



Sicheres autonomes Fahren und
Erprobung in Automatisierungszonen
mit mindestens 20 km/h

Schlussbericht Fraunhofer IVI und Fraunhofer IML

Förderkennzeichen: 19A20011C

Laufzeit: 10/2020 – 03/2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Autoren

Name	Organisation
Maximilian Schellert, M.Sc.	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Felix Keppler, M.Sc.	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Weitere Autoren

Name	Organisation
Jonas Stenzel, M.Sc.	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Moritz Tenhoff, M.Sc.	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Julius Kolb, Dipl.-Ing.	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI
Eric Gleitsmann, Dipl.-Ing. (FH)	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI
Dr. Nikolay Belov	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI
Dr. Carlos Eduardo Viol Barbosa	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI
Gunter Nitzsche, Dipl.-Ing.	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI

Die Partner danken dem Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz - BMWK für die finanzielle Förderung des Verbundprojekts SAFE20 sowie dem Projektträger TÜV Rheinland für die Betreuung während der Projektlaufzeit.

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird im vorliegenden Bericht auf die geschlechtsspezifische Schreibweise verzichtet und das generische Maskulinum verwendet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen und Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.

Inhalt

Inhalt	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis / Glossar	10
1 Kurze Darstellung	11
1.1 Aufgabenstellung	11
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	12
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	13
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	14
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	19
2 Eingehende Darstellung	20
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	20
2.1.1 Projektmanagement (AP 1)	20
2.1.1.1 Projektmeetings, Arbeitsgruppen, Veranstaltungen	20
2.1.1.2 Öffentlichkeitsarbeit	23
2.1.1.3 Wissenschaftliche Publikationen, Vorträge	26
2.1.2 Anforderungsanalyse (funktionale Sicht) (AP 2)	28
2.1.2.1 Identifikation und Definition der betrachteten Use-Cases / betroffenen Personenklassen (AP 2.1)	28
2.1.2.2 Anforderungserhebung	41
2.1.2.3 Entwurf vorläufige Systemarchitektur (AP 2.4)	45
2.1.2.4 Zusammenfassung AP 2	48
2.1.3 Sicherheitskonzept (AP 3)	49
2.1.3.1 Risikobeurteilung (AP 3.1)	49
2.1.3.2 Identifikation sicherheitsgerichteter Funktionen und funktionales Sicherheitskonzept (AP 3.2)	52
2.1.3.3 Funktionale Dekomposition (AP 3.3)	54
2.1.3.4 Design und Evaluierung des sicheren Gesamtsystems (AP 3.4)	55
2.1.3.5 Analytischer Nachweis umfelderfassender Sicherheitsfunktionen (AP 3.5)	55
2.1.3.6 Ableitung technischer Anforderungen an Subsysteme (AP 3.6)	56
2.1.3.7 Nachweis anwendbarer Richtlinien (AP 3.7)	56
2.1.3.8 Zusammenfassung AP 3	59
2.1.4 Sichere Fahrzeugtechnologien (AP 4)	60

2.1.4.1	Sichere interne Kommunikation (Framework-Implementierung) (AP 4.1)	60
2.1.4.2	Sichere Notbremse (AP 4.2)	61
2.1.4.3	KI-basiertes Reaktionsmodell für unvorhergesehene Hindernisse (AP 4.3)	61
2.1.4.4	Funktional sichere, hochperformante Rechnerhardware (AP 4.4)	61
2.1.4.5	Lokale Bahnplanung (AP 4.5)	62
2.1.4.6	Sichere Nahfeldsensorik für LKW (AP 4.6)	62
2.1.4.7	Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)	62
2.1.4.8	Sicheres automatisches Handling Wechselbrücke (AP 4.8)	62
2.1.4.9	Sicheres Handling Verteiler-LKW (AP 4.9)	62
2.1.4.10	Hochverfügbare Ortung mittels Fusionssystem (AP 4.10)	64
2.1.4.11	Schnittstelle autonomes Fahren (AP 4.11)	64
2.1.4.12	Zusammenfassung AP 4	64
2.1.5	Sichere Infrastrukturtechnologien (AP 5)	65
2.1.5.1	Kooperative Manöverplanung über Live-Karte (AP 5.1)	66
2.1.5.2	Sichere Kommunikation und Vernetzung Infrastruktur zu Fahrzeugen V2X (AP 5.2)	75
2.1.5.3	Fahrzeugmanagement-System für Missionsplanung und -überwachung (AP 5.3)	80
2.1.5.4	Ortung / Lokalisierung von Wechselbrücken, Semi-Trailern, Park- und Rampen-positionen / Aktive Objektllokalisierung in Automatisierungszone (AP 5.4)	86
2.1.5.5	Zusammenfassung AP 5	86
2.1.6	Sichere Umfeld-/Objekterfassung (AP 6)	88
2.1.6.1	Sichere Umfeld-/ Objekterfassung für Sonderfahrzeuge (AP 6.2)	88
2.1.6.2	Digitales Echtzeit-Abbild der Automatisierungszone (DAZ) basierend auf Fusion von HD- Karte mit Live-Umgebungsdaten von ISK & Fahrzeugen (AP 6.4)	96
2.1.6.3	Zusammenfassung AP 6	98
2.1.7	Schrittweise Systemintegration (AP 7)	99
2.1.7.1	Aufbau und Inbetriebnahme Automatisierungszone (AP 7.1)	100
2.1.7.2	Nichterfüllung von AP 7.3 und AP 7.4	102
2.1.7.3	Integration des Gesamtsystems AP 7.5	103
2.1.7.4	Zusammenfassung AP 7	103
2.1.8	Testen, Lernen und Optimieren im Feld (AP 8)	103
2.1.8.1	Evaluierung des Testbetriebs (AP 8.2)	104
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	119
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	120
2.4	Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit	120
2.5	Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens	122
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	124
3	Lessons learned	125
	Literaturverzeichnis	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Arbeitspakete SAFE20 _____	14
Abbildung 2: SAFE20-Schlusspräsentation - Grußwort des Fördergebers Hr. Stefan Heidemann, BMWK _____	22
Abbildung 3: Fahrdemonstration während der SAFE20-Schlusspräsentation _____	23
Abbildung 7: Ausschnitt aus dem ersten SAFE20-Erklärfilm _____	25
Abbildung 8: Szene aus dem SAFE20-Projektabschlussfilm (Rückwärtsfahrt / Bluetooth-Objekterkennung) _____	26
Abbildung 4: Use-Cases und Missionen im Projekt SAFE20 _____	29
Abbildung 5: Typischer Verkehrsweg des Nahverkehrs _____	31
Abbildung 6: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Abstellplatz-Rampe _____	33
Abbildung 7: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Rampe-Abstellplatz _____	34
Abbildung 8: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Rampe-Rampe _____	36
Abbildung 9: Beispiel Swimlane-Diagramm _____	37
Abbildung 10: Vorgehensweise zur Identifikation von Nebenprozessen _____	38
Abbildung 11: Bewertung der Alternativen für Nebenprozesse _____	39
Abbildung 12: Nebenprozesse - Ergebnis der Analyse _____	40
Abbildung 13: Ausschnitt Swimlane Diagramm _____	46
Abbildung 14: Übersicht der Swimlane Diagramme _____	47
Abbildung 15: Potenzielle Fahrwege und Einschätzung des maximal zu erwartetem Risiko in den einzelnen Fahrsegmente. _____	50
Abbildung 16: Ausschnitt aus der Risikobeurteilung, Fahrweg KAMAG PM – Rückseite Halle ELW1	52
Abbildung 17: Funktionale Dekomposition. Die einzelnen Ebenen entsprechen den L1- bis L3-Ebenen der Modellierungen der funktionalen Architektur in AP 2 _____	53
Abbildung 18: Exemplarisches Sequenz-Diagramm für die freie Fahrt (hier für den KAMAG PT) __	55
Abbildung 26: Sicherheitskritische Eingangsgrößen _____	56
Abbildung 27: Ablaufdiagramm einer möglichen Umsetzung _____	58
Abbildung 19: Konzept der Simulationsumgebung mit n jeweils in einem Docker-Container simulierten Agenten und dem gemeinsamen Gazebo-Umgebungsmodell des DACHSER-Betriebshofs. _____	67

Abbildung 20: Simulierter Betriebshof mit zwei ebenfalls simulierten Fahrzeugen, die Laser-Scandaten aus deren Umgebung erhalten _____	68
Abbildung 21: Beispielszenario, errechnete Geschwindigkeitsprofile (blau, grün, rot) und Störung (gelb) _____	68
Abbildung 22: RMTRUCK Koordinationsraum mit originaler Trajektorienabstimmung zwischen Agent 1 und Agent 2 (rot gestrichelt) und Konfliktbereich (dunkelgrün) _____	69
Abbildung 23: Beispielszenario mit sechs Agenten und zufällig eingestreuten Störungen _____	70
Abbildung 24: Skizze für eine einfache City-Map zur Suche nach dem kürzesten Pfad auf einem Netzwerk der gespeicherten Pfade. Die Suche erfolgt mit der Hilfe des TruckTrix-City Pfadplaners. Alle Pfade haben eine vorgegebene Richtung und können über eine Liste erlaubter Fahrzeuge verfügen. _____	71
Abbildung 25: Beispielpfad auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI. _____	72
Abbildung 26: Lenkwinkel und Spurbabweichung für eine simulierte Fahrt mit dem Verteiler-LKW auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI mit Umfahrung eines statischen Hindernisses mit dem kinematischen Zustandsregler. Die Geschwindigkeit beträgt $5ms$ und führt zu einer maximalen Querbeschleunigung von $2,5ms^2$. _____	74
Abbildung 27: Dezentralisierter Einsatz von Infrastrukturknoten zur Erweiterung des Objekterfassungssystems (schematische Darstellung). _____	76
Abbildung 28: Riskante Umgehung der Sicherheitsbereiche durch Personen _____	76
Abbildung 29: Netzabdeckung von 5G (links) und 4G (rechts) Mobilfunknetzen am Standort in Langenau _____	77
Abbildung 30: Kommunikationsnetzwerk SAFE20 _____	78
Abbildung 31: Überwachte Zonen auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau _____	79
Abbildung 32: Infrastrukturknoten im Süden des DACHSER-Betriebshofs Langenau _____	79
Abbildung 33: Einer der Infrastrukturknoten im Nordosten des DACHSER-Betriebshofs Langenau _____	80
Abbildung 34: Übersicht des Nutzerinterface-Konzepts für Logistikhof-Anwendungen _____	85
Abbildung 35: Fahrzeugdetails mit Beschriftung zur Erläuterung der Funktion _____	85
Abbildung 36: Mit TruckTrix-City berechneter Pfad für eine Pick-Mission auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau _____	86
Abbildung 37 Beispielhafte Darstellung von Lidar- und Kameradaten im Labelingtool supervisely, die auf dem Dachser Hof in Langenau aufgenommen wurden _____	89
Abbildung 38 Mobiler Roboter für die Datenaufnahme in Langenau. Zu sehen sind 3 Lidarsensoren und 3 Kameras _____	90

Abbildung 39: Szene mit gelabelten Objekten in LiDAR Daten. Alle Objekte in der Szene sind Wechselbrücken. _____	90
Abbildung 40 Aufnahmen eines Kalibrierobjekts in Lidar- und Kameradaten _____	91
Abbildung 41 Ergebnis der Lidar-/ Kamerakalibrierung: Kamerabild und Lidarmesspunkte liegen räumlich übereinander (Quelle: https://github.com/acfr/cam_lidar_calibration) _	92
Abbildung 42 Ergebnis der Lidar- / Kamerakalibrierung. Die Lidarpunktwolke wird sehr präzise über das Bild der Kamera gelegt. _____	92
Abbildung 43 Automatisches Labeln von Lidardaten. Rot = als Trailer klassifiziertes Objekt, Grün = als Truck klassifiziertes Objekt _____	93
Abbildung 44 Mit RegNet klassifizierte Objekte in Lidardaten vom Dachser Hof in Langenau. Das Netz wurde mit Lidardaten aus dem nuScenes Daten trainiert. _____	94
Abbildung 45 links: Ausrichtung der Hauptebene im Labelingtool vor der Korrektur. Rechts: Korrigierte Hauptebene im Labelingtool. Diese entspricht der Bodenebene. _____	94
Abbildung 46 Konfusionsmatrix für die drei Objektklassen Fußgänger (Pedestrian), Wechselbrücke (Swap Body) und Auto (Car) _____	95
Abbildung 47: Aktualisierte Prozesskette Kollisionsvorhersage. _____	97
Abbildung 48: Ablauf zur Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs. _____	98
Abbildung 49: GNSS-Qualitätsanalyse _____	104
Abbildung 50: Messung Querversatz KAMAG PT bei DACHSER südlich vom Hauptgebäude _____	105
Abbildung 51: automatische Fahrmission im Westen (links); Ergebnisse (rechts) _____	105
Abbildung 52: Erfolgreicher Endzustand beim Andocken eines Trailers an eine Rampe _____	106
Abbildung 53: Beispiele beim Andocken _____	107
Abbildung 54: Übersicht der genutzten Vorgehensweisen _____	110
Abbildung 55: Umsetzfahrt _____	112
Abbildung 56: Manuelle und automatisierte Prozesszeiten (in Sekunden) _____	114
Abbildung 57: Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge _____	115
Abbildung 58: Jährliche Auszahlungen und kumulierter Barwertverlauf (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb) _____	118
Abbildung 59: Anteile der Kosteneinflussgrößen je Fahrzeug (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb) _____	118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wissenschaftliche Publikationen und Vorträge im Rahmen von SAFE20 _____	27
Tabelle 2: Technische Anforderungen der Infrastruktur _____	42
Tabelle 3: Technische Anforderungen der automatisierten Fahrzeuge _____	43
Tabelle 4: Wirtschaftliche Anforderungen _____	44
Tabelle 5: Sicherheitsanforderungen _____	44
Tabelle 6: Struktur der Risikobeurteilung _____	49

Abkürzungsverzeichnis / Glossar

Abkürzung / Begriff	Bedeutung
F&E	Forschung und Entwicklung
LKW	Lastkraftwagen
SAE	SAE International, ehemalige Bezeichnung Society of Automotive Engineers
TRL	Technology Readiness Level = Technologie-Reifegrad; Skala von 1-9 zur Bewertung des Entwicklungsstands neuer Technologien

1 Kurze Darstellung

An dem Projekt SAFE20 waren zwei Institute der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. beteiligt, das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (Fraunhofer IVI) und das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (Fraunhofer IML).

Die zentrale Aufgabe des Projekts SAFE20 bestand darin, einen signifikanten Beitrag zur Entwicklung eines ganzheitlichen Sicherheitskonzepts für den Regelbetrieb von vollautomatischen Fahrzeugen auf Betriebshöfen mit mindestens 20 km/h im Mischbetrieb zu leisten. Bisherige Projekte konnten unter weitestgehend geschützten Bedingungen zeigen, dass diverse Anwendungsfälle mit autonomen Fahrzeugen technologisch prinzipiell machbar sind. Für die wirtschaftliche Verwertung dieser Machbarkeitsstudien fehlt jedoch bisher ein solches, mit den Genehmigungsbehörden abgestimmtes Sicherheitskonzept. Dieses Konzept ist eine zwingende Voraussetzung für den Regelbetrieb und somit für den wirtschaftlichen Durchbruch und Erfolg autonom fahrender Nutzfahrzeuge.

1.1 Aufgabenstellung

Im Projekt SAFE20 sollten rechtlich belastbare und sicherheitsorientierte Anforderungen an ein Gesamtsystem erarbeitet werden, das aus Fahrzeugen und einer hofseitigen Automatisierungszone besteht, um einen automatisierten Betrieb von Fahrzeugen im Mischbetrieb eines Betriebshofs mit Geschwindigkeiten über 20 km/h zu ermöglichen. Basierend auf der Untersuchung der Ablaufprozesse sollten erstmals konkrete (Sicherheits-)Anforderungen an Subsysteme entlang der gesamten fahrzeuginternen und hofseitigen Automatisierungskette definiert werden. Dies umfasste die Erarbeitung diverser Schnittstellendefinitionen und Objektbeschreibungen, die Weiterentwicklung technologischer Lösungen, die Etablierung einer einheitlichen Kommunikationsstruktur sowie Vorschläge zur Verbesserung der Prozessabläufe für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge.

Der neuartige Ansatz des Vorhabens bestand darin, das Sicherheitskonzept nicht isoliert für die autonomen Fahrzeuge zu betrachten. Stattdessen sollten die Einrichtung sogenannter Automatisierungszonen innerhalb des Betriebshofs einen neuen Freiheitsgrad für Sicherheitsfunktionen ermöglichen. Das Projekt sollte somit einen Beitrag zur industriellen Normung und Standardisierung leisten und sowohl den Technologie- und Erkenntnistransfer zwischen den beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen fördern als auch zur praxisbezogenen akademischen Qualifizierung beitragen.

Ein wesentlicher Aspekt zur Erfüllung der Aufgabenstellung bestand in der Verifizierung des Konzepts in einem mehrmonatigen Testbetrieb unter Realbedingungen.

Der angestrebte Automatisierungsgrad des SAFE20-Systems gemäß SAE J3016 Definition war „High Automation“ (Level 4). Dies bedeutet, dass die Fahrmodus-spezifische Ausführung aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch ein automatisiertes Fahrsystem erfolgt, ohne die Erwartung, dass ein Fahrer zum Eingreifen reagiert.

Der Technology Readiness Level (TRL) für das entwickelte SAFE20-System ist 6 von 9 (Prototyp in Einsatzumgebung).

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Für die Umsetzung des Projekts war die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Unternehmen, F&E-Instituten und Berufsgenossenschaften essenziell, um möglichst viele der erforderlichen Technologiefelder (Sensoren, Rechentechnik, Kommunikation, Automatisierung, Fahrzeugtechnik, Algorithmen) abzudecken und die Abläufe und Anforderungen aus allen relevanten Perspektiven zu beurteilen. Kein einzelner Partner wäre in der Lage gewesen, ein gleichwertiges Sicherheitskonzept zu erarbeiten.

Für das Projekt wurden zwei grundlegende Anwendungsfälle definiert: der Hofdienst und der Nahverkehrsbetrieb. Der Hofdienst unterteilt sich je nach den zu bewegenden Einheiten in die Umsetzung von Wechselbrücken und Sattelaufliegern, wodurch unterschiedliche Teilanforderungen entstehen. Im Nahverkehrsbetrieb musste insbesondere der Fahrzeugbetrieb in verschiedenen Umgebungen berücksichtigt werden, also der manuelle Betrieb im öffentlichen Straßenverkehr und der automatisierte Betrieb im innerbetrieblichen Mischverkehr. Im innerbetrieblichen Verkehr war nicht nur der Mischverkehr mit anderen, nicht automatisierten Fahrzeugen zu berücksichtigen, sondern auch der Personenverkehr in den einzelnen Zonen.

Da es Ziel des Projekts war, die erarbeiteten Lösungen nicht nur einmalig zu demonstrieren, sondern sie in einem mehrmonatigen Testbetrieb unter verschiedenen Verkehrs-, Wetter- und Lichtbedingungen zu verifizieren, stellte die Analyse und Risikobewertung der Bedingungen in den Automatisierungszonen sowie die Ableitung von Anforderungen eine besondere Herausforderung dar. Die Bedingungen sind insbesondere durch den vorherrschenden Mischverkehr und zusätzliche Personenbewegungen beeinflusst. Hierfür sollten vorhandene Lösungen auf ihre Nutzbarkeit untersucht und entsprechend weiterentwickelt werden.

Der angestrebte Testbetrieb sollte auf einem realen Betriebshof der Firma Dachser in Langenau, Baden-Württemberg, erfolgen. Dafür stellte die Firma TII KAMAG ein Trailer-Zugfahrzeug und ein Fahrzeug für den Wechselbrückenbetrieb für die Umbauten und Untersuchungen zur Verfügung. Als drittes Fahrzeug für die Untersuchungen des Nahverkehrsbetriebs sollte ein Fahrzeug aus dem Projekt Autotruck genutzt werden.

Aufgrund der bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen war ein vollständig autonomer Betrieb auf dem Dachser-Betriebsgelände nicht erlaubt. Daher erfolgte der Testbetrieb unter Einsatz eines Sicherheitsfahrers gemäß SAE J3016 „Conditional Automation“ (Level 3). Der Sicherheitsfahrer hatte

die Aufgabe, das System und die Umgebung ständig zu überwachen und bereit zu sein, die Fahraufgabe jederzeit zu übernehmen.

Das Projekt startete am 01.10.2020 und wurde in der Projektlaufzeit von 42 Monaten unter realen Bedingungen auf dem Modellhof der Firma DACHSER im baden-württembergischen Langenau von den Konsortialpartnern umgesetzt und am 31.03.2024 offiziell beendet.

Die am Projekt beteiligten Partner waren:

- ZF CVS Hannover GmbH (Konsortialführer) / ZF Friedrichshafen AG
- DACHSER SE
- Fraunhofer IVI
- Fraunhofer IML
- Götting KG
- TII KAMAG
- SICK AG
- Sensor-Technik Wiedemann GmbH

Zur Unterbeauftragung geplant waren:

- Motor AI UG (durch Fraunhofer IVI)
- TU Dresden (durch Fraunhofer IVI)
- AlbrechtConsult GmbH (externes Projektbüro, durch alle Konsortialpartner)

Als assoziierte Partner:

- Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, Körperschaft des öffentlichen Rechts
- Fraport AG
- T-SYSTEMS INTERNATIONAL GMBH
- SAF-HOLLAND SE
- Embotech AG

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben SAFE20 wurde in insgesamt acht Arbeitspaketen (APs) und 36 Unter-Arbeitspaketen durchgeführt. Diese sowie die verantwortlichen Partner für jedes Arbeitspaket sind der nachfolgenden Abbildung 1 zu entnehmen. Die Gesamtleitung oblag dem Konsortialführer ZF CVS Hannover GmbH. Unterarbeitspakete, an denen Fraunhofer IVI und Fraunhofer IML einen Anteil hatte, sind farbig markiert.

Technologien von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) innerhalb von Werkshallen (Intralogistik) zu betrachten, welche potenziell auch in der Hoflogistik einsetzbar sind. Hier treffen beide Felder aufeinander, da sowohl Serien-Lkw als auch Sonderfahrzeuge wie Stapler, Wechselbrückenumsetzer etc. auf dem gleichen Gelände verkehren.

Die wirtschaftlich-technische Ausgangssituation ist in der FAT-Schriftenreihe 312 „Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr“ sowie im Buch „Fahrerlose Transportsysteme“ (Günter Ullrich, Springer Verlag) umfassend beschrieben. Die Kernaussagen für den Bereich Intralogistik und FTS sind:

- Die FTS-Entwicklung befindet sich am Ende ihrer dritten Epoche. Es hat sich ein stabiler Technologiestandard entwickelt, mit dem kundenspezifische verlässliche Systemlösungen realisiert werden, die primär dem Materialtransport dienen.
- FTS fahren mit ca. 4-5 km/h, orientieren sich in einer bekannten Umgebung mittels Lidar, Leitdraht oder Transponder, ohne vom Disponenten direkt gesteuert zu werden.
- FTS werden im Mischbetrieb eingesetzt und garantieren ihr sicheres Agieren, d. h. sie tragen Sorge für den Personenschutz sowie für den Schutz vor Beschädigungen an der Last und an Umgebungseinrichtungen mittels Laserscanner oder berührungsempfindlichen Kontaktleisten.
- Fahrerlose Fahrzeuge sind organisatorisch in übergeordnete Leitstände eingebunden und kommunizieren mit diesem drahtlos. Sie empfangen Transportaufträge / Missionen und senden Statusinformationen.

In der Hoflogistik sind die Herausforderungen deutlich höher und vergleichbar mit dem öffentlichen Straßenverkehr. Besonders Wetterbedingungen wie Regen, Nebel oder wechselnde Beleuchtung stellen große Herausforderungen dar (z. B. Blendung durch tief stehende Sonne), da die zuverlässige Erfassung der Umgebung der Schlüssel für einen sicheren Betrieb ist. Die maximale Geschwindigkeit autonomer Lkw liegt aufgrund der stark eingeschränkten fahrerseitigen Umfelderkennung derzeit bei etwa 6 km/h bis 10 km/h. Umbaumaßnahmen führen oft dazu, dass autonome Fahrzeuge keine Zulassung für den öffentlichen Verkehr erhalten.

In verschiedenen Projekten wurden Lösungen für einzelne Teilaspekte des autonomen Fahrens auf Betriebshöfen untersucht. Die Projekte konzentrierten sich z.B. auf Lösungen unter der Bedingung, die maximal zulässigen Geschwindigkeiten (Projekt AutoTruck) einzuhalten oder untersuchten Teilaspekte, wie eine hochgenaue Positionsbestimmung, eine sicherheitsgerichtete, sensorbasierte Objekterkennung sowie Fahrzeugnavigation (Projekt GAMA). Das Forschungsprojekte Ko-Tag untersuchte im Rahmen der übergeordneten Forschungsinitiative „Ko-FAS“ kooperative Sensortechnologie auf Basis von Funk für die Anwendungsbereiche "Schutz von verletzlichen Verkehrsteilnehmern" und "Fahrzeug-Fahrzeug-Sicherheit".

Der Stand der Technik ist nachfolgend kurz zusammengefasst:

- Fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme sind heute bereits auf dem Markt und bilden die Basis für die schrittweise Automatisierung konventioneller Fahrzeuge. Hier ist jedoch zu

beachten, dass diese Assistenzsysteme so ausgelegt sind, dass der Fahrer im Fehlerfall rechtzeitig eingreifen kann. Ohne diese Annahme ergeben sich signifikant höhere Anforderungen an die Sicherheit aller Subsysteme in der funktionalen Kette (z.B. redundante Sensoren, Aktoren, Steuergeräte etc.). Die Entwicklungsaufwände übersteigen die des nicht sicheren Systems i.d.R. um ein Vielfaches.

- Die vorhandene Technologie zum hochautomatisierten Fahren erlaubt es bereits (Stand 2019), die Kontrolle in bestimmten Situationen an das System abzugeben, sodass hochautomatisiertes Fahren ermöglicht wird (z.B. Stauassistenten). Auch hier gilt die zwingende Voraussetzung, dass der Fahrer im Fehlerfall rechtzeitig eingreifen kann.
- Als Techniken zur Absicherung werden Sensoren zur Umfelderkennung (Kameras, Lidar, Radar – meist als Fusionssystem) sowie Car2Car-Kommunikation in Kombination mit Steuer- und Regelsystemen eingesetzt.
- Objekte auf der Fahrbahn werden von der fahrzeugeigenen Umfelderkennung nicht immer eindeutig erkannt und klassifiziert und lösen z. T. Fehlentscheidungen aus – auch mit schwerwiegenden Folgen. Tödliche Unfälle von Tesla- und Uber-Fahrzeugen sind dokumentiert.
- Viele Unternehmen (Google, Uber, Daimler, Continental uvm.) arbeiten an sog. Robo-Taxis, die laut Ankündigung ab 2021 als Alternative/Ergänzung zum ÖPNV eingeführt werden sollen. Diese Fahrzeuge werden mit dem Smartphone gerufen und sollen vollautomatisch zum Ziel fahren. Einige Konzepte lassen Bedienelemente für Fahrer konsequent weg.

Über diesen generellen Abriss hinaus gab es viele laufende F&E-Projekte, die unterschiedliche Teilaspekte des autonomen Fahrens im Detail untersuchten. Besonders interessant war hier das Fördervorhaben MEC-View (Laufzeit 12/2016 bis 11/2019), das das Ziel verfolgte, infrastrukturseitig verbaute Umfoldsensoren für das höher automatisierte Fahren nutzbar zu machen. Dazu wurden neue Verfahren zur wegseitigen Objektdetektion und -verarbeitung entwickelt, in zwei Schritten zu einem Umfeldmodell fusioniert und den hochautomatisierten Fahrzeugen zur Verfügung gestellt. Dieses Vorgehen ist grundsätzlich mit dem Ansatz zur Umfelderkennung in SAFE20 vergleichbar, betrachtet aber nicht die Sicherheitsaspekte und den vollautomatischen Betrieb.

Heutzutage setzen bereits einige Seehäfen im internen Verkehr hochautomatisierte Fahrzeuge in den Terminals ein, wie bspw. die Containerterminals im Hafen von Rotterdam oder Hamburg Finkenwerder. Hier führen Diesel-Hydraulik-AGVs (Automated Guided Vehicles) den Transportprozess von Containern zwischen Schiff und Containerdepot aus.

Über die generellen Untersuchungen hinaus galt es Einzellösungen für Systeme oder Komponenten zu erweitern oder neu zu entwickeln. Gerade weil in der Praxis oftmals auf den vorgeschriebenen Einweiser verzichtet wird und beispielsweise Sattelzüge unübersichtlich rückwärts zu rangieren sind, ist der Einsatz von Sensorik zur Erfassung des Rückraums notwendig. Der Einsatz von z.B. Kameras erfordert dabei Datenraten, die mit den herkömmlichen Fahrzeugdatenbussen nicht realisierbar ist. Hierfür sind neue kabelgebundene Lösungen erforderlich, wie z.B. die durch die ZF CV Systems vorentwickelte Technik in Form eines Automotive-Ethernet-basierten Datengateways die notwendige Datenrate bei höchster Verfügbarkeit gewährleistet. Für einen automatisierten Betrieb

bei Geschwindigkeiten größer als 10km/h sind zudem Sensoren mit Reichweiten von 20m und mehr erforderlich, um eine sichere Nahfeldererkennung von Objekten und Personen zu gewährleisten. Im Projekt sollten daher neue prototypische Radar- und Lidarsysteme der Fa. SICK hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit untersucht werden. Ein ebenfalls wichtiges Element der Hofautomatisierung ist der Einsatz zuverlässiger Notbremsysteme, die über die Funktion der herkömmlichen Betriebsbremsen hinaus wirksam sind. Stand der Technik war hier der im BMWi geförderten "aFAS" Projekt entwickelte Ansatz eines Fail-safe-Bremssystem, um ein autonom fahrendes Fahrzeug bei Eintritt eines Fehlers sicher zum Stillstand zu bringen.

Seit mehreren Jahren beschäftigt sich eine Vielzahl von Projekten mit den Möglichkeiten und Anforderungen zur Automatisierung auf Betriebshöfen. Eine Automatisierung in diesen Bereichen bietet sich insbesondere daher an, da sich die Abläufe oft wiederholen und damit standardisierbar sind. Zudem findet der Fahrzeugbetrieb in der Regel bei geringeren Geschwindigkeiten auf Privatgelände außerhalb des öffentlichen Straßenverkehrs statt. Dies erlaubt den Einsatz unterschiedlichster Automatisierungslösungen. Folgende Projekte aus Forschung und Industrie thematisieren vergleichbare Anwendungsbereiche:

- AutoTruck – Fahrzeug ist so ausgestattet, dass es prinzipiell 10 km/h ohne Fahrer betrieben werden kann. Lediglich die sichere Notbremse ist nicht verfügbar, sodass noch ein Sicherheitsfahrer vorhanden sein muss. Das Fahrzeug ist entgegen vieler anderer Lösungen auch mit den umfassenden Änderungen für den autonomen Hofbetrieb für den öffentlichen Straßenverkehr zugelassen. Das Fahrzeug sowie die im Projekt gewonnen Erkenntnisse werden von WABCO, Götting KG und Fraunhofer IVI in das Vorhaben SAFE20 eingebracht.
- Automatisierter Wiesel: DB Schenker und KAMAG haben die Machbarkeit zum autonomen Umsetzen von Wechselbrücken erstmalig nachgewiesen. KAMAG hat in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IML die Vorentwicklung der Prototypen durchgeführt und bringt diese Ergebnisse ins Projekt SAFE20 ein.
- E-jit – Im Projekt wurden Fahrzeugassistenzsysteme bei Sattelzugfahrzeugen getestet, die in festen Umläufen zwischen zwei Werksgeländen verkehren und dabei zahlreiche Prozesse der Hoflogistik bewältigen. Vorrangiges Ziel war die Erprobung batterieelektrischer Antriebe im Anwendungsfall.
- AutoTug: Die Firma Terberg bietet den AutoTug als autonome Zugmaschine für Häfen an. Diese Lösung verwendet Transponder, jedoch muss zum Aufnehmen eines Sattelauflegers eine Kennzeichnung von diesem erfolgen.
- autonomous yard maneuvering: Knorr-Bremse hat eine Technologie zum autonomen Fahren auf Werksgeländen demonstriert, ebenfalls auf Basis von Sattelzugmaschinen, die im Fernverkehr eingesetzt werden und auf einem passenden Werksgelände automatisch agieren können.

Eine wesentliche Erkenntnis aus vorangegangenen Projekten ist, dass das erforderliche Sicherheitsniveau für den automatisierten Hofbetrieb mit 20 km/h und mehr mit den derzeit

verfügbaren Sensortechnologien nicht erreichbar ist. Sollen Fahrzeuge im Mischbetrieb auf einem Hof automatisiert betrieben werden erscheint es sinnvoll, die fahrzeugseitigen Sicherheitsfunktionen über Dekompositionsstrategien durch hofseitige Sensorik, Routenplanung und Prozesse zu ergänzen. Dies erfordert eine intensive Untersuchung und gegebenenfalls Neudefinition von Arbeitsabläufen und Hofgestaltung anhand der umzusetzenden Nutzungsszenarien.

Wesentliche Komponenten, die für den automatisierten Betrieb auf Betriebshöfen fehlten, waren daher

- ein umfassendes Sicherheitskonzept, das die erforderlichen Anwendungsfälle beschreibt und definiert
- darauf aufbauende Sensortechnologie, insbesondere im Nahfeldbereich mit Reichweiten von 20 m und mehr
- die Erhöhung der Betriebsgeschwindigkeit auf durchschnittlich 20 km/h
- sicheres Notbremssystem für den Hofbetrieb bei Geschwindigkeiten größer 20 km/h
- Standardisierung eines integrativen Sicherheitskonzeptes aus hof- und fahrzeugseitigen Komponenten
- Anerkennung durch die relevanten Freigabebehörden (z.B. Berufsgenossenschaft)

Eine zusätzliche Herausforderung stellte die Verfügbarkeit der erforderlichen Sensorik für den Außenbereich dar. Die größten Hemmnisse zur Verwendung von FTF im Außenbereich sind damit die fehlende Zuverlässigkeit und Sicherheit der umgebungserkennenden Sensoren sowie die Verarbeitung der Informationen zur autonomen Steuerung, die eine auf die aktuelle Situation angepasste Reaktion erlaubt.

Ein autonomes System ist mit seiner eigenen Wahrnehmung zwangsläufig auf die Reichweite seiner on-Board Sensorik beschränkt. Diese unterliegt physikalischen und insbesondere für kommerzielle Nutzung wirtschaftlichen Restriktionen. Durch Infrastruktursensorik kann die Umgebungsrepräsentation eines autonomen Systems mit Informationen außerhalb seines Sichtbereichs erweitert werden, ein klassisches Beispiel ist die Detektion von Querverkehr an einer Kreuzung. Müsste ein autonomes Fahrzeug jedes mögliche Szenario mit ausreichender Sicherheit behandeln können, ist eine sehr große Anzahl unterschiedlichster Sensorik erforderlich. Durch Infrastruktursensorik kann die Menge an Sensoren im Fahrzeug verringert werden.

Das vom BMWi geförderte Projekt „MEC-View“ behandelte das Problem komplexer Verkehrssituationen im Stadtverkehr mit dem Schwerpunkt Verdeckungen von Verkehrsteilnehmern durch geeignete Infrastruktursensorik bestehend aus LiDAR und Kamerasensorik sowie 5G-Kommunikationsmodule zu nutzen, um dauerhaft den Verkehrsraum zu überwachen und Informationen über ggf. verdeckte Verkehrsteilnehmer zu verteilen.

Infrastruktursensorik wird in unterschiedlichen Anwendungsfällen eingesetzt. Zur Vermeidung von Verdeckungen kann Infrastruktursensorik deutlich höher angebracht werden als die Sensorik im Fahrzeug. Hierdurch und durch ihre Lage außerhalb der Fahrbahn kann sie verdeckte Objekte,

insbesondere Fußgänger und Fahrradfahrer frühzeitig erkennen und diese Information mit anderen Verkehrsteilnehmern teilen. Vernetzte Infrastruktursensorik kann auch dazu genutzt werden, den Verkehrsfluss zu optimieren, z.B. durch Ampelschaltungen oder die Überwachung von Fußgängerzonen.

Ein weiterer Aspekt der Automatisierung von Betriebshöfen ist die Umsetzung kooperativer Manöverplanungen. Fest installierte Fahrwegmarkierungen z.B. mittels Leitdraht oder magnetischer Marker sind unflexibel oder mit hohen Kosten verbunden. Dabei sollen die einzelnen Fahrzeuge sowohl statische Hindernisse wie Gebäude umfahren als auch Kollisionen mit dynamischen Hindernissen wie anderen Verkehrsteilnehmern vermeiden. Die Fahrten sollen sowohl einzeln als auch in ihrer Gesamtheit möglichst zeiteffizient ausgeführt werden.

Die weitaus größten Herausforderungen für die in SAFE20 geplante Art der Automatisierung stellen die rechtlichen Bedingungen dar. Während für den Straßenverkehr und die allgemeine Betriebsautomatisierung klar geregelte rechtliche Bedingungen gelten, ist oftmals noch nicht einmal klar, wie sich ein nicht öffentlicher Verkehrsraum definiert. Öffentlicher Verkehrsraum sind Flächen mit Zugangskontrolle (z.B. beschränktes und umzäuntes privates Gelände), von denen die Allgemeinheit nach dem Willen der Verfügungsberechtigten, z. B. Eigentümer oder Pächter, tatsächlich ausgeschlossen ist. Auf nicht öffentlichen Verkehrsflächen gilt die StVZO grundsätzlich nicht. Oft liegt jedoch ein Mischbetrieb vor.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der interdisziplinären Zusammenarbeit der Partner im Projekt-Konsortium wurde von Beginn an der Austausch mit weiteren wichtigen Partnern für eine spätere rechtliche und kommerzielle Umsetzung des Projektes gesucht. Insbesondere die Einbindung der Berufsgenossenschaften BG Handel und Warenlogistik und BG Verkehr vor allem als Ansprechpartner für regulatorische Fragen leistete daher einen essentiellen Beitrag für die weitere Verwendung der Ergebnisse. Als ein erstes Ergebnis aus dem Projekt sollen grundlegende Vorgaben zum Einsatz automatisierter Fahrzeuge in die von der BG Verkehr zu überarbeitende Unfallverhütungsvorschrift Fahrzeuge einfließen.

Weitere assoziierte Partner unterstützten die Untersuchungen und Umsetzungen mit ihrem spezifischen Know-How, wie die T-Systems International GmbH bei der Auslegung der Kommunikationsstrukturen oder die SAF Holland SE mit der Bereitstellung einer automatischen Kupplung für den verwendeten Sattelaufleger.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse des Projektes SAFE20 dargestellt, an denen Fraunhofer IVI und Fraunhofer IML mitgewirkt haben.

2.1.1 Projektmanagement (AP 1)

2.1.1.1 Projektmeetings, Arbeitsgruppen, Veranstaltungen

Die zentrale Arbeitsinstanz zum Austausch zwischen den Projektpartnern war das üblicherweise einmal im Monat stattfindende AP-Leiter-Meeting. Hier tauschten sich die Projektverantwortlichen der Partnerunternehmen über die Fortschritte innerhalb der Arbeitspakete aus und planten die weiteren Arbeiten. Die Projektmeetings wurden von der ZF CV Systems GmbH federführend geleitet und durch das externe Projektbüro AlbrechtConsult organisiert und protokolliert.

In den AP-Leiter-Meetings wurden anfangs auch Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit besprochen; da dies aber im Projektverlauf den Rahmen sprengte und der Zeitbedarf für dringende technische Themen wuchs, wurde im Mai 2022 ein zusätzliches, alle zwei Wochen stattfindendes Kommunikationsmeeting eingerichtet. Hier wurden vor allem Maßnahmen für die öffentliche Darstellung des Projekts SAFE20 besprochen.

Abstimmungen auf Arbeitspaketebene wurden in bi- oder multilateralen, themengebundenen Austauschtreffen zwischen den jeweils beteiligten Projektpartnern durchgeführt. Hier können beispielhaft die Use-Case-Erstellung, Anforderungsanalyse, Fahrzeugkonzeption und -Aufbau, Freigabe der Systemkomponenten, Feldtest, Review des Sicherheitskonzepts genannt werden.

In der Projekt-Endphase (ab 01/2023) wurden wöchentliche Treffen der Projektpartner unter Leitung des Fraunhofer IVI anberaumt, in denen das engmaschige Monitoring des Fortschritts der Integrationsarbeiten und später des Feldtests sowie die Optimierung der Systemkomponenten im Vordergrund standen.

Kick-Off

Nach mehreren Vorbereitungsgesprächen wurde das Projekt SAFE20 am 06.10.2020 im ZF-Entwicklungszentrum Am Lindener Hafen 21 in Hannover offiziell mit einem Kick-Off Meeting gestartet. Das Treffen diente dazu, erstmals alle Partner zusammenzubringen und die Projektstruktur sowie alle Arbeitspakete vorzustellen. Mitten in der Covid-Pandemie war die Organisation des Treffens eine besondere Herausforderung.

In diesem Rahmen wurde der Zeitplan präsentiert, ebenso wie die Projektressourcenplanung. Abschließend wurden die Versuchsfahrzeuge (AutoTruck, KAMAG PM für Wechselbrücken, KAMAG PT für Semitrailer) und die Versuchsumgebung vorgestellt. Wichtige Diskussionspunkte des Meetings waren die Aufgabenteilung und Festlegung der Verantwortlichkeiten anhand der geplanten Zielfahrzeuge sowie die Planung des Starts der einzelnen Arbeitspakete. Weiterhin wurden Fragen der Kommunikation im Projekt und gegenüber der Öffentlichkeit geklärt, sowie Entwürfe für das Projekt-Logo diskutiert.

Austausch mit dem Konsortium des Fördervorhabens ANITA

Da der Austausch zwischen ähnlichen Fördervorhaben – besonders innerhalb des gleichen Förderprogramms – vom Fördergeber explizit gewünscht ist, wurde ein Austausch zwischen den Projekten „ANITA – Autonome Innovation im Terminal Ablauf“ und SAFE20 initiiert. ANITA erforschte die Integration autonomer LKW in den Betrieb in einem Containerdepot und Umschlagterminal der Deutschen Bahn und hatte daher einige Anknüpfungspunkte zu SAFE20, allerdings auch deutliche Unterschiede. So erforschten beide Projekte die Automatisierung auf Betriebsgelände im Logistikumfeld, bei ANITA lag der Schwerpunkt allerdings eher auf der Autonomisierung eines Serien-LKW für den öffentlichen Straßenverkehr, während in SAFE20 vor allem Spezialfahrzeuge ausgestattet wurden. Zudem nutzte SAFE20 im Rahmen des ausführlich formulierten Sicherheitskonzepts auch Infrastruktursensorik und einen Leitstand, während in ANITA der LKW vom Logistiksystem direkt übermittelte Fahraufträge eigenverantwortlich durchführte.

Im Dezember 2022 trafen sich beide Projektkonsortien in einer Videokonferenz, in der beide Projekte und die beteiligten Partner vorgestellt wurden sowie die Anknüpfungspunkte gesucht wurden. Besonders der Leitstand helyOS® war für das ANITA-Konsortium interessant, weshalb es einen Folgetermin mit dem ANITA-Konsortium und dem Fraunhofer IVI im Januar 2023 gab.

Konsortialtreffen 06/2023

Im Juni 2023 führten die SAFE20-Partner ein Konsortialtreffen durch, zu dem auch die assoziierten Partner, die BG Verkehr und der Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH eingeladen wurden. Auf der ZF-Testbahn in Jevern bei Hannover wurde der Stand der Arbeiten präsentiert und diskutiert, wie sich das Vorhaben auf eventuelle regulatorische Aktivitäten, national wie international, auswirken kann. Der Nachmittag stand ganz im Zeichen einer Live-Demo, bei der der bereits komplett sensorisch ausgestattete KAMAG PT Sattelaufleger-Umsetzer autonom eine Strecke auf der Testbahn abfuhr und an unterschiedlichen, vorher definierten Haltepunkten zum Stehen kam. Auch das automatische An- und Abkuppeln konnte demonstriert werden, sowie die Erkennung von Personen im toten Winkel hinter dem Trailer mittels Nahfeldererkennung von Bluetooth-Tags an der Kleidung.

SAFE20-Schlusspräsentation 03/2024

Als Projektabschluss wurde am 14.03.2024 die große SAFE20-Schlusspräsentation im DACHSER Logistikzentrum Ulm durchgeführt. Insgesamt 80 Gäste – Projektträger und Fördergeber, Presse, assoziierte Partner, Mitarbeitende der SAFE20-Partnerunternehmen und andere Interessierte – erhielten einen umfassenden Überblick über die erzielten Projektergebnisse. Auf einer Veranstaltungsfläche in einem Warehouse im laufenden Betrieb wurden vormittags die technologischen Fortschritte und erarbeiteten Konzepte ausführlich präsentiert.



Abbildung 2: SAFE20-Schlusspräsentation - Grußwort des Fördergebers Hr. Stefan Heidemann, BMWK

Nachmittags wurde in einer Fahrvorführung auf dem DACHSER-Gelände das Konzept praktisch demonstriert: mehrere komplette Abläufe mit Erhalt einer Mission, Ausparken, Rundfahrt um den Hof, rückwärts an die Rampe rangieren, Wechselbrücke aufnehmen und abstellen, automatisches An- und Abkuppeln eines Trailers, Bluetooth-Erkennung. Die Vorgänge wurden dem Publikum ausführlich erläutert und es gab die Möglichkeit für Mitfahrten in den autonomen Fahrzeugen.



Abbildung 3: Fahrdemonstration während der SAFE20-Schlusspräsentation

Die Resonanz aller Teilnehmer auf die Schlusspräsentation war sehr positiv, da sowohl die Konzepte von SAFE20 als auch die praktische Ausführung als besonders und innovativ wahrgenommen wurden. Hier konnte auch der Praxisbezug des Projekts gezeigt werden, der einerseits durch die enge Einbindung des Partners DACHSER in allen Projektstadien als auch durch den langen und intensiven Feldversuch gewährleistet war.

2.1.1.2 Öffentlichkeitsarbeit

Um sowohl die Innovationskraft der Partner zu betonen als auch die förderpolitischen Ziele des Vorhabens öffentlichkeitswirksam darzustellen, hat das SAFE20-Konsortium unterschiedliche Formen der Öffentlichkeitsarbeit betrieben.

LinkedIn

Die SAFE20-Partner beauftragten die Firma AlbrechtConsult GmbH mit der Einrichtung einer Seite beim sozialen Netzwerk LinkedIn¹, die im Februar 2022 eingerichtet wurde.

Die Seite wurde von AlbrechtConsult administrativ und inhaltlich betreut, hier wurden vor allem folgende Inhalte veröffentlicht:

- Nachrichten über neue assoziierte Partner im Projekt (z. B. SAF-HOLLAND, Embotech),
- Vorstellungen aller Konsortialpartner und ihres Anteils am Vorhaben,
- Animationsfilme zu Projektinhalten (sechsteilige Serie, s. a. folgendes Kapitel „SAFE20-Filme“),
- Neuigkeiten zum Projektfortschritt,
- Berichte über Veranstaltungen, z. B. Konsortialtreffen, Schlussveranstaltung.

Die LinkedIn-Seite hatte zum Projektende 367 Follower, überwiegend aus dem deutschsprachigen Bereich, aber auch internationale.

SAFE20-Filme

Das SAFE20-Konsortium entschloss sich, zur Veranschaulichung der komplexen Projektzusammenhänge eine Reihe von Erklärfilmen zu realisieren. Diese sollten ca. eine Minute dauern und die Projektinhalte auf abstrakte und leicht verständliche Weise zusammenfassen. Als Form dafür wurde ein Animationsfilmformat gewählt, das sich durch die Iso-3D-Ansicht deutlich von gängigen Erklärfilmen unterscheidet und somit einen Wiedererkennungswert garantiert.

¹ <https://www.linkedin.com/company/safe20> (SAFE20 Projektkonsortium, 2022)



Abbildung 4: Ausschnitt aus dem ersten SAFE20-Erklärfilm

Die Inhalte der Filme wurden durch das Konsortium erarbeitet und die Aufbereitung des Drehbuchs sowie die Produktion von AlbrechtConsult koordiniert. Die Filme bauten sequenziell aufeinander auf:

1. Projektübersicht / Projektziele,
2. Eingesetzte Sensortechnologie Fahrzeuge,
3. Eingesetzte Sensortechnologie Infrastruktur,
4. Leitstand,
5. Fahrzeugtechnologien: Hochperformante Rechnerhardware, hochverfügbare und genaue Fahrzeugortung, Bluetooth-Objekterkennung, Rückwärtsfahrt an die Rampe, sicheres Notbremssystem,
6. SAFE20-Baukastensystem zur leichteren Übertragbarkeit auf andere Standorte.

Zum Projektabschluss wurde ein weiterer Film produziert, dieses Mal mit Realfilmaufnahmen, der die Umsetzung der vorher in den Animationsfilmen gezeigten Inhalte in der Realität demonstriert. Die Dreharbeiten fanden zum Abschluss des Pilotbetriebs mit den tatsächlichen Versuchsträgern im DACHSER Logistikzentrum Ulm statt. Hier werden alle in den Animationsfilmen schematisch dargestellten Technologien in ihrer realen Umsetzung demonstriert.



Abbildung 5: Szene aus dem SAFE20-Projektabschlussfilm (Rückwärtsfahrt / Bluetooth-Objekterkennung)

Alle Filme dienten neben der Außendarstellung des Konsortiums auch den einzelnen Projektpartnern als Verdeutlichung der Projektinhalte bei Vorträgen und zu internen Fortbildungszwecken.

Die Veröffentlichung erfolgte auf der SAFE20-LinkedIn Seite sowie im YouTube-Kanal² des Konsortiums, der ebenfalls durch AlbrechtConsult administriert wurde.

Presse

Vor allem die Schlusspräsentation wurde intensiv mit Pressearbeit begleitet. Ab Oktober 2023 nahmen auch die PR-Abteilungen der Partnerunternehmen an den SAFE20-Kommunikationsmeetings teil, um gemeinsam eine Pressemitteilung zu erstellen und die Einladungen zur Schlusspräsentation an die Redaktionen der Fach- und Tagespresse zu koordinieren. Besonders die Resonanz auf die Schlusspräsentation war bei der Presse sehr groß. So nahmen insgesamt fünf Medienvertetende an der Veranstaltung teil, es gab Veröffentlichungen im SWR sowie in den Fachmedien (z. B. Verkehrsrundschau, Transport – Die Zeitung für den Güterverkehr etc.)

2.1.1.3 Wissenschaftliche Publikationen, Vorträge

Das Projekt SAFE20 wurde auch in Vorträgen bei Konferenzen und in wissenschaftlichen Publikationen behandelt. Diese dienten nicht nur der Präsentation von Forschungsergebnissen, sondern auch der Vernetzung mit Fachkollegen und der Diskussion neuer Ansätze. Die Vorträge

² <https://www.youtube.com/@safe20> (SAFE20 Projektkonsortium, 2022)

boten die Möglichkeit, aktuelle Entwicklungen vor einem Fachpublikum zu präsentieren, während wissenschaftliche Publikationen die Grundlage für eine nachhaltige Verbreitung und Dokumentation der Forschungsergebnisse bilden und in möglichen Folgeprojekten Ausgangspunkt für Weiterentwicklungen werden können. Beide Formate trugen zur Wissensvermittlung und zur Vertiefung der im Projekt behandelten Themen bei.

Tabelle 1: Wissenschaftliche Publikationen und Vorträge im Rahmen von SAFE20

Unternehmen / Institution Autor / Referent	Art der Veröffent- lichung	Datum, Ort	Titel / Thema
ZF CV Systems Rüdiger Meyer	Vortrag / Paper	ATZ Live – Automatisiertes Fahren 2024 19.03.2024, Frankfurt	The journey to regular operation of a fully automatic terminal tractor at a depot in mixed operation
Fraunhofer IML Maximilian Schellert	Vortrag	innocam.THEMENFORUM – Logistik im Kontext der automatisierten und vernetzten Mobilität 15.09.2022, Duisburg	
Fraunhofer IVI Felix Keppler	Vortrag	VDI Autonomous Trucks, 25.04.2023, Düsseldorf	Trajectory Planning and Disturbance handling for deadlock-free yard automation
Fraunhofer IVI Nikolay Belov et al.	Paper	IEEE INDIN 2021, Palma de Mallorca, Spain (online)	TruckTriX® Path-Planning in the helyOS Operating System for Yard Automation
Fraunhofer IVI Felix Keppler et al.	Paper	IEEE/SICE SII 2022, Narvik, Norwegen (online)	Prioritized Planning for Spatiotemporal Trajectory Coordination of Articulated Vehicles and Co-Simulation with ROS, Docker and Gazebo
Fraunhofer IVI Felix Keppler et al.	Paper	IEEE SCIS&ISIS 2022, Ise, Mie, Japan	Genetic Kinodynamic Velocity Planning for Prioritized Multi- Robot Coordination
Fraunhofer IVI Carlos Eduardo Viol Barbosa et al.	Paper	IEEE/SICE SII 2023, Atlanta, GA, USA	helyOS: A customized off-the- shelf solution for autonomous driving applications in delimited areas

Fraunhofer IVI Johannes Schäfer et al.	Paper	IEEE ITSC 2023, Bilbao, Spanien	RMTRUCK: Deadlock-free Execution of Multi-robot Plans under Delaying Disturbances
--	-------	---------------------------------	---

2.1.2 Anforderungsanalyse (funktionale Sicht) (AP 2)

Zu Beginn des Projekts wurde im Konsortium eine umfangreiche Anforderungsanalyse durchgeführt, welche in einer Systemarchitektur resultierte, die den nachfolgenden Arbeitspaketen als Grundlage für ihre Entwicklungen diente. Die Anforderungsanalyse umfasste die Identifikation und Definition von Use-Cases und Personenklassen sowie die Sammlung von funktionalen und technischen Anforderungen. Schlussendlich wurde eine umfangreiche Systemarchitektur erstellt, die die einzelnen Komponenten, Informationsflüsse und Verantwortlichkeiten darstellt. Ergebnisse und Details sind in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

2.1.2.1 Identifikation und Definition der betrachteten Use-Cases / betroffenen Personenklassen (AP 2.1)

Im ersten Schritt führte das SAFE20-Konsortium eine umfangreiche Aufnahme der IST-Prozesse durch, um den Anwendungsfall zu definieren und ein einheitliches Verständnis der dortigen Prozesse zu erlangen. Dies beinhaltete neben der formellen Definition von Use-Cases und Missionen die Abbildung der IST-Prozesse in Ablaufdiagrammen, die Erstellung eines Glossars sowie der Definition von Nebenprozessen und Ausarbeitung von Nothalt-Szenarien.

Use-Case Definition

Die Anwendungsfälle, welche sich im Zuge von AP 2.1 abgezeichnet haben, sind der Hofdienst und der Nahverkehr. Der Hofdienst umfasst dabei sämtliche Umsetzbewegungen und Rangierbewegungen durch Hoffahrzeuge innerhalb des Betriebsgeländes. Beim Use-Case Nahverkehr wird der betriebsinterne Verkehr zwischen verschiedenen Betriebsstätten beschrieben. Eine Mission beschreibt eine abgeschlossene Aufgabe, die das Fahrzeug durchführt und besteht in der Regel aus mehreren Teilaufgaben

Im Rahmen des Projekts SAFE20 wurden drei Missionen für den Hofverkehr und eine Mission für den Nahverkehr definiert. Diese sind in nachfolgender Abbildung 6 aufgeführt.

	Nahverkehr	Hofverkehr
Use-Case		
Mission	<ol style="list-style-type: none"> Ein Rundlauf Fahrt Tor (Werkstor) zu Rampe, Be- & Entladung, Fahrt Rampe zu Tor 	<ol style="list-style-type: none"> Bewegung Abstellplatz -> Rampe Bewegung Rampe -> Abstellplatz Bewegung Rampe -> Rampe

Abbildung 6: Use-Cases und Missionen im Projekt SAFE20

Beschreibung in Ablaufdiagrammen

Zu Beginn des Projekts wurden die IST-Prozesse auf dem Logistikhof der DACHSER-Betriebsstätte in Langenau aufgenommen. Dieser bietet die Möglichkeit, verschiedene Use-Cases des Projektes abzubilden und ermöglicht die spezifische Anforderungserhebung. Dies dient sowohl zur Erörterung der Logistikprozesse als auch als Modellierungsgrundlage der Automatisierungsprozesse. Hierfür wurden durch DACHSER und IML zunächst die Eigenschaften der Vorgänge auf dem Logistikhof in Ablaufdiagrammen für die genannten Missionen abgebildet.

Use-Case Nahverkehr

Der Ablauf für die Mission Nahverkehr kann in sieben Abschnitte unterteilt werden. In Abbildung 7 sind die genannten Abschnitte auf dem Layout der Betriebsstätte Langenau verortet.

1. Anfahrt

Die Anfahrt umfasst den Weg eines Nahverkehrs-LKW zur Betriebsstätte, außerhalb des privaten Geländes. Im Nahverkehr werden täglich ca. 50 Touren je Betriebsstätte gefahren. Dabei übernimmt jeder LKW etwa zwei bis drei Touren, wobei je Tour 17 Palettenstellplätze bereitstehen.

2. Anmeldung

Die Anmeldung des Fahrzeugs und der Fracht findet beim Pförtner des Gates statt. Hier soll zusätzlich für betriebsinterne Fahrzeuge die Möglichkeit entstehen, über eine Kamera das Fahrzeug und dessen Fracht automatisch zu identifizieren und damit einen zeitlich effizienteren Check-In zu gewährleisten.

3. Fahrt zur Rampe

Nach erfolgreichem Check-In und Einlass des Fahrzeugs auf das Betriebsgelände erfolgt nun die Anfahrt der dem Fahrzeug zugewiesenen Laderampe. Da rund um die Halle ein Einbahnstraßensystem gilt, ist die Rampe direkt anzufahren. Lediglich weiterer Hofverkehr bzw. den Verkehr kreuzende Mitarbeiter können für eine Verzögerung sorgen.

4. Be-/Entladen

Bei Ankunft an der Rampe wird das Fahrzeug mit dem Heck zuerst an der Halle eingeparkt. Angekommen an der für den Nahverkehr designierten Laderampe wird nun der LKW Be-/Entladen. Den Ladevorgang übernehmen die Fahrer selbst.

5. Weiterfahrt

Nachdem der Ladevorgang abgeschlossen wurde, fährt das Fahrzeug in Richtung Abfertigung, welche sich in der Nähe der Ausfahrt des Betriebsgeländes befindet.

6. Abfertigung

Angekommen an der Abfertigung, wird das Fahrzeug zwischengeparkt und die Frachtpapiere werden vom Fahrer an die Standortmitarbeiter weitergegeben, die die Abwicklung vornehmen. Zudem werden dort die Dokumente für den neuen Fahrauftrag an den Fahrer übergeben.

7. Abfahrt

Die letzte Teilmission ist die Abfahrt vom Gebäude der Abwicklung in Richtung Ausfahrt des Betriebsgeländes. Nach Passieren des Gates nimmt der Fahrer seinen neuen Fahrauftrag auf.

Nachfolgend sind in Abbildung 7 die vorgenannten sieben Stationen des Nahverkehrs in einer Übersichtsgrafik verortet.



Abbildung 7: Typischer Verkehrsweg des Nahverkehrs

Use-Case Hofverkehr

Der Hofverkehr wurde in drei separate Teilmissionen gegliedert. Nachfolgend werden diese beschrieben.

- Erste Mission Hofverkehr: Abstellplatz zu Rampe

Der erste Use-Case betrachtet die Fahrten von Hoffahrzeugen zwischen einem Abstellplatz, d. h. Flächen auf der Betriebsfläche zum Abstellen von Ladungsträgern, die nicht an der Halle stehen, und den Rampen.

1. Annahme Transportauftrag

Zu Beginn dieser Mission nimmt der Fahrer via Yard Management System den Fahrauftrag entgegen und quittiert die Übernahme an seinem YMS-Gerät.

2. Anfahrt Abstellplatz

Nach Annahme des Transportauftrags begibt sich der Fahrer mit dem Fahrzeug zum Abstellplatz der ihm zugeteilten Fracht. Dabei ist er nicht an die Einbahnstraßenregelung der Betriebsstätte gebunden, da der Hofverkehr Vorrang hat.

3. Aufnehmen der Fracht

Angekommen am Abstellplatz ist je nach Ladegefäß der Prozess leicht unterschiedlich. Wenn es sich um eine Wechselbrücke handelt, muss diese zuerst mit dem Fahrzeug unterfahren werden. Anschließend kann sie, nach der korrekten Positionierung des Fahrzeugs unterhalb der

Aufnahmepunkte der Wechselbrücke, angehoben bzw. aufgenommen werden. Bei einem Trailer ist lediglich die richtige Positionierung des Fahrzeugs zum Trailer für die Aufnahme zu berücksichtigen. Bevor jedoch das Fahrzeug mit der aufgenommenen Fracht losfahren darf, sind die ordnungsgemäße Aufnahme und die verschlossene Türenverriegelung am Ladegefäß sicherzustellen.

4. Umsetzen der Fracht zur Laderampe

Im Anschluss an die Frachtaufnahme befördert der Fahrer die Fracht in Richtung Zielrampe. Auch bei diesem Umsetzen muss der Fahrer die Einbahnstraßenregelung auf dem Betriebsgelände nicht berücksichtigen.

5. Absetzen an der Laderampe

Bei der Ankunft an der Ziel-Laderampe wird diese auf Verfügbarkeit überprüft. Der Fahrer kann den Belegungszustand per Sichtung feststellen. Sofern die Zielrampe frei ist, rangiert der Fahrer das Fahrzeug rückwärts an die Laderampe. Er hält zuerst ca. 10 m vor der Rampe, steigt aus und öffnet die Türen des Frachtcontainers. Anschließend setzt der Fahrer das Fahrzeug rückwärts an die Rampe, an der die Fracht abgestellt werden soll. Vor dem endgültigen Absetzen der Fracht wird je nach Ladegefäß ebenfalls der Prozess unterschieden. Bei einer Wechselbrücke wird vor dem Absetzen die Verriegelung an den Stützbeinen überprüft. Bei Trailern wird nach dem Parken die Kopplung zum Zugfahrzeug gelöst und der Trailer abgestellt. Nachdem das Fahrzeug nun sicher vorgezogen bzw. vorgefahren wurde, kann der Fahrauftrag beim Yard Management System als erledigt gemeldet werden.

Nachfolgend sind in Abbildung 8 die vorgenannten fünf Stationen der ersten Mission des Hofbetriebs in einer Übersichtsgrafik verortet.

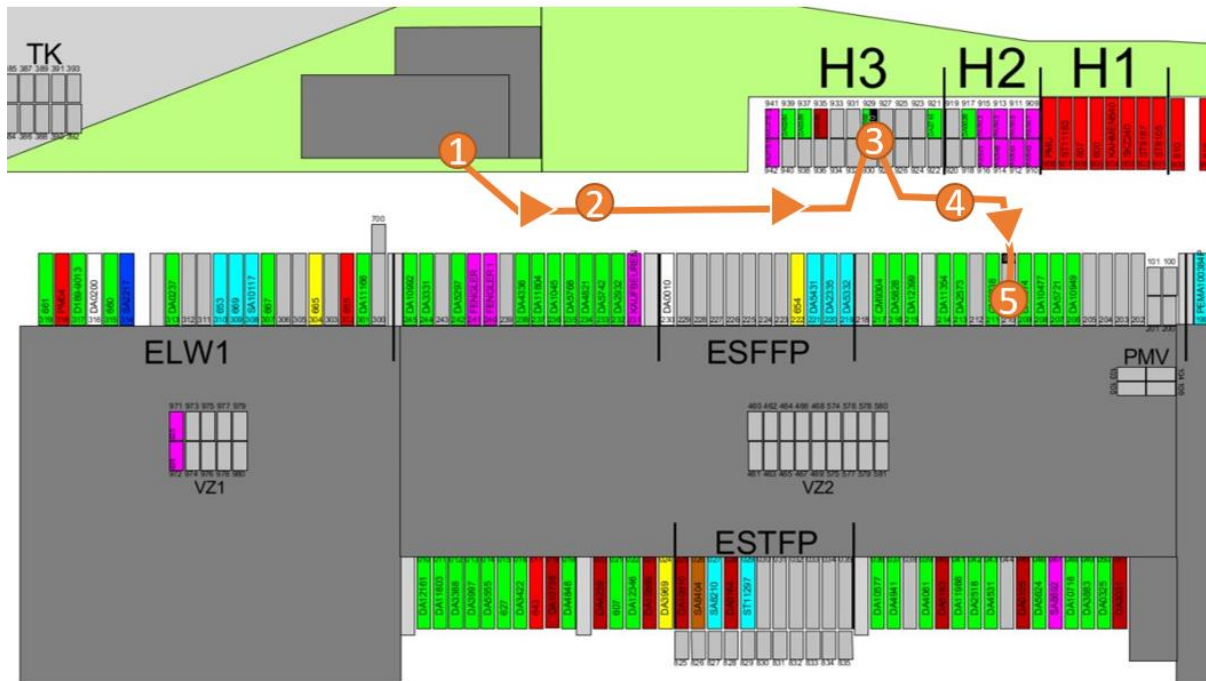


Abbildung 8: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Abstellplatz-Rampe

Zweite Mission Hofverkehr: Rampe zu Abstellplatz

1. Annahme Transportauftrag

Zu Beginn dieser Mission nimmt der Fahrer via Yard Management System den Fahrauftrag entgegen und quittiert die Übernahme an seinem YMS-Gerät.

2. Anfahrt Laderampe

Nach Annahme des Transportauftrags begibt sich der Fahrer mit dem Fahrzeug zur Laderampe, an der die ihm zugeteilte Fracht steht. Dabei ist er nicht an die Einbahnstraßenregelung der Betriebsstätte gebunden, da der Hofverkehr Vorrang hat.

3. Aufnehmen der Fracht

Angekommen an der Laderampe ist je nach Ladegefäß der Prozess leicht unterschiedlich. Wenn es sich um eine Wechselbrücke handelt, muss diese zuerst mit dem Fahrzeug unterfahren werden. Anschließend kann diese, nach der korrekten Positionierung des Fahrzeugs unterhalb der Aufnahmepunkte der Wechselbrücke, angehoben bzw. aufgenommen werden. Bei einem Trailer ist lediglich die richtige Positionierung des Fahrzeugs zum Trailer für die Aufnahme zu berücksichtigen. Bevor jedoch das Fahrzeug mit der aufgenommenen Fracht losfahren darf, sind die ordnungsgemäße Aufnahme und die verschlossene Türenverriegelung am Frachtcontainer sicherzustellen.

4. Umsetzen der Fracht zum Abstellplatz

Im Anschluss an die Frachtaufnahme befördert der Fahrer nun die Fracht zum Abstellplatz. Auch bei diesem Umsetzen muss der Fahrer die Einbahnstraßenregelung auf dem Betriebsgelände nicht berücksichtigen.

5. Absetzen am Abstellplatz

Bei der Ankunft am Abstellplatz wird dieser auf Verfügbarkeit überprüft. Der Fahrer kann den Belegungszustand per Sichtung feststellen. Sofern der Abstellplatz frei ist, rangiert der Fahrer das Fahrzeug rückwärts zum Abstellplatz, wo die Fracht abgestellt werden soll. Vor dem endgültigen Absetzen der Fracht wird je nach Ladegefäß ebenfalls der Prozess unterschieden. Bei einer Wechselbrücke wird vor dem Absetzen die Verriegelung an den Stützbeinen überprüft. Bei Trailern wird nach dem Parken die Kopplung zum Zugfahrzeug gelöst und der Trailer abgestellt. Nachdem das Fahrzeug nun sicher vorgezogen bzw. vorgefahren wurde, kann der Fahrauftrag beim Yard Management System als erledigt gemeldet werden. Nachfolgend sind in Abbildung 9 die vorgenannten fünf Stationen der zweiten Mission des Hofbetriebs in einer Übersichtsgrafik verortet.

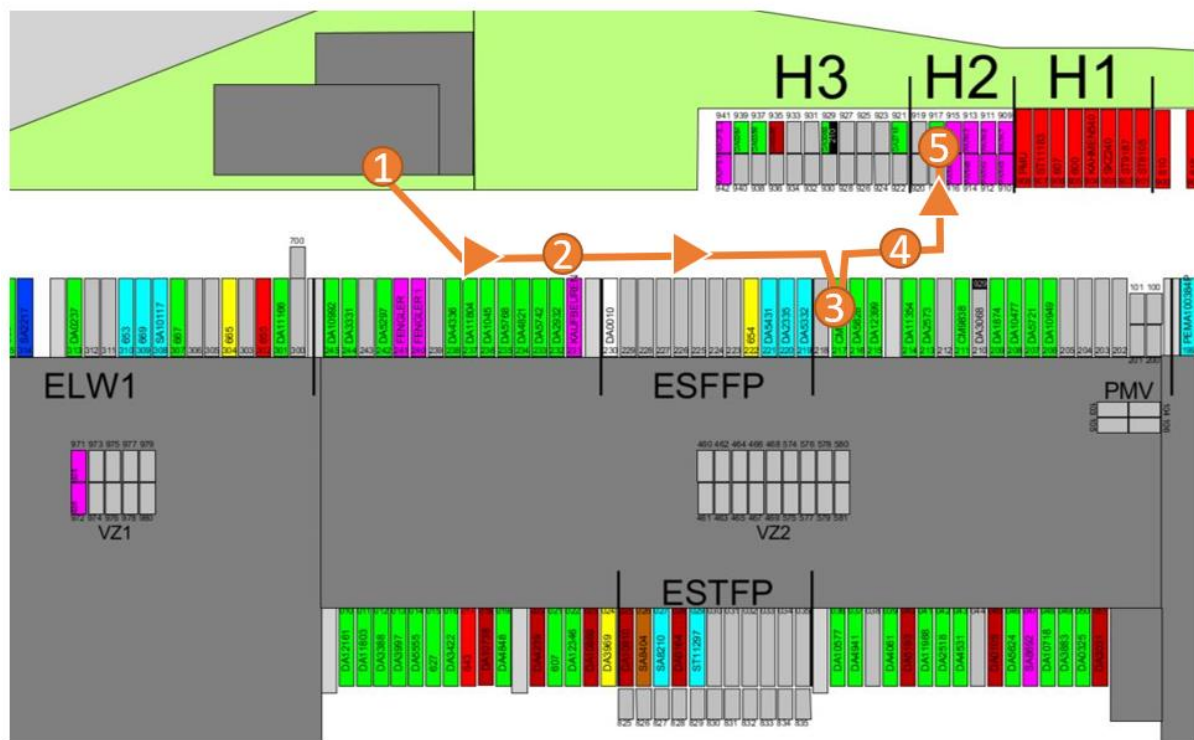


Abbildung 9: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Rampe-Abstellplatz

Dritte Mission Hofverkehr: Rampe zu Rampe

1. Annahme Transportauftrag

Zu Beginn dieser Mission nimmt der Fahrer via Yard Management System den Fahrauftrag entgegen und quittiert die Übernahme an seinem YMS-Gerät.

2. Anfahrt Start-Laderampe

Nach Annahme des Transportauftrags begibt sich der Fahrer mit dem Fahrzeug zur Start-Laderampe der ihm zugeteilten Fracht. Dabei ist er nicht an die Einbahnstraßenregelung der Betriebsstätte gebunden, da der Hofverkehr Vorrang hat.

3. Aufnehmen der Fracht

Angekommen an der Start-Laderampe ist je nach Ladegefäß der Prozess leicht unterschiedlich. Wenn es sich um eine Wechselbrücke handelt, muss diese zuerst mit dem Fahrzeug unterfahren werden. Anschließend kann sie nach der korrekten Positionierung des Fahrzeugs unterhalb der Aufnahmepunkte der Wechselbrücke angehoben bzw. aufgenommen werden. Bei einem Trailer ist lediglich die richtige Positionierung des Fahrzeugs zum Trailer für die Aufnahme zu berücksichtigen. Bevor jedoch das Fahrzeug mit der aufgenommenen Fracht losfahren darf, sind die ordnungsgemäße Aufnahme und die verschlossene Türenverriegelung am Frachtcontainer sicherzustellen.

4. Umsetzen der Fracht zur Ziel-Laderampe

Im Anschluss an die Frachtaufnahme befördert der Fahrer die Fracht zur Zielrampe. Auch bei diesem Umsetzen muss der Fahrer die Einbahnstraßenregelung auf dem Betriebsgelände nicht berücksichtigen.

5. Absetzen an der Ziel-Laderampe

Bei der Ankunft an der Ziel-Laderampe wird diese auf Verfügbarkeit überprüft. Der Fahrer kann den Belegungszustand per Sichtung feststellen. Sofern die Zielrampe frei ist, rangiert der Fahrer das Fahrzeug rückwärts an die Ziel-Laderampe. Der Fahrer hält zuerst ca. 10 m vor der Rampe, steigt aus und öffnet die Türen des Frachtcontainers. Anschließend setzt er das Fahrzeug rückwärts an die Rampe, an der die Fracht abgestellt werden soll. Vor dem endgültigen Absetzen der Fracht wird je nach Ladegefäß ebenfalls der Prozess unterschieden. Bei einer Wechselbrücke wird vor dem Absetzen die Verriegelung an den Stützbeinen überprüft. Bei Trailern wird nach dem Parken die Kopplung zum Zugfahrzeug gelöst und der Trailer abgestellt. Nachdem das Fahrzeug nun sicher vorgezogen bzw. vorgefahren wurde, kann der Fahrauftrag beim Yard Management System als erledigt gemeldet werden.

Nachfolgend sind in Abbildung 10 die vorgenannten fünf Stationen der dritten Mission des Hofbetriebs in einer Übersichtsgrafik verortet.

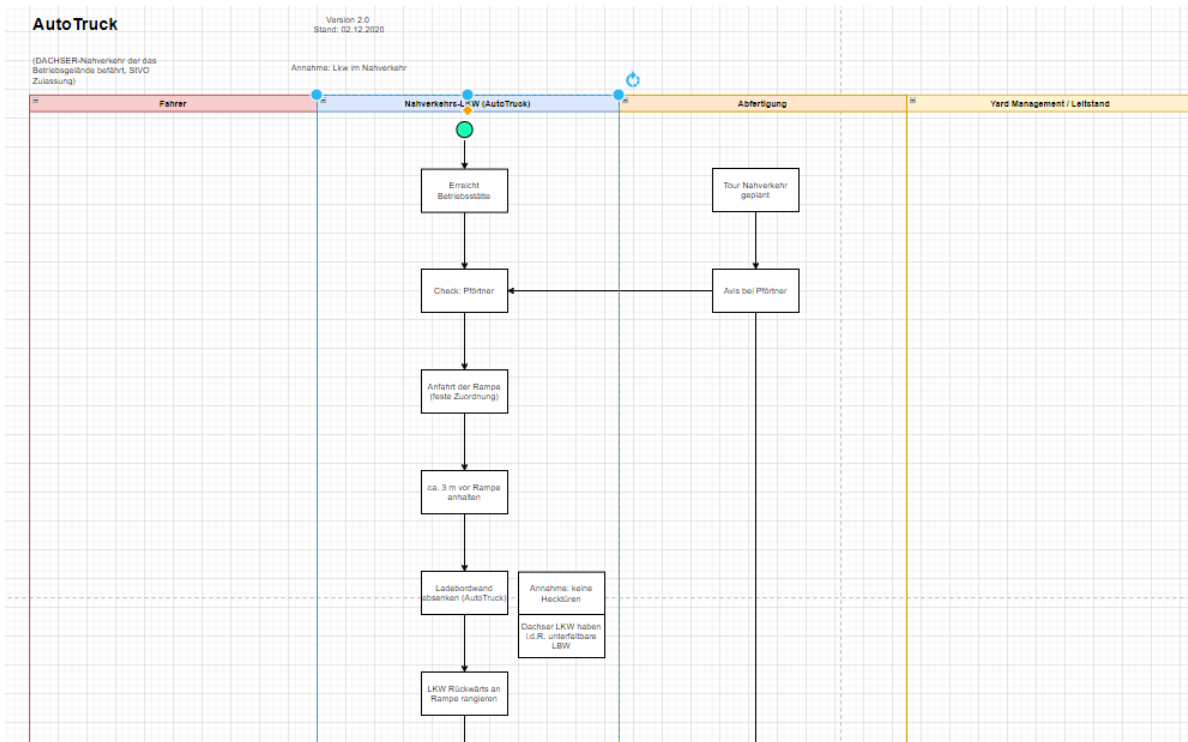


Abbildung 11: Beispiel Swimlane-Diagramm

Glossar

Das erstellte Glossar enthielt sämtliche relevanten Begriffe des Projekts und deren Definition. Begriffe, die aus dem logistischen Anwenderumfeld stammen sowie Bezeichnungen der Automatisierungstechnologie und Komponenten. Das Glossar unterstützte so die partnerübergreifende Zusammenarbeit und ermöglichte ein einheitliches Verständnis. Es wurde seit dem Projektbeginn fortlaufend inhaltlich gepflegt und um neue Begriffe ergänzt.

Nebenprozesse (Manuelle Prozesse)

Das Ziel der Aufstellung von manuellen Nebenprozessen war die Identifikation von herausfordernden Tätigkeiten, die nicht zur Fahraufgabe zählen und derzeit vornehmlich durch den Fahrer oder anderes Personal durchgeführt wird. Neben der vollständigen Darstellung der Prozesse sollten Alternativen identifiziert werden, die bei Entfall des Fahrpersonals den Betrieb sicherstellen können. Diese Alternativen entfallen auf drei Kategorien:

- Personelle Alternative – eine andere Person als der Fahrer übernimmt die Tätigkeit,
- Prozessuale Alternative – die aktuelle Tätigkeit wird umgangen, indem die Prozesse umgestellt werden,
- Technische Alternative – die manuelle Tätigkeit wird durch eine technische Komponente ersetzt.

Ein weiteres Ziel der Aufstellung ist es, für die Umsetzung im Rahmen des SAFE20-Projektes in AP8 eine Lösung zu identifizieren, die dort umgesetzt wird.

Vorgehensweise

Die Analyse wurde in vier wesentlichen Schritten durchgeführt, die in Abbildung 12 dargestellt sind. Im ersten Schritt wurden in einem Brainstorming von ZF, DACHSER und Fraunhofer IML die Nebenprozesse anhand der in AP 2.1 erstellten Ablaufdiagramme erstellt. Hier wurde insbesondere auf eine allgemeingültige Aussagekraft geachtet. Hierdurch wurden Aufgaben und Prozesse gefunden, bei denen die unabhängige Durchführung weiterer Komponenten bedarf, die über die automatische Fahraufgabe hinaus gehen. Diese wurden drei Kategorien zugeordnet: Allgemein, Trailer und Wechselbrückenhubwagen. So wurde eine Darstellung der Nebenprozesse in einer Matrix-Darstellung erreicht.

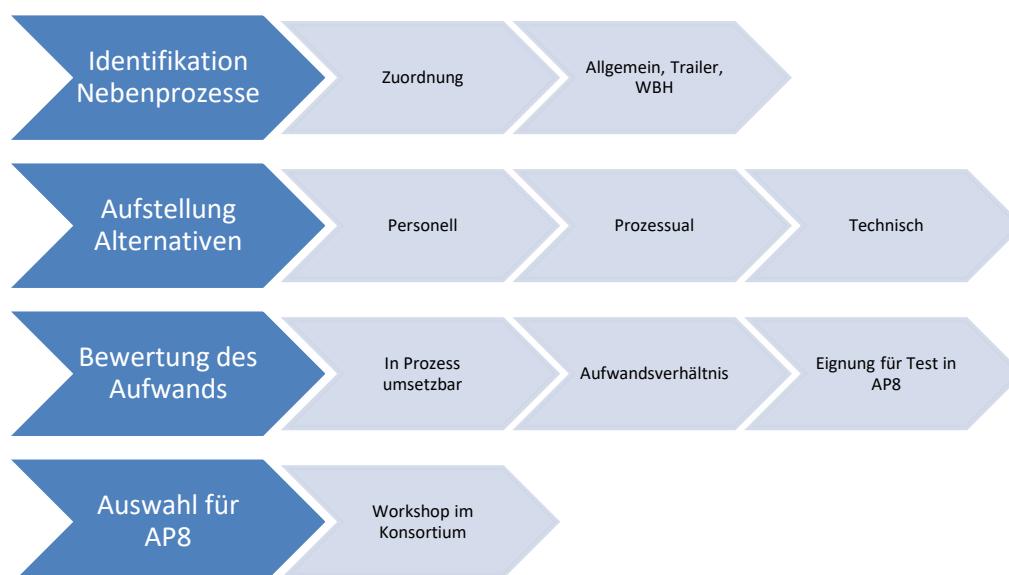


Abbildung 12: Vorgehensweise zur Identifikation von Nebenprozessen

Die Bewertung des jeweiligen Aufwands wurde darauf aufbauend für jede Alternative durchgeführt. Diese wurde wiederum nach drei Kriterien durchgeführt (vgl. Abbildung 13). Das erste Kriterium beschreibt die prozessuale Umsetzbarkeit im Prozess, also ob die Alternative durch eine Neuorganisation geeignet bzw. integrierbar ins das Gesamtsystem ist. Das zweite Kriterium beschreibt das Aufwandsverhältnis der Alternative, sowohl finanziell (Investition und laufende Kosten) sowie zeitlich (zeitlicher Bedarf). Die ersten beiden Kriterien beziehen sich auf eine breite Anwendung und Hochskalierung des Automatisierungssystems, also nicht speziell auf den Einsatzzweck an einem einzelnen Standort oder einzelnen Unternehmen. Drittes Kriterium ist die Umsetzbarkeit im Rahmen des Projektes. Dieses wiederum konzentriert sich im Gegensatz zu den ersten beiden Kriterien auf die Umsetzung im Rahmen des Praxistests im Projekt SAFE20. Hier sind ggf. Work Arounds oder nicht wirtschaftlich erscheinende Alternativen in Betracht gekommen, u. a.

um die Alternativen zu erproben. Die Bewertungen wurden initial durch ZF, DACHSER und Fraunhofer IML durchgeführt und in einem Workshop mit dem Konsortium am 20.10.2021 festgelegt.

Bewertung		Bewertungsskala		
In Prozess umsetzbar	?	1	2	3
Aufwandsverhältnis (Zeitlich, Kosten)	?	1	2	3
Eignung für Test in SAFE20 (AP 8)	?	1	2	3

Gut Unverhältnismäßig

Bitte Optionen mit 1 bis 3 bewerten

Prozess 1 => ist bereits umgesetzt bzw. einfach einsetzbar
 Prozess 2 => ist denkbar umzusetzen, aber unter Vorbedingungen (z. B. Schulungen, Redundanzen)
 Prozess 3 => Umsetzung unrealistisch / nicht möglich

Aufwand 1 => keine Extrakosten
 Aufwand 2 => Kosten stehen wahrscheinlich im Verhältnis, müssen aber noch genauer analysiert werden
 Aufwand 3 => unbezahlbar bzw. Kosten stehen in keinem Verhältnis

SAFE20-Eignung 1 => geeignet und bereits erprobt
 SAFE20-Eignung 2 => eingeschränkt geeignet
 SAFE20-Eignung 3 => nicht geeignet

Abbildung 13: Bewertung der Alternativen für Nebenprozesse

Als letzter Schritt wurde je Nebenprozess eine Alternative ausgewählt, die im Rahmen des Projekts SAFE20 für den prototypischen Test in AP8 verfolgt werden sollte. Dies wurde ebenso im Workshop vom 20.10.2021 gemeinsam mit den Konsortialpartnern festgelegt.

Die Ergebnisse der Analyse sind in nachfolgender Abbildung 14 dargestellt.

Übersicht Manuelle Prozesse V 1.4 vom 04.10.2021
Manuelle Prozesse sind Aufgaben, die zum Handhaben von WB und Trailern bzw. des Fahrzeugs absichts der Fahraufgabe notwendig sind.

Prozess	Manuelle Alternative (Personell)	Prozessuelle Alternative	Technische Alternative (LE / Infrastruktur)	
Allgemein	Heckklappen öffnen Heckklappen schließen Kontrolle Überdeckeldeck Stromversorgung für alle Leuchten Verlöschen von LE	Leuchtmittel (Leuchtmittel) A-Abstraktion Leuchtmittel (Leuchtmittel) B-Abstraktion Leuchtmittel (Leuchtmittel) C-Abstraktion Freigabe von Haltepersonal an das Leibsystem Mitarbeiter XY übernimmt das Anschließen und Lösen Mitarbeiter XY übernimmt das Verlöschen	Heckklappen permanent offen Heckklappen permanent geschlossen Zustandsanalyzer für Überdeckeldeck (an Verlastetechnik) Diesel-Aggregat läuft durch	Rolltore Aufbausatz angebrachte Loadhouses Rolltore Aufbausatz angebrachte Loadhouses Zustandsanalyzer für Überdeckeldeck (an Verlastetechnik) Diesel-Aggregat läuft durch
Trailer	Keile anlegen Keile entfernen Trailer rückwärts an Rampe setzen Strom und Hydraulik-Verbindungen Stützbeine ausfahren Stützplatte öffnen und klemmen	MA der Halle legt Keil an (Drehflur nur Rampen) MA der Halle entfernt Keil (Drehflur nur Rampen) Ein erweiterter Druckluftkanal für Brennelemente, Antriebsflur durch XY In der Regel wird ohne Verbindung gefahren Umkehrschritte haben Stützbeine in die Höhe aus, sodass diese ausgefahren werden können	Welche restrand system (biträksukursale Keilung) Welche restrand system (biträksukursale Keilung) Infrastruktursysteme Umkehrschritte im Rampenbereich Blöcke (Nierloch) für lehrer autum Koppeln Elektrische, automatische Stützbeine (z.B. von IML) Anhebung der Verankerung	Rampenservice (Gabel) (Sensor am Zuglenkwerk) Bodenmarkierung (für Signalisierung Haltepunkt Zugmaschine) Sensor am Trailer Heck Adapterplatte an Trailer ZF (?) KKS Just Adapter SAF Holland Adapter
Werk	Verriegelung der Stützbeine	Biogelichtung der Blöcke vor Be-Einfachung	Erreichungs-sensoren auf dem Weisel Quersensoren sensor auf dem Weisel	

Bewertung

	1	2	3
In Prozess umsetzbar	+	+	+
Aufwandsverhältnis (Zeitlich, Kosten)	+	+	+
Eignung für Test in SAFE20 (AP 8)	+	+	+

Gut Unverhältnismäßig

Bitte Optionen mit 1 bis 3 bewerten

Prozess 1 = ist bereits umgesetzt bzw. einfach einsetzbar
 Prozess 2 = ist denkbar umzusetzen, aber unter Vorbedingungen (z. B. Schulungen, Redundanzen)
 Prozess 3 = Umsetzung unrealistisch / nicht möglich
 Aufwand 1 = keine Extrakosten
 Aufwand 2 = Kosten stehen wahrscheinlich im Verhältnis, müssen aber noch genauer analysiert werden
 Aufwand 3 = unbezahlbar bzw. Kosten stehen in keinem Verhältnis
 SAFE20-Eignung 1 = geeignet und bereits erprobt
 SAFE20-Eignung 2 = eingeschränkt geeignet
 SAFE20-Eignung 3 = nicht geeignet

Legende

Weitere Option Erörterung Freigabe von Haltepersonal der Rampe am Leibsystem **Backlog**

 Ausgewählte Alternative für AP8

Abbildung 14: Nebenprozesse - Ergebnis der Analyse

Nothalt/Notaus FMEA Darstellung und Bewertung

Definiert wurden zwei Szenarien für das Betreiben der Fahrzeuge im SAFE20-Projekt.

Im ersten Szenario fährt das Fahrzeug autonom, im zweiten wird das Fahrzeug durch den Sicherheitsfahrer übernommen. Dadurch ergaben sich für beide Szenarien neue sicherheitskritische Aspekte. Im ersten Fall wurde für diese Ausarbeitung das Ausschalten des Automatisierungs-Systems durch den Notaus oder den Nothalt unterschieden, wobei ein Notaus kritischer zu bewerten ist als der Nothalt, da der Notaus als letzte Maßnahme das gesamte Fahrzeug stilllegt und alles abschaltet, während der Nothalt eine detaillierte Degradierung ermöglicht.

Auch wenn der Notaus kritischer eingestuft ist als der Nothalt, wurden zum Erreichen des Notaus bekannte Maßnahmen im Fahrzeug und erprobte Systeme genutzt. In den Notaus führen z. B. erkannte Fehler in der Sensorik oder das Betätigen des Notausschalters.

Der Nothalt wird hingegen durch die neu zu entwickelnden Techniken, wie komplexe Kollisionsvermeidung, ausgelöst. Da diese Maßnahmen zum Zeitpunkt der Erhebung noch nicht bekannt waren, wurden diese weiterhin als kritisch eingestuft.

Der zweite Fall, bei dem der Sicherheitsfahrer das Fahrzeug übernimmt, kann als weniger kritisch eingestuft werden, da die technischen Möglichkeiten der Erkennung eines manuellen Eingriffs ins System bekannt und gut erprobt sind.

Mögliche offene Punkte sind wie folgt beschrieben:

- Sensoren
 - Objekt im Schutzbereich (Folgen noch mal diskutieren mit Partnern)
 - Wie reagieren wir auf diesen Zustand
 - Aktive Handlung notwendig, entweder durch Super User im Leitsystem oder durch Wiederaufnahmen beim Entfernen des Objektes => Als Reaktion Meldung an das Leitsystem nach zu definierender Zeit (z. B. 10 min)
- Manuelle Eingriffe noch mal abklären => was ist wirklich möglich im Fahrzeug? Im Moment alle theoretischen Möglichkeiten aufgeschrieben
 - Bremse / Kupplung / Gaspedal / Lenkung / Ein/Aus-Schalter Automatisierung
- Leitsystem nur rudimentär betrachtet

2.1.2.2 Anforderungserhebung

Die Komplexität des Gesamtsystems und die angestrebte sicherheitsgerichtete Technologieentwicklung erfordert eine umfassende Anforderungserhebung hinsichtlich aller beteiligten Systeme (fahrzeug- und infrastrukturseitig) sowie der betrachteten Use-Cases. Insbesondere bei den Use-Cases besteht die Herausforderung darin, einen guten Mittelweg zwischen Spezialisierung und Generalisierung zu erarbeiten. Nachfolgend wird die Vorgehensweise erläutert.

Funktionale Anforderungen

Im Weiteren wurden im AP 2 die funktionalen Anforderungen des Gesamtsystems erfasst. Zudem wurden gemeinsam mit allen Partnern Anforderungen an die Auswahl eines geeigneten Logistikhofs für die in AP 8 erfolgende Felderprobung des automatisierten Fahrens gesammelt. Dazu gehören u. a. Anforderungen an die bestehenden und für das automatisierte Fahren erforderlichen Logistikprozesse, die Verkehrsdichte und die technische Infrastruktur auf dem Hof.

Technische Komponenten

Zur allgemeingültigen Übersicht und Strukturierung wurden im ersten Schritt die funktionellen Anforderungen nach der MoSCoW-Methode³ ermittelt. Diese Priorisierungstechnik dient der Sortierung von Komponenten nach Wichtigkeit und deren Auswirkung nach folgenden Kategorien:

- **Must have** (Aufgaben sind unbedingt erforderlich, ca. 60%)
- **Should have** (Umsetzung nur, wenn trotzdem alle vorrangigen Aufgaben erledigt werden)
- **Could have** (Umsetzung nur, wenn keine höherwertigen Aufgaben beeinträchtigt werden)
- **Won't have** (Keine Umsetzung, aber Vormerkung für spätere Priorisierungsbetrachtungen)

Diese wurden nach vier Bereichen unterteilt:

- Technische Anforderungen Infrastruktur,
- Technische Anforderungen Fahrzeuge,
- Wirtschaftliche Anforderungen,
- Sicherheitsanforderungen.

Nachfolgend sind diese tabellarisch aufgeführt.

³ (Pinkster, van de Burgt, Janssen, & van Veenendaal, 2004)

Die technischen Anforderungen der Infrastruktur beschreiben die Ausstattung des Werksgeländes. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Anforderungen samt Kurzbeschreibung sowie deren Priorität dargestellt.

Tabelle 2: Technische Anforderungen der Infrastruktur

Technische Anforderungen Infrastruktur	MoSCoW-Priorität	Beschreibung
Übergabepplatz vorhanden	S	Ein Stellplatz in der Nähe der Geländezufahrt ist vorhanden, an dem eine Abfertigung von automatischen Fahrzeugen durchgeführt werden kann.
Bediener Leitsystem	M	Ein Leitsystem für die Bediener ist vorhanden.
Klassifizierung von Zonen auf dem Gelände	M	Die Verkehrswege auf dem Werksgelände wurden hinsichtlich der Automatisierbarkeit eingeordnet, z. B. anhand der Kriterien infrastruktureller Ausstattung (Sensorknoten verfügbar.
Automatisierungssysteme verfügbar und betriebsbereit	M	Die für die Steuerung notwendigen Systeme sind infrastruktureitig ausgestattet (u. a. Leitsystem, YMS, DAZ).
Standardisierte Kommunikationsschnittstelle der Infrastruktur mit autom. Fahrzeugen	M	Die Datenkommunikation zwischen Infrastruktur und automatisierten Fahrzeugen ist sichergestellt.
Das Leitsystem ist zentrale Instanz	S	Im Leitsystem werden sämtliche Informationsstränge zusammengeführt und verteilt.
Angepasste / standardisierte Fahrbahnmarkierungen in den Fahrwegen und an den Rampen	S	Das Werksgelände verfügt über eindeutige Fahrbahnmarkierungen.
Nummerierung und Stellplatzzuordnung der Ladegefäße	S	Stellplätze und Rampen sind eindeutig nummeriert.

Die technischen Anforderungen der automatisierten Fahrzeuge beschreiben deren Ausstattung. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die Anforderungen samt Kurzbeschreibung sowie deren Priorität dargestellt.

Tabelle 3: Technische Anforderungen der automatisierten Fahrzeuge

Technische Anforderungen Fahrzeuge	MoSCoW-Priorität	Beschreibung
Vollautomatischer Regelbetrieb mit mind. 20 km/h im Mischbetrieb	S	Fahrzeug sollte befähigt sein, eine Geschwindigkeit von 20 km/h im Automatikmodus zu erreichen.
Notbremssystem im Fahrzeug	M	Fahrzeug verfügt über fehlersicheres Notbremssystem, dass von außen aktiviert werden kann.
Sensorik zur Umgebungswahrnehmung	M	Fahrzeug ist mit hinreichender Umfeldsensorik ausgestattet, um die beschriebenen Aufgaben zu bewältigen.
Bisherige Fahrzeugmaße bleiben gleich	S	Fahrzeugmaße bleiben im Rahmen, um bestehende Fahrwege zu befahren und Ladefässer aufzunehmen.
Anschluss von Leitungen automatisierbar oder prozessual gelöst	M	Beim Handling von Trailern ist das Verbinden und Lösen der Hydraulik- und Elektroleitungen berücksichtigt.
Fahrzeug verfügt über Interaktionsmodule	M	Fahrzeugbediener können mittels geeigneter Schalter und Anzeigen das Fahrzeug steuern.
Standardisierte Kommunikationsschnittstelle Infrastruktur mit autom. Fahrzeugen	M	
Rangieren an Rampe mit max. +/- 15 cm in Querrichtung	M	Zur Sicherstellung der Nutzung von Überladeblechen muss die Toleranz beim Abstellen von Ladefässen innerhalb von 15 cm liegen.

Die wirtschaftlichen Anforderungen sollen langfristig die Akzeptanz fördern. Nachfolgend werden in Tabelle 4 die grundlegenden Anforderungen beschrieben.

Tabelle 4: Wirtschaftliche Anforderungen

Wirtschaftliche Anforderungen	MoSCoW-Priorität
Kosten für Umrüstung müssen im Verhältnis zur langfristigen Ersparnis stehen (Wirtschaftlichkeit)	M
Operativer Betrieb muss während der Implementierung störungsfrei weiterlaufen	S
Keine / minimale infrastrukturelle Umbaumaßnahmen an Rampen notwendig	S
Umbaumaßnahmen an Ladeeinheiten werden vermieden	S
Prozessuale Änderungen des Logistikbetriebs sind möglich	S

Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, werden folgende Sicherheitsanforderungen zu Grunde gelegt. Die detaillierte Sicherheitsbewertung wird in AP 3 durchgeführt.

Tabelle 5: Sicherheitsanforderungen

Sicherheitsanforderungen	MoSCoW-Priorität
Manuelle Abschaltung des Fahrzeugs und Systems jederzeit möglich	M
Einfahrtskontrolle für Geländezugang	M
Gemischter Fahrbereich für autonome Fahrzeuge	S
Fußgängerverkehr in autonomen Bereichen organisieren	M
Einbahnstraßenregelung	C
Hoffahrzeug hat Vorfahrt	S
Klassifizierungsbereiche ohne Querverkehr abgrenzen	M

Fahrzeug wird manuell durch Fahrzeugbediener (autorisiert) am Fahrzeug in Betrieb gesetzt (Checkliste) und am Dienstende wieder außer Betrieb gesetzt	M
Notaus-Knöpfe sind im und am Fahrzeug angebracht	M
Notaus kann vom Leitsystem ausgelöst werden	M
Schulungen und Unterweisungen für Fahrzeug- und Leitsystembediener	M
Unterweisungen über Automatisierungsbetrieb für sämtliche Personen auf dem Gelände	M

2.1.2.3 Entwurf vorläufige Systemarchitektur (AP 2.4)

Die Anforderungserhebung und -analyse (AP 2.2) sowie Anforderungsspezifikation und -bewertung (AP 2.3) wurden aufgrund ihrer hohen Abhängigkeit zueinander iterativ bearbeitet und unter der Leitung des Fraunhofer IML dokumentiert. Gemeinsam mit den Projektpartnern und SICK wurde eine funktionale Dekompensation des Automatisierungssystems vorgenommen. Darauf aufbauend wurden Interaktionsdiagramme des Automatisierungssystems und der einzelnen Use-Cases erstellt. Diese funktionale Sicht auf das Automatisierungssystem ermöglicht es, Anforderungen an die Schnittstellen genauer zu definieren. Die funktionale Systemarchitektur wurde gemeinsam dokumentiert und steht allen Projektpartnern zur Verfügung. Anhand der allgemeinen und technischen Anforderungen wurde ein vorläufiger Gesamtsystementwurf erarbeitet, der die logistischen Prozesse einschließlich Kommunikations- und Datenflüssen in einer technischen Lösung abbildet. Methodisch erfolgt der Entwurf vom Großen (Gesamtsystem) ins Kleine (Subsysteme einschließlich deren Funktionen und Schnittstellen). In diesem fortlaufenden Prozess wurde die Systemarchitektur beginnend bei einer übergeordneten Gesamtsystemstruktur immer weiter detailliert.

Im ersten Schritt wurde ein System Overview auf der höchsten Abstraktionsebene erstellt, der Teilsysteme der Automatisierungslösung zusammenfasst.

Konkret wurde ein iterativer Ansatz gewählt, der eine fortlaufende Beschreibung der Systeme und Subsysteme erlaubt. Der System Overview dient dabei der Zuordnung von (Sub-)Systemen zu Projektpartnern und zeigt dabei auch die Verantwortlichkeiten.

Die Interaktionsdiagramme dienen der Darstellung von Interaktionen, Abhängigkeiten und Zusammenhängen der (Sub-)Systeme. Die Teilsysteme des System Overview werden zu Swimlanes

im Interaktionsdiagramm zusammengeführt (vgl. Abbildung 15). Das Interaktionsdiagramm enthält Informationen zu:

- Nötigen Funktionen zum Erbringen der Automatisierungsfunktion,
- Ablauf der Funktionen,
- Allokation der Funktionen zu Teilsystemen,
- Interaktion zwischen den Teilsystemen.

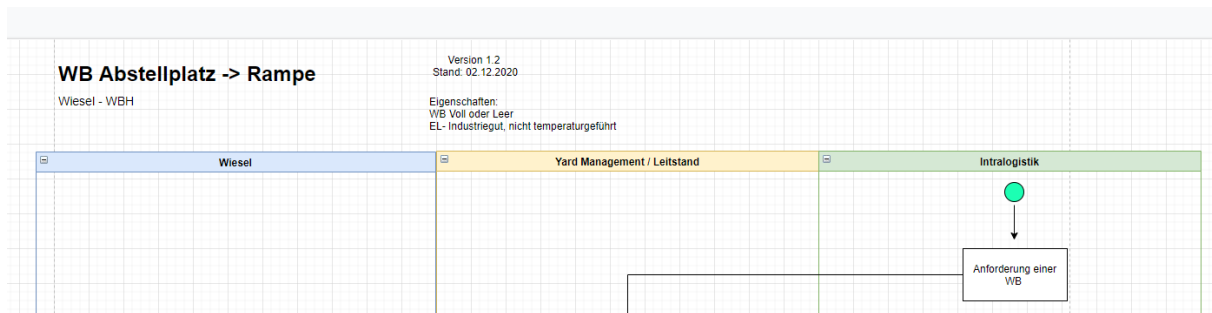


Abbildung 15: Ausschnitt Swimlane Diagramm

Die vom Konsortium erstellten Interaktionsdiagramme ermöglichen ein Verständnis für das systemübergreifende funktionale Konzept zur Erbringung der Automatisierungslösung. Sowohl für den Gesamtprozessablauf als auch für Subsysteme wie die Fahrt, das Aufnehmen von Wechselbrücken und Trailern sowie das Bewältigen besonderer Aufgaben (z. B. rückwärts an Rampe anfahren). Die Interaktionsdiagramme bilden die funktionale Interaktion zwischen den Systemen ab (z. B. Leitsystem, KAMAG PM, Infrastruktursensorik), die zur Erbringung der Automatisierungslösung notwendig sind und bei denen bei entsprechender Annotation der Interaktionspfeile zusätzlich ersichtlich wird, welche Information zwischen den Subsystemen ausgetauscht wird. Ebenso werden Abhängigkeiten zu manuellen Eingriffen ersichtlich, die gegebenenfalls zur Bewältigung des Prozesses notwendig werden.

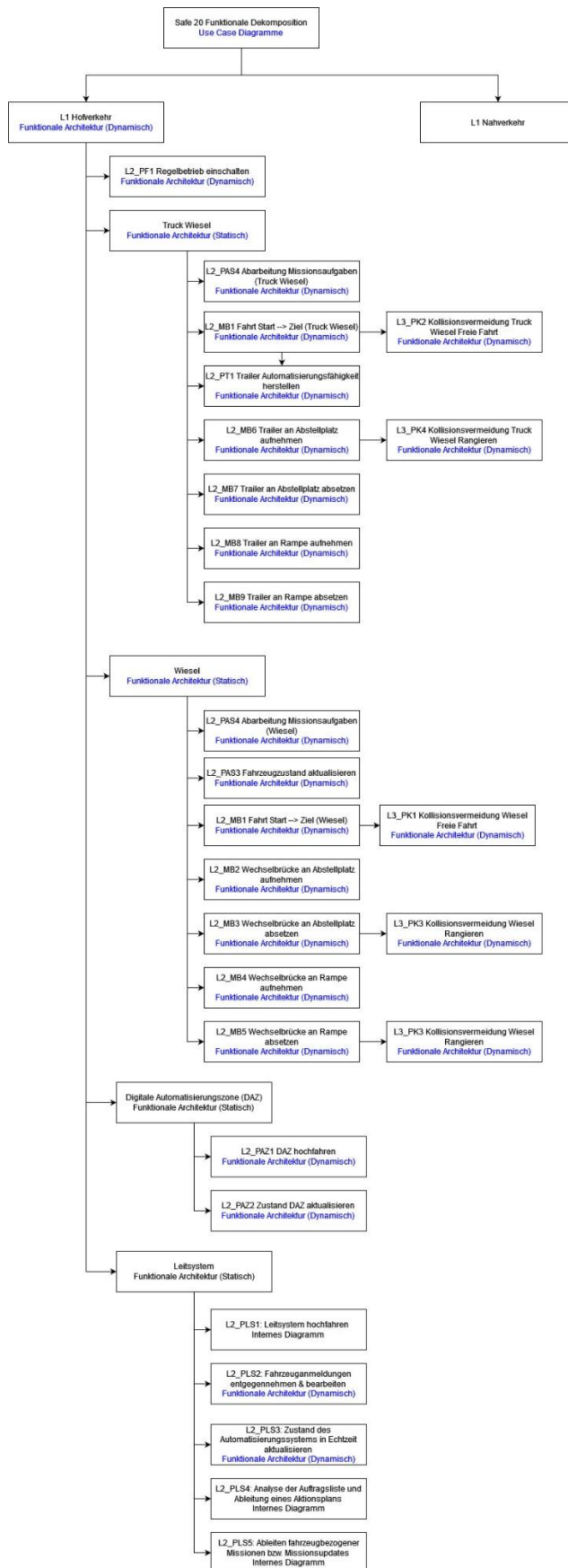


Abbildung 16: Übersicht der Swimlane Diagramme⁴

Jeder Kachel der in Abbildung 16 dargestellten Übersicht ist ein Swimlane-Diagramm eines Subsystems hinterlegt. Bei Bedarf können jeweils Abbildungen von Subsystemen in der Systemarchitektur angelegt werden.

2.1.2.4 Zusammenfassung AP 2

Die Komplexität des Gesamtsystems und die angestrebte sicherheitsgerichtete Technologieentwicklung erforderte eine umfassende Anforderungsanalyse hinsichtlich aller beteiligten Systeme (fahrzeug- und infrastrukturseitig) sowie der betrachteten Use-Cases. Insbesondere bei den Use-Cases bestand die Herausforderung darin, einen angemessenen Grad zwischen Spezialisierung und Generalisierung zu erarbeiten. Ausgeprägte Generalisierung resultiert in hohem Aufwand für die Sicherheitsbetrachtungen und der Subsystementwicklung. Bei einer zu engen Spezialisierung sind die erarbeiteten Ergebnisse nur in einem engen Anwendungskontext nutzbar.

Das übergeordnete Ziel des AP 2 war die Erhebung und Erfassung funktionaler Anforderungen an das Gesamtsystem, bestehend aus der Fahrzeugumfeldererkennung und hofseitigen Infrastruktur-Sensorknoten, um ein sicheres System autonomer Hoffahrzeuge zu verwirklichen. In diesem Kontext wurden Use-Cases und Rahmenbedingungen erfasst und systematisch analysiert, um ein repräsentatives Abbild der Praxisprozesse darstellen zu können. Als Anwendungsfälle im Projekt wurden Hofdienst und Nahverkehr identifiziert. Der Hofdienst umfasst dabei sämtliche Umsetz- und Rangierbewegungen durch Hoffahrzeuge innerhalb des Betriebsgeländes. Beim Use-Case Nahverkehr wurde der betriebsinterne Verkehr zwischen verschiedenen Betriebsstätten beschrieben.

Der Lösungsansatz bestand darin, zunächst in AP 2.1 die bestehenden Use-Cases auf Logistikhöfen zu analysieren und potenziell erforderliche Änderungen hinsichtlich Automatisierung zu definieren. Dabei orientierten sich die beteiligten Partner an den nicht automatisierten Ist-Prozessen und modellierten automatisierte Soll-Prozesse. Anschließend wurden auch funktionale Anforderungen an Technologien/Subsysteme zusammengefasst und geeignet dokumentiert. Ausgehend von den Soll-Prozessen wurden funktionale Anforderungen an fahrzeuginterne, sicherheitsrelevante Subsysteme, z. B. Bremsen, Lenkung, Kommunikation (V2I, V2V), Objekterkennung identifiziert und zusammenfassend beschrieben (AP 2.2). Die Anforderungen wurden dabei in AP 2.3 iterativ hinsichtlich Umsetzbarkeit und Stand der Technik von den beteiligten Partnern priorisiert und bewertet. In AP 2.4 wurde daraus die vorläufige Systemarchitektur sowohl für die Fahrzeuge als auch für die Infrastruktur abgeleitet. Die Ergebnisse bildeten die funktionale Basis für die Entwicklung des Sicherheitskonzepts in AP3 sowie die technischen Arbeitspakete.

⁴ Stand: 08.11.2021

Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurde in den drei Bereichen der Gestaltung prozessualer, organisatorischer oder manueller Alternativen identifiziert. Es handelt sich um Aufgaben, die bislang das Fahrpersonal übernimmt. Hierbei ist das Ziel, die automatisierten Fahrzeuge optimal in den logistischen Gesamtprozess zu integrieren. Um dies zu erreichen, sollten einzelne Lösungen in den Bereichen weiterentwickelt werden und die aufeinander abgestimmte Gesamtfunktionalität gewährleistet sein.

2.1.3 Sicherheitskonzept (AP 3)

2.1.3.1 Risikobeurteilung (AP 3.1)

Die Basis der Risikobeurteilung bilden die in AP 2 festgelegten Use Cases für den Hof- bzw. Nahverkehr. Ausgehend von den Ablaufdiagrammen der Soll-Zustände der Automatisierungsfunktion wurden hier zunächst potenzielle Gefährdungen, insbesondere in der Interaktion mit Personen im Bereich der Automatisierungszone, identifiziert.

Ausgangspunkt waren dabei die beiden Use-Cases Hofverkehr (KAMAG PT und PM) und Nahverkehr (AutoTruck). Um ein besseres Verständnis für die Anwendung zu gewinnen, wurden die aus den Use-Cases abgeleiteten Missionen beschrieben und einer weiterführenden Prozessanalyse unterzogen. Aufgrund der Komplexität und auch der Berücksichtigung von drei unterschiedlichen Fahrzeugtypen in der Anwendung wurde zuerst ein Vorschlag für die Struktur der Risikobeurteilung ausgearbeitet und mit den Partnern abgeglichen. Daraus ergab sich, dass zwei Risikobeurteilungen entsprechend der Use-Cases verfasst wurden. Da die beiden Hoffahrzeuge zwar technologisch unterschiedlich waren, aber im Prozess ähnlich agierten, wurden diese in einer Risikobeurteilung zusammengefasst.

Tabelle 6: Struktur der Risikobeurteilung

Die Struktur der Risikobeurteilung	
Hofverkehr	Nahverkehr
	Übergang vom öffentlichen Straßenverkehr auf autonomes Fahren Betriebsstätte
Mission Aufnehmen Wechselbrücke (6 Unterprozesse)	Mission Fahrzeug vor Rampe rangieren (4 Unterprozesse)
Mission Aufnehmen des Trailers (6 Unterprozesse)	
Mission Absetzen der Wechselbrücke (6 Unterprozesse)	Mission Fahrzeug vor Rampe vorziehen (4 Unterprozesse)
Mission Absetzen des Trailers (6 Unterprozesse)	

Mission Zwischenparken und Standby (6 Unterprozesse KAMAG PM/PT)	Unterbrechung der Mission/ Teilmissionen (3 Unterprozesse)
Manuelle Tätigkeiten in den Teilmissionen (7 Unterprozesse)	Manuelle Tätigkeiten in den Teilmissionen (5 Unterprozesse)
Mission Fahrstrecke Anfahrt/Umsetzen (9 Zonen PM/PT für die freie Fahrt und 4 Unterprozesse)	Mission Fahrstrecke zu/von Rampe (10 Zonen und 5 Unterprozesse)
Mission Fahrstrecke Aufnehmen und Umsetzen an Abstellplätzen (6 Unterprozesse, 3 je Fahrzeugtyp)	
Mission Fahrstrecke Aufnehmen und Umsetzen an Rampen (3 Unterprozesse)	Mission Fahrstrecke Rampenbereich (2 Unterprozesse)
Stillsetzen im Notfall (Personal / Sicherheitsfahrer / verantwortliche Person für autonomen Betrieb)	Stillsetzen im Notfall (Personal / Sicherheitsfahrer / verantwortliche Person für autonomen Betrieb)
Von der Trajektorienplanung abweichende Fahrbewegungen, einschließlich Geschwindigkeitsänderungen	Von der Trajektorienplanung abweichende Fahrbewegungen, einschließlich Geschwindigkeitsänderungen

In einem Vororttermin am 27. April 2021, der pandemiebedingt mit wenigen Vertretern der Konsortialpartner und später als ursprünglich vorgesehen durchgeführt wurde, wurden die identifizierten Gefährdungen am DACHSER-Betriebshof in Langenau überprüft, aktualisiert, ergänzt und mit den Teilnehmern diskutiert.



Fahrstreckensegmente bisher im RA berücksichtigt.

Ggf. Benennung in Fahrwegskorridore

- Fahrweg Rückseite ELW1 = PL c
- Fahrweg Rückseite ESTFP und A1/A3 und C1 = PL c
- Fahrweg Rückseite FLW1 und C1 = PL d
- Fahrweg Bereich E1/E2 und E3 = PL c
- Fahrweg / Übergang Bereich ESFL nach FL = PL = c
- Fahrweg Hallenbereich FL = PL d
- Fahrweg Hallenbereich FLW1 = PL c
- Fahrweg Hallenbereich ESFP = PL c
- Fahrweg Hallenbereich ELW1 = PL c
- Fahrweg für Aufnahme/ Absetzen (WB/ Trailer) Abstellbereich A1 und A3 = PL c
- Fahrweg für Aufnahme/ Absetzen (WB/ Trailer) Abstellbereich C1-4 = PL = c

Abbildung 17: Potenzielle Fahrwege und Einschätzung des maximal zu erwartendem Risiko in den einzelnen Fahrsegmente.

Im weiteren Verlauf des Projekts musste sichergestellt werden, dass die Liste der erfassten Gefährdungen vollständig bleibt und keine potenziellen Gefährdungen übersehen wurden. Insbesondere bei Änderungen an den geplanten Abläufen und in Hinblick auf manuelle Prozesse mussten weitere Anpassungen vorgenommen werden. Hier war vor allem die enge Zusammenarbeit mit dem Logistikunternehmen DACHSER von entscheidendem Vorteil, da dieses seine Prozesse exakt kannte und schnell analysieren konnte, ob die später geplanten risikomindernden Maßnahmen umsetzbar waren und wie die Akzeptanz bei den Mitarbeitern ist.

Im nächsten Schritt wurde für jede identifizierte Gefährdung mittels der Risikobewertungsmethode COHeReNT das assoziierte initiale Risiko bewertet. COHeReNT ist ein speziell für kollaborative Applikationen adaptiertes Risikobewertungsverfahren, basierend auf der in der Prozessindustrie weit verbreiteten Hazard Rating Number Methode (HRN). Details zum verwendeten Verfahren COHeReNT finden sich in der wissenschaftlichen Publikation „COHeReNT: A HRN-based risk assessment method tailored to human-robot collaboration“⁵

Im Vergleich zu etablierten Risikobewertungsverfahren im Maschinenbau zeichnet sich COHeReNT durch eine größere Anzahl von betrachteten Parametern und durch eine feingranularere Bewertung der einzelnen Risikofaktoren aus. Insbesondere werden auch Aspekte der Mensch-Maschinen-Interaktion detailliert betrachtet, wobei sowohl der Kenntnisstand des Arbeiters als auch Möglichkeiten der Vermeidbarkeit eines potenziellen Schadens berücksichtigt werden.

Den Projektpartnern wurde die Methode und das verwendete Softwaretool in einem Workshop am 11. Mai 2021 vorgestellt.

Die Risikobewertung wurde von den jeweils involvierten Partnern im Oktober 2021 einem Review unterzogen und als Grundlage für das weitere Vorgehen akzeptiert. Die vorläufige Risikobewertung wurde im Spätjahr 2021 abgeschlossen und von den beteiligten Projektpartnern als Grundlage für das weitere Projekt akzeptiert.

In der Zwischenzeit gab es weitere Iterationen und Aktualisierungen, somit wurde die Risikobeurteilung einem weiteren Review mit allen Partnern im April 2023 unterzogen. Weitere Änderungen, die sich im Laufe des Projekts ergaben, wurden bis zum Feldtest aktualisiert, dabei lag die Verantwortung bei den jeweiligen Partnern, rechtzeitig Rückmeldungen zu geben, falls es zu Abweichungen kam oder das geplante Ziel der Risikominderung nicht erreicht worden ist.

⁵ (Mollbach & Albert, 2020)

auch die Darstellung notwendiger Schnittstellen zu anderen Teilsystemen. Die entsprechenden Sicherheitsfunktionen sind in den L2-Diagrammen aus AP2 aufgenommen und in L3-Diagrammen weiter spezifiziert.

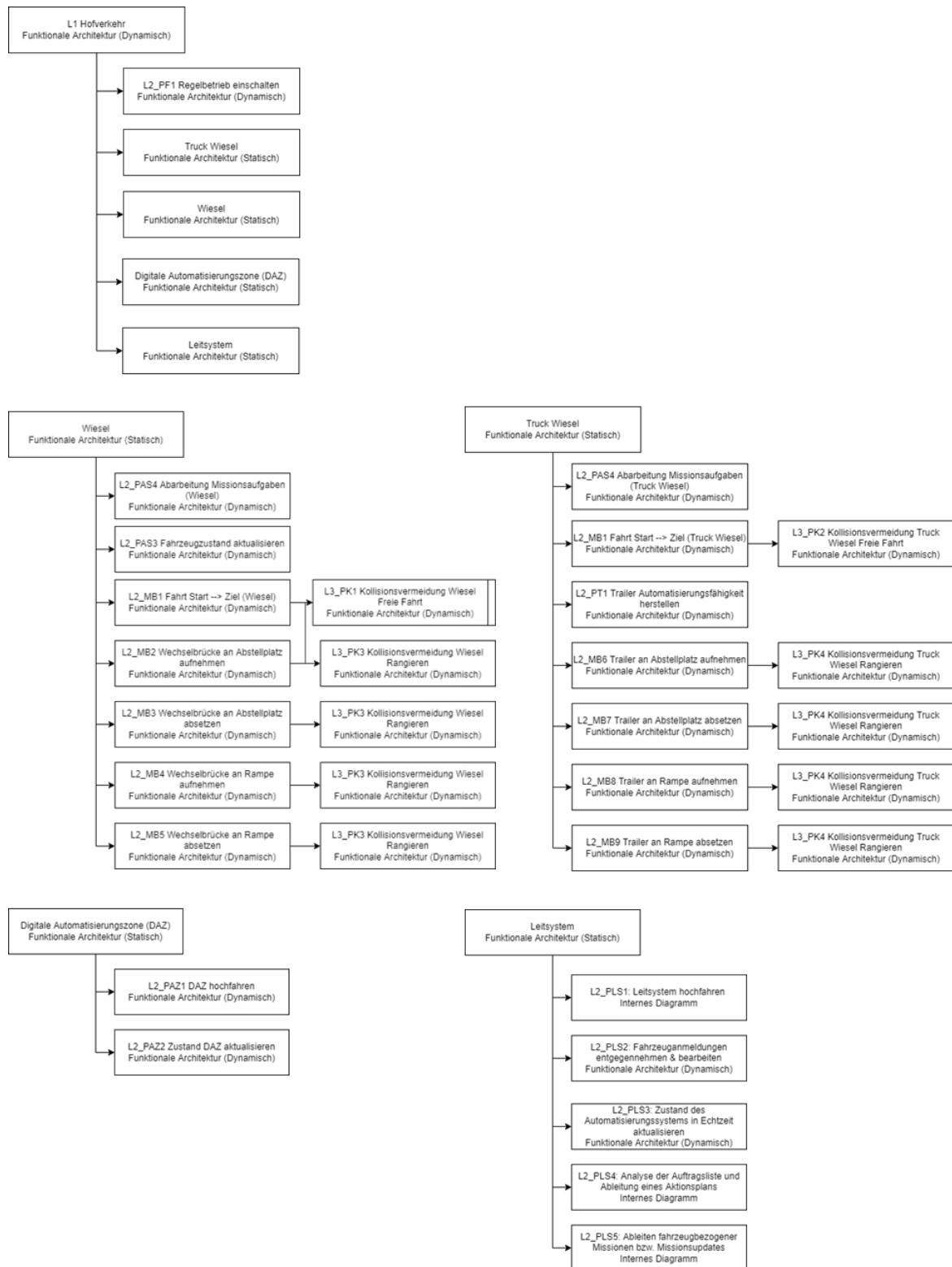


Abbildung 19: Funktionale Dekomposition. Die einzelnen Ebenen entsprechen den L1- bis L3-Ebenen der Modellierungen der funktionalen Architektur in AP 2

Aus aus Gründen der Konsistenz wurde für die identifizierten Sicherheitsfunktionen eine initiale Einstufung der integritätsbezogenen Safety-Requirements in Form von „Performance Level Required“ (PLr), wie sie die ISO 13849-1 vorsieht, vorgenommen. Allerdings ist zu beachten, dass diese Einstufung lediglich einen vorläufigen Charakter hatte und durch das eingesetzte Verfahren COHeReNT und das unterstützende Softwaretool jederzeit ein Wechsel der zu realisierenden Integritätsanforderungen auf Basis anderer normative Referenzen möglich war, wie z. B. der ISO 26262.

Der Beitrag jeder realisierten Sicherheitsfunktion musste im Rahmen des Projekts auf Basis der tatsächlichen Umsetzung und der sicherheitsgerichteten Nachweisführung bewertet werden. Insbesondere die systematische Untersuchung während der Erprobungsphase hatte hier einen wichtigen Input geliefert. Auf eine entsprechende Systematik wurde im Laufe des weiteren Projekts geachtet.

2.1.3.3 Funktionale Dekomposition (AP 3.3)

In einem weiteren Schritt wurden in AP 3.3 die (abstrakten) High-Level-Beschreibungen der Sicherheitsfunktionen weiter dekomponiert, mit dem Ziel, geeignete Sub-Funktionen zu identifizieren, die eine weitere funktionale Verfeinerung erlauben. Konkret umfasst dies eine weitere Spezifikation der übergeordneten Sicherheitsfunktionen, ausgehend von den Elementen der Use-Cases, und die Verknüpfung mit der jeweiligen Automatisierungsfunktion. Eine entsprechend detaillierte Übersichtsdarstellung wurde in der 10. Iteration erstellt.

Ein Überblick über die identifizierten Funktionen sowie die Einbettung in die Automatisierungsfunktion ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Dekompositionsebenen entsprechen dabei den in AP 2 gewählten Abstraktionsebenen L1 bis L3. Aus der funktionalen Dekomposition wird auch die detaillierte Einbettung der (abstrakten) High-Level-Sicherheitsfunktionen mit den Automatisierungsfunktionen deutlich.

- **Kollisionsvermeidung**

Für das Projektziel der Realisierung eines Konzepts für eine Automatisierungszone mit Geschwindigkeiten ≥ 20 km/h sind Funktionen zur Vermeidung von Kollisionen zwischen den automatisierten Fahrzeugen und Hindernissen zentrale Elemente. Da diese Funktionen auch entscheidend zur Reduktion von bewegungsbedingten Risiken durch die Fahrzeuge beitragen, kommt ihnen im Gesamtsicherheitskonzept eine herausgehobene Rolle zu.

Um eine größtmögliche Robustheit und gleichzeitig eine hinreichend sichere Lösung zu gewährleisten, wurde ein zweistufiges Sicherheitskonzept erarbeitet, das einerseits eine an klassischen Sicherheitslösungen orientierte Auswertung von Schutzfeldern im Bereich vor den bewegten Fahrzeugen vorsieht und andererseits eine adaptive Kollisionsvermeidung, welche – gestützt auf Fahrzeug- und Infrastrukturdaten – bewegte Objekte detektiert und mittels Objekttracking Position, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung ermittelt. Dieses Verfahren

ermöglicht die Berechnung einer Time-to-Collision (TTC) durch die Fahrzeuge und eine Anpassung des aktuellen Fahrverhaltens, bevor die Verletzung von Schutzfeldern ein sicherheitsgerichtetes Anhalten der Fahrzeuge erforderlich macht.

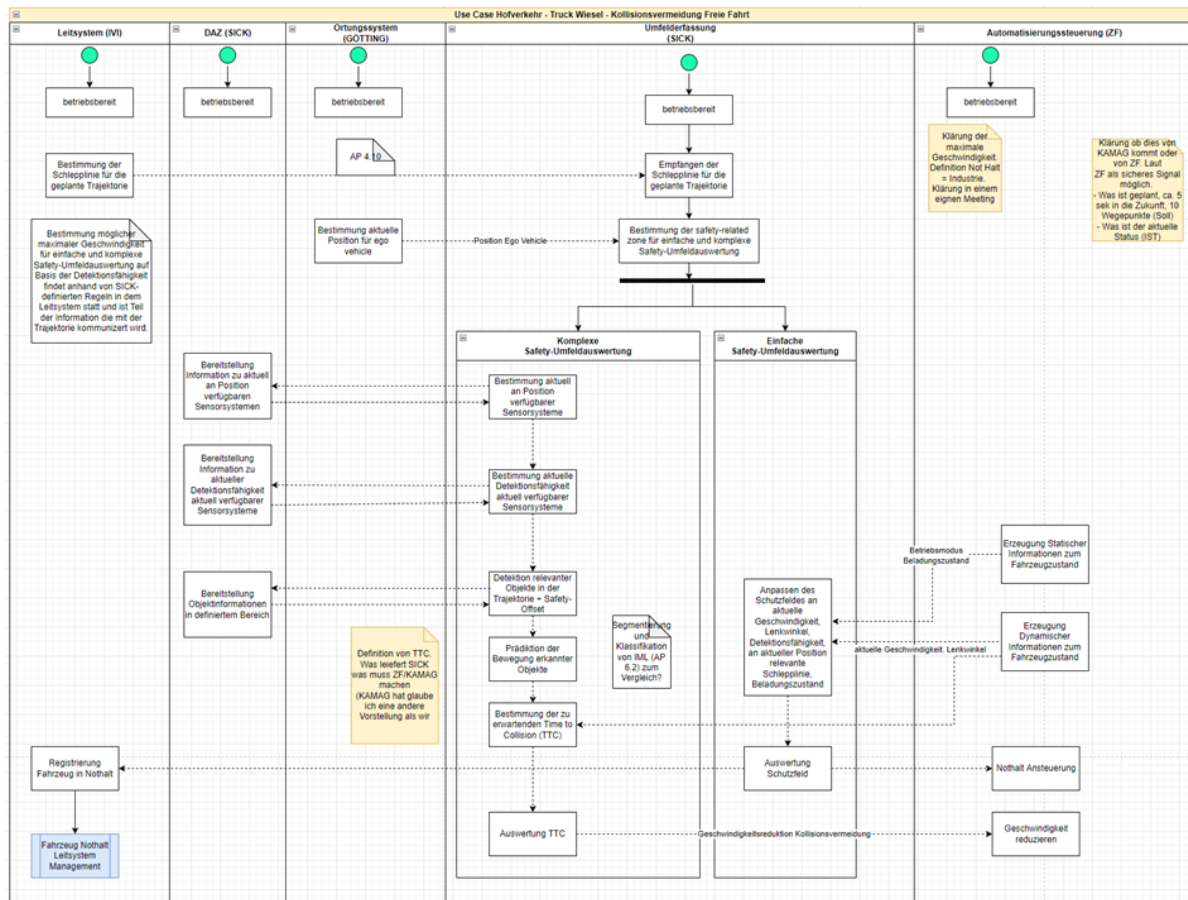


Abbildung 20: Exemplarisches Sequenz-Diagramm für die freie Fahrt (hier für den KAMAG PT)

2.1.3.4 Design und Evaluierung des sicheren Gesamtsystems (AP 3.4)

Abweichend zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung wurden die Inhalte von AP 3.4 in den anderen Teilarbeitspaketen adressiert.

2.1.3.5 Analytischer Nachweis umfelderfassender Sicherheitsfunktionen (AP 3.5)

An diesem AP waren Fraunhofer IML und IVI nicht beteiligt.

2.1.3.6 Ableitung technischer Anforderungen an Subsysteme (AP 3.6)

Zur Anforderungsbeschreibung hatten sich die Partner auf die Abstimmung der Schnittstellen zwischen den Swimlanes aus den Architekturen von AP 2.4 konzentriert. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass alle Schnittstellen zwischen den Partnern definiert und funktional abgestimmt sind. Um die Sicherheitskritikalität einer Anforderung zu definieren, wurde in das Anforderungstemplate das Attribut „Sicherheitsrelevant“ aufgenommen. In Abbildung 21 sieht man z. B. das Signal „Geschwindigkeitsreduktion“ aus dem sicherheitskritischen Modul der Kollisionsvermeidung. Dieses Signal wird durch die Automatisierungssteuerung von ZF CVS empfangen und muss dieses entsprechend als sicherheitskritisch markieren.

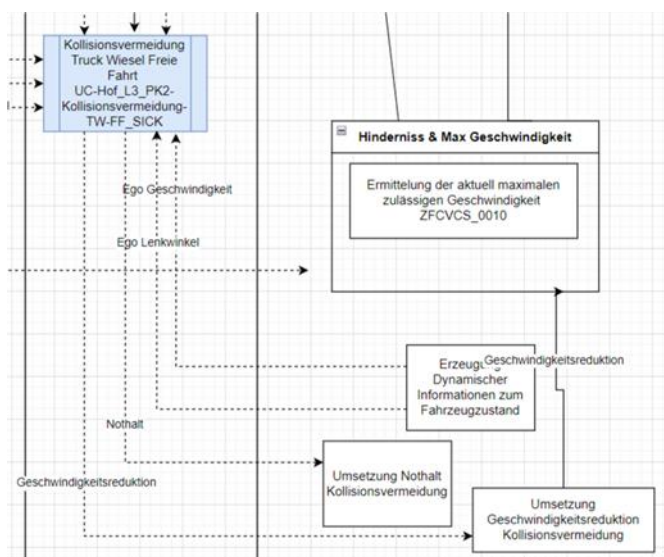


Abbildung 21: Sicherheitskritische Eingangsgrößen

2.1.3.7 Nachweis anwendbarer Richtlinien (AP 3.7)

Zu Beginn des Projektes wurde im AP 3.1 eine Richtlinien- und Normenrecherche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass noch viele Fragen offen waren und dass in Bezug auf die Normen nicht alle Anforderungen, die sich aus dem Projekt ergaben, geklärt werden konnten.

Grundsätzlich stellte sich die Frage, wie das Gesamtsystem bewertet werden kann. Zum einen ist der Verkehr auf dem Betriebsgelände dem des öffentlichen Straßenverkehrs ähnlich, zum anderen ist das interne Warenhandling (innerhalb der Logistikhallen) vergleichbar mit der Industrie. Es wurde deutlich, dass keine exakte Trennung zwischen den Anforderungen (Verordnungen, Richtlinien und Normen) aus dem Automobilbereich und der Industrie möglich ist und dass die Berücksichtigung von Anforderungen beider Bereiche (Automobil und Industrie) eine große Hürde für die Kommerzialisierung darstellen kann. Während der Projektlaufzeit gab es zudem einige Änderungen, die Auswirkungen auf das Projekt und insbesondere auf das AP 3.7 hatten. So veröffentlichte die BG

Fachbereich Holz und Metall die Information - Fachbereich AKTUELL⁶– „Automatisiert fahrende Fahrzeuge in betrieblichen Bereichen“. Außerdem veröffentlichte die EU eine neue Maschinenverordnung⁷ die die bisherige Maschinenrichtlinie zum 20.01.2027 ersetzt und erstmalig für „autonome mobile Maschinen“ Grundanforderungen definiert.

Aus den Erkenntnissen des Projekts und den bevorstehenden Änderungen durch die Maschinenverordnung wurde folgendes Ablaufdiagramm für eine mögliche Umsetzung entwickelt.

⁶ (DGUV - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2022)

⁷ (Europäische Union, 2023)

Letztendlich hat das Projekt SAFE20 aufgezeigt, dass eine generelle Trennung zu überdenken ist, wenn man sich der Regelungen beider Bereiche (Automobil und Industrie) bedient und eine Kombination zulässt.

Mit der neuen Maschinenverordnung (MVO) steht ein rechtlicher Rahmen fest, der dies nicht ausschließt. Durch harmonisierte oder internationale Normen können die Anforderungen der MVO erfüllt werden, man erreicht so die Vermutungswirkung und kann die Konformität bescheinigen. Alternativ können auch die Wege der Einzelprüfung, EU-Baumusterprüfung oder der umfassenden Qualitätssicherung eingeschlagen werden (Siehe § 21 der MVO).

Um Doppelentwicklungen zu verhindern, muss ein rechtlicher Rahmen geschaffen und die Anwendung von Normen aus anderen Bereichen (z. B. Automobil) ermöglicht werden. Die BG hat mit ihrer Publikation aufgezeigt, wie so etwas gehen kann. Es darf aber nicht bei diesen nationalen Regelungen bleiben, sondern es muss mindestens auf europäischer Ebene der Weg dafür bereitet werden.

2.1.3.8 Zusammenfassung AP 3

Die Grundlage für das Sicherheitskonzept während des ganzen Projektes war, wie in der Vorhabenbeschreibung geplant, die Risikobeurteilung, die im Laufe des Projektes immer weiter verfeinert und mit den Rückmeldungen der einzelnen Partner ergänzt wurde. Somit wurde der Iterationsprozess gemäß der ISO 12100 – „Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung“ umgesetzt. Dabei wurden zunächst die kritischen Szenarien aus den in AP 2 ermittelten Anwendungsfällen identifiziert und für diese Gefährdungen das jeweilige initiale Risiko bestimmt (AP 3.1).

Auf Basis dieser initialen Risikobewertung wurden risikomindernde Maßnahmen und sicherheitsgerichtete Funktionen identifiziert (AP 3.2). In AP 3.3 wurden diese Sicherheitsfunktionen durch funktionale Dekomposition in Teil-Funktionen zerlegt und weiter spezifiziert. Die Ergebnisse der APs 3.2 und 3.3 wurden zusammen mit den Automatisierungsfunktionen in die Architekturen und Ablaufdiagramme von AP 2 integriert. Dies ermöglichte eine möglichst nahtlose Integration der sicherheitsgerichteten Funktionen in den Gesamtkontext der Automatisierungsfunktionen.

Die Hinlänglichkeit der Sicherheitsfunktionen wurden in AP 3.5 „Analytischer Nachweis“ untersucht. Hier wurde ein Konzept zur Nachweisführung der Hinlänglichkeit des vorgesehenen mehrstufigen Sicherheitskonzepts zur Kollisionsvermeidung erarbeitet, welches die Grundlage für die daten- und simulationsbasierten Verifikations- und Validierungsschritte im Realisierungsprozess bildete. Statistische Methoden bilden hier, neben klassischen Ansätzen, die Basis der Nachweisführung.

In AP 3.6 wurden abschließend die technischen Anforderungen an die zugrundeliegenden Subsysteme wie Umfelderkennungssysteme oder Bremsen von den Projektpartnern abgeleitet und mit den jeweiligen Partnern besprochen und abgestimmt.

Das AP 3.7 bildete den Abschluss. Hier ging es um einen partnerübergreifenden Nachweis über die Anwendbarkeit von Verordnungen, Richtlinien, Normen usw. Im Laufe des Projekts zeigte sich, dass die zuvor angenommenen Lücken bei den Richtlinien und Normen deutlich kleiner waren als erwartet und dass die neue Maschinenverordnung, die in Europa auf den Weg gebracht worden ist, die Grundanforderungen für „Autonome mobile Maschinen“ beinhaltet. Nichtsdestotrotz müssen noch derzeitige Lücken geschlossen werden.

2.1.4 Sichere Fahrzeugtechnologien (AP 4)

2.1.4.1 Sichere interne Kommunikation (Framework-Implementierung) (AP 4.1)

Es wurde entschieden, dass jedes Fahrzeug intern individuelle Kommunikationslösungen verwenden darf, vorzugsweise auf Basis von ROS1. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich etliche Funktionen von ROS2 noch im experimentellen Zustand befinden. Dabei ist es wichtig, dass sich die kommunizierenden Parteien aus Kompatibilitätsgründen auf eine gemeinsam verwendete ROS-Version einigen. Sicherheitskritische Funktionen sollten nicht mit ROS bedient, sondern auf etablierte Art und Weise gesteuert werden.

Um die externe Kommunikation mit dem Leitstand optimal vorzubereiten, wurde ein kompatibler Treiber (open source) vom Fraunhofer IML auf Basis des VDA 5050 Standards entwickelt. Dieser Treiber wurde den Partnern für erste Tests zur Verfügung gestellt.

Schlussendlich erfolgte die individuelle Implementierung der Kommunikationslösungen auf den drei Fahrzeugen. Für die zukünftige Entwicklung und Standardisierung wird die Verwendung des VDA 5050 Standards empfohlen.

Der VDA 5050 Standard bietet zahlreiche Vorteile, die ihn zu einer attraktiven Wahl für die Kommunikation in automatisierten Fahrzeugen machen. Einer der Hauptvorteile ist die Interoperabilität, die eine nahtlose Kommunikation zwischen verschiedenen Herstellern und Systemen ermöglicht und somit die Integration erleichtert. Die Standardisierung sorgt für eine einheitliche Schnittstelle, was die Entwicklung und Wartung von Systemen vereinfacht. Darüber hinaus ist VDA 5050 äußerst flexibel und unterstützt verschiedene Fahrzeugtypen und Anwendungen.

Ein weiterer Vorteil ist die Zukunftssicherheit des Standards. Dank seiner breiten Akzeptanz und kontinuierlichen Weiterentwicklung bleibt VDA 5050 langfristig relevant. Als Open-Source-Standard fördert er zudem Transparenz und Kollaboration, was die Weiterentwicklung und Fehlerbehebung

beschleunigt. Die einheitliche Kommunikation führt zu einer höheren Effizienz, da der Aufwand für die Anpassung und Integration neuer Systeme reduziert wird. Schließlich trägt VDA 5050 auch zur Sicherheit bei, indem er standardisierte Protokolle und bewährte Verfahren verwendet, die Sicherheitsrisiken minimieren.

Das Fraunhofer IVI nutzte für das Ersatzfahrzeug damit auch weiterhin ROS1. Zusätzlich wurde helyOS um einen VDA 5050 Adapter erweitert.

2.1.4.2 Sichere Notbremse (AP 4.2)

Das Fraunhofer IVI untersuchte gemeinsam mit ZF CVS, ob die Bremsanlage des AutoTruck adaptiert werden kann, sodass eine sichere Notbremsfunktion ermöglicht wird. Die Analyse ergab, dass die Funktionalität nicht auf die vergleichsweise alte Bremsanlage appliziert werden kann. Nach Ausfall des AutoTruck im letzten Drittel der Projektlaufzeit war es nicht mehr möglich, die Betrachtung erneut für den Ersatztruck vorzunehmen.

2.1.4.3 KI-basiertes Reaktionsmodell für unvorhergesehene Hindernisse (AP 4.3)

Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung und Integration eines KI-basierten Reaktionsmodells für die Hofautomatisierung, unter Berücksichtigung lokaler Störungen und Sicherstellung der funktionalen Anbindung an die Fahrzeugsteuerungssysteme, um eine effiziente, sichere und anpassungsfähige Trajektorienführung von automatisierten Fahrzeugen zu ermöglichen.

In diesem AP wurden die Anforderungen für Schnittstellen im Austausch mit Motor AI definiert. Die vorgesehene Integration in den Verteiler-LKW eines KI-basierten Reaktionsmodells für unvorhergesehene Hindernisse auf der Mission durch den assoziierten Partner Motor AI konnte durch die verzögerte Inbetriebnahme des Verteiler-LKW leider nicht umgesetzt werden. Eine entsprechende Anfrage zur Beauftragung wurde von Seiten Motor AI aus technischen und organisatorischen Gründen abgelehnt. Dennoch fanden in diesem Zusammenhang wertvolle Gespräche zwischen Motor AI und Fraunhofer IVI statt, die eine zukünftige Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Reaktionsplanung für Nutzfahrzeuge nahelegen.

2.1.4.4 Funktional sichere, hochperformante Rechnerhardware (AP 4.4)

Ziel des Teilarbeitspaketes war seitens Fraunhofer IVI die Migration der AutoTruck-Software von einem zuvor verwendeten, nicht sicheren Industrie-PC auf die sichere, hochperformante Rechnerhardware, die im Rahmen des Projektes durch STW entwickelt wurde. Nach Umplanung der Inbetriebnahme auf einem anderen LKW innerhalb kurzer Zeit (siehe AP7) und durch Verzögerungen in der Bereitstellung von Funktionsmustern der neuen Rechnerhardware u.a. durch Lieferengpässe

im Zusammenhang mit der COVID19-Pandemie erwies sich eine vollständige Migration der AutoTruck-Software auf die neue Hardware als nicht zielführend. Stattdessen wurde ein etabliertes STW-Steuergerät in Verbindung mit einem Industrie-PC verwendet, die Software jedoch weitgehend für ein Deployment auf der neuen Rechnerhardware vorbereitet und die Entwicklung bei STW durch bilateralen Austausch von Anforderungen intensiv begleitet.

2.1.4.5 Lokale Bahnplanung (AP 4.5)

Das Fraunhofer IVI hat gemeinsam mit dem Partner Götting KG die Schnittstellenabsprachen und Dokumentationen durchgeführt, um die Bahnplanung und Umsetzung dieser für die Rampenanfahrt auf dem Verteiler LKW AutoTruck zu ermöglichen. Die angedachte Integration der lokalen Bahnplanung zur Rampenanfahrt des Partners Götting KG in den AutoTruck wurde abgebrochen, als der AutoTruck irreparabel vom Hersteller an das Fraunhofer IVI zurückgeschickt wurde.

2.1.4.6 Sichere Nahfeldsensorik für LKW (AP 4.6)

An diesem AP waren Fraunhofer IML und IVI nicht beteiligt.

2.1.4.7 Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)

An diesem AP waren Fraunhofer IML und IVI nicht beteiligt.

2.1.4.8 Sicheres automatisches Handling Wechselbrücke (AP 4.8)

An diesem AP waren Fraunhofer IML und IVI nicht beteiligt.

2.1.4.9 Sicheres Handling Verteiler-LKW (AP 4.9)

Das Ziel des Arbeitspakets bestand darin, das komplette Fahrzeugsteuerungssystem des im Vorgängerprojekt AutoTruck⁸ genutzten Verteiler-LKWs zu überarbeiten, um die im AP 3 definierten Sicherheitsanforderungen zu implementieren. Diese Überarbeitung umfasst Anpassungen an der E/E-Architektur, wie sensorische Redundanzen und Redundanzen der physischen Schnittstellen, die Optimierung der Schnittstellenprotokolle durch zusätzliche Alive-Counter und Checksummen, sowie die Aktualisierung der softwarebasierten Steuerungs- und Regelungsfunktionen. Für jede Funktion

⁸ (Fraunhofer IVI, 2019)

des Fahrzeugs wird ein spezifisches Umsetzungskonzept entwickelt, das die Sicherheitsanforderungen unter Berücksichtigung des Projektrahmens integriert.

Die Basis dieses APs bildete der aus dem AutoTruck-Projekt stammende Verteiler-LKW, ein elektrisch angetriebener Verteiler-Lkw, der mit umfangreicher Aktuatorik und Sensorik für das autonome Fahren ausgestattet ist (u. a. Drive-by-Wire-Schnittstelle, Steer-by-Wire-Aktuator und -Schnittstelle, laserbasiertes Umgebungserfassungssystem, Sicherheitslaserscanner). Basierend auf dieser Hardware-Ausstattung wurden erste Funktionen konzipiert und implementiert. Im Vorhaben SAFE20 wurden diese Funktionen weiterentwickelt sowie neue Funktionen insbesondere mit Blick auf die Sicherheit ergänzt.

Zur Bearbeitung dieses APs wurden die im AutoTruck zum ersten Mal eingesetzten Technologien für autonomes Fahren analysiert und einem Reviewprozess unterzogen. Aus den Entscheidungen, z. B. für die Interne Kommunikation aus AP 4.1, folgte eine Architektur auf zwei Ebenen, einerseits einer performanten, sicherheitsgerichteten Fahrzeugsteuerung mit einem Echtzeit-Betriebssystem und andererseits einer Automatisierungssteuerung auf Linux-Basis mit dem ROS1-Framework. Die Kommunikation zwischen diesen Steuerungen wurde mittels CAN-Bus realisiert.

Die Fahrzeugsteuerung ist für die Einbindung der Fahrzeugkomponenten zuständig, unter anderem des Antriebsstrangs und der Lenkung. Die Fahrzeugsteuergerätesoftware wurde vollständig überarbeitet, mit einem neuen Zustandsautomaten und der Schnittstelle zur Automatisierungssteuerung.

Durch die Betrachtung des Sicherheitsfahrers als Teil des Automatisierungssystems ist es zwingend notwendig, diesen in dem Prozessablauf einzubinden. Daraus entstand ein Konzept und Prototyp für ein Human-Machine-Interface (HMI) für die Fahrerkabine. Durch dieses HMI kennt der Sicherheitsfahrer den Systemzustand und kann das Fahrzeugverhalten beurteilen sowie den Ablauf im Automatisierungsprozess ermitteln und Freigaben für ein sicheres Automatisieren erteilen und widerrufen.

Die aus den Reviewprozess stammenden Erkenntnisse zeigten, dass die Neuentwicklung der Software auf der Automatisierungssteuerung sinnvoll ist. Dies ist nicht nur dadurch bedingt, dass die Automatisierungslogik angepasst und die Trajektorienfolgeregelung neu erstellt werden mussten, es wurden auch die Schnittstellen in Richtung Fahrzeugsteuerung und helyOS-Leitstand neugestaltet.

Für die Anbindung an den helyOS-Leitstand wurde auf das am Fraunhofer IVI neu entwickelte helyOS Agent SDK aufgebaut, wofür auch Komponenten für die Integration in das ROS1-Framework entwickelt wurden. Das helyOS Agent SDK dient zur Kommunikation mit dem Leitstand, wird als Developer Tool angeboten und ist als Open Source Softwarepaket veröffentlicht worden.

Für die Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung wurde die Schnittstelle optimiert, neue CAN-Botschaften definiert und auf gleichzeitig das Nötigste reduziert. Dadurch konnten das Handling und die Robustheit erhöht werden.

Hardwareseitig wurde ein neues GNSS-Modul angeschafft. Das System ist als Zweiantennensystem gestaltet und liefert damit die Fahrzeugorientierung ab Start. Für die verbesserte Positionierung hat dieses GNSS ein inertiales Navigationssystem und nutzt Korrekturdaten aus einem SAPOS-Dienst.

Auf der Automatisierungssteuerung werden die GNSS-Daten zusammen mit der Fahrzeugodometrie zu einer stabilen lokalen Pose fusioniert, welche als Grundlage für die Folgeregelung dient.

Für den Verteiler-LKW wurde ein neues Regelungskonzept entwickelt und umgesetzt, das die Anforderungen im SAFE20-Kontext erfüllt. Resultat ist eine Pfadfolgeregelung basierend auf Spline-Abschnitten, mit einstellbaren zulässigen Toleranzen für die Pfadfolgegüte, und dadurch ein sicheres und stetiges Lenken.

Das Fraunhofer IVI konnte durch die Vorerfahrungen aus dem AutoTruck-Projekt und dem Austausch mit den Projektpartnern auf unvorhergesehene technische Defekte bei dem Verteiler-LKW AutoTruck effizient reagieren und kurzfristig auf ein Ersatzfahrzeug umstellen. Dadurch konnten allerdings nicht alle Integrationen vorgenommen werden.

2.1.4.10 Hochverfügbare Ortung mittels Fusionssystem (AP 4.10)

Für die Applizierung der hochverfügbaren Ortung im AutoTruck fanden mehrere Austauschtreffen mit den Projektpartnern statt, die die Schnittstellendefinition und Sensorpositionierung am AutoTruck umfasste. Durch Ausfall des AutoTruck und die Umstellung auf den Ersatz-Verteiler-LKW wurde bei diesem eine vereinfachte Lokalisierungslösung aufgesetzt, welche die GNSS-Daten zusammen mit der Fahrzeugodometrie zu einer stabilen lokalen Pose fusioniert.

2.1.4.11 Schnittstelle autonomes Fahren (AP 4.11)

An diesem AP waren Fraunhofer IML und IVI nicht beteiligt.

2.1.4.12 Zusammenfassung AP 4

Die zu entwickelnden Teilsysteme wurden von den Partnern in großen Teilen entsprechend den Anforderungen aus AP 3 umgesetzt und standen zum geplanten Integrationszeitpunkt mit dem gewünschten Reifegrad von mindestens TRL 6 zur Verfügung.

Die Verifizierung fand überwiegend bei den jeweiligen Partnern auf eigenen Versuchsträgern oder auf bereitgestellten Fahrzeugen des Partners KAMAG statt. So konnte das Risiko des Auftretens von Schwierigkeiten bei der Integration der Teilsysteme in das Gesamtsystem minimiert werden.

Leider konnten die Arbeiten am Verteilerfahrzeug AutoTruck aufgrund eines nicht behebbaren Fehlers nicht wie erwartet ausgeführt werden. Der Partner Fraunhofer IVI konnte jedoch für einige der geplanten Arbeiten ein ähnliches Ersatzfahrzeug zur Verfügung stellen.

Bezüglich der internen Kommunikation wurde in AP 4.1. die standardisierte VDA 5050 empfohlen, die Implementation hätte jedoch den Zeitrahmen deutlich gesprengt, so dass hier nur eine Teilintegration erfolgte, um die Funktion im realen Umfeld erproben zu können.

Das KI-gestützte Reaktionsmodell aus AP 4.3. konnte leider durch die verzögerte Inbetriebnahme des Ersatz-Verteiler-LKWs nicht umgesetzt werden. Die zu beauftragende MOTOR AI lehnte den Auftrag aus zeitlichen und technischen Gründen ab.

Die zeitaufwendigsten Arbeiten an Fahrzeugkomponenten für das automatisierte Fahren zeigten sehr gute Ergebnisse und wurden durch häufige Testschleifen sukzessive verbessert.

Die Arbeiten an der Nahfeldererkennung mittels Bluetooth LE zeigten sowohl im Labor als auch auf der hauseigenen ZF Testbahn Versuchsrampe sehr gute Ergebnisse.

2.1.5 Sichere Infrastrukturtechnologien (AP 5)

Das Gesamtziel des Vorhabens – mit 20 km/h sicher auf Betriebshöfen vollautomatisch im Mischbetrieb zu fahren (Level 5) – lässt sich nach Auffassung der am Vorhaben beteiligten Partner derzeit nicht allein mit Fahrzeugsensorik erreichen.

Die Herausforderung für einen sicheren Regelbetrieb besteht primär darin, gefährliche Situationen rechtzeitig und zuverlässig zu erkennen und über geeignete Gegenmaßnahmen insbesondere Personenschäden zu vermeiden. Der Schlüssel dazu ist eine verlässliche Objekterkennung und -klassifikation.

Verfügbare fahrzeugseitige Sensorsysteme sind derzeit bis max. 10 km/h unter guten Bedingungen und entsprechend schnellen, nachgelagerten Notbremsmechanismen personensicher. Für die an sich vielversprechenden und vielfach verwendeten lernbasierten Auswertelgorithmen zur Objekterkennung und -klassifizierung lässt sich derzeit kein Sicherheitsnachweis erbringen. Ob letzteres prinzipiell gelingen kann, ist weiter offen und Gegenstand intensiver Forschung. Ohne einen Sicherheitsnachweis sind diese zwar für Demonstrationen nicht jedoch für den Regelbetrieb verwendbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass derzeit weder die Industrie noch die Forschung geeignete Lösungen für das sichere autonome Fahren auf Betriebshöfen mit 20 km/h offengelegt haben.

Ziel des AP 5 ist es daher, integrative Technologien zu entwickeln, über die sich die Objekterkennung und -klassifikation von typischen Objekten in Automatisierungszonen sicher und zuverlässig

darstellen lässt, um darauf aufbauend einen sicheren Betrieb autonomer Fahrzeuge in Automatisierungszonen gewährleisten zu können.

Hierzu werden wesentliche Bindeglieder erarbeitet, um die Ergebnisse von AP 6 (Fusion der Fahrzeug- und Infrastrukturdaten, DAZ) im Gesamtsystemkontext – und damit im Sinne des Kernziels des Vorhabens – nutzbar zu machen. Zu diesen Binderglieder zählen:

- eine kooperative Manöverplanung (AP 5.1),
- eine sichere Kommunikation und Vernetzung der Infrastruktur (AP 5.2)
- ein Fahrzeugmanagement-System für Missionsplanung und -überwachung (AP 5.3) und
- eine Ortung / Lokalisierung von Wechselbrücken, Semi-Trailern, Rampen etc. (AP 5.4).

2.1.5.1 Kooperative Manöverplanung über Live-Karte (AP 5.1)

Ziel des Arbeitspakets 5.1 war, die Entwicklung und Implementierung von integrativen Technologien zur sicheren und zuverlässigen kooperativen Manöverplanung auf Grundlage der DAZ-Kartendaten. Dies sollte die Basis für einen sicheren Betrieb autonomer Fahrzeuge ermöglichen. Dazu gehörten die Anpassung und Verbesserung der Pfadberechnung, die Entwicklung kooperativer Planungsmethoden für kollisionsfreie Trajektorien sowie die Konzeption eines effizienten Störungsmanagements, das umfassende Neuplanungen bei Störungen vermeidet und die Auswirkungen von Störungen lokal begrenzt. Weiterhin war die Entwicklung einer Simulationsumgebung vorgesehen, um die Praktikabilität und Skalierbarkeit der Lösungen zu bewerten. Abschließend sollten die entwickelten Trajektorien auf das AutoTruck-System übertragen und die entsprechenden Regler implementiert und getestet werden, um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen und einen reibungslosen Betrieb zu garantieren.

Im Rahmen von AP 5.1 wurde intensiv an der Entwicklung und Verbesserung der kooperativen Manöverplanung gearbeitet. Mit der vollautomatischen Pfadberechnung TruckTrix-Path als Basis, erfolgte die Neuentwicklung, Integration und Optimierung des TruckTrix-City Routennetz-Pfadplaners. Die Live-Karte (DAZ), welche aktualisierte Daten über Hindernisse liefert, und die nahtlose Integration dieser Daten über den helyOS Leitstand in die Pfadplanung, ermöglichten zusammen mit dem TruckTrix-City Pfadplaner eine adaptive und flexible Routenplanung.

Zur Erhöhung der Entwicklungsgeschwindigkeit sowohl bei der kooperativen Manöverplanung, dem Störungshandling, als auch beim Leitsystem, wurde eine Simulationsumgebung konzipiert, die das Leitsystem, die Manöverplanung, simulierte Fahrzeuge und den DACHSER-Betriebshof umfasst. Das Besondere des Konzepts ist, dass beliebig viele gekapselt simulierte Fahrzeuge erzeugt werden können. Diese verhalten sich wie reale Fahrzeuge asynchron, sodass erstmals auch der Einfluss von Rechenzeiten und Kommunikationskanälen untersucht werden kann. Technisch ist das durch autarke Docker-Container gelöst, in denen die gesamte Software zur Fahrzeugautomatisierung mit helyOS

ausgerollt wird. Regelstrecken können durch Simulationsmodelle ersetzt werden, die über sogenannte Functional Mock-Up Units (FMUs) modular und austauschbar eingebunden werden. So wurde das Fahrverhalten eines Sattelzuges kinematisch in (Open-)Modelica modelliert und verschiedene Ansätze zur Trajektorienfolgeregelung simulativ erprobt. Damit sich die autarken Simulationsfahrzeuge in einer gemeinsamen simulierten Umgebung gegenseitig „sehen“ und miteinander interagieren können, werden die Positionen aller Fahrzeuge in einem gemeinsamen Umgebungsmodell zusammengeführt. Hierfür nutzt das Konzept den universellen und frei zugänglichen Robotersimulator Gazebo. Durch diesen Ansatz ist es u. a. möglich, simulierte Sensordaten (z. B. von Laser-Scannern) an die Fahrzeuge zurückzuschicken, sodass die simulierten Fahrzeuge ihre Umgebung und andere Fahrzeuge „sehen“ können.

Ein Blockschaltbild der Simulationsumgebung zeigt Abbildung 23. Ein Beispiel zweier simulierter Fahrzeuge auf dem ebenfalls simulierten DACHSER-Betriebshof zeigt Abbildung 24. Das Konzept der verteilten Simulationsumgebung wurde erfolgreich in zwei wissenschaftlichen Konferenzbeiträgen^{9 10} publiziert.

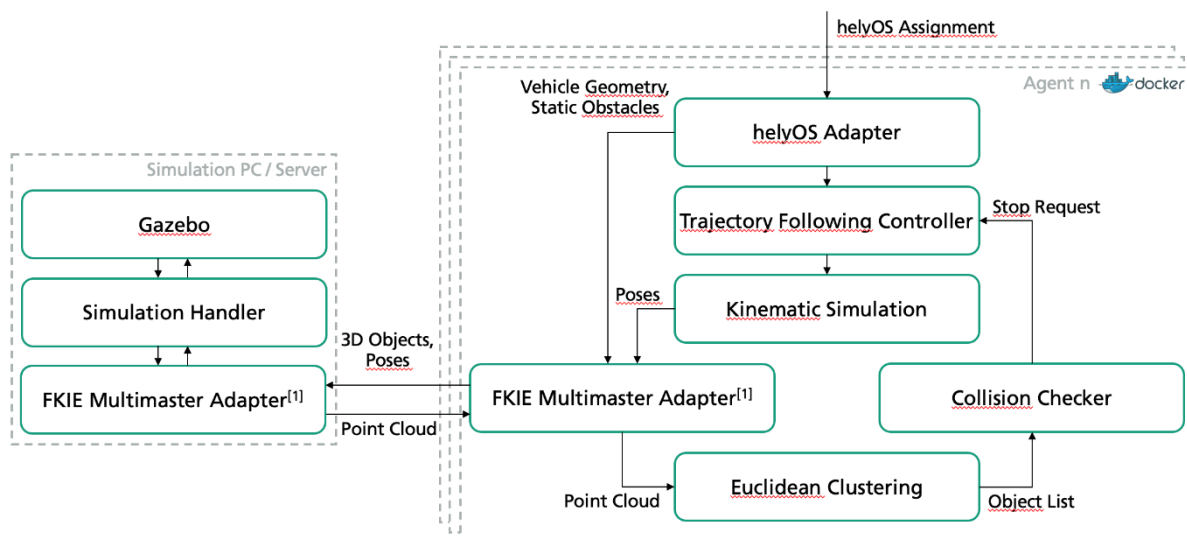


Abbildung 23: Konzept der Simulationsumgebung mit n jeweils in einem Docker-Container simulierten Agenten und dem gemeinsamen Gazebo-Umgebungsmodell des DACHSER-Betriebshofs.

⁹ Prioritized Planning for Spatiotemporal Trajectory Coordination of Articulated Vehicles and Co-Simulation with ROS, Docker and Gazebo (Keppler, Kramer, Koch, Wagner, & Janschek, Jan. 2022)

¹⁰ Verteilte Simulationsumgebung zur Erprobung koordinierter Fahrmanöver automatisierter Fahrzeuge (Kramer, Keppler, & Janschek, Mar. 2022)

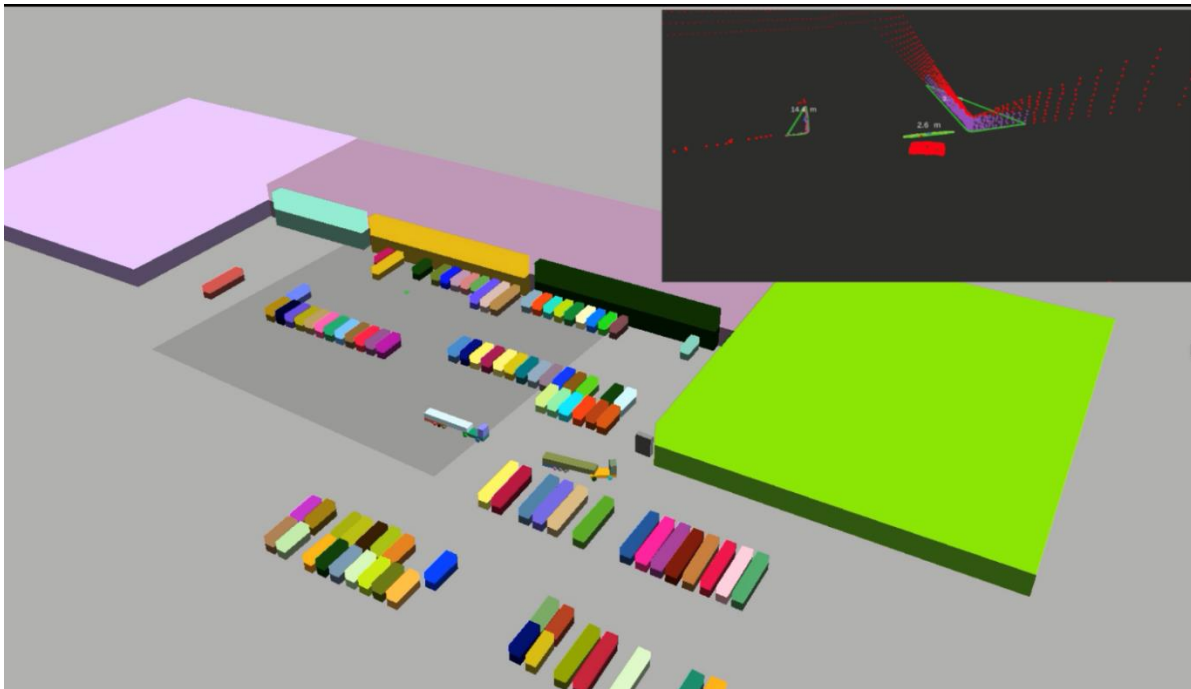


Abbildung 24: Simulierter Betriebshof mit zwei ebenfalls simulierten Fahrzeugen, die Laser-Scandaten aus deren Umgebung erhalten

In AP 5.1 sollte die Pfadplanung mit kooperativen Planungsmethoden erweitert werden. Dafür wurde ein Ansatz zur Koordination mehrerer Fahrzeuge, im Kontext der mobilen Robotik auch „Agenten“ genannt, entwickelt und in ein Planungstool „OrchesTruck“ integriert, welches als Microservice in das helyOS-Leitstandssystem eingebunden werden kann.

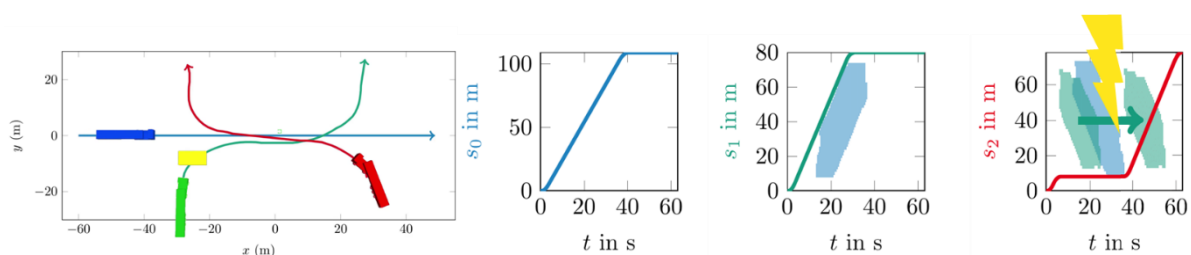


Abbildung 25: Beispielszenario, errechnete Geschwindigkeitsprofile (blau, grün, rot) und Störung (gelb)

Abbildung 25 zeigt ein Beispielszenario, für welches koordinierte Geschwindigkeitsprofile mit OrchesTruck geplant wurden. Während der Projektlaufzeit wurden die Verfahren zur Berechnung der Geschwindigkeitsprofile erheblich verbessert und ein neuartiger Ansatz zur Nutzung eines genetischen Algorithmus auf einer wissenschaftlichen Konferenz veröffentlicht. Das spatiotemporale Tracking ermöglicht eine verbesserte Durchsatzrate an Kreuzungspunkten um bis zu 30 % im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren.

Da im Mischbetrieb mit nicht-automatisierten Fahrzeugen und Menschen Störungen zu erwarten sind, die zu einer zeitlichen Verzögerung gegenüber den aufeinander abgestimmten

Geschwindigkeitsprofilen und damit zu Verklemmungen (engl. Deadlock) führen können, lag ein weiterer inhaltlicher Schwerpunkt auf der Entwicklung robuster Verfahren zum Störungshandling. Im Rahmen einer Diplomarbeit am Fraunhofer IVI wurde der bestehende Störungshandlings-Algorithmus „RMTRACK“ einer tschechischen Forschergruppe um Čáp et. al¹¹ adaptiert und zu „RMTRUCK“ erweitert. Statt kreisförmiger Roboter mit unendlich großer Beschleunigung werden dadurch auch komplexe Fahrzeugkombinationen mit realistischen Beschleunigungswerten unterstützt. Basierend auf den konflikt- und deadlockfrei aufeinander abgestimmten Trajektorien aus OrchesTruck, werden zunächst leitstandsseitig sogenannte Koordinationsräume für jedes Fahrzeugpaar berechnet, in denen die zurückgelegte Distanz der jeweiligen Fahrzeuge übereinander aufgetragen ist. Distanzwerte, die bei gleichzeitiger Belegung zu einer Kollision führen würden, werden, wie in Abbildung 26 in dunkelgrün dargestellt, zu einem Konfliktbereich zusammengefasst.

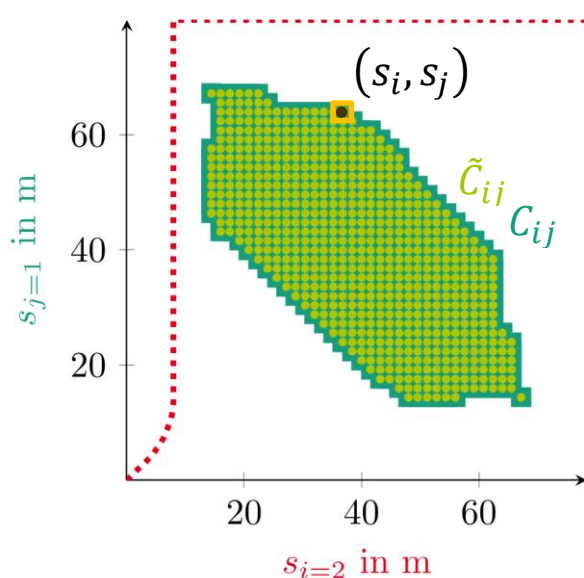


Abbildung 26: RMTRUCK Koordinationsraum mit originaler Trajektorienabstimmung zwischen Agent 1 und Agent 2 (rot gestrichelt) und Konfliktbereich (dunkelgrün)

Zusammen mit dem Auftrag, eine bestimmte Trajektorie abzufahren, erhält jedes Fahrzeug die Koordinationsräume für alle anderen geplanten Fahrzeugbewegungen vom Leitstand. Durch Überwachung der Fortschritte aller Agenten entlang ihrer Trajektorien wird die Einhaltung der geplanten Abstimmung auch bei zeitlichen Abweichungen nachweisbar garantiert, indem zu jedem Zeitschritt für jeden Agenten eine zulässige Maximalgeschwindigkeit errechnet wird, innerhalb derer das jeweilige Fahrzeug zum Stehen kommen kann, ohne einen Konfliktbereich zu betreten. Der Algorithmus wurde erfolgreich in der zuvor entwickelten verteilten Simulationsumgebung in Betrieb genommen und auf verschiedenen Szenarien getestet. Ein Beispiel ist in Abbildung 27 dargestellt. Mittels zufällig generierter Szenarien wurden statistisch signifikante Daten zur Evaluation des

¹¹ (Čáp, Gregoire, & Frazzoli, Oct. 2016)

Algorithmus gegenüber dem Stand der Technik erhoben, die nun in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung genutzt werden.

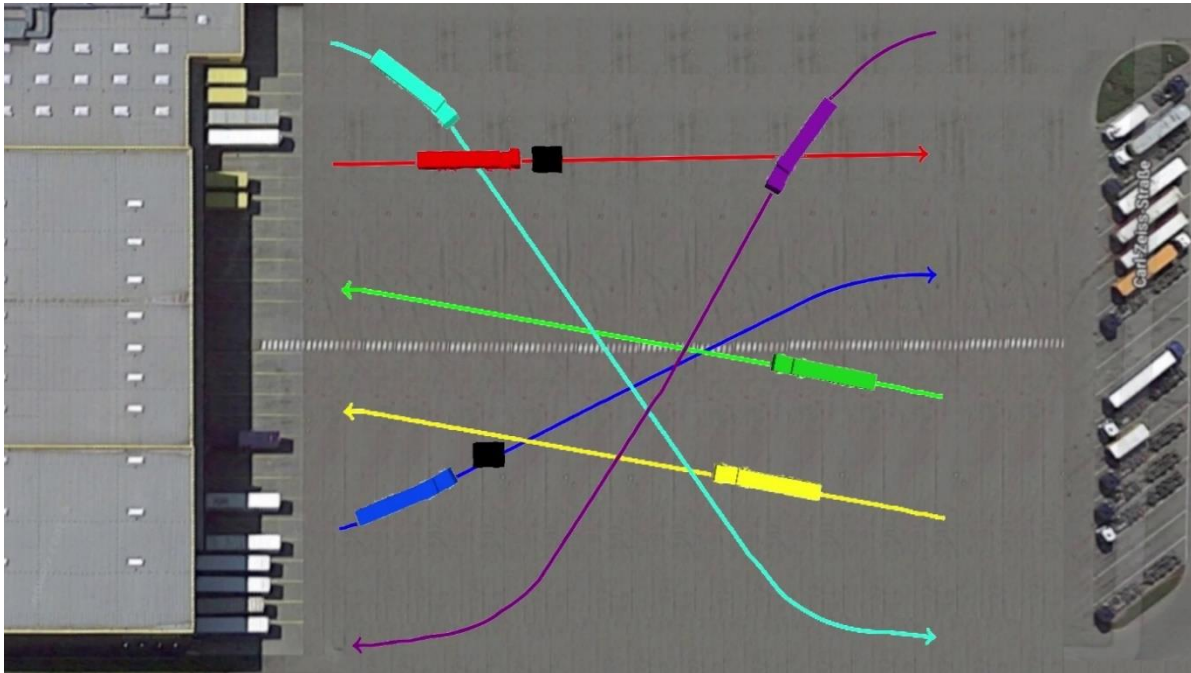


Abbildung 27: Beispielszenario mit sechs Agenten und zufällig eingestreuten Störungen

Die kooperative Manöverplanung wird weiterhin ein zentraler Forschungsbereich bleiben, um die Effizienz und Sicherheit automatisierter Transportsysteme zu erhöhen.

Im vorangegangenen AutoTruck-Projekt wurde deutlich, dass es bei der Nutzung des am IVI entwickelten TruckTrix-Path-Algorithmus in manchen Szenarien zu längeren Planungszeiten kommen kann und die gelieferten kürzesten Pfade nicht immer intuitiv mit den Wegenetzen eines Betriebshofs übereinstimmen, bzw. auch deren Befahrbarkeit für ein komplexes Fahrzeug nicht immer gegeben ist. Basierend auf den TruckTrix-Path-Erkenntnissen wurde im Projekt SAFE20 ein neuartiger Planer konzipiert und eine erste Entwicklung des Pfadplaners TruckTrix-City erreicht. Der TruckTrix-City Pfadplaner wurde als Schlüsselkomponente für das Projekt entwickelt, um effiziente und sichere Fahrwege für die Projektfahrzeuge zu bieten.

Basierend auf einem Netz feststehender Pfadsegmente auf dem Yard, der sogenannten City-Map, sucht der TruckTrix-City-Algorithmus mit Hilfe des bewährten Dijkstra-Algorithmus einen kollisionsfreien, kinematisch fahrbaren Pfad. Der Pfadplaner berücksichtigt spezifisch die Fahrzeugkinematik und ermöglicht die präzise Vermeidung von Kollisionen. Dies ist besonders wichtig für den Betrieb in komplexen Umgebungen.

Die City-Map besteht aus den Pfaden, die aufgenommen oder vorab berechnet werden können, und verfügt über eine Connectivity-Matrix, die entsprechend der Fahrzeug-Kinematik die Verbindungen zwischen den Pfaden darstellt. Abbildung 28 zeigt die Skizze für ein sehr vereinfachtes City-Map-Netzwerk. Es können auch mehrere parallele bzw. nebenliegende Pfade gespeichert sein, um für

unterschiedliche Fahrzeug-Geometrien passende Durchfahrsmöglichkeiten in der City-Map zu generieren.



Abbildung 28: Skizze für eine einfache City-Map zur Suche nach dem kürzesten Pfad auf einem Netzwerk der gespeicherten Pfade. Die Suche erfolgt mit der Hilfe des TruckTrix-City Pfadplaners. Alle Pfade haben eine vorgegebene Richtung und können über eine Liste erlaubter Fahrzeuge verfügen.

Ein besonderer Fokus während der Entwicklung lag auf der präzisen Berechnung von nahtlosen und fahrzeugfreundlichen Übergängen zwischen den Start- oder Zielpositionen des Fahrzeugs und dem nächsten gespeicherten Pfadsegment.

Der Pfadplaner wurde umfassend mit den Simulatoren sowie den Projekt-Fahrzeugen getestet. Dabei wurden seine Fähigkeiten, wie die zügige Berechnung von Fahrwegen, bestätigt.

Zur Vorbereitung der Inbetriebnahme des Verteiler-LKWs am Fraunhofer IVI wurde der TruckTrix-City-Algorithmus auch dafür genutzt, um Pfadsegmente auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI zu generieren.

Um den TruckTrix-City Pfadplaner vollständig nutzen zu können, benötigt man drei Karten-Layer: einen mit dem Pfadnetz, einen mit Hindernissen und einen weiteren mit Targets. Der letzte Layer repräsentiert die Positionen und weitere notwendige Merkmale von Rampen und Abstellplätzen. Alle drei Layer sind als separate helyOS-Karten mit sogenannten Map-Objekten in der helyOS-Datenbank gespeichert und werden für die Pfadberechnung an den TruckTrix-City-Microservice weitergeleitet. Für den DACHSER-Betriebshof in Langenau wurde die helyOS-Karte auf Grundlage von Hindernisdaten von DACHSER, Rampendaten von KAMAG sowie Messdaten von DACHSER, IVI und ZF mithilfe des QGIS-Programms erstellt.

Die DAZ-Live-Karte spielt eine fundamentale Rolle bei der Bereitstellung von Echtzeit-Daten von Hindernissen. Diese Daten werden vom Projektpartner SICK bereitgestellt und ermöglichen eine adaptive und flexible Routenplanung. Die Live-Karte trägt somit maßgeblich zur dynamischen Anpassung der Fahrzeugrouten bei, um auf Veränderungen im operativen Umfeld reagieren zu können. Für die Integration der DAZ wurde im helyOS-Backend die GraphQL-Schnittstelle angepasst und SICK bereitgestellt.

Die Anbindung der DAZ an den Leitstand wurde erfolgreich in Betrieb genommen, wodurch neu erkannte Hindernisse aus den Überwachungsbereichen an den Leitstand gemeldet werden können. Die Hinderniskarte wird bei jeder Neuplanung automatisch aktualisiert. Sobald semi-statische Hindernisse in der semantischen Karte des Leitstands eingetragen werden, finden diese bei der nächsten Pfadplanung Berücksichtigung. Dies ermöglicht eine adaptive und reaktive Routenführung.

Die Integration dieser Technologien in den helyOS-Leitstand ermöglicht eine effiziente und sichere Koordination von Fahrzeugen, was die Grundlage für den erfolgreichen Einsatz in der Logistik und anderen Bereichen bildet.

Aufbauend auf den Arbeiten aus AP 4 wurde für den Verteiler-LKW des Fraunhofer IVI auch ein Regler für die Längs- und Querführung entwickelt, der die Informationen der durch den Leitstand geplanten Trajektorien nutzt. Ziel ist hierbei, dass das Fahrzeug die Trajektorien eigensicher und selbstständig befahren kann.

Die von TruckTrix-City geplanten Pfade werden als helyOS-Assignment an das Fahrzeug übertragen. Dabei sind die Pfade als krümmungsstetige Splines enthalten, damit die Krümmungsinformation für den Regler zur Verfügung steht, siehe Abbildung 29. Weiterhin sind Informationen zur Geschwindigkeit, wie auch Bereiche mit unterschiedlichen erlaubten Maximalgeschwindigkeiten sowie Punkte, an denen während der Fahrt kurz gestoppt werden soll, enthalten.

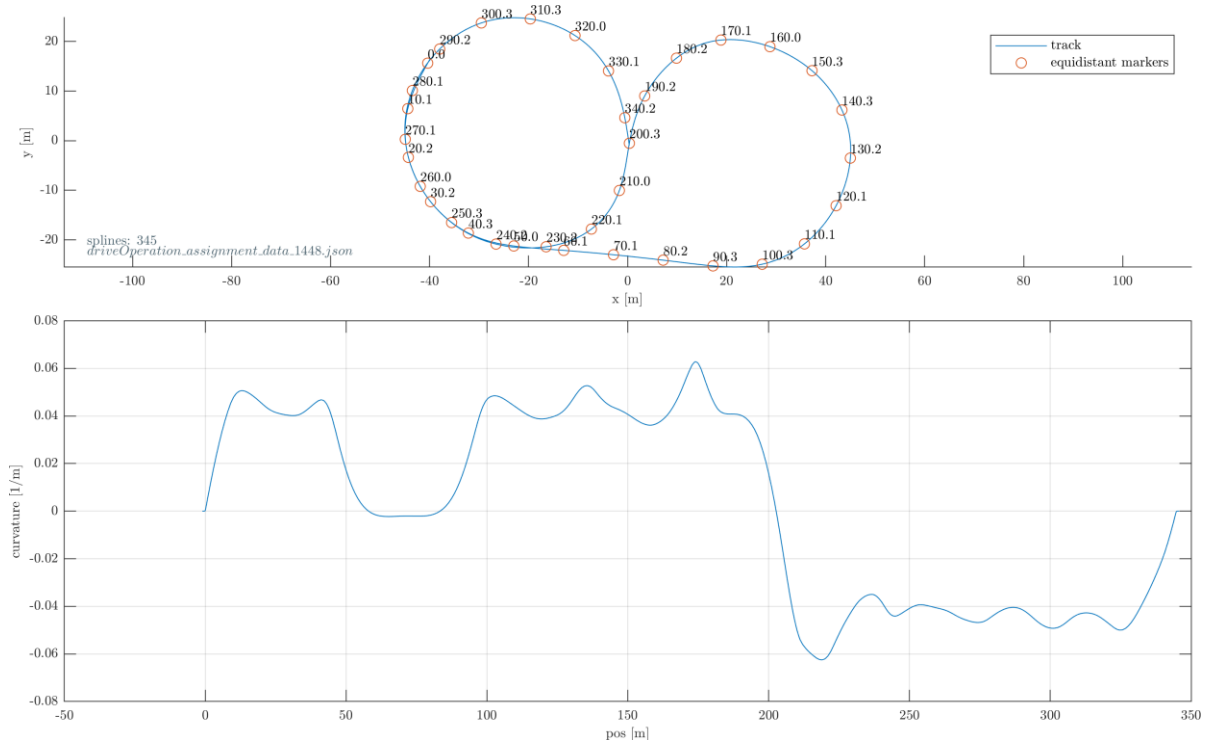


Abbildung 29: Beispielpfad auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI.

Die sichere Fahrzeugtechnologie aus AP 4 des Verteiler-LKW des Fraunhofer IVI stellt folgende Eingangsinformationen für den Regler bereit:

- Position

- Orientierung
- Geschwindigkeit
- Gierrate
- Querbearschleunigung

Die Ansteuerung des Fahrzeugs erfolgt über folgende Schnittstellen:

- Sollgeschwindigkeit
 - Die Steuerung des elektrischen Antriebsstrangs des Fahrzeugs übernimmt die Regelung der Sollgeschwindigkeit und berechnet selbstständig das notwendige elektrische Drehmoment zum Antreiben bzw. Bremsen.
 - Ein Zugriff auf die mechanische Betriebsbremse war nicht möglich.
- Lenkwinkel
 - Das verbaute elektronische Lenksystem der Firma Paravan setzt die Lenkwinkel entsprechend um.

Eine sicherere Umfeldüberwachung (AP 6) stand für den Verteiler-LKW, der den ursprünglich eingeplanten AutoTruck ersetzte, aus verschiedenen Gründen nicht zur Verfügung. Daher war es nicht möglich, das eigensichere Abfahren umzusetzen. Die Softwarestruktur des Reglers ist jedoch entsprechend vorbereitet, sodass es später ergänzt werden kann.

Die Regelungsaufgabe wird mit zwei separaten Reglern für die Längs- und Querführung erfüllt. Dabei ermittelt der Querregler aus der aktuellen Position des Fahrzeugs die zugehörige Sollposition entlang des Pfades. Aus dieser werden für den Längsregler relevante Informationen, wie z. B. die aktuell zulässige Maximalgeschwindigkeit abgeleitet. Die Regler werden im Folgenden separat beschrieben.

Beide Regler wurden in der Programmiersprache C++ umgesetzt. Das ermöglicht es, die gleiche Implementierung in verschiedene Adaptionsschichten einzubetten. Somit konnten frühzeitig Tests in Simulation mit Matlab/Simulink durchgeführt und anschließend der gleiche Quellcode mit einer anderen Adaptionsschicht als ROS-Node auf dem realen Fahrzeug eingesetzt werden. Gemeinsam mit den implementierten Unit-Tests kann so bereits ohne zur Verfügung stehendes Fahrzeug die Funktion der Regler zu großen Teilen getestet werden. Das reduziert zum einen die Projektrisiken der schlussendlichen Inbetriebnahme. Zum anderen sichert es die korrekte Funktionsweise ab, sodass der Regler später im Fahrzeug zuverlässig funktioniert.

Die Aufgabe der Querregelung besteht aus zwei Unteraufgaben. Zunächst muss aus der aktuellen Fahrzeugposition die zugehörige Sollposition auf der Trajektorie ermittelt werden, bevor aus dieser Information mittels des eigentlichen Reglers der Lenkwinkel berechnet werden kann.

Die Ermittlung der Sollposition erfolgt über das Lot-Fußpunkt-Verfahren. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Initialisierung des Verfahrens gelegt. Es sollte – vor allem auch mit Blick auf die Inbetriebnahme – möglich sein, dass das Fahrzeug nicht exakt am Startpunkt der Trajektorie initialisiert werden muss, sondern auch entlang dieser. Hierbei mussten Fragestellungen für sich

kreuzende oder eng parallel verlaufende Trajektorien gelöst werden. Dabei zahlte sich das Unit-Testing aus, mit dem dies effizient getestet werden konnte, sodass später während der Inbetriebnahme die Fahraufgabe von beliebigen, praktisch relevanten Positionen entlang der Trajektorie gestartet werden konnte.

Für die eigentliche Regelung wurden in Simulation verschiedene Konzepte getestet. Ziel war es dabei, einen möglichst einfachen Regler zu verwenden, der Betrachtungen hinsichtlich der Sicherheit und Zuverlässigkeit leichter ermöglicht. Die Wahl fiel dabei zunächst auf einen Zustandsregler auf Basis eines kinematischen Fahrzeugmodells. Dieser beinhaltet auch eine Vorsteuerung basierend auf z. B. den Krümmungsinformationen der von TruckTrix-City bereitgestellten Splines. Mithilfe der vorhandenen Messgrößen (z. B. Gierrate und Querschleunigung) wurde ebenfalls eine Vorausschau berechnet. Diese diente vor allem dazu, Verzögerungen zu kompensieren, die im verwendeten zugrundeliegenden Fahrzeugmodell nicht berücksichtigt wurden, aber z. B. aufgrund des Lenksystems im realen Verteiler-LKW vorhanden sind. Simulationsergebnisse dieses Reglers zeigten sehr vielversprechende Ergebnisse mit sehr kleinen Spurbabweichungen bei hohen Geschwindigkeiten und Querschleunigungen, siehe Abbildung 30.

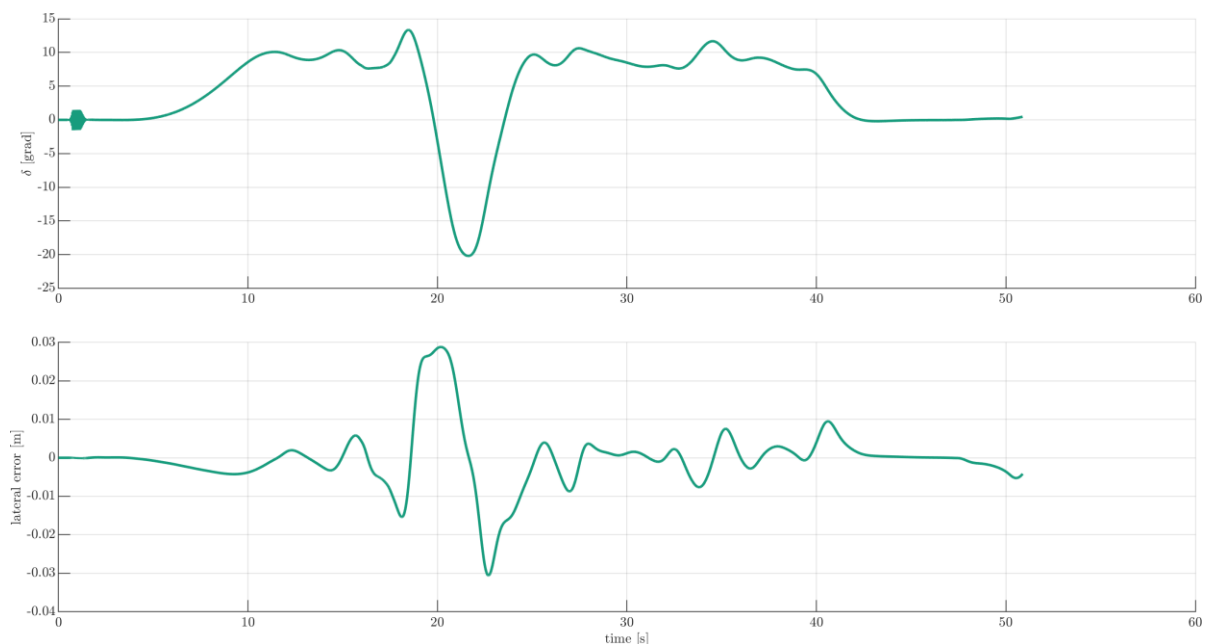


Abbildung 30: Lenkwinkel und Spurbabweichung für eine simulierte Fahrt mit dem Verteiler-LKW auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI mit Umfahrung eines statischen Hindernisses mit dem kinematischen Zustandsregler. Die Geschwindigkeit beträgt $5 \frac{m}{s}$ und führt zu einer maximalen Querschleunigung von $2,5 \frac{m}{s^2}$.

Die Simulationsergebnisse deuteten teilweise potenzielle Probleme beim Anfahren aus dem Stillstand an. Daher wurde zur Risikominimierung bereits zu diesem Zeitpunkt ein Absicherungsplan vorgehalten. Dabei wurde der Zustandsregler durch einen PID-Regler ersetzt. Die Vorsteuerung und auch Vorschau blieben in ähnlicher Form erhalten. Diese Reglerkombination konnte bei hohen Geschwindigkeiten die Güte des Zustandsreglers nicht erreichen, hatte jedoch keine Probleme beim Anfahren aus dem Stillstand. Da der Zustandsregler während der Inbetriebnahme (AP 7) ebenfalls Probleme zeigte, die in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht mehr gelöst werden konnten, kam

schlussendlich auf dem Verteiler-LKW des Fraunhofer IVI der PID-Regler mit Vorsteuerung und Vorausschau zum Einsatz.

Für den Längsregler bestand die Aufgabe darin, Sollgeschwindigkeiten zu berechnen, die an die Fahrzeugschnittstelle gesendet wurden. Dabei mussten die Eigenheiten der Schnittstelle beachtet werden, sodass die Geschwindigkeit nur in größeren Abständen aktualisiert werden konnte. Wichtig bei der Implementierung waren das Einhalten der zulässigen Maximalgeschwindigkeiten und das Anhalten an Stoppunkten. Hierfür war es notwendig, die Sollgeschwindigkeit rechtzeitig im Voraus zu reduzieren, sodass das Fahrzeug die entsprechenden Werte einhielt und an den entsprechenden Punkten anhalten konnte. Dafür wurde die aktuelle Sollposition entlang der Trajektorie genutzt, die durch den Querregler ermittelt wurde. Daraus konnte der Abstand zur nächsten gültigen Maximalgeschwindigkeit oder zum Stoppunkt berechnet werden.

Die Inbetriebnahme beider Regler konnte im Verteiler-LKW erfolgreich durchgeführt werden. Durch die Vorarbeiten mit Unittests und Simulation beschränkten sich die reglerbezogenen Arbeiten im Wesentlichen auf die Integration mit den restlichen Systemkomponenten, wie z. B. Lokalisierung und Schnittstellen zum Fahrzeug, sowie das Parametrieren des Reglers.

In Summe war die Inbetriebnahme der Regler im Verteiler-LKW erfolgreich und die von TruckTrix-City geplanten Trajektorien konnten zuverlässig abgefahren werden.

2.1.5.2 Sichere Kommunikation und Vernetzung Infrastruktur zu Fahrzeugen V2X (AP 5.2)

ZF CVS hat sich mit den Partnern Fraunhofer IML, Fraunhofer IVI und STW der Aufgabe gestellt, die Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Infrastrukturlnoten und Leitstand technologisch entsprechend der erarbeiteten Sicherheitsanforderungen aus AP 3 aufzubauen und auf dem Betriebshof des DACHSER Logistikzentrums Ulm zu integrieren.

Verfügbare fahrzeugseitige Sensorsysteme sind derzeit bis max. 10 km/h unter guten Bedingungen und entsprechend schnellen, nachgelagerten Notbremsmechanismen personensicher. Dies setzt jedoch voraus, dass die Umgebung um das Fahrzeug ausreichend einsehbar und frei von dynamisch agierenden Objekten ist und diese möglichst früh erkannt werden.

Die Realität zeigt, dass der Betrieb auf einem Logistikhof aufgrund der hohen Zeitanforderungen meist so hektisch ist, dass sowohl Fußgänger als auch Fahrzeugführer bestehende Sicherheitsregeln bewusst oder unbewusst umgehen, um ihre Aufgabe möglichst schnell und bequem zu erledigen, siehe Abbildung 32. Dabei kommt es auch ohne Automatisierung oft zu Situationen, bei denen Personen oder Fahrzeuge zu Schaden kommen, sei es durch Unaufmerksamkeit oder bedingt durch bestimmte Umstände wie z. B. schlechte Sichtverhältnisse.



Abbildung 31: Dezentralisierter Einsatz von Infrastrukturknoten zur Erweiterung des Objekterfassungssystems (schematische Darstellung).



Abbildung 32: Riskante Umgehung der Sicherheitsbereiche durch Personen

Die Herausforderung an die Objekterkennung ist demnach, schwer oder nicht einsehbare Bereiche auf dem Betriebshof durch lokale dezentralisierte Infrastruktursensoren abzudecken und diese Informationen an die automatisierten Fahrzeuge zu übermitteln, um geeignete (Not-)brems- oder Ausweichfunktionen rechtzeitig einleiten zu können. Diese müssen entweder über eine ausreichende Reichweite verfügen oder miteinander vernetzt agieren, sodass die Fahrzeuge zeitnah über die Situation informiert werden. So können Fahrzeuge auf dem Betriebshof mit den geforderten 20 km/h betrieben werden, wenn die Infrastrukturknoten freies Geleit vermelden. Andernfalls muss die Zielgeschwindigkeit verringert und eine Bremsbereitschaft vorbereitet werden.

Als erstes galt es, sich einen Überblick über den Betriebshof zu verschaffen, um zu prüfen, ob vorhandene Kommunikationstechnologien mitgenutzt werden können und diese den Anforderungen genügen. Die Sicherheitskriterien für die Kommunikation waren Verfügbarkeit, Verlässlichkeit und Latenz. Zudem muss die auszuwählende Technologie drahtlos sein.

Die hohe Anforderung an die Sicherheit besteht auf der Kommunikationsstrecke ISK ↔ Fahrzeug sowie ISK ↔ ISK. Die Kommunikationsstrecke Leitstand ↔ ISK und Leitstand ↔ Fahrzeug wurde als weniger kritisch bewertet, da hier hauptsächlich Missionsdaten zu Beginn der Mission sowie zyklische Statusmeldungen übertragen werden sollten.

Der Betriebshof in Langenau verfügt über ein WLAN, das für den Betrieb innerhalb der Warenlager ausgelegt ist. Außerhalb der Hallen ist die Signalqualität sehr schlecht und es kommt zu Ausfällen durch Funklöcher. Somit kam diese Option nicht in Frage.

Als nächstes wurde die Option der mobilen Kommunikation über LTE+ (4G) oder (5G) untersucht.

Online-Netzpläne¹² der deutschen Telekom gaben dem Projekt die Möglichkeit, die Abdeckung der 4G- und 5G-Abdeckung auf dem Betriebshof zu untersuchen.

So war zu beobachten, dass das 5G-Netz eine weniger gute Abdeckung aufweist als das 4G-Netzwerk, somit war letzteres zu priorisieren, siehe Abbildung 33.

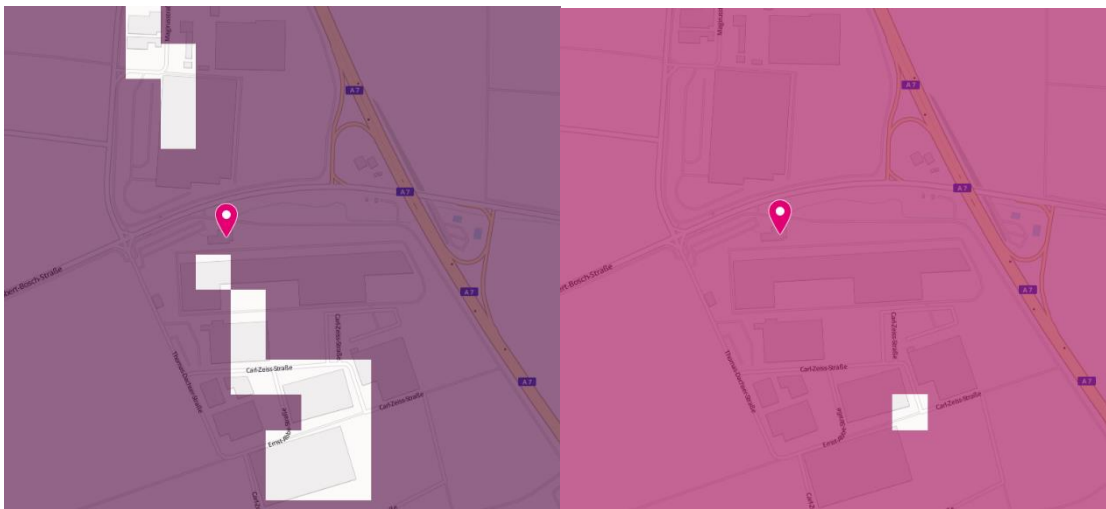


Abbildung 33: Netzabdeckung von 5G (links) und 4G (rechts) Mobilfunknetzen am Standort in Langenau

Als nächstes wurden verfügbare Kommunikationskomponenten untersucht. Dabei kamen Komponenten der beiden Partner STW (TC4G) und ZF (ProConnect) in Betracht, da diese innerhalb des Konsortiums zur Verfügung gestellt werden konnten und mit der Option, selbstständig Veränderungen vornehmen zu können, ausgestattet sind.

Bei der sicherheitskritischen Übertragung wurde entschieden, auf Kommunikation mit Basis DSRC - ITS-G5 (802.11p), auch bekannt als Vehicle-to-Vehicle (V2V) oder Vehicle-to-Infrastructure (V2I), zu setzen. Diese Technologie wird vielfach im Automotive-Bereich eingesetzt und bietet standardisierte Kommunikationsprotokolle für den Straßenverkehr.

ZF hat hierfür eigene Prototypen der Serie ProConnect V2X eingesetzt, die sowohl die mobile Kommunikation via 4G als auch DSRC (V2X) beherrschen.

Nach Auswahl der geeigneten Technologien und Komponenten galt es als nächstes zu überlegen, wie diese in das Gesamtnetzwerk zu integrieren sind.

So wurden beide Kommunikationsnetzwerke (4G: sicherheitsunkritisch, DSRC: sicherheitskritisch) in das Gesamtkonstrukt für SAFE20, wie in Abbildung 34 gezeigt, integriert. Hier sind die einzelnen

¹² (Telekom Deutschland GmbH, kein Datum)

Komponenten Leitstand, Infrastrukturknoten mit Überwachungssensorik, Zugfahrzeug (Truck) und Anhänger (Trailer) aufgeführt.

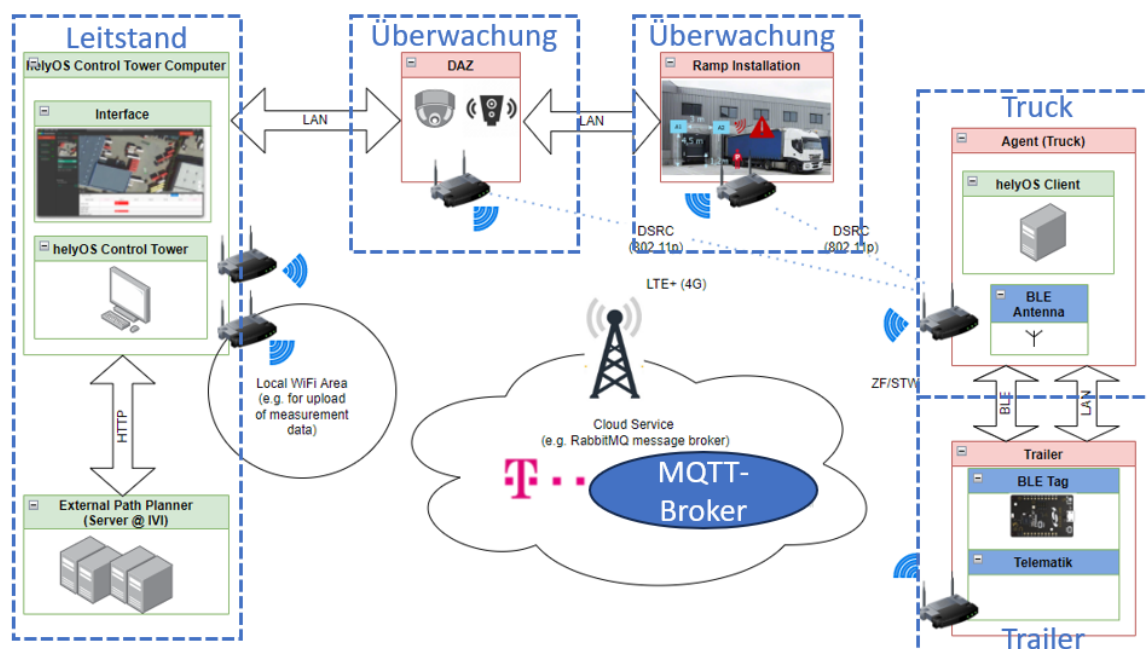


Abbildung 34: Kommunikationsnetzwerk SAFE20

Der Leitstand übermittelt seine Daten, hauptsächlich Missionsdaten, über den sicherheitsunkritischen Kommunikationskanal mittels LTE (4G) und nutzt AMQP/MQTT als Datenmanagement-Tool. Gleichzeitig erhält der Leitstand auf diese Weise Positions- und Statusmitteilungen vom Fahrzeug sowie Daten von den Infrastrukturknoten, entweder über eine drahtgebundene (LAN) oder über die drahtlose (4G oder WLAN) Verbindung.

Das Zugfahrzeug jedoch erhält seine sicherheitskritischen Informationen auf direkte Art und Weise über den DSRC(V2X)-Kanal. Dieser weist eine sogenannte verbindungslose Eigenschaft auf, was bedeutet, dass Botschaften auf direktem Wege empfangen werden können, ohne zuerst eine Verbindung aufbauen zu müssen, die hier eine weitere unnötige Latenz bedeuten würde. Als Kommunikationsprotokoll wurde auf den Einsatz der standardisierten ITS-G5-Botschaften verzichtet, da diese lediglich die Information „Personen auf der Fahrbahn“ in Zusammenhang mit Unfällen oder Baustellen spezifiziert hat. Stattdessen hat man auf ein proprietäres UDP-Protokoll gesetzt, das die benötigten Informationen samt Objektdaten zur Verfügung stellen konnte.

Der nächste Schritt war die Integration dieses Aufbaus auf dem Betriebshof.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der Sensoriken und Kommunikationsgeräte konnte nicht der gesamte Betriebshof ausgerüstet werden, sodass entschieden wurde, lediglich bestimmte sicherheitskritische Zonen auszustatten. So wurden Infrastrukturknoten im Süden und Nordosten des DACHSER-Betriebshofs ausgestattet, die eine hohe Verkehrslast (Rampen und Fußgängerüberwege) sowie teils schlecht einsehbare Bereiche aufweisen. In diesen in Abbildung 35 veranschaulichten

Zonen kann, bei entsprechend sicherer Umgebung, mit der im Projekt vorgesehenen Maximalgeschwindigkeit gefahren werden, vorausgesetzt, die Infrastrukturknoten senden durchgehend verlässliche Daten bzw. diese werden vom Fahrzeug empfangen. Zwei installierte Infrastrukturknoten auf dem Betriebshof sind in Abbildung 36 und Abbildung 37 zu sehen.



Abbildung 35: Überwachte Zonen auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau



Abbildung 36: Infrastrukturknoten im Süden des DACHSER-Betriebshofs Langenau



Abbildung 37: Einer der Infrastrukturknoten im Nordosten des DACHSER-Betriebshofs Langenau

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kommunikationsnetzwerke ihre Aufgabe mit Bravour erfüllt haben. Für einen serienreifen Aufbau dieses Netzwerks müssen die Fahrzeuge und Infrastrukturknoten entsprechend dem Aufbau des Betriebshofs angepasst und miteinander vernetzt werden. Dabei ist die zu wählende Technologie nicht ausschlaggebend, es ist jedoch bei sicherheitskritischen Kommunikationskanälen darauf zu achten, dass eine geringe Latenz von <20 ms eingehalten wird und mögliche Störquellen der Funkverbindungen möglichst ausgeschlossen sind. So sollten Antennen aufgrund der vielen Fahrzeuge vor den Rampen möglichst weit oben an den Gebäuden platziert sein.

2.1.5.3 Fahrzeugmanagement-System für Missionsplanung und -überwachung (AP 5.3)

Ziel des Arbeitspakets war die Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines robusten Leitstands zur Orchestrierung autonomer Fahrzeuge in Echtzeit. Der Leitstand sollte komplexe Aufgaben der Datenverarbeitung und der automatisierenden Algorithmen bewältigen, darunter die Integration und Visualisierung der DAZ, die Echtzeit-Überwachung und Visualisierung von Fahrzeugdaten sowie die vollautomatische Erstellung und Übermittlung von Missionsdaten an die Fahrzeuge. Darüber hinaus sollte der Leitstand alle Vorgänge protokollieren, um eine nachgelagerte Analyse und Optimierung zu ermöglichen. Die Weiterentwicklung von helyOS, einem bereits im AutoTruck-Projekt entwickelten Labormuster, bildete die Basis, wobei der Fokus auf der Erstellung neuer Datenmodelle, Architektorentwürfe, Funktionen und Testverfahren liegt, die alle Sicherheitsanforderungen und die Möglichkeit einer Offenlegung als Open-Source-Projekt berücksichtigen.

Der Leitstand spielt eine zentrale Rolle in der Verwaltung und Überwachung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge innerhalb verschiedener logistischer und industrieller Einsatzbereiche. In diesem Abschnitt werden die Entwicklungsaktivitäten, Integrationen, Tests und Verbesserungen des helyOS-Leitstands detailliert beschrieben, die im Rahmen des SAFE20-Projekts am Fraunhofer IVI durchgeführt wurden. Die Entwicklungsarbeiten zielten darauf ab, eine leistungsfähige,

benutzerfreundliche und flexible Steuerungsplattform zu schaffen, die moderne Technologien und spezifische Kundenanforderungen integriert. Dabei sind erhebliche Fortschritte in drei Teilbereichen zu verzeichnen: Sicherheit, Robustheit sowie Funktionalität, Bediener- und Nutzerfreundlichkeit.

Verbesserung der Sicherheit von helyOS: Eine Sicherheitsschicht wurde im helyOS-Core und in den RabbitMQ-Servern implementiert, ohne dass deren Portabilität beeinträchtigt wird. Dies bedeutet, dass die Verbindungen zwischen Benutzeroberfläche, Agenten, Expertensystemen und dem SAFE20-Server nun gesichert und verschlüsselt sind, während es immer noch möglich ist, den gesamten Leitstand für die Entwicklung auf einem lokalen Rechner auszuführen.

Darüber hinaus laufen die Microservices, die zur Erweiterung der SAFE20-Anwendung verwendet werden, nun auf einem eigenen, unabhängigen Server, der durch die IVI-Netzwerkinfrastruktur geschützt und nur vom helyOS-Core-Server aus zugänglich ist. Das bedeutet, dass die Anwendung nun besser geschützt ist und das Potenzial für Angriffe von außen reduziert wurde.

Die Schnittstellen zwischen Leitstand und Agenten wurden analysiert und neue Datenmodelle und Strukturen aufgesetzt. Damit wurde der Kommunikationskanal zwischen helyOS-Backend und den Fahrzeugen vereinheitlicht und die Entwicklung endete in der Implementierung und Veröffentlichung als Open Source Software, helyOS-Agent-Software Development Kit (helyOS-Agent-SDK). Das helyOS-Agent-SDK wurde ebenfalls aktualisiert, um die Verbindung über den verschlüsselten Kanal zu erleichtern. Die Validierung des helyOS-Hostnamens kann entweder manuell durch Herunterladen der Autoritätszertifikatsdatei (ca_certificate.pem) oder automatisch durch Empfangen des CA-Zertifikats als PEM-String im Check-in-Prozess erfolgen.

Im Rahmen der Sicherheitsverbesserung haben nun alle AMQP-Nachrichten, die vom helyOS-Core oder von Agenten ausgegeben werden, eine Sender-Validierung. Diese Funktion ist wichtig, um Nachrichtenfälschungen zwischen den Agenten auszuschließen.

Um die Robustheit des Gesamtsystems zu evaluieren, wurden Untersuchungen zu den Stressbedingungen durchgeführt, wobei Faktoren wie die Anzahl der Anwendungen und die Aktualisierungsfrequenz berücksichtigt wurden. Diese Untersuchungen konnten dazu beitragen, Schwachstellen im System aufzudecken und Verbesserungen vorzunehmen, um die Leistung und Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Die kontinuierliche Verbesserung der Funktionalität und Bedienbarkeit von helyOS war Teilvorhaben des IVI. Einige der Fortschritte und Ergebnisse umfassen:

1. Die Möglichkeit, Verbindungen zwischen Agenten und dem System sowohl über AMQP- als auch MQTT-Protokolle herzustellen, was nützlich für Verbindungen von MQTT-Geräten ist.
2. Für die Integration von Agenten in helyOS wurde ein ROS-Wrapper für die helyOS Agent-SDK geschrieben. Dadurch ist eine direkte Kompatibilität zum Robot Operating System (ROS) sichergestellt. Dieses ROS-Framework ist das weltweit meistgenutzte Tool für neuartige Robotikanwendungen und Forschung im Bereich der Robotik.

3. Entwickler können nun das RabbitMQ-Konto, einschließlich Protokoll, direkt im helyOS-Dashboard konfigurieren.
4. Verbesserungen am Dashboard ermöglichen die Feinabstimmung von Agenten-, Microservice- und Missionseinstellungen.
5. Microservices- und Missionsrezepte können nun als YAML-Dateien, ein vom Menschen lesbares Format, geladen werden. Dadurch können erstens SAFE20-Missionsdefinitionen ausgetauscht und versioniert und zweitens die Datenbank ohne Verlust der Missionsbeschreibungen gelöscht werden.
6. Kartenobjekte und Yard-Informationen können als JSON-Dateien vom Dashboard hoch- und heruntergeladen werden. Diese Dateien können zur Erstellung der Datenbank verwendet oder direkt von Online-Kartenserver-Microservices bedient werden.
7. Es wurden Microservices erstellt, um Aufgaben zu konvertieren und statische Karten zu laden. Diese Entwicklung wird dazu beitragen, die Effizienz bei der Handhabung von Aufgaben zu verbessern und die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen.
8. Entwickler können jetzt Mission-Warteschlangen im helyOS-Core erstellen. Diese Funktion kann von der Benutzeroberfläche in Szenarien genutzt werden, in denen komplexe Missionen in mehrere unabhängige Stufen aufgeteilt werden sollen. Jede Stufe kann während einer laufenden Mission-Warteschlange hinzugefügt oder entfernt werden.
9. Entwickler können nun auswählen, welche Kontextdaten an Microservices (Pfadplaner, Karten-Server etc.) gesendet werden sollen. Diese Funktion wird die Reaktionsgeschwindigkeit der Anwendung erhöhen, indem unnötiger Datenfluss eliminiert wird.
10. Die Visualisierung von Missionen und Zuweisungen im Dashboard wurde verbessert. Dies ist sehr wichtig, um Probleme während der Implementierung von Agenten zu diagnostizieren.
11. Die Protokollsammlung ist jetzt umfassender und liefert zusätzliche relevante Informationen im Zusammenhang mit der Anwendungsentwicklung.
12. Eine erste Implementierung für Pfadberechnungen zwischen Aufgaben wurde entwickelt. Dies ist bei langen Missionen wichtig, da Agenten aktualisierte Parameterergebnisse benötigen können, anstatt sich auf die bei Missionsbeginn gesammelten Daten zu stützen.

Insgesamt verbesserten die genannten Punkte die Einrichtung des Leitstands und die Bedienung, um eine automatische Zusammenstellung von Missionsdaten sowie das vollautomatische Handling aller eingehenden und ausgehenden Daten zu ermöglichen.

Die helyOS-Dokumentation hat weitere Verbesserungen und Vervollständigungen erfahren, die laufend während der Projektlaufzeit erstellt wurden. Wichtige Punkte für die Anwendung des Leitstands in SAFE20 wurden in einer neuen Dokumentation bereitgestellt. Zudem wurde eine umfassende Dokumentation von helyOS auf [ReadTheDocs.io](https://readthedocs.io) veröffentlicht, die eine

Systemübersicht, Anweisungen und Beispiele enthält¹³. Darüber hinaus wurde ein neues Repository mit einem Beispiel für eine vollständige Leitstand-Anwendung mit Hilfe von helyOS veröffentlicht¹⁴.

Um die Arbeit von Entwicklern zu vereinfachen, wurden Code-Beispiele für den Leitstand implementiert, die zeigen, wie man mit den Schnittstellen umgeht, z. B. wie man sich mit GraphQL, AMQP und MQTT verbindet. Dies wird dazu beitragen, die Nutzung der Leitstands-Technologie helyOS zu verbreiten.

In enger Zusammenarbeit mit ZF wurde im Rahmen von Abstimmungen in AP 5.2 erfolgreich die Entwicklung eines Adapters zur Integration des VDA5050-Protokolls mit helyOS abgeschlossen. Dieser Adapter ermöglicht die Übermittlung von Fahrzeugdaten an helyOS durch standardisierte VDA5050-Nachrichten über das MQTT-Protokoll.

Durch den Fokus der VDA5050, die eine Standardisierung der Kommunikation zwischen Automatisierungssystemen von Flurförderfahrzeugen und übergeordneten Leitsystemen vorschlägt, waren für den Anwendungsfall „Hoflogistik mit Sattelzugumsetzern“ Anpassungen nötig. Hierbei wurden die Felder des VDA5050-Protokolls, gemäß den Vorschlägen von ZF und den Ergebnissen der Machbarkeitsstudie am Fraunhofer IVI, sorgfältig konfiguriert und erweitert, um beispielsweise die Übertragung von Knickwinkeln zu ermöglichen.

Der Adapter wurde erfolgreich mit Simulatoren und dem KAMAG PT auf dem DACHSER-Hof verwendet. Während dieser Fahrttests wurden komplexe Fahrmissionen, die mithilfe von TruckTrix-City berechnet wurden, von einem helyOS-eigenen Nachrichtenformat in sogenannte VDA5050-Orders konvertiert und von den Fahrzeugen erfolgreich ausgeführt.

Als abschließende Echtzeit-Integration des Fahrzeugs von KAMAG, wurde die Implementierung der zwischen Fraunhofer IVI und KAMAG festgelegten Schnittstellen für den KAMAG PM vorgenommen. Damit ist auch die Umwandlung von helyOS-Missionen zu der von KAMAG verwendeten Software bereit, genauso wie der Rückkanal für die Statusinformationen des Fahrzeugs an den Leitstand. Die Funktionalität wurde am Fraunhofer IVI mittels eines Simulators getestet und validiert. Die initialen Fahrttests führten zur weiteren Entwicklung des helyOS-KAMAG-Adapters, die die Anforderungen des helyOS-Frameworks mit der proprietären Kontrollturmsteuerung des Fahrzeugs in Einklang brachte. Das Fraunhofer IVI hat KAMAG Online-Support für die Durchführung zusätzlicher Fahrttests mit dem KAMAG-PM bereitgestellt. Infolgedessen wurden die Verbindung, Kommunikation und Zustandsinterpretation über den Adapter erfolgreich umgesetzt. Die Einbindung mit dem KAMAG PM wurde damit zusammen mit KAMAG während einer Integrationsphase in Langenau erfolgreich abgeschlossen, sodass eine nahtlose Kommunikation und Steuerung des KAMAG PM über den helyOS-Leitstand erreicht wurde.

¹³ (Fraunhofer IVI, 2024)

¹⁴ (Fraunhofer IVI, 2023)

Für die Echtzeit-Integration der DAZ wurde mit den Projektpartnern eine geeignete Schnittstelle zum Austausch von Echtzeit-Objektdaten vereinbart und die Funktionalität am helyOS-Backend erweitert, damit die externen Anfragen bearbeitet werden konnten. Weitere Details zur DAZ und der Integration des Leitstands sind in AP 5.1 beschrieben.

Obwohl zunächst vom Leitstand helyOS unabhängig, stellt das Fraunhofer IVI auch die User App für die Nutzung von helyOS im Projekt bereit. Dafür wurde die Benutzeroberfläche für die User App des SAFE20-Projekts weiter überarbeitet. Die AutoTruck-App wurde so modifiziert, dass sie als Prototyp-Tool für SAFE20 funktioniert. Die neuen Missions-Buttons können dynamisch angepasst werden, indem ihre Funktionalität im helyOS-Dashboard deklariert wird. Das bedeutet, dass keine Programmierung erforderlich ist, um die Buttons einzurichten. Diese Änderung ist eine bedeutende Verbesserung, die die App benutzerfreundlicher und effizienter macht. Der AutoTruck-App-Prototyp wurde durch kontinuierliches Feedback der Projektpartner während der Testphase weiter verbessert. Das Login wurde deutlich vereinfacht, was die Nutzerzufriedenheit steigerte. Für laufende Missionen werden Statusberichte als Pop-Up Nachrichten gezeigt. Damit ist es der bedienenden Person deutlich klarer, in welchem Schritt sich das System befindet.

Zudem hat das IVI-Projektteam zusammen mit der TU Dresden mehrere Treffen zur Entwicklung einer intuitiven Benutzeroberfläche (UI) und Benutzererfahrung (UX) für die SAFE20-Anwendungsfälle abgehalten. Die Beauftragung der TU Dresden für den Entwurf und Entwicklung einer geeigneten Nutzerführung und -interaktion wurde erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen mehrerer Treffen und Workshops wurden die Anforderungen und Spezifikationen für das Nutzerinterface detailliert ausgearbeitet. Dabei standen insbesondere Anwenderfragen im Fokus, um eine hohe Gebrauchstauglichkeit und Benutzerfreundlichkeit zu gewährleisten. Zudem wurden die Schnittstellen und Möglichkeiten des helyOS-Leitstands ausgetauscht, damit aus dem Design ein funktionaler App-Prototyp erstellt werden kann. Schließlich wurde eine vollständig simulierte Umgebung des DACHSER-Betriebshofs erstellt, damit die TU Dresden die App-Entwicklung ohne Eingriffe in das helyOS-Leitstandssystem in der DACHSER-Niederlassung Langenau trotzdem realitätsnah gemäß den SAFE20-Vorgaben vornehmen kann.

Die Fakultät „Technisches Design“ der TUD hat ein umfassendes Konzept für die UI/UX der Anwendung erarbeitet. Dieses Konzept wurde in Abbildung 38 als Gesamtdarstellung und in Abbildung 39 mit einer Detailansicht visualisiert und veranschaulicht die Funktionen und das Design der Benutzeroberfläche.

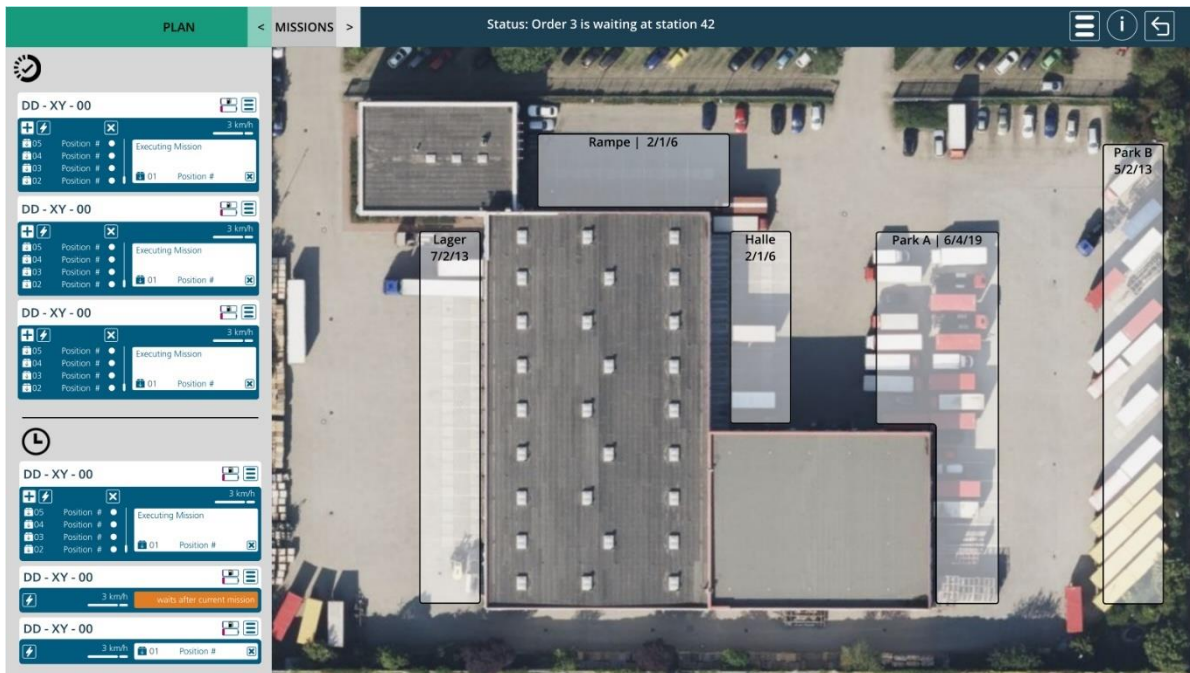


Abbildung 38: Übersicht des Nutzerinterface-Konzepts für Logistikhof-Anwendungen

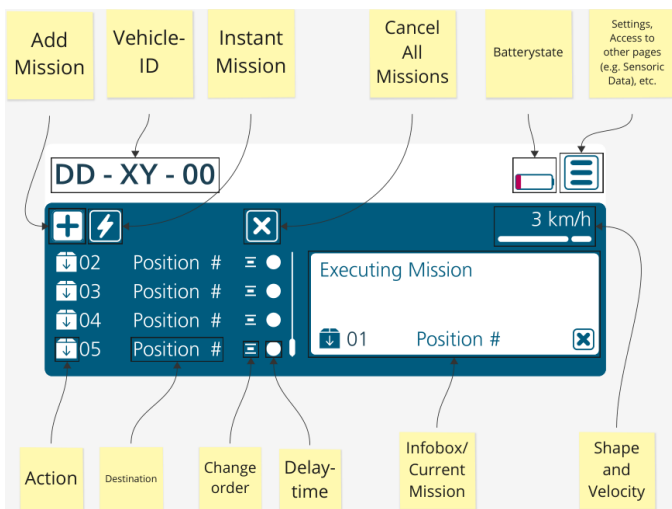


Abbildung 39: Fahrzeugdetails mit Beschriftung zur Erläuterung der Funktion

Die vorgestellte Benutzeroberfläche ermöglicht es den Nutzern, verkettete Missionen zu erstellen, sodass mehrere aufeinanderfolgende Aufträge an spezifische Fahrzeuge vergeben werden können, die diese dann sequenziell abarbeiten. Darüber hinaus bietet die UI-App-Funktionalität die Möglichkeit, Missionen zu unterbrechen oder zu pausieren. Nicht gesendete Aufträge können vor dem finalen Versand überprüft, modifiziert oder zurückgezogen werden, was eine flexible Anpassung an dynamische Betriebsbedingungen im Logistikbetrieb ermöglicht.

Um die durch den im AP 5.1 entwickelten TruckTrix-City-Pfadplaner erstellten Missionen nahtlos in logistische Abläufe, einschließlich Aufgaben wie Aufnahme/Abgabe von Anhängern oder das Andocken an Rampen, zu integrieren, wurde ein spezialisierter Logistik-Microservice entwickelt. Abbildung 40 zeigt eine mit TruckTrix-City geplante und durch den Logistik-Microservice angereicherte Mission zum Aufnehmen eines Sattelauflegers. Während der Systemintegration und dem ersten Testbetrieb wurden auch neue Demoszenarien beim Logistik-Microservice ermöglicht, die für die wiederholbare Ausführung längerer Sequenzen elementarer Aktionen erforderlich waren. Des Weiteren wurde ein Microservice, der die Missionen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen für verschiedene Geschwindigkeitszonen erweitert und Halteaufgaben an Stoppschildern einfügt, implementiert und erfolgreich in Betrieb genommen.



Abbildung 40: Mit TruckTrix-City berechneter Pfad für eine Pick-Mission auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau

2.1.5.4 Ortung / Lokalisierung von Wechselbrücken, Semi-Trailern, Park- und Rampenpositionen / Aktive Objektlokalisierung in Automatisierungszone (AP 5.4)

An diesem AP waren Fraunhofer IML und IVI nicht beteiligt.

2.1.5.5 Zusammenfassung AP 5

Für den sicheren Betrieb autonomer Fahrzeuge auf Logistikhöfen im Mischbetrieb ist die Betrachtung der Infrastruktur notwendig. Im Rahmen dieses Arbeitspakets lag der Fokus auf vier Kernthemen: der sicheren und zuverlässigen Kommunikationsinfrastruktur, dem Leitstand und der lokalen Ortung von Gegenständen in der Automatisierungszone.

Zu den Kernergebnissen der kooperativen Manöverplanung zählen die Weiterentwicklung und Integration des TruckTrix-City Routennetz-Pfadplaners, der die Berechnung kinematisch fahrbarer und kollisionsfreier Pfade ermöglicht, sowie die Entwicklung des Planungstools „OrchesTruck“ für koordinierte Geschwindigkeitsprofile und ein neuartiger Algorithmus, der die Durchsatzrate an Kreuzungspunkten erheblich verbesserte. Zudem wurde der „RMTRACK“-Algorithmus zu „RMTRUCK“ erweitert, um robuste Verfahren zum Störungshandling zu ermöglichen. Ein weiteres Highlight war die Konzeption einer umfassenden Simulationsumgebung zur Untersuchung von Rechenzeiten und Kommunikationskanälen.

Für die Kommunikationsinfrastruktur zur sicheren Datenübertragung zwischen Fahrzeugen, Infrastruktur und Leitstand wurden geeignete Technologien wie LTE (4G) und DSRC (ITS-G5) für sicherheitskritische und unkritische Kommunikationskanäle untersucht und ausgewählt. Auf dem DACHSER-Betriebshof in Langenau wurde die Kommunikationsinfrastruktur erfolgreich implementiert und in Betrieb genommen. Dies ermöglichte eine sichere und zuverlässige Datenübertragung mit geringer Latenz, was entscheidend für den Betrieb autonomer Fahrzeuge ist.

Ein weiteres Ziel war die Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines robusten Leitstands zur Orchestrierung autonomer Fahrzeuge in Echtzeit. Zu den wesentlichen Ergebnissen gehören die Implementierung einer Sicherheitsschicht im helyOS-Core und den RabbitMQ-Servern sowie die Veröffentlichung als Open Source Software. Ferner wurden zahlreiche Verbesserungen am helyOS-Dashboard und der Funktionalität vorgenommen, darunter die Unterstützung von AMQP- und MQTT-Protokollen, die Adaption zu proprietären Formaten für die Echtzeit-Integration der Fahrzeuge sowie die Entwicklung einer benutzerfreundlichen und intuitiven Benutzeroberfläche (UI/UX) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden. Die Echtzeit-Integration der DAZ in das helyOS-Leitstandssystem ermöglichte die Anpassung der statischen Hinderniskarte, um auf neue Gegebenheiten auf dem Betriebshof reagieren zu können. Eine umfassende Dokumentation wurde auf [ReadTheDocs.io](https://readthedocs.io) veröffentlicht, um Entwicklern die Nutzung der Leitstandstechnologie zu erleichtern.

Bei der Entwicklung und Erprobung von Technologien zur Ortung von Wechselbrücken und Semi-Trailern war ursprünglich die Nutzung von SolarTags geplant, jedoch wurde aufgrund des Ausstiegs von ZF Openmatics auf Bluetooth-Tags und UWB-Technologie als Alternativen zurückgegriffen. Während UWB aufgrund regulatorischer Einschränkungen nicht zum Einsatz kam, wurden die Bluetooth-Tags erfolgreich getestet.

Ausgehend von den Ergebnissen dieses Arbeitspakets, verbleiben offene Forschungs- und Entwicklungsbereiche. Beispielsweise ist die Übertragbarkeit der entwickelten Technologien auf andere logistische und industrielle Anwendungen weiter zu untersuchen, um die Flexibilität und Effizienz weiter zu steigern. Durch den gesteigerten Einsatz autonomer Fahrzeuge wird die kooperative Manöverplanung weiterhin ein zentraler Forschungsbereich bleiben, um die Effizienz und Sicherheit automatisierter Transportsysteme zu erhöhen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die entwickelten Technologien und Methoden im Rahmen von AP 5 signifikant zur Verbesserung der Sicherheit, Effizienz und Zuverlässigkeit des autonomen Betriebs von Nutzfahrzeugen in logistischen Umgebungen beigetragen haben.

2.1.6 Sichere Umfeld-/Objekterfassung (AP 6)

Die sichere und robuste Erfassung aller relevanten Objekte in der Automatisierungszone stellt einen zentralen Baustein zur Umsetzung und Sicherstellung des entwickelten Sicherheitskonzepts dar. In diesem Arbeitspaket wurden daher verschiedene Ansätze zur Objekterfassung für die bereitgestellten Demonstratoren entwickelt und erprobt. Es wurde eine partnerübergreifende Umfeldbeschreibung entwickelt und von den beteiligten Partnern mit den jeweils geplanten Sensorlösungen umgesetzt. Die Ergebnisse wurden in einer gemeinsamen Karte fusioniert und der Automatisierungsschicht zur Verfügung gestellt.

Die funktionale Umsetzung der Umgebungswahrnehmung diente im Rahmen der Evaluierung als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsprüfung.

2.1.6.1 Sichere Umfeld-/ Objekterfassung für Sonderfahrzeuge (AP 6.2)

Im Kontext des autonomen Fahrens auf Logistikhöfen spielt die zuverlässige Erkennung der Umgebung ebenfalls eine zentrale Rolle. Anders als auf öffentlichen Straßen, wo der Verkehr von klaren Regeln und einer standardisierten Infrastruktur geprägt ist, stellen Logistikhöfe spezifische Herausforderungen dar. Auf diesen meist unübersichtlichen und dynamischen Arealen gibt es oft eine Vielzahl an Hindernissen, darunter Lastwagen, Gabelstapler, Wechselbrücken, Trailer und andere Fahrzeuge, sowie wechselnde Bedingungen wie enge Fahrwege, Lagergüter und Personenverkehr. Hier ist es besonders wichtig, ein detailliertes und präzises Umgebungsmodell zu erstellen, um sichere und effiziente Fahrmanöver autonomer Fahrzeuge zu ermöglichen.

Die Objekterkennung ist eine Schlüsselkomponente für die Erstellung dieses Umgebungsmodells. Sie dient dazu, alle relevanten Objekte in der Umgebung des Fahrzeugs zu identifizieren und deren Position und Bewegung zu bestimmen. Dies ist essenziell, um anschließend die richtigen Fahrentscheidungen abzuleiten, wie z. B. das Navigieren um Hindernisse, das genaue Einparken an Laderampen oder das Halten bei plötzlichen Hindernissen.

Um die Objekterkennung auf Logistikhöfen zu realisieren, werden Sensordaten von Lidar- und Kamerasystemen genutzt. Lidar-Sensoren sind besonders wertvoll, da sie genaue Entfernungsdaten liefern und das Fahrzeug in die Lage versetzen, auch in komplexen Umgebungen wie dicht befahrenen Höfen präzise Abstände zu messen. Kameras erfassen visuelle Informationen, die für das Erkennen von spezifischen Objekten wie Ladungsträgern, Markierungen oder Fußgängern nützlich

sind. Die Fusion dieser beiden Sensordaten liefert ein umfassendes Bild der Umgebung. Nach der Erarbeitung des Simulations- und Trainings-Workflows für die KI-basierte Objekterkennung in AP6.2, wurden mehrere Tools für das Labeln von kombinierten Lidar-/Kameradaten recherchiert und evaluiert. Zudem müssen die Lidar- und Kameradaten zueinander kalibriert werden, dafür ist ein Kalibrierungstool (Lidar-/Kamerakalibrierung) notwendig. Zu diesem Zweck wurde mit verschiedenen Lidar- und Kamerasensoren auf dem Dachser Hof in Langenau mittels eines mobilen Roboters (siehe Abbildung 7) Daten aufgenommen. Diese Schritte sind entscheidend, um das KI-Modell mit realitätsnahen Daten zu trainieren, die speziell auf die besonderen Anforderungen von Logistikhöfen ausgerichtet sind. Das daraus resultierende Umgebungsmodell ermöglicht es dem autonomen Fahrzeug, präzise Fahrentscheidungen zu treffen, z. B. das Manövrieren in engen Bereichen, das Anhalten vor Hindernissen oder das sichere Navigieren durch dynamische Arbeitsumgebungen. So kann das Fahrzeug reibungslos und sicher Aufgaben wie das Beladen, Entladen oder den Transport von Gütern auf dem Hof übernehmen.

Bei der Recherche und Evaluierung der Labeling Tools hat sich die „3D Labeling Toolbox“ der Fa. supervisely (<https://supervise.ly/labeling-toolbox/3d-lidar-sensor-fusion/> , siehe Abbildung 41) aus folgenden Gründen als geeignetstes Tool herausgestellt:

- Kostenlose Nutzung möglich. Andere kommerzielle Labeling Tools kosten meist mehr als 10k€ pro Jahr
- Labeln von kalibrierten Lidar-/Kameradaten möglich
- Automatisierung des Labelns über API möglich
- Automatisiertes Labeln über bestehende und selber trainierte neuronale Netze möglich. Dadurch ist deutlich weniger manuelles Labeln von Daten erforderlich
- Einfach zu bedienende GUI

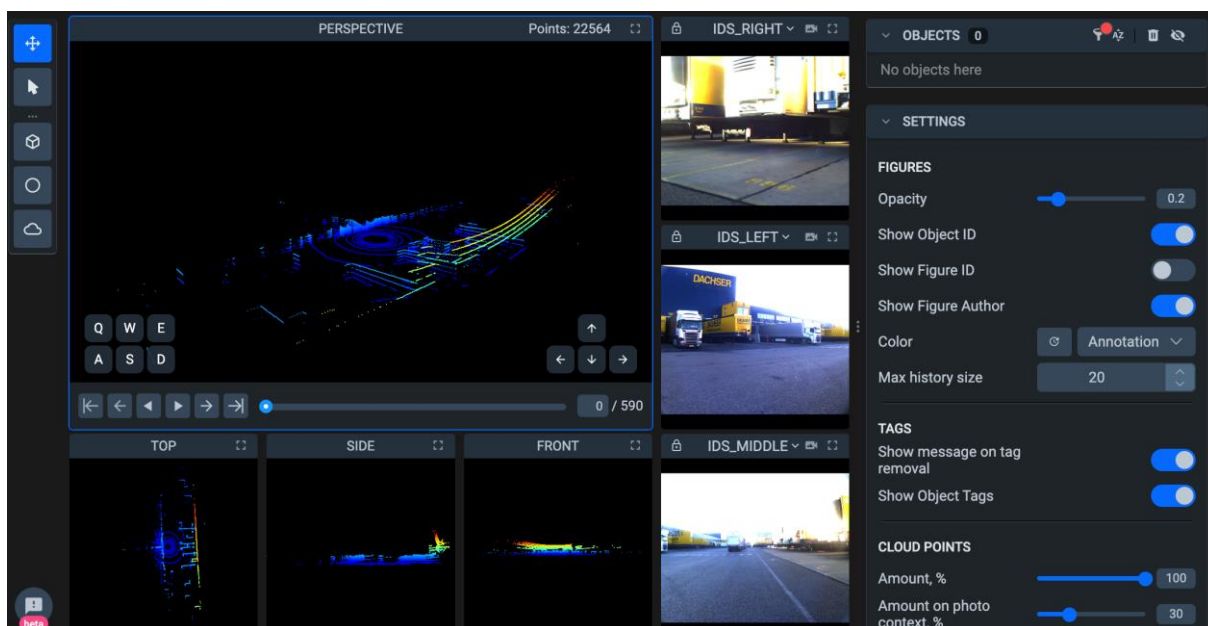


Abbildung 41 Beispielhafte Darstellung von Lidar- und Kameradaten im Labelingtool supervisely, die auf dem Dachser Hof in Langenau aufgenommen wurden

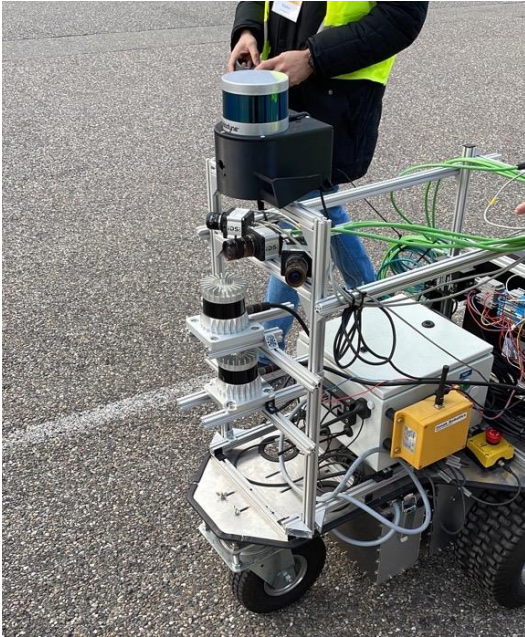


Abbildung 42 Mobiler Roboter für die Datenaufnahme in Langenau. Zu sehen sind 3 Lidarsensoren und 3 Kameras

Dieses Tool wurde im weiteren Projektverlauf für das Labeln der Daten vom Dachser Hof aus Langenau verwendet. Dazu wurde in einem Workshop eine Excel-Tabelle mit den auf einem Logistikhof vorhandenen und relevanten Objektklassen erstellt.

Um die Daten konsistent und ausreichend genau für das Training der neuronalen Netze zu labeln, wurden gemeinsam mit Kamag sog. „Annotation Guidelines“ erstellt. Diese legen fest, welche Besonderheiten und Feinheiten beim Labeling beachtet werden müssen. Eine exemplarische gelabelte Szene ist in Abbildung 43 dargestellt.

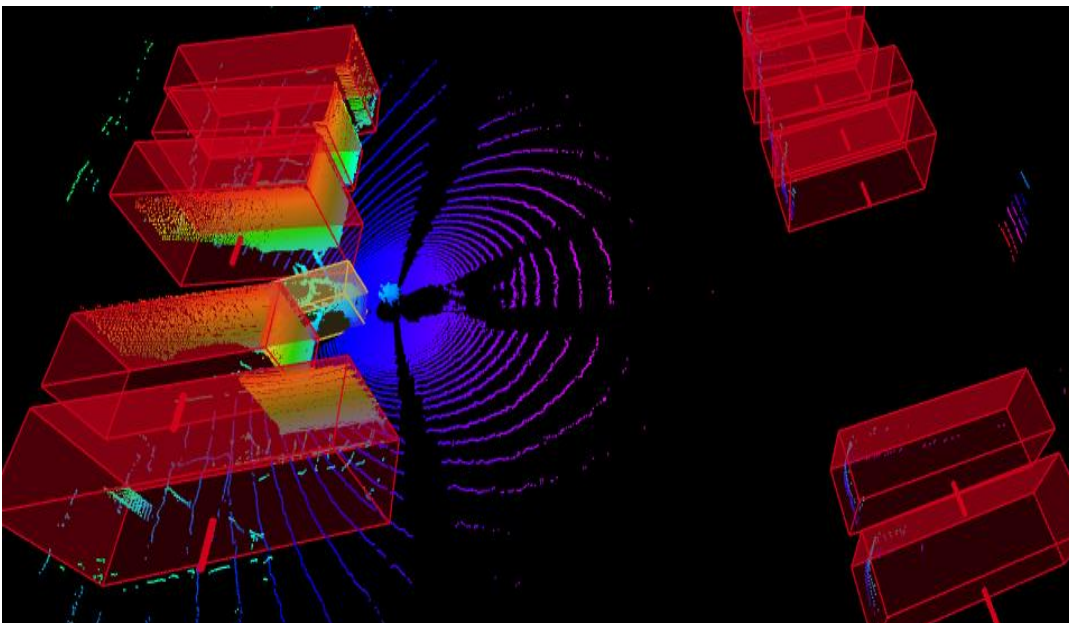


Abbildung 43: Szene mit gelabelten Objekten in LiDAR Daten. Alle Objekte in der Szene sind Wechselbrücken.

Des Weiteren wurden die in Langenau aufgenommenen Daten zur Weiterentwicklung eines Kalibrierungstools¹⁵ (siehe Abbildung 44) genutzt.

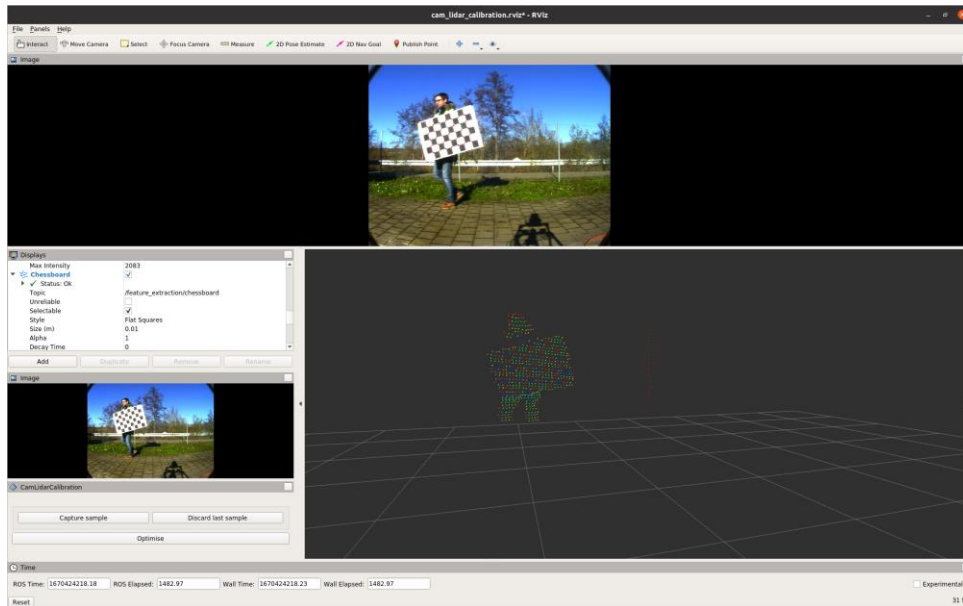


Abbildung 44 Aufnahmen eines Kalibrierobjekts in Lidar- und Kameradaten

Bei der Kalibrierung wird die Lage der einzelnen Sensoren zueinander bestimmt, sodass die Daten ein oder mehrerer Kameras und/oder Lidarsensoren zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden können (siehe Abbildung 45). Dieses Gesamtbild kann hinterher zur Orientierung beim Labeln der Lidar- und Kameradaten dienen, da man sich dadurch besser in den Lidardaten orientieren kann. Mit den gelabelten realen Sensordaten und den simulativ in pyBullet erzeugten Sensordaten kann später ein neuronales Netz zur Objektklassifikation von Objekten auf dem Logistikhof trainiert werden. Die Verwendung von sowohl simulierten als auch realen Daten verspricht eine höhere Robustheit und Accuracy bei der Klassifikation der Objekte. Der Workflow zum Trainieren des neuronalen Netzes wurde bereits fertiggestellt: Die gelabelten Daten aus der Simulation und dem Labelingtool wurden so aufbereitet, dass das Netz direkt damit trainiert werden kann. Außerdem wurde das neuronale Netz zur Objekterkennung in einem Docker-Container installiert, der auf dem KI-Server des Fraunhofer IML¹⁶ lauffähig ist.

¹⁵ Vgl. https://github.com/acfr/cam_lidar_calibration

¹⁶ Vgl. <https://www.nvidia.com/de-de/data-center/dgx-2/>

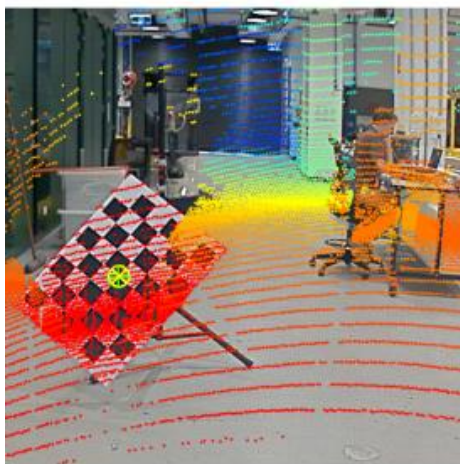


Abbildung 45 Ergebnis der Lidar-/ Kamerakalibrierung: Kamerabild und Lidarmesspunkte liegen räumlich übereinander
(Quelle: https://github.com/acfr/cam_lidar_calibration)

Die im vorherigen Berichtszeitraum entwickelte Lidar- / Kamerakalibrierung wurde weiterentwickelt und kann nun zur Kalibrierung von unterschiedlichen Lidar Sensoren der beiden marktführenden Lidarhersteller Velodyne und Ouster verwendet werden. Für die Kalibrierung wurden nochmals neue Daten auf dem Dachser Hof in Langenau aufgenommen. Die Genauigkeit der Kalibrierung konnte dadurch nochmals verbessert werden, das Ergebnis ist in Abbildung 46 zu sehen.



Abbildung 46 Ergebnis der Lidar- / Kamerakalibrierung. Die Lidarpunktwolke wird sehr präzise über das Bild der Kamera gelegt.

Im Labelingtool supervisely wurde ein neuronales Netz mit Daten aus einem öffentlich verfügbaren Datensatz von Kamera- und Lidardaten aus dem autonomen Fahren vortrainiert¹⁷. Dieser nuScenes-Datensatz ist speziell für die Entwicklung und Evaluierung von Algorithmen für das autonome Fahren konzipiert und enthält multisensorische Daten wie Lidar-Punktwolken, Kamerabilder und bereits vorab erstellte Annotationen. Der Prozess des automatisierten Labels nutzt diese Daten, um Modelle zu trainieren und neue Daten automatisch zu labeln. Der Datensatz enthält dabei bereits manuell annotierte Lidar-Punktwolken und Kameradaten. Diese Label werden verwendet, um ein KI-Modell in Supervisely zu trainieren. Das Modell lernt dabei, Objekte wie Fahrzeuge, Fußgänger, Fahrradfahrer usw. in den Lidar-Daten und Kamerabildern zu erkennen und zu klassifizieren. Sobald das Modell auf den vorhandenen Daten trainiert ist, wird es auf neue, noch nicht annotierte Daten angewendet. Das Modell analysiert die Lidar-Punktwolken und Kamerabilder, um Objekte automatisch zu erkennen und zu labeln. Dies erfolgt in Echtzeit oder batchweise, je nach Größe des Datensatzes.

Jedes erkannte Objekt wird dann automatisch durch Bounding Boxes in der Punktwolke (meist in 3D-Form) markiert, die dessen Ausmaß und Position präzise festlegen. Abbildung 47 Abbildung 47 zeigt die Funktion des automatischen Labels durch ein vortrainiertes neuronales Netz in supervisely.

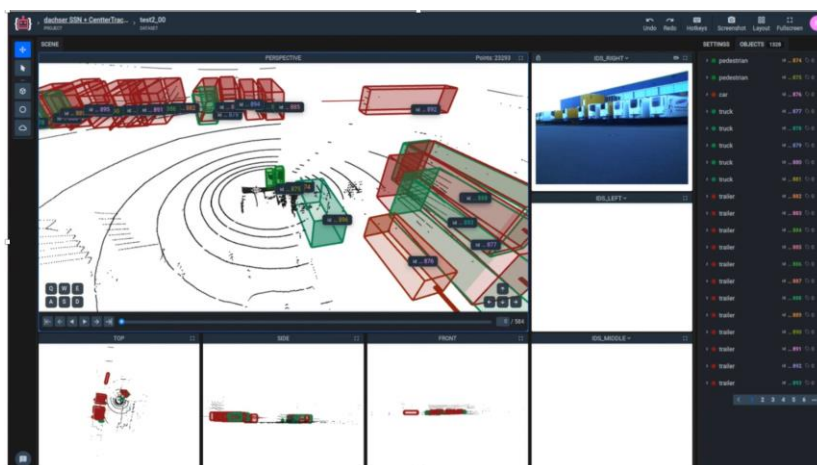


Abbildung 47 Automatisches Labeln von Lidardaten. Rot = als Trailer klassifiziertes Objekt, Grün = als Truck klassifiziertes Objekt

Außerdem wurde ein Test vielversprechender neuronaler Netze für den Anwendungsfall Objekterkennung für automatisierte Hoflogistikfahrzeuge durchgeführt. Abbildung 48 Abbildung 48 zeigt beispielsweise die in Lidardaten durch die Architektur „RegNet“ klassifizierten und lokalisierten Objekte.

¹⁷ Vgl. <https://www.nuscenes.org/nuscenes>

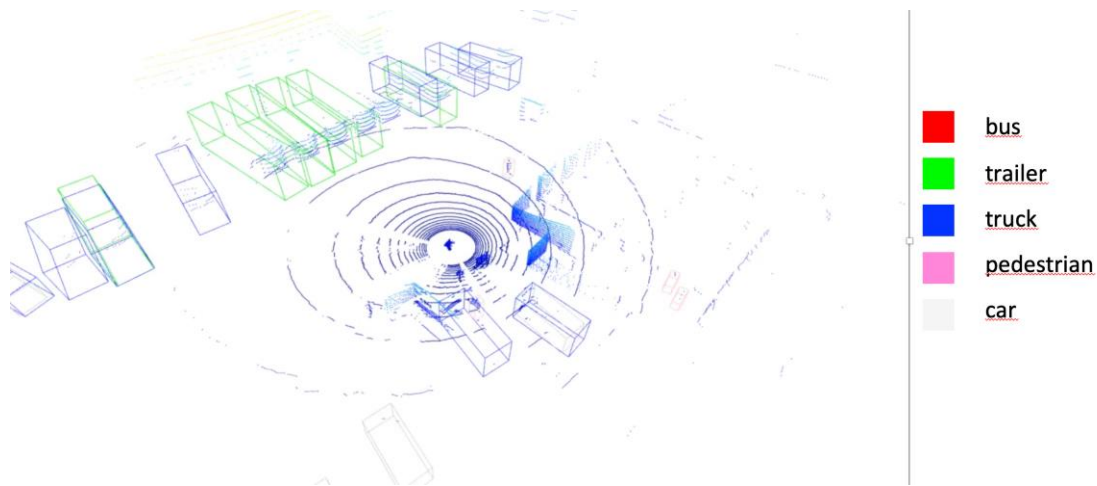


Abbildung 48 Mit RegNet klassifizierte Objekte in Lidardaten vom Dachser Hof in Langenau. Das Netz wurde mit Lidardaten aus dem nuScenes Daten trainiert.

Insgesamt stellte sich allerdings heraus, dass der Labelingprozess selbst für eine geringe Anzahl an Szenen deutlich aufwendiger ist als zunächst angenommen wurde. Einer der wesentlichen „Zeitfresser“ ist die präzise Ausrichtung der Objekt BoundingBoxes (rote Quader in Abbildung 48) in 3 Dimensionen. Um diesen Prozess zu beschleunigen, wurde eine Software und Prozess entwickelt, mit dem sich die Objekt BoundingBoxes automatisch an der Bodenebene ausrichten lassen, sprich die untere Fläche der BoundingBoxes immer exakt auf dem Boden liegt. Die Funktionalität der Software ist in Abbildung 49 dargestellt.

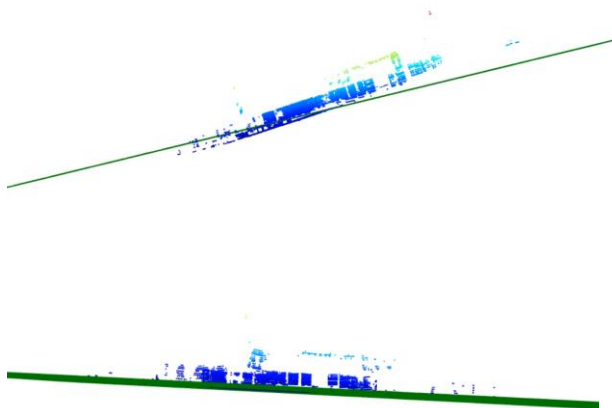


Abbildung 49 links: Ausrichtung der Hauptebene im Labelingtool vor der Korrektur. Rechts: Korrigierte Hauptebene im Labelingtool. Diese entspricht der Bodenebene.

Durch diese automatische Ausrichtung der BoundingBoxes kann der Labelingprozess im verwendeten Labelingtool supervisely deutlich beschleunigt werden.

		Predicted		
		Pedestrian	Swap Body	Car
Actual	Pedestrian	517	332	7
	Swap Body	69	2240	4
	Car	44	194	167

Abbildung 50 Konfusionsmatrix für die drei Objektklassen Fußgänger (Pedestrian), Wechselbrücke (Swap Body) und Auto (Car)

Zum Abschluss wurde ein neuronales Netz mit PointPillars Architektur¹⁸ zunächst mit dem nuscenes Datensatz trainiert und dann mit den in supervisely gelabelten Daten vom Dachser Hof aus Langenau mittels Transfer Learning nachtrainiert.

Transfer Learning ist eine Technik im maschinellen Lernen, bei der ein vortrainiertes Modell, das auf einer großen Datenmenge für eine ähnliche Aufgabe trainiert wurde, auf eine neue, verwandte Aufgabe angewendet wird. Statt ein Modell von Grund auf zu trainieren, werden die vorhandenen, generalisierten Merkmale des Modells genutzt, um die Zielaufgabe schneller und effizienter zu lösen. Dies reduziert den Bedarf an großen Trainingsdatensätzen und Rechenressourcen. Ein großer Vorteil ist, dass es oft zu besseren Ergebnissen führt, insbesondere bei kleinen oder spezialisierten Datensätzen.

In Abbildung 50 ist die Konfusionsmatrix für die Klassifikation der drei Objektklassen Fußgänger (Pedestrian), Wechselbrücke (Swap Body) und Auto (Car) dargestellt.

Eine Konfusionsmatrix ist ein Werkzeug zur Bewertung von Klassifikationsmodellen. Sie zeigt, wie gut ein Modell zwischen verschiedenen Klassen unterscheidet, indem sie tatsächliche Klassen mit den vorhergesagten vergleicht.

Bei mehr als zwei Klassen (Multiklassen-Klassifikation) wird die Konfusionsmatrix als $N \times N$ -Matrix dargestellt, wobei N die Anzahl der Klassen ist. Jede Zeile der Matrix repräsentiert die tatsächlichen Klassen, und jede Spalte zeigt die vom Modell vorhergesagten Klassen. Diese Matrix hilft, die Genauigkeit pro Klasse zu beurteilen und zeigt, wo das Modell häufig Fehler macht.

Die Abbildung zeigt, dass die Klassen überwiegend richtig zugeordnet werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl an Trainingsdaten bei den Wechselbrücken (ca. 1500 gelabelte Objekte) wäre eine größere Datenmenge erforderlich gewesen. Außerdem könnten durch Techniken wie Non-Maxima Suppression bessere Ergebnisse erzielt werden.

¹⁸ Vgl. <https://github.com/zhulf0804/PointPillars>

2.1.6.2 Digitales Echtzeit-Abbild der Automatisierungszone (DAZ) basierend auf Fusion von HD-Karte mit Live-Umgebungsdaten von ISK & Fahrzeugen (AP 6.4)

- Fusion von Objektlisten aus verteilten Umfelderfassungssystemen

Die Objektlisten, die von den verschiedenen Fahrzeug- bzw. Infrastruktursystemen bereitgestellt werden, werden mittels eines Algorithmus fusioniert, der auf einem Kalman-Filter und der probabilistischen Fusion von Objektdaten wie Objektposition, Objektgröße, Objektausrichtung, Geschwindigkeit, Klassifikation und der zugehörigen Kovarianzmatrizen basiert. Dadurch werden die Informationen über detektierte Objekte von verschiedenen Systemen gesammelt und integriert. Die Kernpunkte der entwickelten Methode umfassen folgende Aspekte:

1. Informationssammlung:

- Sammeln von Objektdaten aus verschiedenen Systemen, um eine umfassende Sicht auf die Umgebung zu ermöglichen.

2. Datenintegration:

- Integrieren aller verfügbaren Informationen, die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt gesammelt wurden, um ein möglichst vollständiges Bild der Umgebung zu erzeugen.

3. Gerätespezifisches Tracking:

- Berücksichtigung der Tracking-Informationen jedes einzelnen Geräts. Dabei wird darauf geachtet, die Zuordnung beizubehalten, falls ein Objekt von demselben Gerät mehrfach erkannt wurde.

4. Umgang mit asynchronen Messungen:

- Verarbeiten von Messungen, die nicht in chronologischer Reihenfolge eintreffen. Zum Beispiel könnte eine Objektliste von System A mit einem älteren Zeitstempel nach einer Objektliste von System B mit einem neueren Zeitstempel eintreffen.

Der Algorithmus behält eine fusionierte Objektliste bei, die so viele Informationen wie möglich über die Umgebung zum aktuellen Zeitpunkt liefert. Diese Liste wird kontinuierlich aktualisiert und bietet eine umfassende Darstellung der detektierten Objekte.

Darauf aufbauend werden die detektierten Objekte zusätzlich an das helyOS-System des Projektpartners Fraunhofer IVI übermittelt und somit in die digitale Live-Karte der Automatisierungszone eingetragen, sodass diese anschließend für eine sicherheitsgerichtete Automatisierung sowie für ein Flottenmanagement über ein angebundenes Flottenmanagementsystem in der Automatisierungszone herangezogen werden kann.

- Risikominimierendes Fahrverhalten auf Basis der fusionierten Informationen

Ein wichtiger Aspekt des in AP 3.5 entwickelten Sicherheitskonzepts ist die Verwendung der fusionierten Objekte aus Fahrzeugsensorik und Infrastruktursensorknoten zur Vorhersage von Kollisionen.

Hierzu wurde das Modul „Adaptive Collision Prediction“ erweitert (vgl. Abbildung 51): Sobald die ISK registriert, dass ein Fußgänger einen überwachten Zebrastreifen passiert, wird ein Signal via ProConnect an das sich in der Nähe befindende Fahrzeug geschickt und dort ein virtuelles Objekt an der Position des entsprechenden Zebrastreifens erzeugt. Dieses Objekt wird mit der Liste an getrackten Objekten aus dem Tracking Modul fusioniert und somit im Modul „Adaptive Collision Prediction“ entsprechend berücksichtigt.

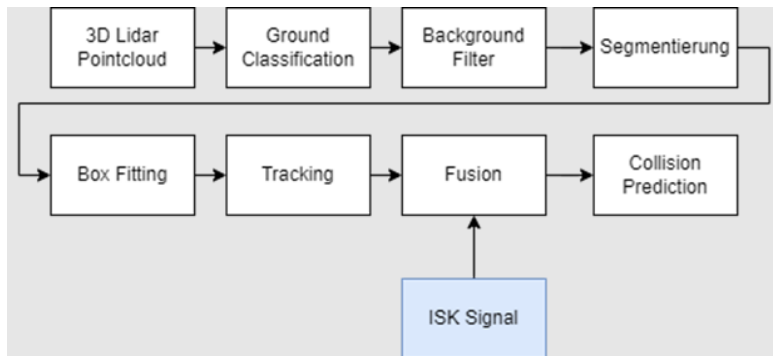


Abbildung 51: Aktualisierte Prozesskette Kollisionsvorhersage.

Weiterhin werden die Signale der ISK genutzt, um die maximal zulässige Geschwindigkeit des Fahrzeugs, die auf Missionen gefahren werden darf, zu bestimmen (vgl. Abbildung 52). Hierzu wird zunächst überprüft, ob sich das autonome Fahrzeug in einer überwachten ISK-Zone befindet und eine stabile Verbindung über die ProConnect zur entsprechenden ISK aufbauen kann. Ist dies der Fall, wird anschließend überprüft, ob der Zebrastreifen bis zum aktuellen Zeitpunkt für mindestens zwei Sekunden frei gewesen ist und sich das Fahrzeug auf den Zebrastreifen zubewegt. Trifft dies ein, wird eine Maximalgeschwindigkeit von 20 km/h ausgegeben. Wenn sich das Fahrzeug mit der Fahrzeugfront hinter dem Zebrastreifen befindet, wird ebenfalls eine Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h für die korrespondierende Zone ausgegeben, unabhängig davon, in welchem Zustand sich die entsprechende ISK befindet. In allen anderen Fällen wird die Geschwindigkeit auf höchstens 10 km/h gedrosselt.

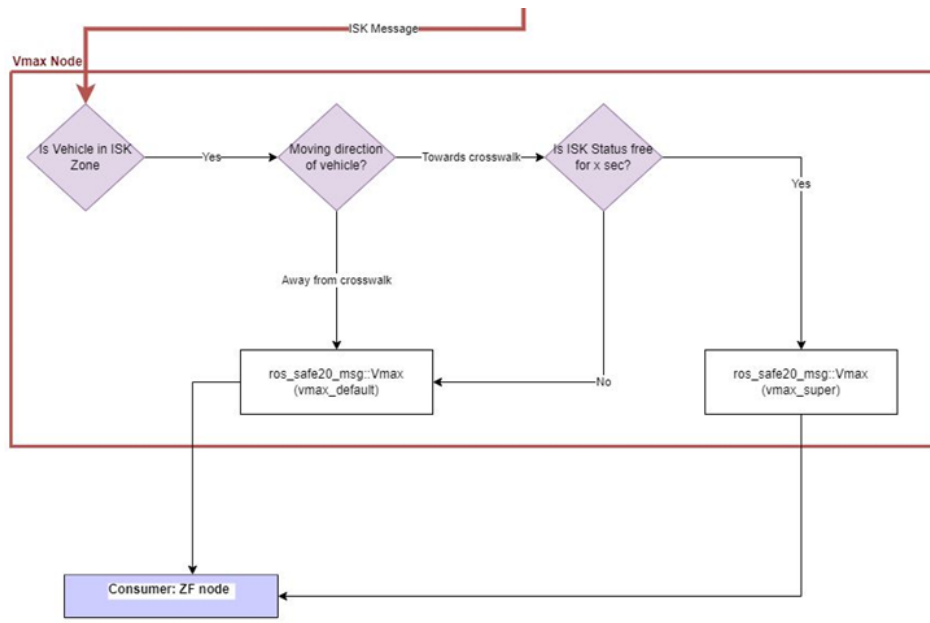


Abbildung 52: Ablauf zur Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs.

2.1.6.3 Zusammenfassung AP 6

AP 6.2 untersuchte die Herausforderungen der Objekterkennung für autonome Fahrzeuge auf Logistikhöfen, die durch dynamische Umgebungen und viele Hindernisse geprägt sind. Auf Logistikhöfen gibt es häufig enge Fahrwege und diverse bewegliche Hindernisse, was ein präzises Umgebungsmodell für sichere Fahrmanöver erfordert. Ein neuronales Netz wurde mit realen und simulierten Sensordaten trainiert, um relevante Objekte zu identifizieren und zu klassifizieren. Dabei spielte die „3D Labeling Toolbox“ von supervisely eine zentrale Rolle beim effizienten Labeln der kombinierten Sensordaten. Kalibrierungstools für Lidar- und Kamerasensoren wurden weiterentwickelt, um die Datenpräzision zu erhöhen und so die Qualität der Umgebungsmodelle zu verbessern. Abschließend wurde das neuronale Netz durch Transfer Learning verfeinert, um die Objekterkennung weiter zu optimieren, obwohl für bestimmte Objektklassen wie Wechselbrücken mehr Daten erforderlich gewesen wären.

In diesem Arbeitspaket wurden außerdem erfolgreich Komponenten für ein umfassendes Sicherheitskonzept für den sicheren Betrieb autonomer Fahrzeuge auf Logistikhöfen im Mischbetrieb implementiert. Diese beinhalten Adaptive Protective Fields (APF), Adaptive Collision Prediction (ACP) und der Infrastrukturüberwachung.

Die APF-Komponente dient als risikoreduzierende Maßnahme, indem sie ein dynamisches Schutzfeld um das Fahrzeug herum erzeugt. Ausgestattet mit mehreren Lidar-Sensoren, werden die Daten jedes Sensors separat verarbeitet, um die Verletzung eines Schutzfeldes zu erkennen. Das Schutzfeld passt sich in Echtzeit an, basierend auf verschiedenen Fahrzeugparametern wie aktueller Geschwindigkeit,

Lenkwinkel, Gangrichtung und anderen Fahrzeugsignalen. Bei einer Verletzung des Schutzfeldes durch Hindernisse wie Personen oder Objekte wird sofort ein Nothalt eingeleitet.

Für die ACP-Komponente wurde ein Konzept zur Kollisionsvorhersage entwickelt und implementiert. Diese Vorhersage bildet die Grundlage für vorausschauendes Fahren und das frühzeitige Erkennen und Vermeiden von gefährlichen Situationen. Dabei wurde ein 3D-Lidar-Sensor eingesetzt, dessen 3D-Punktwolken zur Objekterkennung und -verfolgung verwendet werden.

Die Überwachung der Infrastruktur konzentriert sich auf Zonen im Bereich von Zebrastreifen und Fußgängerüberwegen. Mithilfe von Radar- und Kamerasystemen wird überprüft, ob diese Zonen frei von Personen sind. Diese Information wird an die Kollisionsvorhersage im Fahrzeug weitergeleitet und fusioniert. Wird eine Zone als frei erkannt, darf das Fahrzeug diesen Bereich mit erhöhter Geschwindigkeit durchfahren, was zu einer effizienteren Verkehrsabwicklung beiträgt.

Obwohl signifikante Fortschritte erzielt wurden, gibt es noch offene Forschungs- und Entwicklungsbereiche. Die aktuellen Systeme berücksichtigen noch keine Wettereinflüsse, die die Leistung der Sensoren und die Genauigkeit der Erkennungsalgorithmen beeinträchtigen könnten. Eine verbesserte Sensorfusion ist notwendig, um verschiedene Objekte zuverlässiger zu erkennen und darauf adäquat zu reagieren. Dies beinhaltet die Integration und Verarbeitung von Daten aus unterschiedlichen Sensorquellen. Es besteht Bedarf an einer Verbesserung des Dynamik-Modells, um eine präzisere Schätzung der Objektbewegungen zu ermöglichen und so die Tracking-Genauigkeit zu erhöhen. Die Zuverlässigkeit der Kommunikation zwischen verschiedenen Systemkomponenten muss weiter optimiert werden, um eine reibungslose und sichere Funktion zu gewährleisten. Eine sichere Klassifikation von Personen ist entscheidend, um sicherzustellen, dass das System in allen Situationen korrekt reagiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass innerhalb des Arbeitspakets wesentliche Fortschritte in der Entwicklung und Implementierung eines Sicherheitskonzepts für autonome Fahrzeuge auf Logistikhöfen erzielt wurden. Die Kombination von adaptiven Schutzfeldern, präziser Kollisionsvorhersage und intelligenter Infrastrukturüberwachung bietet eine robuste Grundlage für den sicheren Mischbetrieb unter realistischen Bedingungen.

2.1.7 Schrittweise Systemintegration (AP 7)

Die Systemintegration von SAFE20 war hochkomplex und aufgrund der vielen, häufig interdisziplinären Technologien eine große Herausforderung. Daher wurden die Integrationschritte in einer Baumstruktur abgebildet und für jeden Knoten jeweils klar abgegrenzte Tests definiert. Die Knoten umfassten neben vielen anderen:

- Ortung, Umfelderkennung und Kommunikation je Fahrzeug,

- Automatisierungsfunktionen und Sicherheitsfunktionen je Fahrzeug (Bremse, Ladebordwand, Aufnehmen und Absetzen von Ladungen/Semitrailern),
- ISK-Datenerfassung und Übertragung an zentralen Server,
- Lokalisierung von Wechselbrücken, Trailern etc. und Übertragung an zentralen Server,
- DAZ auf zentralem Server,
- Leitstand und Manöverplanung.

Der erfolgreiche Abschluss der vorangegangenen Arbeitspakete war die Startbedingung für dieses Arbeitspaket. Die bis dahin weitestgehend unabhängig entwickelten Technologien und Konzepte wurden in diesem Arbeitspaket zusammengeführt. Um die diversen und hochkomplexen Technologien zu einer funktionierenden Fahrzeugeinheit zu integrieren, waren enge Absprachen und ein strukturiertes und iteratives Vorgehen notwendig. Der verständnisvolle und professionelle Umgang der Projektpartner führte zu sehr guten Integrationsergebnissen. Die Schritte der diesem Arbeitspaket untergeordneten UAP sind semantisch priorisiert nach Fahrzeug und Partnern, die Chronologie kann daher in Teilen abweichend sein.

Wenn in diesem Arbeitspaket von autonomen Fahrfunktionen gesprochen wird, wird der theoretische Reifegrad gemeint. Im Projekt SAFE20 wurden aufgrund von Freigaben und Sicherheitsbetrachtungen automatisierte Fahrten durchgeführt.

2.1.7.1 Aufbau und Inbetriebnahme Automatisierungszone (AP 7.1)

In diesem Arbeitspaket hat SICK in Zusammenarbeit mit ZF und dem Fraunhofer IVI den Aufbau und die Inbetriebnahme der Automatisierungszone durchgeführt. Zur Kommunikation zwischen Infrastrukturknoten und autonomen Fahrzeugen wurde die von ZF bereitgestellte Kommunikationseinheit ProConnect verwendet.

Die im AP 6 beschriebenen und von den Fahrzeug- und Infrastruktursystemen detektierten Objekte werden live an das helyOS-System des Projektpartners Fraunhofer IVI übermittelt und somit in die digitale Live-Karte der Automatisierungszone eingetragen. Auf der DIMA-Recheneinheit wurde zum laufenden ROS-System ein Pythonskript implementiert, welches mit helyOS über ein GraphQL-Interface kommuniziert. Zur Inbetriebnahme wurden entsprechende Integrationstests (Testen der Verbindung zum helyOS, korrekte Übermittlung eines Objekt-Updates, korrekte Übermittlung des Frei-/Belegt-Status der Infrastrukturzonen) durchgeführt. Die DAZ erkannte dabei auch Objekte, die nicht vorhanden waren. Wenn dies der Fall war, war es TruckTrix-City nicht möglich, Pfade um die erkannten Objekte zu planen. Grund hierfür war, dass die verfügbare Fläche nicht mehr für eine Durchfahrt reichte. In allen anderen Fällen konnte TruckTrix-City einen befahrbaren Pfad berechnen. Systemintegration Fahrzeuge (AP 7.2)

In diesem Arbeitspaket wurden die Technologien für die Automatisierung erstmals auf den Fahrzeugen erprobt.

helyOS-Anbindung im KAMAG PT

Der KAMAG PT setzte auf eine VDA5050-Schnittstelle, die zuerst in helyOS implementiert werden musste. Die Schnittstelle bot nicht alle Möglichkeiten für eine vollständige Betriebshofautomatisierung. Andere Konzepte der Schnittstelle hatten positive Effekte auf den Betrieb und wurden in helyOS übernommen. Um die Schnittstelle in Betrieb zu nehmen, wurden folgende Teilschritte durchgeführt:

- Implementierung einer Kommunikationsbrücke von RabbitMQ zu einem von ZF gehosteten MQTT-Server.
- Die Kommunikationsbrücke nahm helyOS-Anfragen im TAD-Format entgegen, wandelte sie in das VDA5050-Format um und übertrug sie via MQTT.
- Das Gleiche funktionierte auch in die andere Richtung, jedoch wurden hier zusätzliche Informationen erzeugt bzw. simuliert. Das war notwendig, da das VDA5050-Format nicht alle benötigten Informationen bereitstellte, damit helyOS seine Orchestrierung durchführen konnte.
- ZF brachte einen Vorschlag in das VDA5050-Konsortium ein, um die fehlenden Informationsstrukturen zu ergänzen, beispielsweise zur Übertragung des gemessenen Knickwinkels zwischen Truck und Trailer. Dieser Vorschlag wurde implementiert und mit der Kommunikationsbrücke erfolgreich getestet.

helyOS-Anbindung im KAMAG PM

Der automatisierte KAMAG PM wurde in das Leitsystem helyOS eingebunden.

In Vorbereitung auf die Integration des KAMAG PM auf dem Betriebshof wurde eine Simulationsumgebung für das Fraunhofer IVI zur Verfügung gestellt. Dabei wird das Verhalten des Fahrzeuges komplett simuliert, die Bedienung erfolgt über die helyOS Schnittstellen. Um die Koordination von mehreren Fahrzeugen zu testen, ließ sich die Simulation skalieren, wobei sich zwei Fahrzeuge als ausreichend zeigten. Damit die Integration erfolgreich abgeschlossen werden konnte, war eine enge Zusammenarbeit zwischen TII KAMAG und dem Fraunhofer IVI notwendig. Im ersten Schritt wurde ein webbasierter Konnektor für die Simulationsumgebung geschrieben. Der in der Simulation entwickelte Agent konnte ohne große Schwierigkeiten auf den automatisierten KAMAG PM übertragen werden und erleichterte die Integration ins helyOS.

helyOS-Anbindung im AutoTruck

Der zu Beginn des Projekts verplante E-LKW, welcher schon im Projekt AutoTruck verwendet wurde, sollte von einer Fachfirma überholt werden. Grund dafür waren kleinere Standschäden und Verbesserungen, die nötig waren, um die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs zu gewährleisten. Es gestaltete sich jedoch als schwierig, eine entsprechende Fachfirma zu finden, die sich dem Fahrzeug annahm und die entsprechende Expertise aufwies. Das Fraunhofer IVI konnte die Firma Orten, die den AutoTruck ursprünglich im Auftrag auf einen E-LKW umgerüstet hatte, für die Reparaturen am

Fahrzeug gewinnen. Dabei sollte viele Komponenten ersetzt werden, für die es mittlerweile bessere Alternativen gab. Das Fahrzeug wurde überführt und wartete auf einen freien Termin in der Werkstattkette. Die Standschäden zeigten größere Beeinträchtigungen als vorher erwartet. Nach längerer Wartezeit lehnte die Firma Orten den Auftrag aus innerbetrieblichen Gründen ab. Die Zeitschiene ließ weitere Arbeiten am AutoTruck nicht zu, wodurch auf ein Ersatzfahrzeug der Firma Framo zurückgegriffen wurde. Das Fahrzeug besitzt eine Drive-By-Wire Schnittstelle, welche vom Fraunhofer IVI bereits in Betrieb genommen wurde. Die fehlenden Sensorsysteme wie GNSS und Odometrie, aber auch 4G-Anbindung und Industrie-PC mussten nachgerüstet und eingebunden werden. Aufgrund dieser Verzögerungen war es nicht mehr möglich

- die Sensorik von SICK zu verbauen,
- die Konzepte der Götting KG einzubinden,
- das Schattensystem von Motor AI zu implementieren,
- auf performantere Hardware von STW zu wechseln,
- Start- und Abschaltprozeduren zu vereinfachen,
- das IBEO-System wieder in Betrieb zu nehmen,
- die V2X Kommunikation einzubinden,
- Lichttechnik zur Anzeige des Betriebszustandes für Außenstehende zu montieren,
- eine Erprobung auf dem Gelände von DACHSER oder Fahrten mit den anderen Fahrzeugen durchzuführen.

Auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI konnte das Fahrzeug jedoch erfolgreich an den helyOS-Leitstand angebunden und automatisierte Fahrten mit Sicherheitsfahrer entlang der von TruckTrix-City generierten Trajektorien durchgeführt werden.

2.1.7.2 Nichterfüllung von AP 7.3 und AP 7.4

Das Ersatzfahrzeug zum AutoTruck wurde leider zu spät im Projekt und dann auch nur mit reduziertem Funktionsumfang fertiggestellt. Da bereits zwei vielversprechende Fahrzeuge zur Verfügung standen, fiel aufgrund von begrenzten Ressourcen die Entscheidung gegen den Betrieb des Ersatzfahrzeuges bei DACHSER in Langenau.

Durch die fehlende Ansteuerungsmöglichkeit der Ladebordwand des Ersatzfahrzeugs konnte ein komplettes Anfahrmanöver an eine Rampe nicht getestet werden. Um zu vermeiden, Ressourcen von den vielversprechenden KAMAG-Fahrzeugen abzuziehen, wurde generell darauf verzichtet, ein entsprechendes Modul der Götting KG zu implementieren.

2.1.7.3 Integration des Gesamtsystems AP 7.5

Die Fahrzeuge konnten über helyOS operiert werden, eine gleichzeitige Fahrt der beiden KAMAG-Fahrzeuge war möglich und die Tests liefen erfolgreich. Der Entwurf einer kommerziellen Nutzeroberfläche wurde an die TU Dresden vergeben. Die Implementierung wurde durchgeführt und bot die Möglichkeit, verschiedene Aufgaben in eine Warteschlange einzureihen, um eine Abarbeitung ohne menschliches Eingreifen zu gewährleisten. Am Ende der Projektlaufzeit konnte nur ein Test mit fest vorgegeben Sequenzen über das neue GUI durchgeführt werden.

2.1.7.4 Zusammenfassung AP 7

Die in AP 7 gesetzten Ziele können im Wesentlichen als erreicht angesehen werden. Die Technologien der vorangegangenen Arbeitspakete konnten in beiden KAMAG-Fahrzeugen integriert und erprobt werden. Die Technologien wurden optimiert und aufeinander abgestimmt, wodurch ein zuverlässiger und qualitativer Reifegrad erreicht wurde. Die kurzfristigen Herausforderungen an den Leitstand wurden bewältigt und die Kommunikation zu den Fahrzeugen erfolgte reibungslos. Ungeachtet dessen können zukünftig noch weitere Optimierungen bei Übertragungsprotokollen angestrebt werden, in Form einer Standardisierung, die allen Anforderungen genügt. Die zusätzlichen Funktionalitäten des Leitstands, wie beispielsweise eine Orchestrierung, können in Anschlussprojekten erschlossen werden. Die Erfassung und Weitergabe der erfassten Objekte über die Infrastrukturknoten erfolgte bereits sehr gut. Die Fahrzeuge können mit diesen Informationen noch robuster gegenüber äußeren Einflüssen werden, hier sind weitere Versuche nötig, um eine Datengrundlage für die Optimierungen zu erhalten. Die sich im Projekt häufenden technischen Unzulänglichkeiten des AutoTruck führten dazu, dass auf ein Ersatzfahrzeug zurückgegriffen werden musste. Der Rückstand durch diesen Wechsel konnte zwar nicht gänzlich aufgeholt werden, die geschaffene Basis erlaubt aber, das Ersatzfahrzeug in Zukunft zu einem ähnlichen Reifegrad zu treiben. Trotzdem war die Erprobungsphase in AP 8 problemlos möglich und die Ziele von SAFE20 konnten erreicht werden.

2.1.8 Testen, Lernen und Optimieren im Feld (AP 8)

Das Arbeitspaket 8 umfasste die Durchführung und Evaluierung des Testbetriebs. Hierfür wurde im DACHSER Logistikzentrum Ulm eine umfangreiche Erprobung der Fahrzeuge und Infrastrukturtechnologien durchgeführt. In den nachfolgenden Absätzen ist die Durchführung des Testbetriebs sowie die Evaluierung dargestellt.

2.1.8.1 Evaluierung des Testbetriebs (AP 8.2)

Im Rahmen des Projekts wurden umfassende Untersuchungen zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von automatisierten Fahrzeugen in Logistikzentren durchgeführt. Der vorliegende Bericht bietet eine detaillierte Analyse der Feldtests mit Terminal-Traktoren und Wechselbrückenhubwagen, eine Durchsatzanalyse sowie eine Wirtschaftlichkeitsbewertung. Ziel ist es, die Effizienz, Wirtschaftlichkeit und praktischen Herausforderungen des Einsatzes von automatisierten Fahrzeugen im Vergleich zu manuellen Lösungen zu beleuchten.

- Technische Analyse der Feldtests Terminal-Traktor (KAMAG PT):

Aufbauend auf der Integrationsphase wurde der Testbetrieb durch DACHSER für den KAMAG PT vorbereitet. Dazu wurde das GNSS als primäre Quelle für die globale Lokalisierung ausgewählt und eine Qualitätsanalyse auf den ausgewählten Fahrstrecken durchgeführt. Entsprechend wurden die Varianzen auf den Abschnitten parametrisiert.

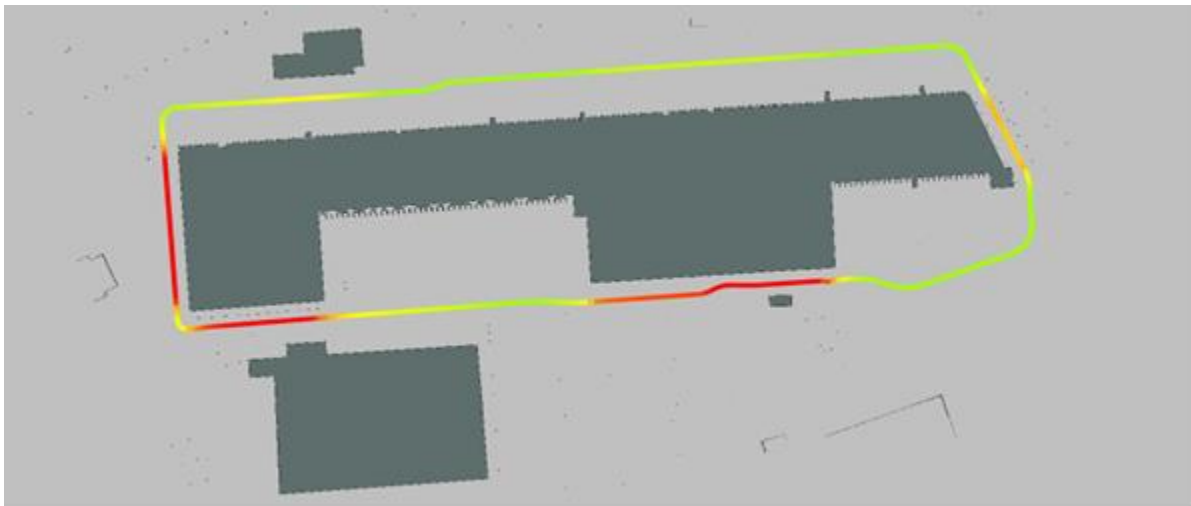


Abbildung 53: GNSS-Qualitätsanalyse

Um die Qualität und Verfügbarkeit weiter beurteilen zu können, wurden seitens DACHSER Messungen zum Querversatz der Positioniergenauigkeit durchgeführt. Dabei wurden im Norden, Süden und Westen des Hauptgebäudes mit unterschiedlichen Abständen zur Wand Ziele automatisch angefahren. Am Endpunkt wurde jeweils die Position eines Reifens markiert, um die Wiederholgenauigkeit feststellen zu können. Das nachfolgende Bild zeigt beispielhaft das Ergebnis von fünf Fahrten.



Abbildung 54: Messung Querversatz KAMAG PT bei DACHSER südlich vom Hauptgebäude

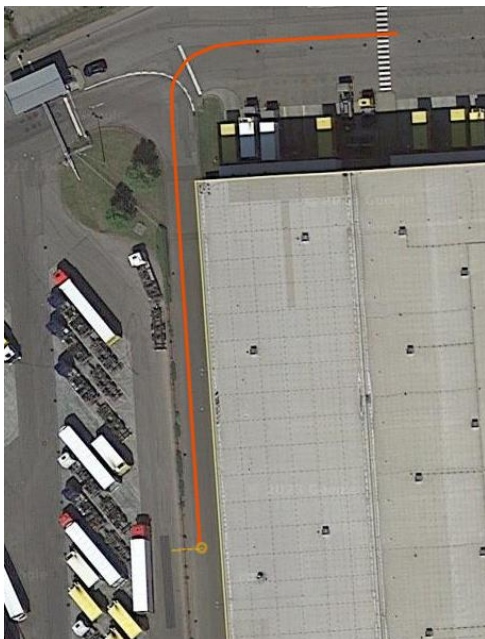


Abbildung 55: automatische Fahrmission im Westen (links); Ergebnisse (rechts)

Die Wiederholgenauigkeit des Querversatzes liegt im Bereich weniger Zentimeter, was als uneingeschränkt ausreichend für die Anwendung angesehen werden kann. In Längsrichtung wurde erwartungsgemäß eine größere Abweichung ermittelt.

Weiterhin wurden zahlreiche Tests zum Rückwärtsfahren an Rampen durchgeführt. Dazu wurden automatische Missionen zu verschiedenen Rampen auf dem DACHSERgelände geplant und durchgeführt. Es konnten erfolgreiche Ergebnisse erreicht werden, bei denen der Trailer ausreichend

genau mit der Flanke der Reifen auf der gelben Linie ausgerichtet war (s. Abbildung 56). Die Linie dient normalerweise den menschlichen Fahrern als Orientierungshilfe und kann hier gut für eine Einschätzung des Ergebnisses herangezogen werden.



Abbildung 56: Erfolgreicher Endzustand beim Andocken eines Trailers an eine Rampe

Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Zuverlässigkeit der Prozesskette noch gesteigert werden muss, da es auch zu automatischen oder manuellen Abbrüchen der Mission gekommen ist.



Abbildung 57: Beispiele beim Andocken

- Technische Analyse der Feldtests Wechselbrückenhubwagens (KAMAG PM)

Lokalisierung

Während der gesamten Testzeit wurde eine hohe Verfügbarkeit der Lokalisierung mit der nötigen Genauigkeit beobachtet. Es gab punktuell Optimierungsbedarf auf dem Standort, zum Beispiel in der Ecke von Rampe 10 und 50, wo eine Abschattung des GPS-Signals vorkommen kann. Ein Lösungsansatz ist die Verwendung eines 360°-Lidars für die Lokalisierung statt zwei Lidaren mit 120°, damit die Ecke der Gebäude besser als Landmarken erkannt werden können. Zudem müssen genügend Landmarken zur Erkennung vorhanden sein, dafür könnten z. B. künstliche Landmarken auf dem Betriebshof angebracht werden.

Navigation im Mischbetrieb

Während der Testperiode wurden hauptsächlich 15 km/h auf der virtuellen Spur gefahren. Das Sicherheitskonzept und die verwendeten Safety-Lidare für den KAMAG PM hätten 20 km/h erlaubt, allerdings löste diese Konfiguration zu viele falsch-positive Sicherheitstopps aufgrund der Boden- oder Bordstein-Erkennung aus. Aus diesem Grund wurde die maximale Geschwindigkeit auf 15 km/h

reduziert. Aus ähnlichen Gründen wurde die maximale Geschwindigkeit in Kurven auf 7 bis 10 km/h reduziert, abhängig von der Kurve.

Aus Sicht von TII KAMAG, die den Sicherheitsfahrer im KAMAG PM stellten, bleibt der Betrieb im Mischverkehr eine Herausforderung.

Die Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs von 15 km/h ist ausreichend auf geraden Strecken, um den Verkehr nicht negativ zu beeinflussen. Zudem gibt es meist genug Platz für mehrere Spuren und Überholmanöver. Eine Geschwindigkeit von 7 bis 10 km/h ist jedoch zu langsam, führt zu Staus und provoziert unerwünschtes und gefährliches Fahrverhalten anderer Verkehrsteilnehmer.

Der automatisierte KAMAG PM kann ein Hindernis für den Logistikverkehr sein. Erstens kann der fahrende Verkehr aufgrund der langsamen Geschwindigkeit des automatisierten Fahrzeugs behindert werden. Auch können rangierende LKWs beim Manövrieren blockiert werden, falls der automatisierte KAMAG PM zu nah angehalten hat. Es ist daher notwendig, einen ausreichend großen Anhalteabstand zu rangierenden Fahrzeugen zu definieren, um Deadlock-Szenarien zu vermeiden.

Im umgekehrten Fall können auch andere Verkehrsteilnehmer Hindernisse für den automatisierten KAMAG PM werden. Rangierende Gliederzüge und rangierende Sattelzüge benötigen viel Platz auf der Fahrbahn und mehr Zeit für ihre Manöver. Während dieser Zeit kann das automatisierte Fahrzeug nicht auf der blockierten Spur vorbeifahren und wartet darauf, dass sie wieder frei wird. Außerdem müssen andere Verkehrsteilnehmer und Wechselbrücken-Transporter anhalten, um die Stützen der Wechselbrücken auszufahren und die Türen zu öffnen. Dabei halten sie oft auf der Fahrfläche an und blockieren langfristig die Spur des automatisierten Fahrzeugs. Der Hofverkehr, also andere Umsetzfahrzeuge, sind sehr agil und schnell und können gut neben dem automatisierten KAMAG PM manövrieren. Sie behindern selten das automatisierte Fahrzeug.

Falsch-positive Sicherheitstopps müssen vermieden werden. Sie können zu einer Beschädigung der Ladung führen, falls die Ladung nicht gesichert ist. Zudem können sie bei dicht hinterherfahrenden LKWs zu gefährlichen Situationen führen. Fahrzeugkomponenten werden auch somit geschont.

Wechselbrücke aufnehmen und abstellen

Das System funktioniert mit unterschiedlichen Typen von Wechselbrücken (C745 und C782). Es sind keine Modifikationen an den Wechselbrücken notwendig. Die Erprobung und Feldtests wurden mit unterschiedlichen Wechselbrücken durchgeführt. Die Performanz des automatisierten KAMAG PM war ähnlich mit jeder Wechselbrücke.

Beim Aufnehmen einer Wechselbrücke kann es zu einer fehlerhaften Aufnahme kommen, falls das Fahrzeug nicht genau positioniert ist. Dabei treten die Fehler beim lateralen Abstand und der Orientierung auf. Die longitudinalen Fehler wurden durch die Optimierung behoben. Fehler wurden richtig erkannt und die Mission in diesem Fall abgebrochen.

Die Manöver, um mit oder ohne Wechselbrücke herauszufahren, funktionieren gut und führen nur sehr selten zu einem Abbruch.

In dieser Phase gibt es noch Optimierungsbedarf, um eine bessere zeitliche Performanz zu erreichen. Dabei könnten Tätigkeiten schneller durchgeführt (Hubtisch heben mit einer höheren Geschwindigkeit) oder parallelisiert (Hubtisch heben und Wechselbrücke gleichzeitig verriegeln) werden.

Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit des automatisierten KAMAG PM, also die vollständige Bereitschaft, mit allen Funktionalitäten im automatisierten Betrieb zu fahren, wurde hauptsächlich durch drei Faktoren beeinflusst. Der erste Faktor sind die Wetterbedingungen. Bei schlechten Wetterbedingungen (Regen, Schnee) ist die Verfügbarkeit reduziert, da die sichere Kollisionsvermeidung nicht verfügbar ist. Der zweite Faktor ist der Ausfall von Komponenten: mehrmals mussten Lidar-Sensoren auf dem KAMAG PM ausgetauscht werden. In diesem Zeitraum war das Fahrzeug nicht verfügbar. Drittens war die Verfügbarkeit aufgrund von zeitweisem Mangel an LTE-Empfang reduziert, jedoch konnten nur selten keine Transportaufträge aus diesem Grund zugewiesen werden.

Vollständigkeit des Systems und Ausblick auf die weiteren Schritte

Der automatisierte KAMAG PM ist in der Lage, Wechselbrücken von A nach B automatisch, ohne menschliches Eingreifen, zu transportieren. Dabei wurden die Kernfunktionalitäten langfristig und unter realen Bedingungen erprobt: Wechselbrücke erkennen, Manövertrajektorie berechnen und abfahren, Wechselbrücke aufnehmen, Wechselbrücke an der Rampe oder auf einem Abstellplatz abstellen, Fahren mit oder ohne Wechselbrücke, sich lokalisieren, Hindernisse erkennen und darauf reagieren und bremsen.

Um einen reibungslosen logistischen Betrieb im Mischverkehr zu erlauben, sind einige Funktionalitäten noch zu implementieren. Die automatisierten Fahrzeuge müssen in das Yard-Management-System von DACHSER integriert werden, damit manuelle und automatisierte Fahrzeuge die Transportaufträge über das gleiche System bekommen. Die Öffnung und Schließung von Wechselbrückentüren ist organisatorisch oder mithilfe von alternativen Systemen wie Vorsatzschleusen oder Rolltoren zu regeln, da das automatisierte Fahrzeug diese Tätigkeit nicht selbst übernehmen kann. Die Automatisierungszone muss auf dem ganzen Betriebshof umgesetzt und der KAMAG PM hier integriert werden, damit das Fahrzeug die Validierung von freien Fußgängerüberwegen aus dem Leitsystem erhält. Alternativ kann an einer OnBoard-Lösung gearbeitet werden. Schließlich soll die V2X-Kommunikation zwischen der Rampe und dem KAMAG PM integriert werden, um die Personensicherheit an der Rampe zu gewährleisten. Das im KAMAG PT integrierte System ist dabei prinzipiell auf den KAMAG PM übertragbar.

- Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeit

Nachfolgend wird die Vorgehensweise der Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeit dargestellt. Es wurden jeweils manuell gesteuerte, konventionelle Fahrzeuge mit automatisierten Fahrzeugen

verglichen. Hierdurch wurde ein systematischer Vergleich der Fahrzeugvarianten erreicht (s. Abbildung 58). Die Durchsatzberechnung zielt auf die Vergleichbarkeit der Leistung in Aufträgen pro Betriebsstunde. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung mittels Total Cost of Ownership resultiert in Kosten je Betriebsstunde.

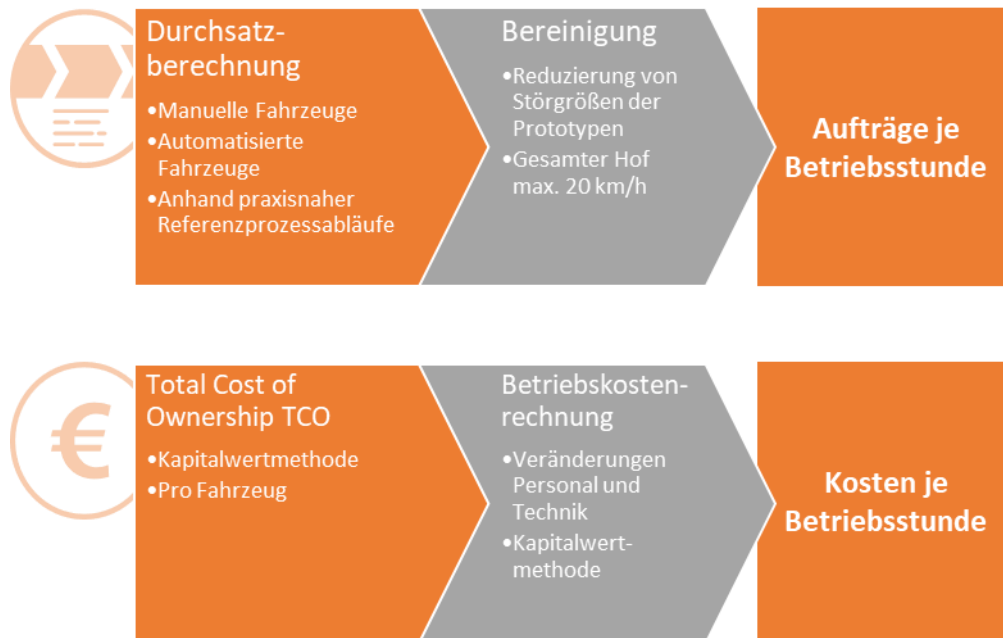


Abbildung 58: Übersicht der genutzten Vorgehensweisen

Durchsatzberechnung

Ziel des Arbeitspakets 8.2 war es, die Prozessabläufe von manuellen und automatisierten Fahrzeugen hinsichtlich ihrer Effizienz auf den Betriebshöfen zu vergleichen, zu analysieren und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Sammlung und Analyse von Daten, die bereits durch das bestehende Yard-Management-System erfasst werden. In diesem Sinne spielte die Zusammenarbeit mit dem DACHSER Yard Management eine entscheidende Rolle. So wurde zu Beginn dieses Arbeitspakets die Bereitstellung spezifischer Daten vereinbart, die bereits in einer ersten Sichtung durch das Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (IML) das Verständnis für die einzelnen Teilprozesse im Kontext des Gesamtsystems über AP 2 hinaus erhöhten. Darauf aufbauend wurden mehrere datenbasierte Interviews mit den Verantwortlichen des Yard Managements geführt, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen und noch unbekannt Zahlen zu ermitteln. Dabei waren beispielsweise Informationen bezüglich:

- Schichtplan,
- Mitarbeiter- und Fahrzeugpool,
- Ladeeinheiten,
- geschätzte und erfasste Umsetzfahrten pro Stunde, Tag und Woche,

- Identifikation der Stoßzeiten der Yard-Prozesse,
- Mitarbeiterbedarf unter Einflussnahme von Urlaub, Krankheit, Pausen, etc.

zu evaluieren und korrekt zu interpretieren, um ein genaues Bild der aktuellen Betriebsabläufe und der Einsatzmöglichkeiten für automatisierte Systeme zu erhalten. Nach den Interviews mit den Verantwortlichen des DACHSER Yard Managements und einer weiterführenden Datenanalyse im Rahmen des Forschungsprojektes SAFE20 wurde deutlich, welche Informationen noch benötigt werden, um dem angestrebten Ziel einer detaillierten Vergleichsanalyse zwischen automatisierten und manuellen Fahrzeugen auf dem Betriebshof gerecht zu werden.

Spezifische Informationen, wie beispielsweise

- Dauer der Umsetzfahrten je Fahrzeugtyp,
- Dauer der üblichen Stillstände je Fahrzeugtyp,
- Identifikation der einzelnen Teilprozesse einer Umsetzfahrt,
- Dauer der einzelnen Teilprozesse der Umsetzfahrten je Fahrzeugtyp

konnten dem System nicht genau entnommen werden, wodurch eine eigene, der Forschungsfrage angepasste Datenerhebung im Projekt erfolgen musste.

Diese Datenerhebung erfolgte in Form von Referenzfahrten, bei denen Projektmitarbeiter des Fraunhofer IML als Beifahrer sowohl manuelle als auch automatisierte Fahrzeuge begleiteten. Ziel war es, detaillierte Informationen über die einzelnen Teilprozesse einer Umsetzfahrt zu sammeln und im Anschluss deren Dauer zu erfassen. Eine typische Umsetzfahrt wird im Folgenden beschrieben.

Die Umsetzfahrt von Ladeeinheiten beginnt mit der Annahme des Auftrags durch den Fahrer, der die Aufträge basierend auf seiner Erfahrung auswählt, priorisiert und sortiert. Anschließend fährt er zur Wechselbrücke oder zum Sattelaufleger, um die Ladeeinheit aufzunehmen, manchmal sogar mit Geschwindigkeiten über 20 km/h.

Bei Ankunft an der Ladeeinheit positioniert der Fahrer das Fahrzeug, nähert sich rückwärts an und hebt die Ladeeinheit an. Bei Sattelauflegern schließt er gegebenenfalls die Druckluft an oder löst die Bremsen und entfernt Unterlegekeile sowie öffnet oder schließt Türen nach Bedarf.

Die Umsetzfahrt wird fortgesetzt, wobei die Geschwindigkeit vom Gewicht der Ladeeinheit abhängt. Am Zielort angekommen, positioniert er das Fahrzeug erneut, fährt rückwärts an die Absetzposition und lässt die Ladeeinheit ab. Anschließend führt er je nach Bedarf weitere Arbeiten aus, wie das erneute Anschließen der Druckluft, Positionieren von Unterlegekeilen und Türen gemäß dem Auftrag. Gelegentlich entscheidet der Fahrer auch während des laufenden Auftrags, Arbeiten für zukünftige Aufträge durchzuführen, falls er sich bereits in der Nähe der betroffenen Ladeeinheit befindet.

Erfahrene Fahrer können Aufträge des Yard-Systems modifizieren, um beispielsweise das Abstellen von Ladeeinheiten direkt neben dem Ort einer zukünftigen Pick-Mission zu ermöglichen.

Abschließend bestätigt der Fahrer den Abschluss des Auftrags. In der folgenden Abbildung 59 wurden die auswertungsrelevanten Prozessschritte dargestellt.

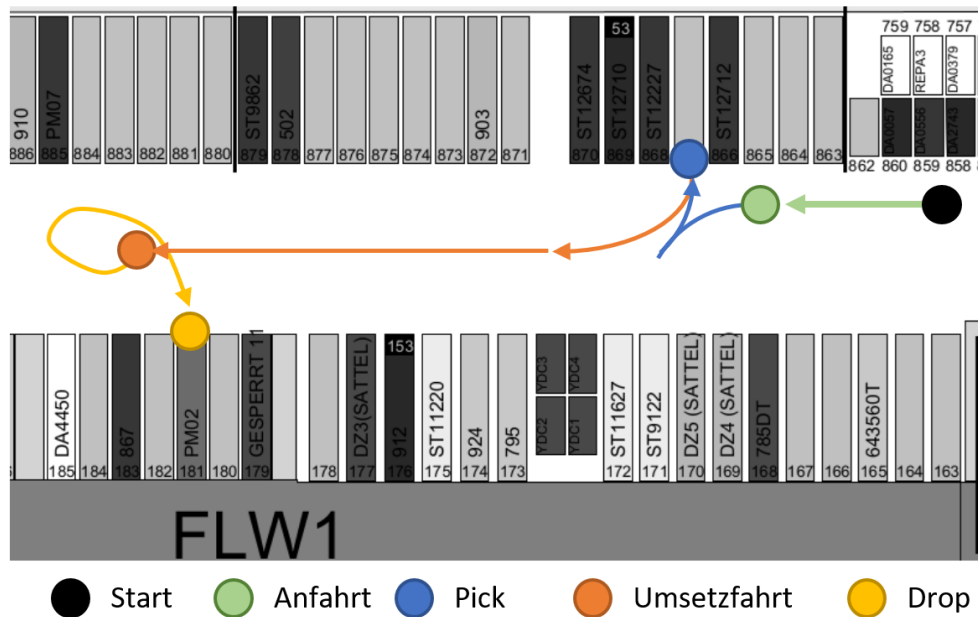


Abbildung 59: Umsetzfahrt

Arbeiten, die zwischen oder während der Aufträge erledigt werden, werden ebenfalls protokolliert, jedoch werden sie bei der Bewertung des Prozesses nur bedingt berücksichtigt. Dazu gehören Tätigkeiten wie das Beantworten von Fragen von betriebsfremden Lastkraftwagenfahrern bezüglich des Abstellorts ihrer Ladeeinheiten oder das Überreichen der entsprechenden Unterlagen.

So wurde deutlich, dass einige Handgriffe während einer typischen Umsetzfahrt stattfinden, die innerhalb dieses Projekts nicht zu automatisieren sind und bei der Gegenüberstellung von manuellem und automatisiertem Fahrzeug berücksichtigt werden müssen.

Angepasst an diese Fahrten und die Fahrten der automatisierten Fahrzeuge wurden die Zeiten der einzelnen Prozessschritte aus der Position des Beifahrers erfasst, im Anschluss ausgewertet und bereinigt. Hierbei waren beispielsweise Einflussgrößen wie der Hawthorne-Effekt zu gewichten.

Der Einfluss des Hawthorne-Effekts ist in diesem Anwendungsfall nicht zu vernachlässigen. Der Hawthorne-Effekt bezieht sich auf die Tendenz von Personen, ihre Leistung zu verbessern oder ihr Verhalten zu ändern, wenn sie wissen, dass sie beobachtet werden. Im Kontext der Umsetzfahrten von Ladeeinheiten könnte dies bedeuten, dass die Fahrer möglicherweise ihre Arbeitsweise ändern oder sich besonders bemühen, wenn sie wissen, dass ihre Tätigkeiten protokolliert und bewertet werden. In diesem konkreten Anwendungsfall wurden beispielweise Pausen nach hinten verschoben oder Tätigkeiten besonders schnell ausgeführt.

Darüber hinaus könnte die Kenntnis, dass ihre Handlungen protokolliert werden, dazu führen, dass die Fahrer ihre Arbeitsweise anpassen, um den erwarteten Standards besser zu entsprechen. Dies könnte eine Verzerrung der Ergebnisse der Prozessbewertung verursachen, da die beobachteten

Leistungen möglicherweise nicht repräsentativ für das sind, was in Abwesenheit der Beobachtung geschehen würde.

Es ist daher wichtig, den Hawthorne-Effekt bei der Interpretation der Ergebnisse der Prozessbewertung zu berücksichtigen und gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen, um die potenzielle Verzerrung durch die bewusste oder unbewusste Reaktion der Fahrer auf die Beobachtung zu minimieren. In diesem Fall wurde dies durch eine standardisierte Protokollierung und Bewertung der Arbeitsabläufe sowie durch einen regelmäßigen Wechsel der begleiteten Fahrer und eine Auswertung, die eine durchschnittliche Abweichung durch den Effekt einbezieht, realisiert.

Zur Gegenüberstellung der Prozesszeiten von manuellen und automatisierten Umsetzfahrten wurde besonders auf die Betrachtung der manuellen Teilprozesse verzichtet. Die alternative Durchführung der manuell notwendigen Teilprozesse müssten für die vollständige Integration in den derzeitigen Tagesablauf noch untersucht werden. Folgende Teilprozesse der manuellen Zeiten wurden nicht betrachtet:

- **Unterlegkeile bewegen:** Bevor ein Trailer umgesetzt wird, müssen teilweise Unterlegkeile platziert oder entfernt werden (findet nicht bei Wechselbrücken statt).
- **Druckluft anschließen:** Container können mit Druckluftbremssystemen ausgestattet sein. (findet nicht bei Wechselbrücken statt).
- **Öffnen und Schließen der Türen:** Bei einem Transport in zu einem Hallentor oder weg von einem Hallentor müssen die Türen des Trailers manuell geöffnet bzw. geschlossen werden (findet bei Trailer und Wechselbrücken statt).
- **Fragen der betriebsfremden Lastkraftwagenfahrer beantworten:** Im Rahmen der Prozessaufnahme wurden die Fahrer der Umsetzfahrzeuge durch die Fahrer der ankommenden LKW mehrfach mit Fragen zur Hoflogistik unterbrochen (findet bei Trailer und Wechselbrücke statt).

Folgende Einflüsse auf die automatisierten Zeiten der Versuchsfahrzeuge wurden nicht betrachtet:

- **Systemabstürze:** Ein Absturz eines der beiden Leitsysteme wurde aus der Prozesszeitenbetrachtung herausgerechnet.
- **Eingreifen des Sicherheitsfahrers:** Bei einem Eingriff des Sicherheitsfahrers in den Ablauf einzelner Teilprozesse wurde die Zeit dieser Teilprozesse nicht weiter erfasst.
- **Systemfehler oder Abbrüche:** Eingriffe des Systems ohne ersichtlichen Grund (falsch-positiv) wurden von den Prozesszeiten abgezogen.
- **Geschwindigkeiten von unter 20 km/h aus Infrastrukturgründen:** Im Rahmen des Projekts konnte nicht das gesamte Anwendungstestfeld mit Sensorik ausgestattet werden. Bei der Prozesszeiterfassung wurde von einer möglichen Geschwindigkeit von 20 km/h auf dem gesamten Testfeld ausgegangen.

Die Prozesszeiten wurden dabei für insgesamt vier Fahrzeuge (KAMAG PT, PM, PT automatisiert und PM automatisiert) erfasst, wobei der PM während der Prozesszeiterfassung ausschließlich für den Wechselbrückenumschlag eingesetzt wurde und somit auch ein Vergleich der

ladungsträgerspezifischen Performance von automatisierten und manuellen Fahrzeugen möglich ist.

Die folgende Abbildung 60 zeigt die Gegenüberstellung der manuellen und automatisierten Prozesszeiten von Umsetzfahrten nach dem in der Abbildung 59 dargestellten Schema.



Modellierte Prozessanteile (Sekunden)					PT
	PT	PM	F&E aPT	F&E aPM	
Organisation	16	16	53	53	
Anfahrt	48	48	48	48	
Pick	60	35	106	102	
Umsetzfahrt	108	108	108	108	
Drop	41	35	129	73	
Sum (Sek)	273	242	444	384	

Abbildung 60: Manuelle und automatisierte Prozesszeiten (in Sekunden)

Die dargestellten Zeiten bilden den Durchschnitt aller erfassten und bereinigten Prozesszeiten für diesen Teilprozess ab, die im Folgenden für manuelle und automatisierte Prozesse beschrieben werden:

- Organisation:**

Automatisiert: Hier werden in beiden Fahrzeugen die eingehenden Informationen über den auszuführenden Auftrag verarbeitet, mit der derzeitigen Position verknüpft und eine dem Auftrag entsprechende Route geplant.

Manuell: Der Fahrer wählt aus den von der Zentrale in das System eingegebenen Aufträgen den Auftrag aus, der seiner Meinung nach für seine Position am besten geeignet ist, und nimmt ihn an.
- Anfahrt:**

Die Zeit für die Anfahrt ergibt sich bei beiden Fahrzeugen aus der durchschnittlichen Distanz, der Beschleunigung und die maximale Geschwindigkeit von 20 km/h. Hier wurde wie im Vorfeld bereits beschrieben von einer theoretischen vollständigen Abdeckung des Testfeldes durch Sensorik ausgegangen.
- Pick:**

Diese Zeit bezieht sich bei allen Fahrzeugen auf den Zeitraum vom Einlegen des Rückwärtsgangs bis zum Einlegen des Vorwärtsgangs mit aufgenommener Ladeinheit.
- Umsetzfahrten:**

Werden nach dem Schema der Anfahrten berechnet. Die höheren Zeiten im Vergleich zur Anfahrt resultieren daraus, dass die Aufträge nach der kürzesten Anfahrt von der derzeitigen Position ausgewählt werden und so die durchschnittliche Distanz der Umsetzfahrten deutlich höher ausfallen.

- Drop:

Diese Zeit bezieht sich bei allen Fahrzeugen auf den Zeitraum vom Einlegen des Rückwärtsgangs bis zum Einlegen des Vorwärtsgangs nach dem Absetzen der Ladeinheit.

Die Summe der beschriebenen Teilprozesse ergibt so die durchschnittliche Zeit für einen Umsetzauftrag pro Fahrzeug auf dem Betriebshof von DACHSER in Langenau. Darauf aufbauend wurde die Leistungsfähigkeit pro Stunde der einzelnen Fahrzeuge in der folgenden Abbildung gegenübergestellt.

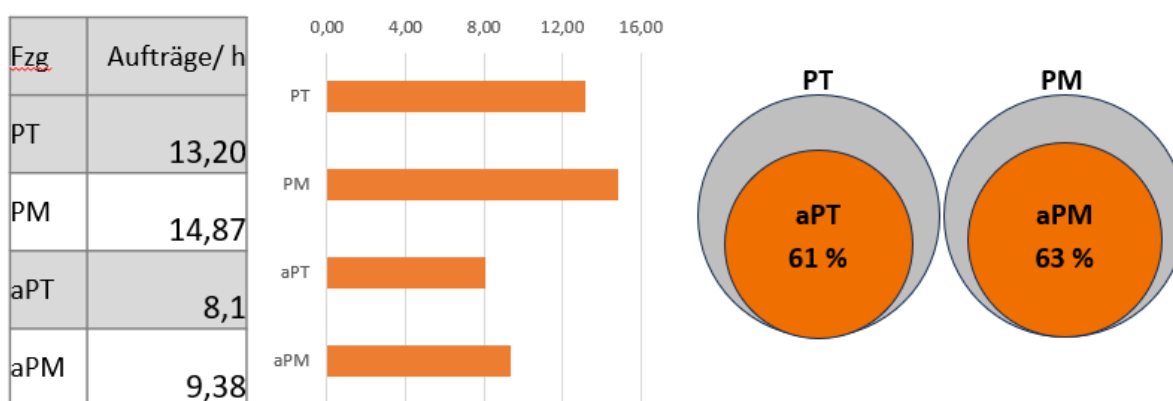


Abbildung 61: Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge

Die automatisierten Fahrzeuge, hier aPT und der aPM, haben einen durchschnittlichen Durchsatz von 8,1 bzw. 9,38 Aufträgen pro Stunde. Im Vergleich dazu sind die manuellen Fahrzeuge PT und PM mit 13,20 bzw. 14,87 Aufträgen pro Stunde deutlich leistungsfähiger. Das bedeutet, dass der aPT nur 61% der Leistung seines manuellen Pendanten PT erreicht, während der aPM bei 63% der Leistung des PM liegt. Am Standort Langenau müssen durchschnittlich 11,5 Aufträge pro Stunde und Fahrzeug bearbeitet werden. Diese Anforderung wird von den automatisierten Fahrzeugen aPT und aPM nicht vollständig erfüllt, was bedeutet, dass die Anzahl der Fahrzeuge bei einem vollautomatisierten Fuhrpark erhöht werden müsste. Ein weiterer kritischer Aspekt sind die Spitzenzeiten, in denen besonders viele Aufträge bearbeitet werden müssen. Hier zeigen die manuellen Fahrzeuge einen deutlichen Vorteil, da sie ihre Leistung kurzfristig auf bis zu 18 Aufträge pro Stunde steigern können. Diese Flexibilität ermöglicht es ihnen, auch bei erhöhtem Auftragsvolumen effizient zu arbeiten und Engpässe zu vermeiden, was für eine reibungslose Abwicklung in Spitzenzeiten entscheidend ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass manuelle Umsetzfahrzeuge derzeit hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit überlegen sind und zudem flexibler auf Lastspitzen reagieren können. Automatisierte Fahrzeuge bieten jedoch ein großes Potenzial, insbesondere wenn die Prozesse der Annahme und Abgabe optimiert werden und die Zusammenarbeit der beiden Leitsysteme

beschleunigt wird. Zum derzeitigen Stand der Entwicklung eignen sich die automatisierten Fahrzeuge vor allem außerhalb der Spitzenzeiten. Auch ein nächtlicher Einsatz der Fahrzeuge ist denkbar. In den nächtlichen Stunden, in denen die manuelle Belegschaft nicht verfügbar ist, könnten automatisierte Fahrzeuge kontinuierlich Aufträge abarbeiten. Durch den Einsatz der automatisierten Fahrzeuge in der Nacht könnten systembekannte Aufträge, die während der frühen Spitzenzeit anfallen, vorgearbeitet werden oder noch ausstehende Aufträge der späten Spitzenzeit ohne besondere Priorität abgearbeitet werden. Beim Betrieb mehrerer automatisierter Fahrzeuge in einem Arbeitsbereich ist perspektivisch von einer Effizienzsteigerung auszugehen, da die automatisierten Fahrzeuge, durch das Leitsystem gesteuert, gut miteinander harmonisieren und Interaktionen mit manuellen Fahrzeugen, die zu Verzögerungen führen könnten, reduziert werden.

Wirtschaftlichkeitsberechnung

Um die Wirtschaftlichkeit von automatisierten Fahrzeugen gegenüber manuellen Fahrzeugen zu bewerten, wurde die Total Cost of Ownership (TCO) Methode basierend auf einer Kapitalwertmethode verwendet. Dieser Ansatz ermöglichte eine umfassende Analyse der Gesamtkosten über die gesamte Nutzungsdauer eines Fahrzeugs. Die schrittweise Vorgehensweise wurde wie folgt angewendet:

1. **Datenerhebung:** Zuerst mussten alle relevanten Kosten und Parameter für beide Fahrzeugtypen erfasst werden. Dazu gehörten die Anschaffungskosten, jährliche Betriebskosten (wie Kraftstoff, Wartung und Versicherung), der Restwert am Ende der Nutzungsdauer, die geplante Nutzungsdauer des Fahrzeugs sowie der Diskontsatz, der den Kapitalzins widerspiegelt.
2. **Abschätzung der zukünftigen Kosten und Vorteile:** Für jedes Jahr der Nutzungsdauer werden die jährlichen Kosten und potenziellen Einsparungen für beide Fahrzeugtypen geschätzt. Dies umfasst alle laufenden Betriebskosten und gegebenenfalls erwartete Vorteile, wie geringere Wartungskosten bei automatisierten Fahrzeugen.
3. **Kapitalwertberechnung:** Alle zukünftigen Kosten und Vorteile werden auf den gegenwärtigen Wert diskontiert. Dies erfolgt durch Anwendung der Kapitalwertformel, bei der die jährlichen Kosten durch den Diskontsatz angepasst werden, um den gegenwärtigen Wert zu berechnen.
4. **Berechnung der TCO:** Die Gesamtkosten über die gesamte Nutzungsdauer des Fahrzeugs werden summiert, indem die diskontierten Werte aller jährlichen Kosten addiert werden. Dies ergibt die Total Cost of Ownership für jeden Fahrzeugtyp.
5. **Vergleich der TCO:** Schließlich werden die TCO-Werte der beiden Fahrzeugtypen verglichen. Der Fahrzeugtyp mit dem niedrigeren TCO wird als wirtschaftlicher angesehen.

Durch diese methodische Herangehensweise wurde eine fundierte und ganzheitliche Bewertung der Wirtschaftlichkeit ermöglicht, die alle relevanten Kostenfaktoren über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs berücksichtigte.

Für die Abschätzung der zukünftigen Kosten und Vorteile wurden neben den Eingangsdaten der Datenerhebung folgende Annahmen getroffen:

- **Supervisor:** Ein Supervisor kann bis zu vier Fahrzeuge parallel bedienen, was die Personalkosten für den Betrieb der automatisierten Fahrzeuge reduziert.
- **Keine Modifikationen:** Es wird davon ausgegangen, dass keine Modifikationen der Trailer, Wechselbrücken oder Tore erforderlich ist.
- **Manueller Aufwand:** Ein manueller personeller Aufwand von 10-15 % bleibt bestehen, um Tätigkeiten wie das Anlegen von Keilen, das Öffnen von Türen und das Verbinden von Leitungen zu übernehmen.
- **Kraftstoff-/Energieverbrauch:** Der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch wird für beide Fahrzeugtypen als gleich angenommen.

Nachfolgend sind in Abbildung 62 Auszahlungen und der kumulierte Barwertverlauf für einen Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb dargestellt, in grauer Farbgebung für das konventionelle Fahrzeug, in Orange für ein automatisiertes Fahrzeug. Für beide Fahrzeuge fallen zum Zeitpunkt t_0 relativ hohe barwertige Auszahlungen an, die auf die Anschaffung der Fahrzeuge zurückzuführen sind. Beim automatisierten Fahrzeug fallen die Anschaffungskosten für Fahrzeug nahezu doppelt so hoch aus wie für das konventionelle Fahrzeug. Diese große Differenz wird über den Zeitraum der Nutzung (sieben Jahre) durch die geringer ausfallenden laufenden Kosten, die unter anderem durch niedrigere Personalkosten erzielt werden, und schlussendlich durch die Veräußerung der Fahrzeuge und der damit erzielten barwertigen Einzahlung des Restwerts ausgeglichen.

In gelber Farbgebung wurde eine zukünftige Vision entworfen, die die Senkung der Betriebskosten durch den Einsatz automatisierter Fahrzeuge beinhaltet. Dies soll durch eine effizientere Aufteilung der Infrastrukturkosten und die Vermeidung von Gewaltschäden erreicht werden. Langfristig soll die Automatisierung zu einer Reduktion der Gesamtkosten führen, indem Personalressourcen effizienter genutzt und Schäden minimiert werden.

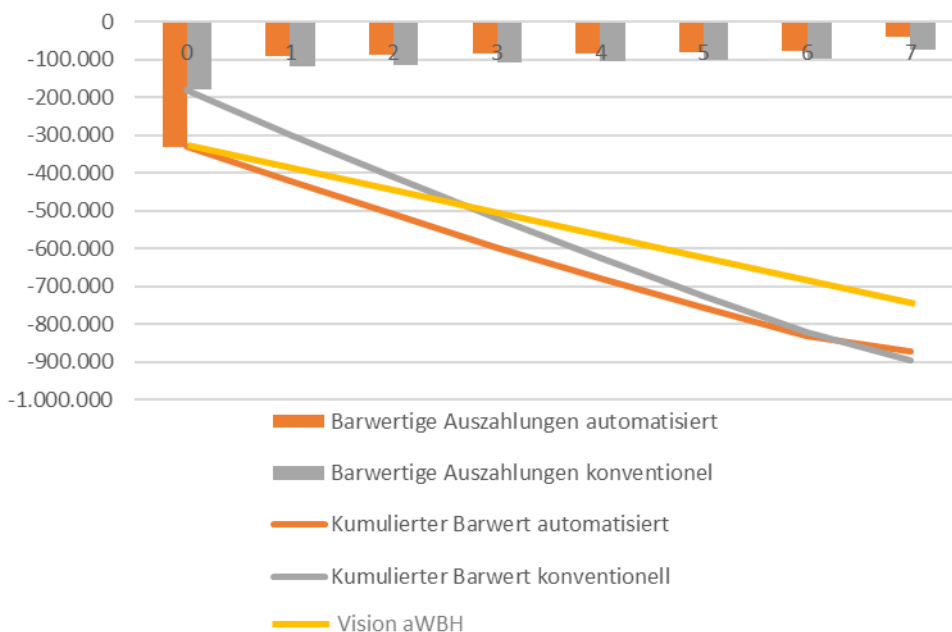


Abbildung 62: Jährliche Auszahlungen und kumulierter Barwertverlauf (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb)

Nachfolgend sind in Abbildung 63 die Anteile der einzelnen Kosteneinflussgrößen für die zwei Fahrzeugvarianten dargestellt. Wie bereits zuvor dargestellt, fallen die Anschaffungskosten für das automatisierte Fahrzeug nahezu doppelt so hoch aus und die Personalkosten geringer. Die Kraftstoffkosten fallen gleich aus, da im Modell die gleichen Verbräuche zu Grunde gelegt wurden. Bei automatisierten Fahrzeugen kommen zusätzliche Aufwände für Technologiekosten hinzu, die aus infrastrukturseitigen Leit- und Steuerungssystemen sowie Sensorik resultieren.

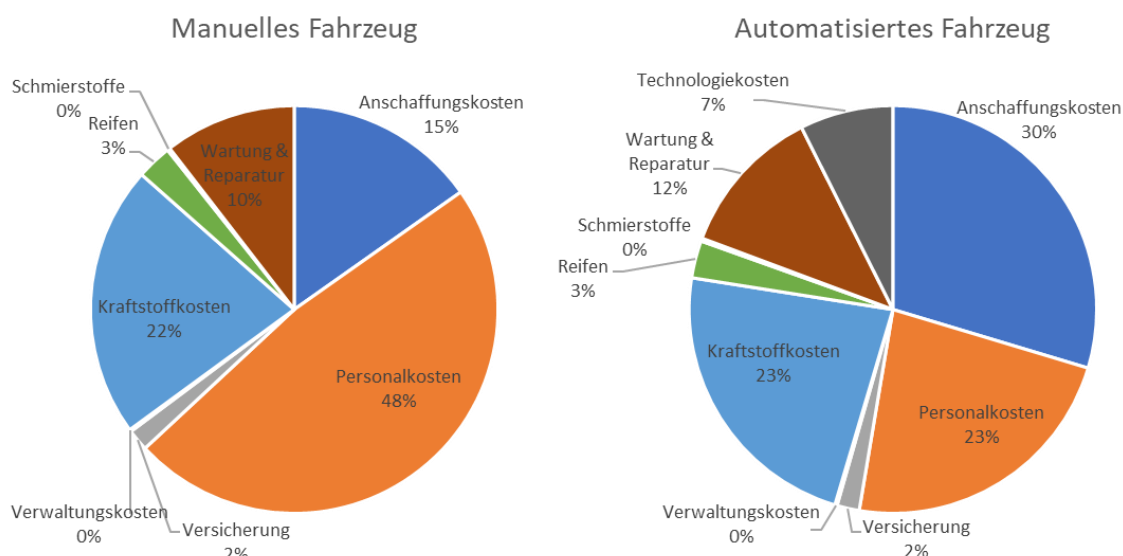


Abbildung 63: Anteile der Kosteneinflussgrößen je Fahrzeug (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb)

Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von automatisierten Fahrzeugen gegenüber manuellen Fahrzeugen gibt es bestimmte Systemgrenzen, die in der Analyse berücksichtigt wurden.

Der Einfluss von Gewaltschäden auf die Fahrzeuge oder Infrastruktur wird in dieser Analyse nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass mögliche Kosten oder Einsparungen, die durch die Reduktion oder das Auftreten von Gewaltschäden entstehen könnten, nicht in die Berechnungen einfließen. Die Kosten für zusätzliche Ausstattungen der Ladeeinheiten, wie beispielsweise automatische Kupplungen für Elektrik und Druckluft, sind nicht in die Bewertung eingeflossen. Diese zusätzlichen Komponenten könnten zwar den Betrieb der automatisierten Fahrzeuge effizienter gestalten, wurden jedoch in dieser spezifischen Wirtschaftlichkeitsanalyse nicht berücksichtigt.

Die Untersuchung zur Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeit von automatisierten Fahrzeugen auf Betriebshöfen hat mehrere wichtige Erkenntnisse erbracht. Ein wesentlicher Kostentreiber ist die Anschaffung der Automatisierungstechnologie fahrzeug- und infrastrukturseitig. Hierzu zählen insbesondere die Sensorik und die spezielle Fahrzeugausstattung, die erforderlichen Infrastruktur- und Sensorknoten sowie die Implementierung der Systeme.

Die Wirtschaftlichkeit automatisierter Systeme steigt mit zunehmender Betriebsdauer, da die Fixkosten auf mehr Betriebsstunden verteilt werden können. Dennoch bleiben bis zu 40 % des Personaleinsatzes auch mit automatisierten Prozessen erforderlich, da bestimmte Tätigkeiten weiterhin menschliches Eingreifen benötigen.

Für eine erfolgreiche Markteinführung sind Use-Cases abseits der Stoßzeiten besonders vorteilhaft, da die Systeme hier effizienter betrieben werden können. Darüber hinaus könnten angepasste Betriebskonzepte für automatisierte Fahrzeuge weitere Lösungsansätze bieten, um die Wirtschaftlichkeit und Effizienz dieser Systeme zu erhöhen.

Aktuell erreichen automatisierte Systeme jedoch nicht die Effizienz manueller Fahrzeuge. Während automatisierte Fahrzeuge sequenziell arbeiten, können manuelle Fahrer Teilprozesse parallelisieren, beispielsweise das gleichzeitige Bedienen eines Hubtisches während der Fahrt. Dies führt zu einer höheren Flexibilität und Einsatzmöglichkeit der manuellen Fahrzeuge, die kurzfristig ihre Leistung auf mehr als 18 Aufträge pro Stunde steigern können.

Abschließend lässt sich folgern, dass die erste wirtschaftliche Integration automatisierter Hoffahrzeuge wahrscheinlich auf Betriebshöfen mit hohem und homogenem Auftragsbestand abseits der Stoßzeiten erfolgen wird. Diese Rahmenbedingungen bieten das größte Potenzial, die Kostenvorteile und Effizienzgewinne der Automatisierung bestmöglich zu nutzen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Seitens Fraunhofer IML und IVI wurden die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises nahezu in allen Bereichen im Rahmen der Projektlaufzeit wie geplant erreicht. Die Personalkosten wurden wie geplant verwendet. Im Bereich Reisen wurde weniger in Anspruch genommen, da ein Großteil der Termine im Konsortium als Online Termine durchgeführt wurden. Im Bereich andere Fremdleistungen ergaben sich am IVI Abweichungen, da die Beauftragung von Motor AI nicht erfolgte.

Abweichungen ergaben sich bei der Beschaffung am Fraunhofer IVI durch Wegfall eines Zulieferers, wodurch sich eine Mittelrückgabe für das Umfeldfassungssystem ergab. Des Weiteren wurden durch Bedarfsänderungen nicht die gesamten Anlagenkosten benötigt.

In Bezug auf den Finanzierungsplan verweisen wir auf den zahlenmäßigen Verwendungsnachweis.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die ambitionierten Vorhabenziele gehen z.T. deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Daher wurden in vielen Bereichen (ganzheitliches Sicherheitskonzept, sichere Objekterkennung und -klassifikation, Rohdatenfusion, Echtzeiterstellung einer zentralen DAZ, Dekompositionsoptionen für fahrzeugseitige und infrastrukturseitige Sicherheitsfunktionen, sichere Lokalisierung, sichere Notbremse, sichere hochperformante Hardware etc.) neue, kreative Lösungen konzipiert, umgesetzt und getestet. Meist sind im Vorfeld der Konzeptionsphase umfangreiche Recherchen, Untersuchungen, Analysen und experimentelle Vorversuche durchzuführen, um eine solide Entscheidungsbasis aufzubauen. Vielfach können spezifische Fragestellungen nur durch das im Projektteam gebündelte Know-how überhaupt sinnvoll angegangen und beantwortet werden.

Insbesondere die hohen Sicherheitsanforderungen für vollautomatische Fahrzeuge führten zu einem signifikanten Grundrisiko für alle Partner. Hier lieferte der Stand der Technik lediglich Anhaltspunkte jedoch weder vergleichbaren Lösungen noch ganzheitlich schlüssige Konzepte. Das gilt im Besonderen für die Kerninnovation des Vorhabens, die an sich durch eine hohe Strahlkraft und Multiplikatorwirkung gekennzeichnet ist. Das Grundrisiko erhöhte sich auch durch die geplanten Demonstrationen und Fahrversuche. Dabei wird der Großteil des vorhandenen und im Projekt erzeugten Konzeptwissens in der praktischen Anwendung auf die Probe gestellt.

Es wurden wesentliche neue Erkenntnisse zu Funktions- und insbesondere zu Sicherheitsanforderungen gewonnen, die signifikanten Einfluss auf alle anschließenden Entwurfs- und Entwicklungsschritte sowohl auf Gesamtsystem- als auch auf Subsystemebene haben. Da diese Erkenntnisse dazu führen können, dass Systeme und/oder Komponenten technisch und/oder wirtschaftlich nicht sinnvoll darstellbar sind (z.B. ASIL D bzw. SIL 3/4 für viele Systemfunktionen), ergibt sich für das Vorhaben ein signifikantes wirtschaftliches und technisches Risiko für alle im Vorhaben geplanten Subsystementwicklungen und die daran beteiligten Partner aus der Wirtschaft.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit

Die gewonnene Expertise und Kompetenz dient als Grundlage für die weitere Arbeit der Fraunhofer-Institute in Forschungs- und Anwendungsprojekten. Die Erkenntnisse wurden bereits durch das Fraunhofer IML intern in einer Studie im Auftrag des Fraunhofer-Leitmarkts Mobilitätswirtschaft der Fraunhofer-Allianz Verkehr eingebracht. Diese beschäftigte sich mit der Fragestellung, wie sich Autonomes Fahren auf den künftigen Mobilitätsmarkt im Personenverkehr als auch im Güterverkehr

auswirkt. Des Weiteren wird die Expertise weiterhin durch das Fraunhofer IVI und Fraunhofer IML auf verschiedenen Messen, Veranstaltungen sowie Konferenzen geteilt.

Die Erfahrungen zum Einsatz von 3D Sensorik und -algorithmen zur Erkennung von Objekten auf dem Logistikhof können auch auf andere Use-Cases in der Intralogistik adaptiert und nutzbar gemacht werden. So beispielsweise für die Objekterkennung von mobilen Robotern in Produktionsumgebungen oder für die Servicerobotik.

Es ist geplant das Thema der autonomen Hoflogistik in geeigneten Gremien (bspw. im Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.) hinsichtlich Normung und Standardisierung weiter voranzutreiben. Dazu gehören u.a. die Standardisierung von (3D-) Sensordaten und daraus erstellten Umgebungsmodellen bzw. die Standardisierung von Schnittstellen zwischen autonomen Fahrzeugen und Hofmanagementsystemen. Ziel ist es, aus den Kontakten dieser Gremienarbeit weitere Industrie- und Forschungsprojekte im Bereich der autonomen Hoflogistik zu akquirieren. Das Fraunhofer IML strebt an, mit den gemachten Erfahrungen, welche bezüglich des Vergleiches der Durchsatzberechnung und die Darstellung des potentiellen wirtschaftlichen Potentials, aufbauende Maßnahmen zu mehr Wirtschaftlichkeit dieser Fahrzeuge abzuleiten und unterschiedliche Transportaufgaben der Yard-Logistik aus Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutzgesichtspunkten zu bewerten bzw. den Einsatz von o.g. Fahrzeuge gezielter wissenschaftlich zu begleiten.

Die durchgeführten Feldtests trugen dazu bei, die Marktreife von sowohl autonom fahrenden, konventionell angetriebenen als auch elektrisch-autonomen Versetzfahrzeugen, zu steigern. Es stehen somit für weitergehende Überlegungen von Versetzfahrzeugen elementare Richtwerte bereit, um Fahrzeugeinsätze logistisch, algorithmisch und wirtschaftlich planen zu können.

Die technische Machbarkeit eines elektrisch-autonomen Betriebes, sowohl prototypisch im Feldtest als auch für den wirtschaftlichen Nutzen des Anwenders, wurde aufgezeigt. Des Weiteren ist die Praxistauglichkeit aus logistischer Sicht prinzipiell gegeben, eine breite Anwenderakzeptanz gilt es zu schaffen.

Es stehen nun Daten aus umfangreichen Messungen, Datenerhebungen und Analysen im Realbetrieb zur Verfügung. Diese können Verwendung bei der Analyse auf ökologischen und wirtschaftlichen Nutzen für die Umstellung von bestehenden und den Aufbau von neuen Anwendungsfeldern im Bereich hochautomatisierte Wechselbrückenumsetzer und Sattelzugmaschinen finden. Daraus sind positive Netzwerkeffekte zu erwarten, die es zu nutzen gilt.

Ein Know-how Transfer allgemein, aber auch in interdisziplinäre Bereiche ist der generelle Anspruch vom Fraunhofer IML, folglich soll dieser auch im Fokus der nächsten Jahre bestehen.

Ein Wissenstransfer bspw. durch Verbesserung von Forschung und Lehre sowie Veröffentlichungen, ist aufgrund der Struktur der Fraunhofer Gesellschaft (Anschluss Universitäten, Institutsleiter sind ebenso Lehrstuhlinhaber) obligatorisch, sowohl im kurz- als auch langfristigen Kontext.

2.5 Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens

Seit 2020 hat das Forschungsgebiet des automatisierten und vernetzten Fahrens auf privaten Grundstücken deutliche Fortschritte gemacht, besonders im Bereich von Parkhäusern, Werksgeländen und Logistikzentren. Hier einige zentrale Entwicklungen und Trends:

1. Automatisierte Parksysteme und Valet Parking

- Bosch und Mercedes-Benz haben 2021 das erste serienreife Automatisierte Valet-Parken (AVP) in Stuttgart gestartet. Fahrzeuge können dort autonom einen Parkplatz finden und wieder abholen, ohne dass der Fahrer anwesend ist.¹⁹
- In ähnlichen Projekten wird erforscht, wie Parkhäuser auf privaten Grundstücken vollständig automatisiert werden können. Die Idee ist, den Raum besser zu nutzen und den Parkprozess effizienter zu gestalten.

2. Automatisierung auf Industrie- und Werksgeländen

- Viele Unternehmen, insbesondere in der Logistik, testen autonom fahrende Fahrzeuge auf Werksgeländen und in geschlossenen Bereichen. Volkswagen Nutzfahrzeuge testet seit 2022 autonome Shuttle-Systeme für den innerbetrieblichen Transport.
- Diese Fahrzeuge nutzen modernste Sensorik, wie LIDAR, Kamera- und Radarsysteme, um sicher durch komplexe Umgebungen zu navigieren und Hindernissen auszuweichen.

3. Vernetzte Logistiklösungen

- In geschlossenen Logistikzentren und Häfen, wie dem Hafen von Hamburg, werden seit 2021 ferngesteuerte Lkw und Transportfahrzeuge der Firma Fernride erprobt, um den Warenfluss effizienter zu gestalten.²⁰
- Die Firma Outrider hat sich zum Ziel gesetzt automatisierte Fahrzeuge auf Werksgeländen zu steuern. Erprobungen dazu haben begonnen.²¹
- Die Firma ISEE hat in Texas, USA, ein Werksgelände mit mehreren automatisierten Fahrzeugen zum Rangieren von Trailern in Betrieb genommen.²²

4. Forschung zu Sicherheitsaspekten

- Auf privaten Grundstücken gibt es weniger strenge regulatorische Anforderungen als im öffentlichen Straßenverkehr, was die Erprobung neuer Technologien erleichtert. Forschungseinrichtungen und Unternehmen konzentrieren sich stark auf die Sicherheitsoptimierung dieser Systeme, um den Übergang von geschlossenen Geländen auf öffentliche Straßen zu erleichtern.
- Zudem wurden redundante Sicherheitsmechanismen entwickelt, um Ausfälle in der Sensorik oder bei der Fahrzeugsteuerung zu kompensieren.

¹⁹ Vgl. <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/weltpremiere-fahrerloses-parksystem-von-bosch-und-mercedes-benz-erhaelt-genehmigung-fuer-serieneinsatz-248960.html>

²⁰ Vgl. <https://www.fernride.com/container-transportation>

²¹ Vgl. <https://www.outrider.ai/system/>

²² Vgl. <https://www.isee.ai/news/business-wire-isee-commercially-deploys-worlds-first-fully-autonomous-truck-yard>

5. Digitalisierung und Vernetzung von Infrastrukturen

- Ein weiterer Fortschritt besteht in der Entwicklung smarterer Infrastrukturen. Logistikzentren werden mit Sensoren (z.B. OCR Gates²³) und Kommunikationstechnologien ausgestattet, um die Fahrzeuge besser zu steuern und zu koordinieren.
- 5G-Netzwerke werden verstärkt genutzt, um die schnelle und zuverlässige Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur zu gewährleisten. Besonders auf weitläufigen Firmengeländen oder in Logistikhubs ist dies von Vorteil.

6. Autonome Shuttle-Services

- Auf großen Firmengeländen, Universitäten oder Flughäfen werden zunehmend autonome Shuttle-Fahrzeuge eingesetzt. Seit 2021 gibt es mehrere Pilotprojekte, z.B. von Navya²⁴ und EasyMile²⁵, die zeigen, dass diese Technologie sicher und effizient funktionieren kann.
- Solche Shuttles werden oft auf definierten Strecken eingesetzt und bieten einen Einblick in die Machbarkeit automatisierter Personenbeförderung.

7. Technologische Fortschritte

- Die Entwicklungen in der Künstlichen Intelligenz (KI) und Sensorfusion haben die Zuverlässigkeit und Präzision autonomer Systeme weiter verbessert. So können die Fahrzeuge immer besser auf Umgebungsveränderungen und unvorhersehbare Ereignisse reagieren.
- Die Integration von Edge Computing sorgt dafür, dass die Berechnungen für autonome Fahrzeuge teilweise direkt an der Quelle, also vor Ort, durchgeführt werden, was die Reaktionszeiten verringert.

Mit dem Projekt „ANITA - Autonome Innovation im Terminal Ablauf“²⁶ wurde ein bilateraler Austausch am 30. November 2022 durchgeführt. Es wurde vereinbart sich themenspezifisch vertieft über den jeweiligen Projektfortschritt zu informieren.

Diese Fortschritte verdeutlichen, dass sich das automatisierte und vernetzte Fahren auf privaten Grundstücken stark weiterentwickelt hat, insbesondere in spezialisierten Umgebungen wie Parkhäusern, Logistikzentren und industriellen Werksgeländen.

²³ Vgl. <https://hhla.de/magazin/automated-gate>

²⁴ Vgl. <https://www.navya.tech/en/solutions/moving-people/self-driving-shuttle-for-passenger-transportation/>

²⁵ Vgl. <https://www.easymile.com/de>

²⁶ Vgl. <https://www.anita.digital/index.html>

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Siehe Kapitel 2.1.1.3 bzw. Tabelle 1: Wissenschaftliche Publikationen und Vorträge im Rahmen von SAFE20

3 Lessons learned

Im Verbundprojekt SAFE20 wurden verschiedene Technologien für das automatisierte Fahren von Nutzfahrzeugen auf Betriebsgeländen erarbeitet. Besonders wertvoll war dabei der direkte Austausch zwischen namhaften Zulieferern und Fahrzeugherstellern, sowie DACHSER als Anwender. Für Fraunhofer IVI standen Erkenntnisse im Bereich Missionsplanung, herstellerübergreifende Vernetzung mittels Leitstandsystem, Spurführungsregelung und Fahrzeug-Systemintegration im Vordergrund, welche im Bericht ausführlich beschrieben sind. Hinsichtlich kooperativer Manöverplanung zeigte sich, dass bestehende Algorithmen der mobilen Robotik nur bedingt auf Fahrzeuge mit komplexen Geometrien wie Sattelzüge mit langen Aufliegern übertragbar sind, da die überstrichene Fläche der Fahrzeugkombination vom Verlauf des Knickwinkels abhängt. Die im Vorhaben entwickelten Methoden berücksichtigen die Schleppkurve solcher Fahrzeuge und ermöglichen so die Missionsplanung für nahezu beliebig komplexe Fahrzeuge. Eine wichtige Rolle spielte dabei auch die (zeitliche) Abstimmung der geplanten Pfade untereinander, sodass Konflikte und sogenannte Deadlocks in Engstellen vermieden werden können. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass es im Verlauf der Missionsausführung zu Abweichungen von den geplanten Trajektorien kommen kann. Es wurden verschiedene Verfahren zum Störungshandling untersucht und erfolgreich in Simulationen umgesetzt, es zeigte sich jedoch insbesondere im Feldversuch mit DACHSER, dass weitere Forschungsarbeiten nötig sind, um auch im Falle von Störungen eine optimale Planung und Ausführung der Fahrzeugbewegungen hinsichtlich globaler Optimierungskriterien wie Fahrzeugdurchsatz und durchschnittlichen Umlaufzeiten nötig sind. Wichtig war dabei auch das Feedback der Anwender, dass sich die automatisierten Maschinen im Mischverkehr nicht zu langsam bewegen dürfen, um manuell geführte Fahrzeuge nicht zu behindern.

Literaturverzeichnis

- Čáp, M., Gregoire, J., & Frazzoli, E. (Oct. 2016). Provably safe and deadlock-free execution of multi-robot plans under delaying disturbances. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (S. 5113–5118). Daejeon, South Korea. doi:10.1109/IROS.2016.7759750
- DGUV - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. (31. 03 2022). *DGUV-Homepage*. Abgerufen am 1. März 2024 von <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/publikationen-nachfachbereich/holz-und-metall/fahrzeugbau-antriebssysteme-instandhaltung/4505/fbhm-119-automatisiert-fahrende-fahrzeuge-in-betrieblichen-bereichen>
- Europäische Union. (29. 06 2023). *Verordnung (EU) 2023/1230 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2023 über Maschinen und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und der Richtlinie 73/361/EWG des Rates*. Abgerufen am 01. Dez. 2023 von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1230>
- Fraunhofer IVI. (August 2019). *Projekt AutoTruck*. Abgerufen am 1. März 2024 von Fraunhofer IVI: <https://www.ivi.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/automatisierte-systeme/autotruck.html>
- Fraunhofer IVI. (2023). *helyOSFramework / logistics-center-demo*. Abgerufen am 11. März 2024 von github.com: <https://github.com/helyOSFramework/logistics-center-demo>
- Fraunhofer IVI. (22. Jan 2024). *helyOS Developer's Manual*. Abgerufen am 22. Jan 2024 von readthedocs.io: <https://helyos-manual.readthedocs.io/en/release/>
- Keppler, F., Kramer, M., Koch, O., Wagner, S., & Janschek, K. (Jan. 2022). Prioritized Planning for Spatiotemporal Trajectory Coordination of Articulated Vehicles and Co-Simulation with ROS, Docker and Gazebo. *2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, (S. 6). Narvik, Norway.
- Khobahi, S. (2017). *Object tracking using kalman filter*. Abgerufen am 17. 06 2023 von [skhoba2.people.uic.edu: https://skhoba2.people.uic.edu/preprints/kalman.pdf](https://skhoba2.people.uic.edu/preprints/kalman.pdf)
- Kramer, M., Keppler, F., & Janschek, K. (Mar. 2022). Verteilte Simulationsumgebung zur Erprobung koordinierter Fahrmanöver automatisierter Fahrzeuge. *VDI Mechatroniktagung 2022*, (S. 6). Darmstadt, Germany.
- Pinkster, I., van de Burgt, B., Janssen, D., & van Veenendaal, E. (2004). *Successful Test Management (2. Aufl.)*. Springer Verlag.
- SAE International. (31. Mai 2019). Automated Driving System (ADS) Marker Lamp (SAE J 3134).
- Telekom Deutschland GmbH. (2022). *Telekom Mobilfunk-Netzausbau*. Abgerufen am 11. Oktober 2022 von <https://www.telekom.de/netz/mobilfunk-netzausbau>

Verschiedene. (13. 01 2006). <https://de.wikipedia.org/wiki/Kalman-Filter>. Abgerufen am 17. 06 2023
von Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kalman-Filter>