



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

Gemeinsamer Schlussbericht

Förderkennzeichen: 19A20011A, 19A20011B,
19A20011C, 19A20011D,
19A20011E, 19A20011F,
19A20011G, 19A20011H

Laufzeit: 10/2020 – 03/2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Autoren

Name	Organisation
Thomas Wolf	ZF CV Systems GmbH
Andre Bilz	DACHSER SE
Maximilian Schellert, M.Sc.	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Felix Keppler, M.Sc.	Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI
Dr. Sebastian Behling	Götting KG
Martin Teuchler	KAMAG Transporttechnik GmbH & Co.KG
Till Sellschopp	SICK AG
Christian Buchhold-Tomazic	Sensor-Technik Wiedemann GmbH

Weitere Autoren

Name	Organisation
Andelko Glavinic	ZF CV Systems GmbH
Daniel Pfefferkorn	ZF CV Systems GmbH
Jens Christel	ZF CV Systems GmbH
Julian van Thiel	ZF CV Systems GmbH
Rüdiger Meyer	ZF CV Systems GmbH
Simon Nuschele	DACHSER SE
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
Bénédicte Bernier	KAMAG Transporttechnik GmbH & Co.KG
Sophie Roscher	SICK AG
Fabio Zachert	SICK AG
Erik Mollbach	SICK AG
Patric Beinschob	SICK AG
Annette Kregel	SICK AG
Martin Weckerle	Sensor-Technik Wiedemann GmbH
Iris Lüpkes	AlbrechtConsult GmbH

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 in der Regel das generische Maskulinum verwendet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen und Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.

Die Rechte aller Abbildungen/Fotos liegen beim SAFE20-Konsortium bzw. den Partnerunternehmen. Die im Bericht genannten Systeme helyOS® und TruckTrix® sind eingetragene Markenzeichen des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI).

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis / Glossar	16
Projektüberblick	20
SAFE20 Projektpartner	20
SAFE20 Assoziierte Partner und Unterauftragnehmer	26
SAFE20 Use-Cases	27
SAFE20 Arbeitspakete	30
1. Projektmanagement (AP 1)	31
1.1. Projektmeetings, Arbeitsgruppen, Veranstaltungen	31
1.2. Öffentlichkeitsarbeit	34
1.3. Wissenschaftliche Publikationen, Vorträge	36
2. Anforderungsanalyse (funktionale Sicht) (AP 2)	38
2.1. Identifikation und Definition der betrachteten Use-Cases / betroffenen Personenklassen (AP 2.1)	38
2.2. Anforderungserhebung	50
2.3. Entwurf vorläufige Systemarchitektur (AP 2.4)	54
2.4. Zusammenfassung AP 2	57
3. Sicherheitskonzept (AP 3)	59
3.1. Risikobeurteilung (AP 3.1)	59
3.2. Identifikation sicherheitsgerichteter Funktionen und funktionales Sicherheitskonzept (AP 3.2)	62
3.3. Funktionale Dekomposition (AP 3.3)	65
3.4. Design und Evaluierung des sicheren Gesamtsystems (AP 3.4)	66
3.5. Analytischer Nachweis umfelderfassender Sicherheitsfunktionen (AP 3.5)	66
3.6. Ableitung technischer Anforderungen an Subsysteme (AP 3.6)	68
3.7. Nachweis anwendbarer Richtlinien (AP 3.7)	69
3.8. Zusammenfassung AP 3	71
4. Sichere Fahrzeugtechnologien (AP 4)	73
4.1. Sichere interne Kommunikation (Framework-Implementierung) (AP 4.1)	73
4.2. Sichere Notbremse (AP 4.2)	74
4.3. KI-basiertes Reaktionsmodell für unvorhergesehene Hindernisse (AP 4.3)	82
4.4. Funktional sichere, hochperformante Rechnerhardware (AP 4.4)	82
4.5. Lokale Bahnplanung (AP 4.5)	92

4.6.	Sichere Nahfeldsensorik für Lkw (AP 4.6)	96
4.7.	Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)	102
4.8.	Sicheres automatisches Handling Wechselbrücke (AP 4.8)	116
4.9.	Sicheres Handling Verteiler-Lkw (AP 4.9)	119
4.10.	Hochverfügbare Ortung mittels Fusionsystem (AP 4.10)	121
4.11.	Schnittstelle autonomes Fahren (AP 4.11)	126
4.12.	Zusammenfassung AP 4	132
5.	Sichere Infrastrukturtechnologien (AP 5)	133
5.1.	Kooperative Manöverplanung über Live-Karte (AP 5.1)	133
5.2.	Sichere Kommunikation und Vernetzung Infrastruktur zu Fahrzeugen V2X (AP 5.2)	143
5.3.	Fahrzeugmanagement-System für Missionsplanung und -überwachung (AP 5.3)	148
5.4.	Ortung / Lokalisierung von Wechselbrücken, Semi-Trailern, Park- und Rampenpositionen / Aktive Objektllokalisierung in Automatisierungszone (AP 5.4)	153
5.5.	Zusammenfassung AP 5	159
6.	Sichere Umfeld-/Objekterfassung (AP 6)	161
6.1.	Sichere Umfeld-/Objekterfassung für Lkw (AP 6.1) / Sichere Umfeld-/Objekterfassung für Sonderfahrzeuge (AP 6.2)	161
6.2.	Sichere Umfeld-/Objekterfassung mit Infrastruktur-Sensorknoten für sicherheitsgerichtete Funktionen (AP 6.3)	192
6.3.	Digitales Echtzeit-Abbild der Automatisierungszone (DAZ) basierend auf Fusion von HD- Karte mit Live-Umgebungsdaten von ISK & Fahrzeugen (AP 6.4)	198
6.4.	Zusammenfassung AP 6	200
7.	Schrittweise Systemintegration (AP 7)	202
7.1.	Aufbau und Inbetriebnahme Automatisierungszone (AP 7.1)	202
7.2.	Systemintegration Fahrzeuge (AP 7.2)	205
7.3.	Test und Validierung der Sicherheitsfunktionen (AP 7.3)	213
7.4.	Test der Automatisierungsfunktionen (AP 7.4)	218
7.5.	Integration des Gesamtsystems (AP 7.5)	227
7.6.	Zusammenfassung AP 7	232
8.	Testen, Lernen und Optimieren im Feld (AP 8)	233
8.1.	Betrieb des Gesamtsystems (AP 8.1)	233
8.2.	Evaluierung des Testbetriebs (AP 8.2)	239
8.3.	Projektabschluss: Ergebnisse, Identifikation weiterer F&E-Bedarfe, Erweiterungspotenzial (AP 8.3)	254
Zusammenfassung und Fazit der Projektpartner		258
Literaturverzeichnis		260

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SAFE20-Konsortium _____	21
Abbildung 2: Übersicht Systembausteine SAFE20 _____	27
Abbildung 3: Automatisierungszone auf Betriebshof mit Infrastruktur-Sensorknoten (ISK), hofseitiger Objekterkennung, Kommunikation und Leitstand-System mit digitalem Echtzeitabbild der Automatisierungszone (DAZ) _____	29
Abbildung 4: Übersicht Arbeitspakete SAFE20 _____	30
Abbildung 5: SAFE20-Schlusspräsentation - Grußwort des Fördergebers Hr. Stefan Heidemann, BMWK _____	33
Abbildung 6: Fahrdemonstration während der SAFE20-Schlusspräsentation _____	33
Abbildung 7: Ausschnitt aus dem ersten SAFE20-Erklärfilm _____	35
Abbildung 8: Szene aus dem SAFE20-Projektabschlussfilm (Rückwärtsfahrt / Bluetooth-Objekterkennung) _____	36
Abbildung 9: Use-Cases und Missionen im Projekt SAFE20 _____	39
Abbildung 10: Typischer Verkehrsweg des Nahverkehrs _____	41
Abbildung 11: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Abstellplatz-Rampe _____	42
Abbildung 12: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Rampe-Abstellplatz _____	44
Abbildung 13: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Rampe-Rampe _____	45
Abbildung 14: Beispiel Swimlane-Diagramm _____	46
Abbildung 15: Vorgehensweise zur Identifikation von Nebenprozessen _____	47
Abbildung 16: Bewertung der Alternativen für Nebenprozesse _____	48
Abbildung 17: Nebenprozesse - Ergebnis der Analyse _____	49
Abbildung 18: Ausschnitt Swimlane Diagramm _____	55
Abbildung 19: Übersicht der Swimlane Diagramme (Stand: 08.11.2021) _____	56
Abbildung 20: Potenzielle Fahrwege und Einschätzung des maximal zu erwartetem Risiko in den einzelnen Fahrsegmente. _____	61
Abbildung 21: Ausschnitt aus der Risikobeurteilung, Fahrweg KAMAG PM – Rückseite Halle ELW1 _____	62
Abbildung 22: Funktionale Dekomposition. Die einzelnen Ebenen entsprechen den L1- bis L3-Ebenen der Modellierungen der funktionalen Architektur in AP 2. _____	64
Abbildung 23: Exemplarisches Sequenz-Diagramm für die freie Fahrt (hier für den KAMAG PT) _____	66
Abbildung 24: Einbettung des analytischen Nachweises umfelderfassungsbasierter Sicherheitsfunktionen in das Gesamtprojekt. _____	67
Abbildung 25: Ausschnitt aus der virtuellen Simulationsumgebung des Betriebshofs in Langenau. Dargestellt ist ein Lkw mit On-board-Sensorik. Die Erfassungsbereiche der Sensoren sind in Rot dargestellt. _____	68
Abbildung 26: Sicherheitskritische Eingangsgrößen _____	68

Abbildung 27: Ablaufdiagramm einer möglichen Umsetzung _____	70
Abbildung 28: Serienbremsen-Bedienelemente eines Nutzfahrzeugs mit handbetätigter Feststellbremse und Einbindung der Feststellbremse durch zusätzliche Ventile in die Automatisierung _____	75
Abbildung 29: Serienkomponenten eines Nutzfahrzeugs mit EPH-Lösung, keine weiteren Hardwarekomponenten benötigt. _____	76
Abbildung 30: Item-Architektur und Hervorhebung der direkt analysierten Funktionen _____	77
Abbildung 31: Ausschnitt Haupt-Sicherheitsziel und abgeleitete Haupt-Sicherheitsanforderung _____	78
Abbildung 32: Sicherheitsfunktionen mit Fokus auf den Anteil von ADOPT _____	78
Abbildung 33: Laboraufbau mit EPH Modul _____	79
Abbildung 34: Kugelhähne zur manuellen Umschaltung zwischen der prototypischen ausfallsicheren Feststellbremse EPH und der klassischen Feststellbremse mit zusätzlichen elektrischen Ventilen im Versuchsfahrzeug _____	80
Abbildung 35: Auszug aus den Architekturen von AP2 Diagramm: UC-Hof_L2_MB1-Fahrt-Start-Ziel-Wiesel_Kamag _____	80
Abbildung 36: Verschiedene Bremswege, abhängig von der Geschwindigkeit und der erreichten Verzögerung (Annahme einer Totzeit von 0.4s und ohne Anstiegszeit (direkter Sprung auf Endverzögerung)) _____	81
Abbildung 37: Systemarchitektur des HPX-Prototyps _____	83
Abbildung 38: HPX-Sicherheitsarchitektur _____	85
Abbildung 39: Black-Channel-Ansatz _____	86
Abbildung 40: EGSP-Fehlerabdeckung _____	87
Abbildung 41: Use-Case-Diagramm "Sicheres Aufnehmen der Wechselbrücke" _____	89
Abbildung 42: Sicheres Unterfahren der Wechselbrücke _____	90
Abbildung 43: Sichere Positionsbestimmung _____	90
Abbildung 44: FMEDA für exemplarische Sicherheitsfunktionen _____	91
Abbildung 45: Belegungsgitter mit Schutzbereich _____	92
Abbildung 46: Heck des Anhängers (blau) und Messpunkte _____	93
Abbildung 47: Visualisierung einer online Bahnplanung _____	93
Abbildung 48: Visualisierung einer Online-Bahnplanung mit dem Ansatz Dubins-Pfad _____	94
Abbildung 49: Ablauf der Bahnplanung zum Andocken an eine Rampe mit Anhänger _____	95
Abbildung 50: Anwendungsfall Rampenanfahrt sowie verwendete Systemkomponenten _____	97
Abbildung 51: Überblicksdarstellung des Versuchsaufbaus zur Validierung der Lokalisierungsgenauigkeit und Dynamik auf dem ZF-Testgelände _____	98
Abbildung 52: Infrastrukturseitig installierte Antennen zur Überwachung des Laderampenvorbereichs _____	99

Abbildung 53: Zur Lokalisierung notwendige Bluetooth-Tags können magnetisch an der Kleidung befestigt werden _____	99
Abbildung 54: Foto der Installation des Bluetooth-basierten Lokalisierungssystems auf dem DACHSER-Betriebshof in Langenau mit aktivierter Warnleuchte _____	100
Abbildung 55: Verbesserung der Positionsschätzung mittels Kalman-Filterung während verschiedener Bewegungen eines Fußgängers mit Bluetooth-Tag _____	101
Abbildung 56: Schematische Darstellung der Installation des Bluetooth-basierten Lokalisierungssystems auf dem DACHSER-Betriebshof in Langenau mit zu erfassender Person _____	102
Abbildung 57: Bei der Detektion von Personen im Gefahrenbereich wird die Warnleuchte aktiviert und das Fahrzeug gestoppt (Ausschnitt aus SAFE20-Projektfilm). _____	102
Abbildung 58: Arten von Ladungsträgern: links: Auflieger, rechts: Wechselbrücke _____	103
Abbildung 59: Rot umrandet: Missionsbestandteile, welche das Auf- und Absatteln des Aufliegers (Sattelanhänger) als Teilaufgabe enthalten _____	103
Abbildung 60: Aus AP 3 erarbeitet: 1. Architekturentwurf inklusive der späteren Zuordnung der Hauptkomponenten des An-/Abkuppelns _____	104
Abbildung 61: Aufgaben des automatischen Aufnehmens des Aufliegers _____	105
Abbildung 62: Skizze der Teilssegmente des Missionsbestandteils MB9, B zu D entspricht der Anfahrt des automatischen Ankuppelns _____	106
Abbildung 63: Anfahrt an den Auflieger und relevante Größen für die Querführung: Sattelplatte A der Zugmaschine und Königszapfen C des Aufliegers B _____	106
Abbildung 64: Live-Sensordarstellung des automatisierten Kupplungsvorgangs _____	107
Abbildung 65: Sattelplatte A des Zugfahrzeugs fängt den leicht seitlich versetzten Königszapfen C des Aufliegers B (D Stützen, E Räder) auf. _____	108
Abbildung 66: Ablauf des Kupplungsprozess am KAMAG PT _____	109
Abbildung 67: Erweiterung der Zugfahrzeug Netzwerke auf den Auflieger _____	110
Abbildung 68: Stützfüße in ausgefahrener Position mit noch ausreichender Bodenfreiheit durch über den Liftarm angehobenen Auflieger _____	111
Abbildung 69: Höhenunterschied des Aufliegers bei Straßenfahrt (Stützen eingefahren) und auf dem Hof (Stützen ausgefahren) _____	111
Abbildung 70: Sattelplatte verändert Abstand I in Fahrtrichtung relativ zum Zugfahrzeug bei veränderter Sattelplattenhöhe _____	112
Abbildung 71: Ablauf des Absetzens (Auszug aus UC-Hof_L2_MB7-SAH-Abstellplatz-absetzen) _____	113
Abbildung 72: Autonome Fahrt auf der ZF Testbahn in Jeversen mit Auflieger, rechts Onlinevisualisierung _____	114
Abbildung 73: Autonome Fahrt um eine Kurve mit Sicherheitsfahrer in der Kabine auf dem DACHSER Betriebsgelände in Langenau _____	115
Abbildung 74: Problematik der Heading-Abweichung Zugfahrzeug und Auflieger-Heckposition _____	116

Abbildung 75: Rückwärtiger Lidar am Aufliegerheck _____	116
Abbildung 76: Ausrüstung des Wechselbrückenhubwagens für ein sicheres Wechselbrücken-Handling ____	117
Abbildung 77: Fahrzeugmodell des KAMAG PT mit Anhänger _____	121
Abbildung 78: Simulationsumgebung des DACHSER Logistikzentrums in Langenau _____	121
Abbildung 79: Innen- und Außenansicht von Verladetoren bei DACHSER in Gazebo _____	122
Abbildung 80: Karte des Betriebsgeländes von DACHSER in Langenau _____	122
Abbildung 81: Eignung der Laserlokalisierung am Standort von DACHSER _____	123
Abbildung 82: Visualisierung der Lidar-Lokalisierung mit PFL _____	123
Abbildung 83: Visualisierung der Fusion aus Rampenerkennung und globaler Lokalisierung _____	125
Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Qualität der Lidar-Lokalisierung mit aktueller Szene (rechts) _____	126
Abbildung 85: Komponenten der Fahrzeugautomatisierung und der entsprechende Teil des menschlichen Fahrers, der ersetzt wird. _____	127
Abbildung 86: Beispiel für eine automatisierte Komponente: Das Ursprungsfahrzeug ist grün eingefärbt, die durch die Automatisierungsplattform zusätzlich hinzugefügten Komponenten sind gelb eingefärbt. _____	128
Abbildung 87: Sicherheitskonzept, Umschalten vom automatisierten Fahren in den abgesicherten Modus über eine Notbremse und Trennen der zusätzlichen Automatisierungskomponenten _____	129
Abbildung 88: Aufbau des virtuellen Fahrers mit der Automatisierung im Projekt _____	131
Abbildung 89: Verarbeitung der unterschiedlichen Geschwindigkeitsvorgaben _____	132
Abbildung 90: Konzept der Simulationsumgebung mit n jeweils in einem Docker-Container simulierten Agenten und dem gemeinsamen Gazebo-Umgebungsmodell des DACHSER-Betriebshofs _____	135
Abbildung 91: Simulierter Betriebshof mit zwei ebenfalls simulierten Fahrzeugen, die Laser-Scandaten aus deren Umgebung erhalten _____	135
Abbildung 92: Beispielszenario, errechnete Geschwindigkeitsprofile (blau, grün, rot) und Störung (gelb) ____	136
Abbildung 93: RMTRUCK Koordinationsraum mit originaler Trajektorienabstimmung zwischen Agent 1 und Agent 2 (rot gestrichelt) und Konfliktbereich (dunkelgrün) _____	137
Abbildung 94: Beispielszenario mit sechs Agenten und zufällig eingestreuten Störungen _____	137
Abbildung 95: 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. __	138
Abbildung 96: Beispielpfad auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI. _____	140
Abbildung 97: Lenkwinkel und Spurabweichung 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 $2,5ms^2$. _____	142

Abbildung 98: Riskante Umgehung der Sicherheitsbereiche durch Personen _____	143
Abbildung 99: Dezentralisierter Einsatz von Infrastrukturknoten zur Erweiterung des Objekterfassungssystems (schematische Darstellung aus SAFE20-Erklärfilm, ISK mit grünen Wellen dargestellt). _____	144
Abbildung 100: Netzabdeckung von 5G (links) und 4G (rechts) Mobilfunknetzen am Standort in Langenau _____	145
Abbildung 101: Kommunikationsnetzwerk SAFE20 _____	146
Abbildung 102: Überwachte Zonen auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau _____	147
Abbildung 103: Infrastrukturknoten im Süden des DACHSER-Betriebshofs Langenau _____	147
Abbildung 104: Einer der Infrastrukturknoten im Nordosten des DACHSER-Betriebshofs Langenau _____	147
Abbildung 105: Übersicht des Nutzerinterface-Konzepts für Logistikhof-Anwendungen _____	152
Abbildung 106: Fahrzeugdetails mit Beschriftung zur Erläuterung der Funktion _____	152
Abbildung 107: Mit TruckTrix-City berechneter Pfad für eine Pick-Mission auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau _____	153
Abbildung 108: Standard 302065-2 LT1 LT2 _____	155
Abbildung 109: Stand der Umsetzungen der Empfehlung ECC/REC/(11)09 in den EU-Mitgliedsländern _____	156
Abbildung 110: Wahre und gemessene Positionen in der Testumgebung _____	157
Abbildung 111: Messgenauigkeit an den verschiedenen Messpositionen _____	158
Abbildung 112: Messunsicherheit an den verschiedenen Messpositionen in der Testumgebung, dargestellt durch die Größe der längsten Halbachse der Konfidenzellipse für die beiden Performanceklassen B und D _____	158
Abbildung 113: Messfahrzeug mit realitätsnaher Breite, verbauter Sensorik, Datenverarbeitungseinheit und Spannungsversorgung. _____	163
Abbildung 114: Übersicht der Modellierung des DACHSER-Betriebshofs Langenau in der Simulationsumgebung Unity. _____	166
Abbildung 115: Simulation der Sichtfeldabdeckung mittels zwei SICK Laserscannern. _____	167
Abbildung 116: Prozesskette Kollisionsvorhersage _____	167
Abbildung 117: Rohe 3D-Punktwolke vom Ouster Sensor. _____	169
Abbildung 118: Bodenklassifizierung. Boden (grün), restliche Punkte (rot). _____	169
Abbildung 119: Background Klassifizierung. Hintergrundpunkte (blau). _____	170
Abbildung 120: Segmentierung. Punkte eingefärbt nach Clusterzugehörigkeit. _____	170
Abbildung 121: Box Fitting _____	170
Abbildung 122: Getrackte Objekte mit ID und Geschwindigkeitsvektor (grün). _____	170
Abbildung 123: Kollisionsvorhersage _____	171
Abbildung 124: Gelabelte Szene mit geparkten Trailern (blau) und Fußgängern (rot) _____	172
Abbildung 125: Unterschiedliche Assoziationsmethoden _____	172

Abbildung 126: Detektierte Objektfläche _____	173
Abbildung 127: Detektionsrate, aufgeteilt nach Szenario und Objekttyp _____	174
Abbildung 128: Detektionsflächenrate, aufgeteilt nach Szenario und Objekttyp _____	174
Abbildung 129: GT-Objekte (rot) und DUT-Objekte (blau). Fußgänger erscheinen im DUT oft kleiner _____	175
Abbildung 130: GT-Objekte (rot) und-DUT Objekte (blau). Trucks sind im DUT häufig geteilt und decken daher weniger Fläche ab _____	175
Abbildung 131: Geschwindigkeitsfehler, aufgeteilt nach Szenario und Objekttyp _____	176
Abbildung 132: Verdeckungserkennung. Verdeckte Scanpunkte in weiß. _____	177
Abbildung 133: Eckpunkerkennung. Sichtbare Eckpunkte in grün, verdeckte Eckpunkte in rot. _____	177
Abbildung 134: Anbaupositionen der MRS 1000 seitlich am Messfahrzeug _____	178
Abbildung 135: Schaltbild für den Messaufbau _____	181
Abbildung 136: Visualisierung der Schutzfeldverletzung _____	182
Abbildung 137: Bereiche von Schutzfeldauslösungen, Betriebshof Langenau _____	183
Abbildung 138: Autonomes Fahrzeug mit dynamisch berechnetem Schutzfeld. _____	184
Abbildung 139: KAMAG PM mit zwei MRS1000 Sensoren (hellblau) and den vorderen Fahrzeugecken. ____	185
Abbildung 140: Links: Schutzfeldberechnung mittels konservativer Schätzung der Bremszeit, rechts: Schutzfeldberechnung basierend auf Reaktionszeit und Bremsbeschleunigung. _____	189
Abbildung 141: Test der Schutzfeldfunktion mit Hilfe einer Schaumstoffmatte beim Ankuppelungsmanöver	189
Abbildung 142: Links: Auslösung des Schutzfeldes durch ein überholendes Fahrzeug, welches beim Wiedereinschneiden den Weg des autonomen Fahrzeuges eng schneidet. Rechts: Schutzfeldauslösung durch starkes Spritzwasser _____	191
Abbildung 143: Ansicht eines typischen Zebrastreifens auf dem Betriebshof von DACHSER in Langenau. ____	192
Abbildung 144: Oben: Darstellung des Betriebshofs. Die rot markierten Bereiche zeigen die durch einen Infrastrukturknoten (ISK) überwachten Bereich. _____	194
Abbildung 145: Darstellung der Kamera- und Radardaten aus Sicht der Infrastruktursensorik: Das grüne Polygon zeigt den zu überwachenden Bereich in globalen Koordinaten. _____	195
Abbildung 146: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Belegung eines Zebrastreifens durch Personen auf Basis von Radardaten. _____	195
Abbildung 147: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Belegung eines Zebrastreifens durch Personen auf Basis von Radar- und Kameradaten. _____	196
Abbildung 148: Ansicht des Zebrastreifenobjekts und weiteren getrackten Objekten aus der Sicht des Fahrzeugs. _____	197
Abbildung 149: Vergleich der Accuracy in Bezug auf alle Klassen (durchgehende Linie) sowie nur für die Klasse „Person“ (gestrichelte Linie) zwischen dem radarbasierten (blau) und radar-kamera-basierten (rot) Ansatz. Der auf zwei Sensoren beruhende Ansatz ist in nahezu allen Testdaten besser. _____	197

Abbildung 150: Vergleich des F1 Scores zwischen radar-basierten und radar-kamera-basiertem Ansatz. ____	198
Abbildung 151: Aktualisierte Prozesskette Kollisionsvorhersage. _____	199
Abbildung 152: Ablauf zur Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs. _____	200
Abbildung 153: Übersicht Kommunikation zwischen Automatisierungszonen und autonomem Fahrzeug ____	203
Abbildung 154: Darstellung aller empfangenen ISK-Nachrichten via ProConnect auf einem autonomen Fahrzeug auf der Nordseite des Betriebshofs. _____	204
Abbildung 155: Heatmap bezüglich ProConnect-Empfangs auf dem Fahrzeug _____	204
Abbildung 156: Test der Schutzfeldfunktion mit Hilfe einer Schaumstoffmatte beim Ankuppelungsmanöver	207
Abbildung 157: Der Entwicklungsprozess des KAMAG PT mit Fokus auf die Integration _____	208
Abbildung 158: Automatisierte Anfahrt an den Auflieger und Visualisierung mit Lidar-Reflektionen zur Ortung des Sattelauflegers _____	209
Abbildung 159: Personen nutzen Abkürzungen quer über die Straße, um zu ihrem Ziel zu gelangen. Dies stellt ein Sicherheitsrisiko im Zusammenhang mit dem autonomen Fahrzeug dar _____	215
Abbildung 160: Person kreuzt zwar den Beginn eines Zebrastreifens, überquert diesen jedoch nicht. Dieses Verhalten führt zu einem fälschlichen Triggering der Infrastruktursensorik _____	215
Abbildung 161: Oben: Übersicht der überwachten Gefahrenzonen. Mitte: Beispielansicht der Nutzung des Zebrastreifens 2 über einen beliebigen Tag verteilt. Unten: Gleiche Darstellung für Zebrastreifen 3. _____	216
Abbildung 162: FMEDA für exemplarische Sicherheitsfunktionen _____	218
Abbildung 163: Karte des DACHSER Hofes in Langenau mit Markierung des in Jeveresen getesteten Bereiches _____	219
Abbildung 164: Erfolgreiche Durchführung einer autonomen Mission in Jeveresen _____	221
Abbildung 165: Übersicht relevanter Stellplätze für die Automatisierung, in Blau gekennzeichnet _____	222
Abbildung 166: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 1, in Grün gekennzeichnet _____	223
Abbildung 167: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 2, in Grün gekennzeichnet _____	223
Abbildung 168: Hauptroute für die Fahrt zwischen den südlichen Rampen und den Abstellbereich C2/C3 __	223
Abbildung 169: Verpackte Sensorik und verladener KAMAG PT auf der Testbahn in Jeveresen _____	228
Abbildung 170: KAMAG PT auf dem DACHSER-Hof nach Anbau der Sensorik auf seinem zugewiesenen Stellplatz _____	228
Abbildung 171: Versatz der Lidar-Pose auf der Offline-Karte _____	229
Abbildung 172: Nutzung des Online-Mappings _____	230
Abbildung 173: Rot markiert der verwendete Referenzpfad des KAMAG PM _____	231
Abbildung 174: KAMAG PT umrundet den DACHSER-Hof in Langenau, live Online-Visualisierung mit erkannten Objekten _____	231

Abbildung 175: Beispiel eines Ablaufdiagramms für den Sicherheitsfahrer _____	232
Abbildung 176: Auf dem Betriebsgelände angebrachte Hinweisschilder _____	234
Abbildung 177: Bereiche für die Abstellplätze und Rampe im DACHSER Logistikzentrum Ulm _____	236
Abbildung 178: GNSS-Qualitätsanalyse _____	240
Abbildung 179: Messung Querversatz KAMAG PT bei DACHSER südlich vom Hauptgebäude _____	240
Abbildung 180: automatische Fahrmission im Westen (links); Ergebnisse (rechts) _____	241
Abbildung 181: Erfolgreicher Endzustand beim Andocken eines Trailers an eine Rampe _____	241
Abbildung 182: Beispiele beim Andocken _____	242
Abbildung 183: Übersicht der genutzten Vorgehensweisen _____	245
Abbildung 184: Umsetzfahrt _____	247
Abbildung 185: Manuelle und automatisierte Prozesszeiten (in Sekunden) _____	249
Abbildung 186: Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge _____	250
Abbildung 187: Jährliche Auszahlungen und kumulierter Barwertverlauf (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb) _____	253
Abbildung 188: Anteile der Kosteneinflussgrößen je Fahrzeug (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb) _____	253

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wissenschaftliche Publikationen und Vorträge im Rahmen von SAFE20	37
Tabelle 2: Technische Anforderungen der Infrastruktur	51
Tabelle 3: Technische Anforderungen der automatisierten Fahrzeuge	52
Tabelle 4: Wirtschaftliche Anforderungen	53
Tabelle 5: Sicherheitsanforderungen	53
Tabelle 6: Struktur der Risikobeurteilung	60
Tabelle 7: Übersicht der Verbesserung wesentlicher Parameter des Objektlokalisierungssystems (keine Nachbearbeitung)	97
Tabelle 8: Übersicht der technischen Daten der Sensoren laut Datenblatt. Es ist anzumerken, dass sich die Reichweiten, Remissionen und Auflösung von Lidar- und Radar-Sensoren nicht direkt vergleichen lassen.	162
Tabelle 9: Visuelle Messdateneindrücke des LDMRS. Die Person rechts im Bild bewegt sich zwischen 5-50 m auf den Messwagen zu. In der untersten Zeile sind die Daten des LDMRS dargestellt.	164
Tabelle 10: Visualisierung von Beispielszenen während Messaufnahmen mit dem LMS150, LDMRS4xxx sowie MRS1xxx. Der LMS150 konnte ab 30 m die sich vom Messwagen wegbewegenden Personen nicht mehr erfassen.	164
Tabelle 11: Visualisierung von Beispielszenen während Messaufnahmen mit dem MRS6xxx, Ouster, Velodyne sowie dem Radar Sensor RMS2xxx.	165
Tabelle 12: Übersicht der Aufteilung der 64 Schutzfelder abhängig von Sensor und Lenkwinkel.	179
Tabelle 13: Übersicht der Aufteilung der 96 Schutzfelder abhängig von Sensor und Lenkwinkel.	180
Tabelle 14: Szenarienkatalog für die Messkampagne	185
Tabelle 15: Auswertung der Adaptiven Kollisionsvorhersage im Testbetrieb	214
Tabelle 16: Übersicht der Mission und ihrer Bestandteile für den KAMAG PT	220
Tabelle 17: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: Teilmissionen	224
Tabelle 18: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: komplette Abläufe	225
Tabelle 19: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: Umsetztransporte	225
Tabelle 20: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: Teilmissionen	226
Tabelle 21: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: komplette Abläufe	227
Tabelle 22: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: Umsetztransporte	227
Tabelle 23: Testszenerien KAMAG PT	237
Tabelle 24: Testszenerien KAMAG PM	237
Tabelle 25: Negative Testszenerien	238

Tabelle 26: Kumulierte Zahlen zur Testdurchführung KAMAG PM _____ 239

Tabelle 27: Übersicht der Chancen und Herausforderungen bei der Implementierung autonomer Systeme im
Logistikbereich. _____ 255

Abkürzungsverzeichnis / Glossar

Abkürzung / Begriff	Bedeutung
ACP	Adaptive Collision Prediction / Adaptive Kollisionsvorhersage
ADOPT	Autonomous Driving Open Platform Technology: Schnittstellenprodukt von ZF
AMCL	Adaptive Monte Carlo Localization
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol: Anwendungsprotokoll für die Nachrichtenübermittlung zwischen Systemen in einem verteilten Netzwerk
AP	Arbeitspaket
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
AMCL	Adaptive Monte Carlo Localization
APF	Adaptive Protective Fields / Adaptive Schutzfelder
ASIL	Automotive Safety Integrity Level: Schema zur Risikobewertung
BLE	Bluetooth Low Energy
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CA	Certificate Authority oder Certification Authority
CAN / CAN-Bus	Controller Area Network: Bus-System zum seriellen Datenaustausch zwischen Steuergeräten
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications / Europäische Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation
CIP	Control and Information Protocol
DAZ	Digitale Automatisierungszone
DATMO	Detection and Tracking of Moving Objects: Boxtracking Library
DDS	Data Distribution Service
DSRC	Dedicated Short-Range Communications: Mobilfunkstandard zur Fahrzeugvernetzung
DUT	Device-Under-Test
ECAS	Elektronische Niveauregelung für luftgefederte Anhängfahrzeuge
E/E-Architektur	elektrisch-elektronische Architektur
E/E/PE-Systeme	Elektrische, Elektronische und Programmierbare Elektronische Systeme
ECC	Electronic Communication Committee
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EGSP	ESX Generic Safety Protocol von STW

EN	Europäische Norm
EPH	Elektro Pneumatische Handbremse
ERC	European Research Council / Europäischer Forschungsrat
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse: Methode zur frühzeitigen Identifikation und Behebung oder Vermeidung möglicher Fehler
FMEDA	Failure Modes Effects and Diagnostic Analysis: Verfahren zur detaillierten Ermittlung von Fehlerursachen und deren Auswirkung auf das System
FMU	Functional Mock-Up Units = ermöglichen die Erstellung von Simulationsmodellen, die miteinander ausgetauscht und kombiniert werden können.
FOV	Field of View: Winkelabhängigkeit des Sichtbereichs eines Sensors
FPD III	Flat-Panel Display Link-III
FPGA	Field Programmable Gate Array: programmierbarer, integrierter Schaltkreis zur Implementierung digitaler Schaltungen
GMSL2	Gigabit Multimedia Serial Link: Digitale, unkomprimierte, verzögerungsfreie Übertragungstechnologie für Videosignale
GND	„Ground“ = Erdung
GNSS	Global Navigation Satellite Systems: satellitengestützte Navigationssysteme
GT	Ground Truth = Gelabelte Referenzdaten
HMI	Human-Machine-Interface
HRN	Hazard Rating Number: Verfahren zur Bestimmung von Risiken
HW	Hardware
IPC	Industrie PC
KI	Künstliche Intelligenz
IoT	Internet of Things: Bezeichnung für ein Netzwerk physischer Objekte
IPC	Industrie-PC
ISK	Infrastruktur-Sensorknoten
ITS-G5	ITS = Intelligent Transport Systems / europ. Mobilfunkstandard zur Fahrzeugvernetzung
JSON	JavaScript Object Notation
LAN	Local Area Network
Lkw	Lastkraftwagen
LT1 / LT2	Location Tracking System of Type 1 / 2
LTE	Long Term Evolution

M2Cloud	Machine to cloud: Kommunikation Maschine mit Cloud
M2M	Machine to machine: Kommunikation Maschine mit Maschine
MoSCoW-Methode	Vierstufiges Verfahren der Priorisierung, z. B. zur Kategorisierung von Anforderungen
MPSoC	Multiprozessor System-on-Chip
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport: Standard-Nachrichtenformat für eingeschränkte Netzwerke mit geringer Bandbreite
MVO	Maschinenverordnung
PEM	Privacy Enhanced Mail
PFL	Partikel-Filter
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
Pkw	Personenkraftwagen
PLd	Performance Level D = niedrige Ausfallwahrscheinlichkeit
PLr	Performance Level Required
PR	Public Relations
QGIS	Ehemals Quantum-GIS: freie Geoinformationssystemsoftware
RED	Radio Equipment Directive / Funkanlagen-Richtlinie
ROS	Robot Operating System: Software-Framework für robotische Systeme
RTLS	Real Time Location Systems / Echtzeitortungssysteme
SAE	SAE International, ehemalige Bezeichnung Society of Automotive Engineers
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SDK	Software Development Kit
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SOTIF	Safety Of The Intended Functionality: Sicherheit der beabsichtigten Funktionalität
SW	Software
TAD	Task Assignment Data
TCO	Total Cost of Ownership
TRL	Technology Readiness Level = Technologie-Reifegrad; Skala von 1-9 zur Bewertung des Entwicklungsstands neuer Technologien
TTC	Time to Collision
TUD	Technische Universität Dresden
UAP	Unter-Arbeitspaket
UBAT	Batteriespannung
UDP	User Datagram Protocol: minimales, verbindungsloses Netzwerkprotokoll
UI	User Interface / Benutzeroberfläche

UKF	Unscented-Kalman-Filter
UTM	Universal Transverse Mercator: globales Koordinatensystem
UWB	Ultra-Wideband / Ultrabreitband: digitale Funktechnologie für den Nahbereich
UX	User Experience / Benutzererfahrung
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to everything: Kommunikation Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen, Infrastruktur etc.
VDA	Verband der Automobilindustrie
WB	Wechselbrücke
WLAN	Wireless Local Area Network
YAML	„YAML Ain't Markup Language“, ursprünglich „Yet Another Markup Language“: textbasiertes Dateiformat zur Datenserialisierung
YMS	Yard Management System: Softwaresystem von Logistikern zum Management einer Betriebshofs

Projektüberblick

Die Automatisierung von Transportaufgaben mit Nutzfahrzeugen auf abgegrenzten Betriebshöfen (Logistikzentrum, Werksgelände, Hafen, Flughafen etc.) spielt für Logistiker, aber mittelbar auch für die deutsche Nutzfahrzeugindustrie, eine große wirtschaftliche Rolle. Bisherige Projekte konnten unter weitestgehend geschützten Bedingungen zeigen, dass diverse Use-Cases mit autonomen Fahrzeugen technologisch prinzipiell machbar sind. Für die wirtschaftliche Verwertung dieser Machbarkeitsstudien fehlte bisher jedoch ein ganzheitliches, mit den Erlaubnisträgern abgestimmtes Sicherheitskonzept. Dieses Konzept ist eine zwingende Voraussetzung für den Regelbetrieb und damit für den wirtschaftlichen Durchbruch und Erfolg autonom fahrender Nutzfahrzeuge.

Das Vorhaben SAFE20 leistete hierfür einen signifikanten Beitrag. Das Gesamtziel – die Entwicklung und erste Umsetzung eines ganzheitlichen Sicherheitskonzepts, welches erstmals den Regelbetrieb von vollautomatischen Fahrzeugen auf Betriebshöfen mit mindestens 20 km/h im Mischbetrieb erlaubt – wurde in der Projektlaufzeit von 42 Monaten zwischen 10/2020 und 03/2024 von den Konsortialpartnern umgesetzt.

Der im Vorhaben verfolgte neuartige Ansatz bestand darin, dass das Sicherheitskonzept für die autonomen Fahrzeuge nicht isoliert betrachtet wurde. Stattdessen wurde innerhalb des Betriebshofs eine sogenannte Automatisierungszone eingerichtet und als neuer Freiheitsgrad für Sicherheitsfunktionen aktiv einbezogen, indem dort sicherheitsfördernde Informationen erhoben und den Fahrzeugen in Echtzeit zur Verfügung gestellt wurden.

Als untergeordnetes Ziel sollte das Vorhaben rechtlich belastbare, sicherheitsorientierte Anforderungen an das Gesamtsystem, bestehend aus Fahrzeugen und hofseitiger Automatisierungszone, sowie an verwendete Technologien (Sensoren, Aktuatoren, Steuergeräte, Software und Algorithmen etc.) liefern. Das erarbeitete Sicherheitskonzept wurde im Dauerbetrieb unter realen Bedingungen auf dem Modellhof der Firma DACHSER im baden-württembergischen Langenau validiert sowie anhand der dabei gewonnenen Erfahrungen weiterentwickelt. Zusätzlich wurden technologische Lücken (Sensorik, Algorithmen, digitales Echtzeitabbild der Automatisierungszone etc.) geschlossen. Damit gingen die Ziele über eine reine Technologiedemonstration hinaus und konnten wertvolle Erkenntnisse für die Kommerzialisierung autonomer Nutzfahrzeuge liefern.

SAFE20 Projektpartner

In dem acht Partner umfassenden Konsortium waren vom Logistikunternehmen über Fahrzeugspezialisten und Systemlieferanten bis hin zum Komponentenhersteller sowohl Experten der ganzen Wertschöpfungskette als auch Partner aus der Wissenschaft mit Zugriff auf neueste Technologien und Methoden involviert. Insgesamt sechs assoziierte Partner und zwei Unterauftragnehmer ergänzten das umfassende Know-how der Konsortialpartner. Die folgende Grafik führt alle am Projekt Beteiligten auf (Stand zu Projektende 03/2024):



Abbildung 1: SAFE20-Konsortium

Den Kern des Projektkonsortiums bilden die acht Konsortialpartner mit folgenden Aufgaben:

- **ZF CV Systems GmbH** (Konsortialführer; Projektleiter: Thomas Wolf)

ZF als weltweit aktiver Technologiekonzern liefert Systeme für die Mobilität von Pkw, Nutzfahrzeugen und Industrietechnik. ZF lässt Fahrzeuge sehen, denken und handeln: In den vier Technologiefeldern Vehicle Motion Control, integrierte Sicherheit, automatisiertes Fahren und Elektromobilität bietet ZF umfassende Produkt- und Software-Lösungen für etablierte Fahrzeughersteller sowie für neu entstehende Anbieter von Transport- und Mobilitätsdienstleistungen. ZF elektrifiziert Fahrzeuge unterschiedlichster Kategorien und trägt mit seinen Produkten dazu bei, Emissionen zu reduzieren, das Klima zu schützen und die Mobilität sicherer zu machen. Das Unternehmen ist mit mehr als 150.000 Mitarbeitern an rund 270 Standorten in 42 Ländern vertreten.

Aufgaben in SAFE20:

- Ausrüstung des Sattelaufleger-Umsetzers KAMAG PT mit Automatisierungslösungen (z. B. ZF ADOPT: Autonomous Driving Open Platform Technology).
 - Entwicklung eines sicheren Notbremsystems als Nachrüstlösung für hoch- und vollautomatische Fahrzeuge, basierend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojekts aFAS.
 - Unterstützung beim Entwurf eines ganzheitlichen Sicherheitskonzepts für den Betrieb vollautomatischer Fahrzeuge in Automatisierungszonen, das die infrastruktur- und fahrzeugseitige Umfelderkennung kombiniert betrachtet und konsequent für die Absicherung des Betriebs nutzt sowie Geschwindigkeiten von bis zu 20 km/h ermöglicht.
 - Mitarbeit bei der Konzeptionierung und Umsetzung neuartiger Infrastruktur-Sensorknoten (ISK), die das Umfeld auf dem Betriebshof seitens der Infrastruktur erfassen und die Anforderungen des Sicherheitskonzepts erfüllen.
 - Mitwirkung bei der Entwicklung eines Telematikmoduls inkl. Software für hochverfügbare und hinreichend sichere Kommunikation zwischen Fahrzeug und Leitrechner sowie ggf. zwischen den Fahrzeugen, die das Sicherheitskonzept möglichst anhand des ISO WLAN-Standards 802.11p implementiert, das künftig in Serienfahrzeugen verwendet wird.
 - Unterstützung des Feldversuchs.
- **DACHSER SE** (Projektleiter: André Bilz)

DACHSER zählt zu den Weltmarktführern in der Systemlogistik. Das 1930 gegründete Familienunternehmen mit Hauptsitz in Kempten im Allgäu ist in der Logistik-Branche einer der großen Innovationstreiber. Zum Portfolio des Unternehmens zählen klassische Transportleistungen, die Distribution und Beschaffung von Waren sowie umfassende Warehouse-Services. Innovative IT-Lösungen und die konsequente digitale Vernetzung schaffen die Voraussetzung für globale Logistik-Netzwerke und reibungslose Warenströme. DACHSER beschäftigt derzeit rund 31.000 Mitarbeiter in 42 Ländern.

Aufgaben in SAFE20:

- Mitwirkung bei der Anforderungsanalyse und der Erstellung des Sicherheitskonzepts.
 - Bereitstellung eines geeigneten Standortes für den Feldversuch sowie verantwortliche Durchführung desselben.
 - Auswertung des Feldversuchs und Mitwirkung bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse.
- **Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML** (Projektleiter: Maximilian Schellert, M.Sc.)

Das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML gilt als erste Adresse in der ganzheitlichen Logistikforschung und arbeitet auf allen Feldern der inner- und außerbetrieblichen Logistik. Im Sinne der Fraunhofer-Idee werden einerseits

Problemlösungen zur unmittelbaren Nutzung für Unternehmen erarbeitet, andererseits wird aber auch Vorlaufforschung von zwei bis fünf Jahren, im Einzelfall darüber hinaus, geleistet. An dem 1981 gegründeten Institut arbeiten zurzeit zahlreiche Wissenschaftler, Doktoranden und Studierende, unterstützt durch Kollegen in Werkstätten, Labors und Servicebereichen, an Großforschungsprojekten und Initiativen unterschiedlicher Ausrichtung.

Aufgaben in SAFE20:

- Durchführung der Anforderungsanalyse.
 - Mitwirkung bei der Erstellung des Sicherheitskonzepts.
 - Konzeption und Entwicklung der sicheren Umfelderkennung, u. a. basierend auf neuen Solid State LIDAR-Sensoren und neuen Algorithmen (z. B. Deep Learning, AI), die das Sicherheitskonzept durch Dekomposition zwischen Fahrzeug und Automatisierungszone implementieren und die Daten in einer hochverlässlichen DAZ zusammenführen.
 - Konzeption der Prozesssteuerung (Sensorkonzept, Algorithmen und Software) für sicheres Aufnehmen, Verfahren und positionsgenaues Abstellen von Wechselbrücken und Sattelaufliegern inkl. Docken an Verladetoren.
 - Begleitung und Auswertung des Feldversuchs.
 - Erstellung der Wirtschaftlichkeitsanalyse.
- **Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI** (Projektleiter: Felix Keppler, M.Sc.)

Das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI in Dresden beschäftigt in fünf Abteilungen und dem Anwendungszentrum „Vernetzte Mobilität und Infrastruktur“ in Ingolstadt mehr als 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Das Spektrum der verkehrsbezogenen Forschungsarbeiten erstreckt sich über die Bereiche Fahrzeug- und Antriebstechnik sowie autonomes Fahren bis hin zu den Gebieten Intelligente Verkehrssysteme, Disposition, Logistik und Digitale Geschäftsprozesse.

Aufgaben in SAFE20:

- Mitwirkung bei der Erstellung des Sicherheitskonzepts.
- Entwicklung eines neuartigen, auf Web-Technologien basierenden Leitstandsystems, über den die autonome Fahrzeugflotte nach den Vorgaben eines Hofmanagement-Systems (z. B. SAP ERP) orchestriert wird und ein Supervisor die Automatisierungszone überwachen kann.
- Implementierung einer kooperativen, globalen Transportauftragsplanung (Algorithmen und Software) basierend auf DAZ, die die aktuell verfügbaren Freiflächen nutzt und temporäre Hindernisse sowie die Aufträge anderer automatisierter Fahrzeuge kennt und entsprechend berücksichtigt.
- Mitwirkung bei der Einwicklung des Telematikmoduls inkl. Software (siehe Beitrag ZF CV Systems).

- Überwachung und Koordination der Integrationsphase, in der alle Systeme integriert und für den Feldversuch vorbereitet wurden.
- Unterstützung des Feldversuchs.
- **Götting KG** (Projektleiter: Dr. Sebastian Behling)

Die Götting KG hat seit 2002 bereits vollautomatische Lkw für die innerbetriebliche Logistik entwickelt und im produktiven Einsatz in Betrieb genommen. Die vorhandenen Erfahrungen erstrecken sich über die komplette Entwicklungskette vom Anforderungsmanagement über das sichere Systemdesign bis hin zur kommerziellen Umsetzung. Weiterhin ist die Götting KG seit Jahrzehnten ein weltweit bekannter Zulieferer und Dienstleister für Navigationslösungen in der Industrie und in Häfen. Das Produktportfolio umfasst verschiedene Verfahren zur Ortung, z. B. GNSS sowie natürliche Umgebungsmerkmale.

Aufgaben in SAFE20:

- Mitwirkung bei der Erstellung des Sicherheitskonzepts.
- Konzeption der Prozesssteuerung (Sensorkonzept, Algorithmen und Software) für sicheres Aufnehmen, Verfahren und positionsgenaues Abstellen von Wechselbrücken und Sattelaufliegern inkl. Docken an Verladetoren.
- Entwicklung und Integration einer hochverfügbaren, genauen Fahrzeugortung (Algorithmen und Software) trotz komplexer Umgebung mit starken Reflexionen und Abschattungen sowie stark veränderlichen Hofstrukturen mittels Fusionssystem basierend auf GNSS, DAZ, SLAM, Odometrie und Inertialsensorik.
- Unterstützung des Feldversuchs.
- **Sensor-Technik Wiedemann GmbH (STW)** (Projektleiter: Christian Buchhold-Tomazic)

Als international tätiges Unternehmen mit Headquarter in Kaufbeuren steht die Sensor-Technik Wiedemann (STW) GmbH seit mehr als 35 Jahren für die Digitalisierung, Automatisierung und Integration mobiler Maschinen. Mit generischen oder kundenspezifischen Produkten, Systemen und Lösungen, die in Deutschland entwickelt und gefertigt werden, unterstützt das international tätige Unternehmen Kunden auf ihrem Weg, mit innovativer Technik ihre Maschinen zu den besten der Welt zu machen, und beteiligt sich aktiv an Zukunftsthemen wie dem Internet der Dinge (IoT) und der Industrie 4.0 sowie dem (teil-)autonomen Fahren und Arbeiten.

Aufgaben in SAFE20:

- Mitwirkung bei der Entwicklung und Integration einer hochverfügbaren, genauen Fahrzeugortung (s. a. Götting KG).
- Entwicklung einer funktional sicheren, hoch-performanten Rechnerhardware für den Einsatz in automatisierten Fahrzeugen inkl. Board-Support-Software, die die Anforderungen des Sicherheitskonzepts implementiert sowie die Rechenleistung sowie Speicherkapazität üblicher Fahrzeugsteuergeräte um ein Vielfaches übersteigt und AI-Anwendungen ermöglicht.

- **SICK AG** (Projektleiter: Till Sellschopp)

SICK ist einer der weltweit führenden Lösungsanbieter für sensorbasierte Applikationen für industrielle Anwendungen. Das 1946 von Dr.-Ing. e. h. Erwin Sick gegründete Unternehmen mit Stammsitz in Waldkirch im Breisgau nahe Freiburg zählt zu den Technologie- und Marktführern und ist mit mehr als 50 Tochtergesellschaften und Beteiligungen sowie zahlreichen Vertretungen rund um den Globus präsent. SICK beschäftigt fast 12.000 Mitarbeitende weltweit und erzielte im Geschäftsjahr 2022 einen Konzernumsatz von rund 2,2 Mrd. Euro.

Aufgaben in SAFE20:

- Verantwortliche Leitung der Erstellung des Sicherheitskonzepts sowie der nachfolgenden Auswertung.
 - Erstellung eines analytischen Sicherheitsnachweises für die umfelderfassungsbasierten Sicherheitsfunktionen.
 - Mitwirkung bei der Konzeption und Entwicklung der sicheren Umfelderfassung.
 - Konzept und Umsetzung neuartiger Infrastruktur-Sensorknoten (ISK), die das Umfeld auf dem Betriebshof seitens der Infrastruktur erfassen und die Anforderungen des Sicherheitskonzepts erfüllen.
 - Mitwirkung bei der Entwicklung und Integration einer hochverfügbaren, genauen Fahrzeugortung (s. a. Götting KG).
 - Unterstützung des Feldversuchs.
- **TII KAMAG** (Projektleiter: Martin Teuchler)

Schwerpunkt des Unternehmens mit Sitz in Ulm an der Donau im Süden Deutschlands ist die Herstellung von Industriefahrzeugen, Modultransportern und Fahrzeugen für die Terminallogistik mit 240 Mitarbeitern auf einer Firmenfläche von 45.000 m². Gegründet wurde die Kamag Transporttechnik 1969 in Karlsdorf-Neuthard mit der Idee, Schwertransporte von der Schiene auf die Straße zu verlagern. Zu den ersten Produkten gehörten Spezialfahrzeuge für Schiffswerften und Stahlwerke. Innerhalb der TII Group ist die Kamag Transporttechnik heute Kompetenzzentrum, wenn es um Industriebustransporter, Stahlwerksfahrzeuge, modulare selbst angetriebene Transporter und Fahrzeuge für die Terminallogistik geht.

Aufgaben in SAFE20:

- Ausrüstung des Wechselbrückenumsetzers KAMAG PM mit Automatisierungslösungen.
- Ausrüstung der Zugmaschine KAMAG PT mit Drive-by-Wire Schnittstelle.
- Mitwirkung bei der Erstellung des Sicherheitskonzepts.

- Mitwirkung bei der Konzeption der Prozesssteuerung (Sensorkonzept, Algorithmen und Software) für sicheres Aufnehmen, Verfahren und positionsgenaues Abstellen von Wechselbrücken und Sattelaufliegern inkl. Docken an Verladetoren.
- Durchführung des Feldversuchs.

SAFE20 Assoziierte Partner und Unterauftragnehmer

Die untere Reihe in Abbildung 1 zeigt die assoziierten Partner sowie die zwei Unterauftragnehmer:

- Die **MOTOR Ai GmbH** war zur Lieferung eines KI-basierten Reaktionsmodells vorgesehen, welches dem AutoTruck im Falle unvorhergesehener Hindernisse Vorschläge für Umfahrungstrajektorien unterbreiten sollte. Aufgrund des Wechsels zu einer anderen Fahrzeugplattform konnte das Reaktionsmodell zwar nicht wie geplant ins Fahrzeug integriert werden, jedoch konnten wertvolle Gespräche zur Anforderungsdefinition für eine spätere Implementierung geführt werden.
- Die **AlbrechtConsult GmbH** unterstützte als Unterauftragnehmer aller Konsortialpartner das Projektkonsortium als externes Projektbüro und war vor allem für die Koordination und Protokollierung von Meetings, die Öffentlichkeitsarbeit und Veranstaltungsorganisation sowie die Unterstützung bei der Berichtslegung verantwortlich.
- Die **Berufsgenossenschaft (BG) Handel und Warenlogistik** war als assoziierter Partner vor allem als Ansprechpartner für regulatorische Fragen vorgesehen. Im Laufe des Projekts kam jedoch auch Unterstützung durch die **BG Verkehr** hinzu, die ebenfalls für den Logistikbereich zuständig ist und sich vor allem mit dem Verkehr auf Betriebsgelände beschäftigt.
- **SAF-HOLLAND SE** steuerte eine automatische Kupplung für Sattelaufleger bei.
- Die **Embotech AG** entwickelte mit ZF eine Lösung für den virtuellen Fahrer im KAMAG PT.
- Die **Fraport AG** war bereits in vorausgehenden Projekten zur Automatisierung von Lkw mit dem Fraunhofer IVI in Kontakt und interessiert sich für die Verwertung der in SAFE20 erarbeiteten Technologien für ihre Anwendungsfälle in flughafennaher Güterlogistik.
- Die **TU Dresden** war Unterauftragnehmer des Fraunhofer IVI zur Entwicklung einer Nutzeroberfläche für das helyOS-Leitstandsystem.

Seit Projektbeginn im Oktober 2020 gab es einige Änderungen im Konsortium:

- Die **Ibeo Automotive Systems GmbH** war anfangs noch assoziierter Partner. Mit der Insolvenz des Unternehmens fand kein Beitrag zum Projekt SAFE20 mehr statt.
- Die **T-Systems International GmbH** war in der Projektanlaufphase als assoziierter Partner vorgesehen und wollte für das Vorhaben ein 5G-Campus Netz zur Verfügung stellen. Da die finanziellen Vorstellungen von T-System den Projektrahmen überschritten hätten, wurde die Kommunikationslösung mit LTE 4G umgesetzt.
- 2022: Zusätzlich war außer der ZF CV Systems GmbH (damals noch WABCO GmbH) noch **ZF Friedrichshafen** als Konsortialpartner vertreten. Die Anteile von ZF Friedrichshafen wurden Ende des 1. Quartals 2022 von der ZF CV Systems GmbH übernommen.

- 2022 wurde die **SAF-HOLLAND SE** als assoziierter Partner aufgenommen.
- Die **Embotech AG** wurde 2023 als assoziierter Partner in das erweiterte Konsortium integriert.

SAFE20 Use-Cases

Das High-Level-Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Demonstration eines sicheren Gesamtsystems, das Arbeitsaufgaben (nachfolgend auch Missionen genannt) auf Betriebshöfen mittels mobiler Maschinen vollautomatisch und sicher mit mindestens 20 km/h im Mischbetrieb ausführt. Die nachfolgende Grafik fasst die einzelnen Systembausteine zusammen:

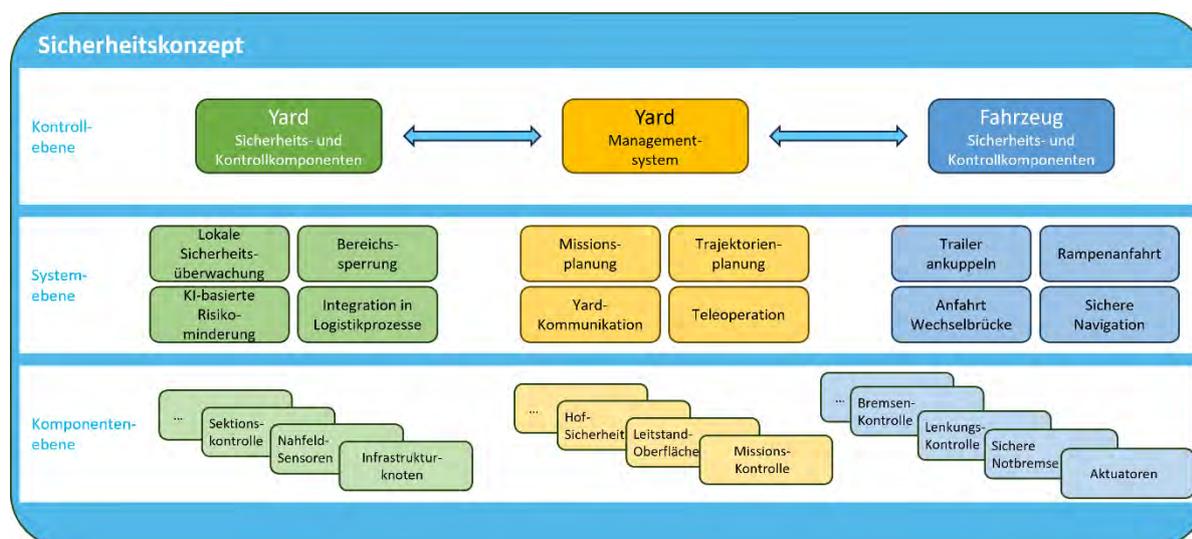


Abbildung 2: Übersicht Systembausteine SAFE20

Die Grundlage dafür – ein ganzheitliches, rechtlich belastbares Sicherheitskonzept – wurde im Rahmen des Arbeitspakets (AP) 3 von den Partnern erarbeitet, nachdem vorab im AP 2 eine ausführliche Anforderungsanalyse erfolgte. Es beschreibt die komplette funktionale Systemarchitektur (Module, Schnittstellen, Funktionen), alle Anforderungen an die einzelnen Systembestandteile, die für einen sicheren Betrieb zwingend erforderlich sind, sowie die im Vorhaben geplante technologische Umsetzung. Damit war das Sicherheitskonzept ein fundamentaler Plan für die Kommerzialisierung und bietet als Kernziel des Vorhabens eine langfristige, verlässliche Orientierung für die Technologie- und Funktionsentwicklungen im Vorhaben sowie weit darüber hinaus.

Für die Erarbeitung dieses Konzepts war die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Unternehmen, F&E-Instituten und Berufsgenossenschaften essenziell, da so möglichst viele der erforderlichen Technologiefelder (Sensoren, Rechentechnik, Kommunikation, Automatisierung, Fahrzeugtechnik, Algorithmen) abgedeckt wurden. Ein einzelner Partner wäre kaum in der Lage gewesen, ein gleichwertiges Sicherheitskonzept zu erarbeiten.

Besonders die folgenden praxisnahen Anwendungsfälle wurden im Sicherheitskonzept betrachtet:

- Ein menschlicher Fahrer fährt mit seinem Lkw auf den Hof. Er stellt das Fahrzeug ab und verlässt es. Alle weiteren Fahrten auf dem Hof führt der Lkw autonom und eigensicher aus. Fahraufgaben wie „Docke um 7:00 Uhr am Tor 42 an“ oder „Parke 9:15 Uhr auf Parkplatz 108“ erhält das Fahrzeug vom Hofmanagement-System über einen Leitstand¹, der die Fahrzeuge auf dem Hof kontrolliert. Dieser Anwendungsfall geht davon aus, dass künftig Serien-Lkw verfügbar sind, die mit der notwendigen drahtlosen Kommunikation, Sensorik und Datenverarbeitung ausgestattet sind.
- Wechselbrücken stehen auf dem Hof. Das Hofmanagement-System weist Wechselbrücken über den Leitstand neue Positionen auf dem Hof zu (z. B. „Wechselbrücke 27 soll um 07:20 Uhr an Tor 23 stehen“ oder „Wechselbrücke 3 soll um 7:25 Uhr auf Abstellplatz 1008 stehen“). Dazu generiert der Leitstand eine Mission und weist diese einem geeigneten und zum geplanten Zeitpunkt verfügbaren Spezialfahrzeug (hier: KAMAG PM) zu. Das Fahrzeug verfährt die Wechselbrücken entsprechend eigensicher und autonom. Der Zu- und Abfluss der Wechselbrücken auf/vom Hof erfolgt mit konventionellen Lkws durch menschliche Fahrer.
- Anwendungsfall wie zuvor. Statt der Wechselbrücke werden Sattelanhänger bewegt (Spezialfahrzeug: KAMAG PT).

Diese Anwendungsfälle mit mindestens 20 km/h unter realen Bedingungen sicher abzubilden, war eine große Herausforderung. Durch die Anforderungen des Mischbetriebs ist es zwingend erforderlich, gefährliche Begegnungen und Kollisionen mit anderen Fahrzeugen und Fußgängern hinreichend hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Dies gelingt nur, wenn die Umgebung der fahrerlosen Fahrzeuge hinreichend sicher erfasst und interpretiert werden kann.

Hierfür verfolgte das Vorhaben einen neuartigen Ansatz, basierend auf der Tatsache, dass nach der Norm ISO 61508² ein sicheres System durch eine geschickte Kombination von mehreren nicht sicheren Systemen mit gleicher Aufgabenstellung aufgebaut werden kann (Dekomposition). Konkret bestand der neue technologische Lösungsansatz für die Umfeldüberwachung darin,

- die Objekterkennung aus dem Fahrzeug durch die Kombination von laser- und kamerabasierter Objekterkennung sowie Bluetooth-Funkortung in einem Umfeld von > 20 m ausreichend sicher zu gestalten (neue Nahfeldüberwachung; System 1),
- über eine hofseitige Objekterkennung mittels Infrastruktur-Sensorknoten (ISK) eine zusätzliche Objekterkennung einzuführen und darüber sicherheitsrelevante Informationen in der Automatisierungszone zu erheben (System 2; s. a. Abbildung 3) und

¹ Hier sei explizit hervorgehoben, dass der Leitstand die autonomen Fahrzeuge nicht fernsteuert. Der Leitstand erstellt und koordiniert stattdessen Missionen, die die Fahrzeuge autonom ausführen. Ein Supervisor überwacht den Betrieb.

² (Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2011)

- die Daten aller Fahrzeuge und ISK in einem hofseitigen Leitstand (Hochleistungscomputer) zu einem digitalen Echtzeitabbild der Automatisierungszone (DAZ) zusammenzuführen (Kombination aus System 1 und 2), die das aktuelle Verkehrsgeschehen hochverlässlich abbildet und es den autonomen Fahrzeugen in Echtzeit zur Verfügung stellt. Die DAZ kann als digitaler Zwilling der Automatisierungszone aufgefasst werden.

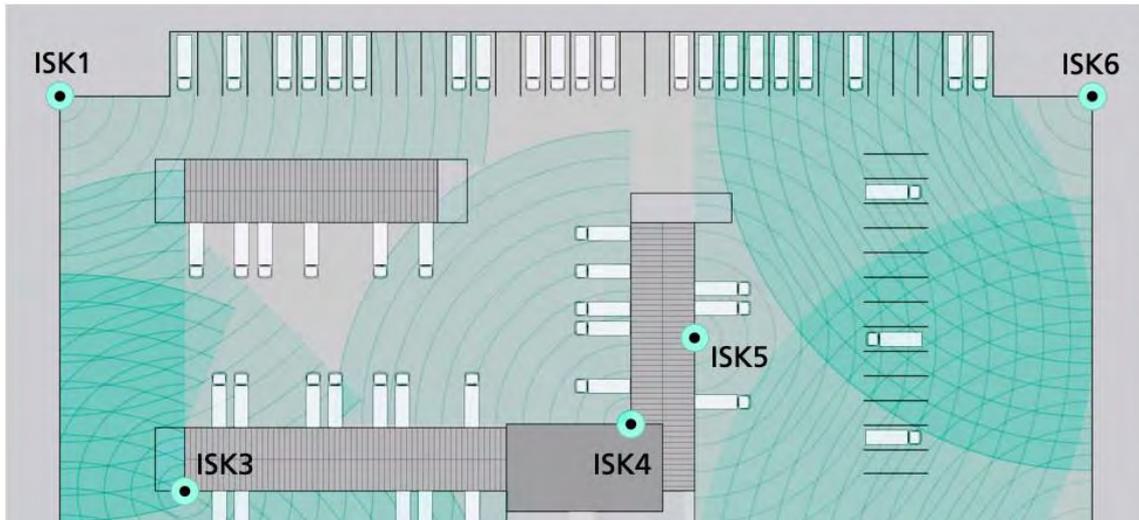


Abbildung 3: Automatisierungszone auf Betriebshof mit Infrastruktur-Sensorknoten (ISK), hofseitiger Objekterkennung, Kommunikation und Leitstand-System mit digitalem Echtzeitabbild der Automatisierungszone (DAZ)

Basierend auf diesen Informationen führen die Fahrzeuge ihre Missionen eigensicher aus. Für die Reaktion der Fahrzeuge auf das aktuelle, durch den Faktor Mensch z. T. schwer vorhersehbare Verkehrsgeschehen wurden im Vorhaben neue regelbasierte KI-Methoden erforscht und erprobt, die nach aktuellem Kenntnisstand in einem Sicherheitskontext zertifizierbar sind.

Ein weiteres Kernziel des Vorhabens war die Evaluation des Gesamtsystems hinsichtlich Sicherheit und Funktionsfähigkeit anhand von Realdaten. Dazu wurden in einer mehrmonatigen Test-, Lern- und Optimierungsphase auf dem Hof des DACHSER Logistikzentrums Ulm mit vollautomatischen Fahrzeugen erprobt und demonstriert. Geplant für diesen Test waren:

- KAMAG Precision Truck (PT): automatisches Handling von Sattelauflegern,
- KAMAP Precision Mover (PM): automatisches Handling von Wechselbrücken, und
- ein Verteiler-Lkw aus dem Vorgängerprojekt AutoTruck.

Dadurch ergab sich für die Kerninnovationen der Anspruch, den Technologie-Reifegrad (TRL) der Teillösungen von derzeit TRL 3 bis 5 auf TRL 6 bis 7 anzuheben.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde das Sicherheitskonzept während des Testbetriebs validiert und kontinuierlich weiterentwickelt.

SAFE20 Arbeitspakete

Das Vorhaben SAFE20 wurde in insgesamt acht Arbeitspaketen (AP) und 36 Unter-Arbeitspaketen (UAP) durchgeführt. Diese, sowie die Verantwortlichen für jedes Arbeitspaket, sind der nachfolgenden Abbildung 4 zu entnehmen.

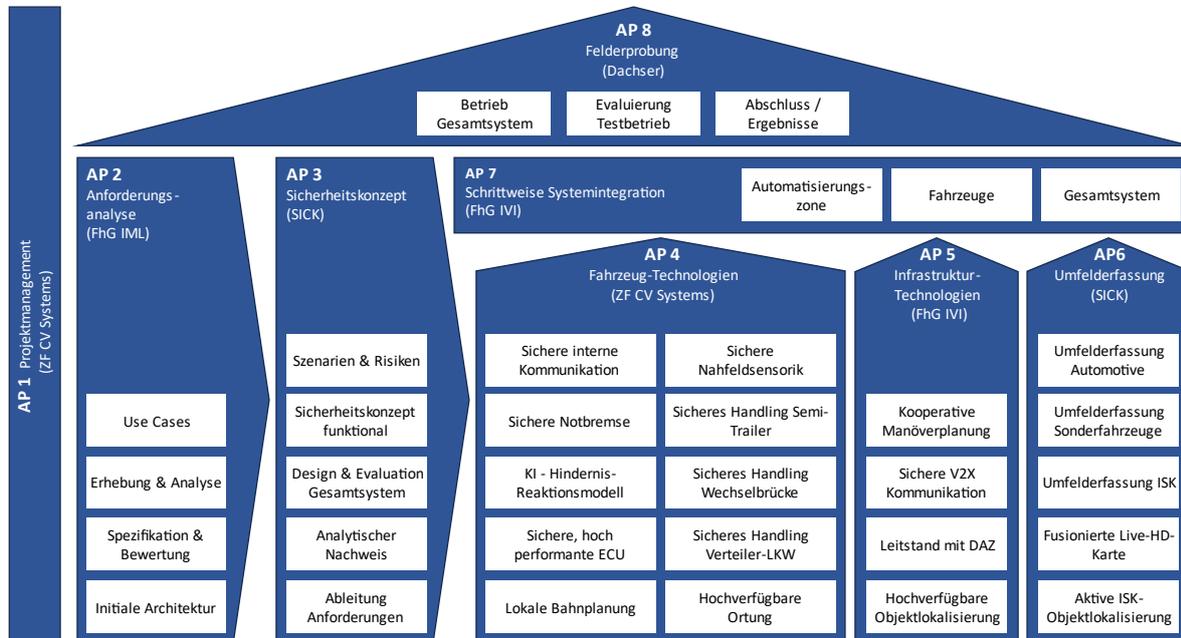


Abbildung 4: Übersicht Arbeitspakete SAFE20

Die Arbeitspakete bauten größtenteils aufeinander auf, wurden aber zum Teil auch parallel vorangetrieben. So stand am Beginn des Projekts vor allem die Anforderungsanalyse (siehe Kap. 2) als Basis aller weiterer Arbeiten, sowie die Ausarbeitung des Sicherheitskonzepts, das die Grundlagen für die Fahrzeugentwicklung (AP 4), die Konzeptionierung der Infrastrukturtechnologien (AP 5) und der Umfelderfassung (AP 6) legte. Alle Entwicklungsarbeiten in den APs 4, 5 und 6 mündeten schließlich in die schrittweise Integration des Gesamtsystems (AP 7), um einen effektiven Testbetrieb zu ermöglichen (AP 8). Während der gesamten Projektlaufzeit wurde im AP 1 das Projektmanagement für das Gesamtprojekt unter der Konsortialführung der ZF CV Systems GmbH durchgeführt.

In den folgenden Kapiteln werden die Arbeitspakete detailliert beschrieben.

1. Projektmanagement (AP 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 (s. a. Kapitel 1.2).

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 und Review des Sicherheitskonzepts genannt werden.

In der Projekt-Endphase (ab 01/2023) wurden im Rahmen von AP 7 wöchentliche Treffen der Projektpartner unter Leitung des Fraunhofer IVI anberaunt, 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 (Verteiler-Lkw 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 Projektlogo diskutiert.

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 Jeversen 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.

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 – **A**utonome **I**nnovation im **T**erminal **A**blauf“ 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 sowie die Anknüpfungspunkte gesucht wurden. Besonders der Leitstand helyOS war für das ANITA-Konsortium interessant, weshalb es einen Folgetermin mit den ANITA-Partnern und dem Fraunhofer IVI im Januar 2023 gab.

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 5: 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 6: Fahr demonstration 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.

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 LinkedIn³, 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 eine Länge von ca. einer Minute haben und die Projektinhalte auf abstrakte und leicht verständliche Weise zusammenfassen. Als Form dafür wurde ein Animationsfilm-Format gewählt, das sich durch die Iso-3D-Ansicht deutlich von gängigen Erklärfilmen unterschied und somit einen Wiedererkennungswert garantierte.

³ <https://www.linkedin.com/company/safe20> (SAFE20 Projektkonsortium, 2022)



Abbildung 7: 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,⁴
2. Eingesetzte Sensortechnologie Fahrzeuge,⁵
3. Eingesetzte Sensortechnologie Infrastruktur,⁶
4. Leitstand,⁷
5. Fahrzeugtechnologien: Hochperformante Rechnerhardware, hochverfügbare und genaue Fahrzeugortung, Bluetooth-Objekterkennung, Rückwärtsfahrt an die Rampe, sicheres Notbremssystem,⁸
6. SAFE20-Baukastensystem zur leichteren Übertragbarkeit auf andere Standorte.⁹

Zum Projektabschluss wurde ein weiterer Film¹⁰ 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 die in den Animationsfilmen schematisch dargestellten Technologien in ihrer realen Umsetzung demonstriert.

⁴ (SAFE20-Konsortium, 2022)

⁵ (SAFE20-Konsortium, 2023)

⁶ (SAFE20-Konsortium, 2023)

⁷ (SAFE20-Konsortium, 2023)

⁸ (SAFE20-Konsortium, 2023)

⁹ (SAFE20-Konsortium, 2023)

¹⁰ (SAFE20-Konsortium, 2024)



Abbildung 8: 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-Kanal¹¹ 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 Südwestrundfunk (SWR) sowie in den Fachmedien (z. B. Verkehrsrundschau, Transport – Die Zeitung für den Güterverkehr, Logistra etc.)

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 boten die Möglichkeit, aktuelle Entwicklungen vor einem Fachpublikum zu präsentieren, während wissenschaftliche Publikationen die Grundlage für eine nachhaltige Verbreitung und Dokumentation

¹¹ <https://www.youtube.com/@safe20> (SAFE20 Projektkonsortium, 2022)

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 Veröffentlichung	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	Sicheres autonomes Fahren und Erprobung in Automatisierungszonen mit mindestens 20 km/h
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. 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. 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 9 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 9: 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 bei Ulm aufgenommen. Dieser bietet die Möglichkeit, verschiedene Use-Cases des Projekts abzubilden und ermöglicht die spezifische Anforderungserhebung. Dies dient sowohl zur Erörterung der Logistikprozesse als auch als Modellierungsgrundlage der Automatisierungsprozesse. Hierfür wurden durch DACHSER und das Fraunhofer 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 10 sind die genannten Abschnitte auf dem Layout der Betriebsstätte Langenau verortet.

1. Anfahrt

Die Anfahrt umfasst den Weg eines Nahverkehrs-Lkws 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 10 die vorgenannten sieben Stationen des Nahverkehrs in einer Übersichtsgrafik verortet.



Abbildung 10: 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 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 11 die vorgenannten fünf Stationen der ersten Mission des Hofbetriebs in einer Übersichtsgrafik verortet.



Abbildung 11: 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 12 die vorgenannten fünf Stationen der zweiten Mission des Hofbetriebs in einer Übersichtsgrafik verortet.

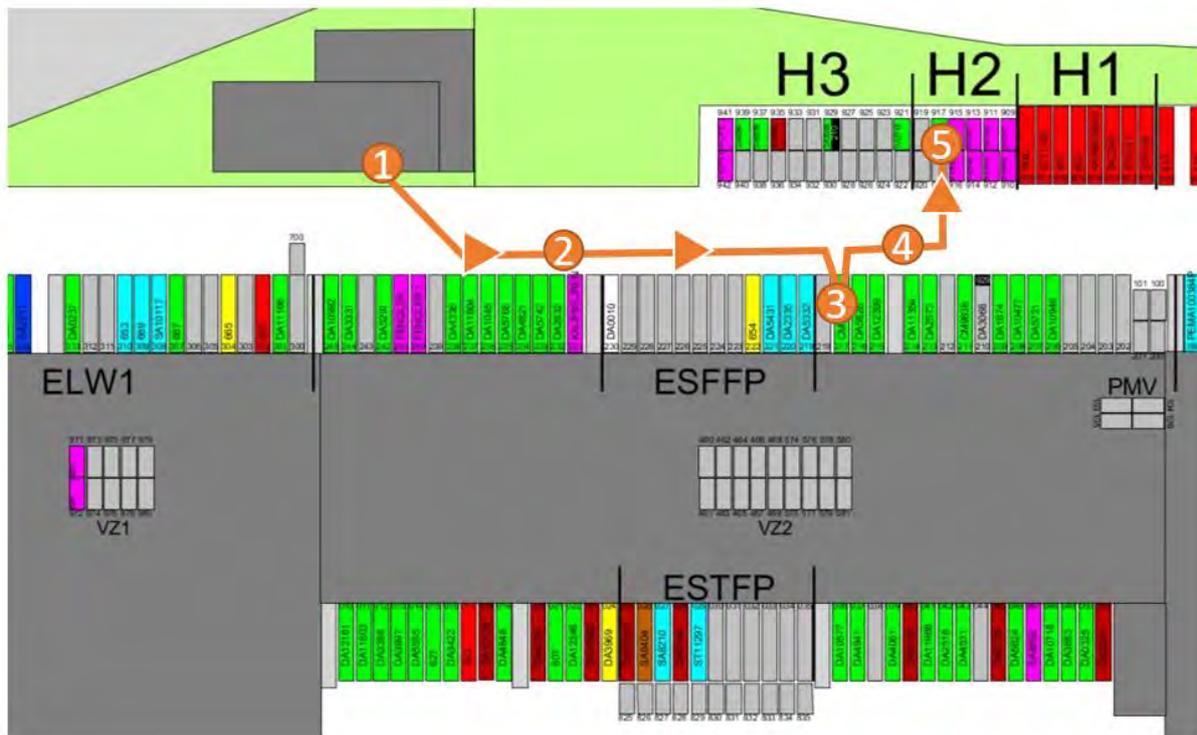


Abbildung 12: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Rampe-Abstellplatz

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 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 13 die vorgenannten fünf Stationen der dritten Mission des Hofbetriebs in einer Übersichtsgrafik verortet.

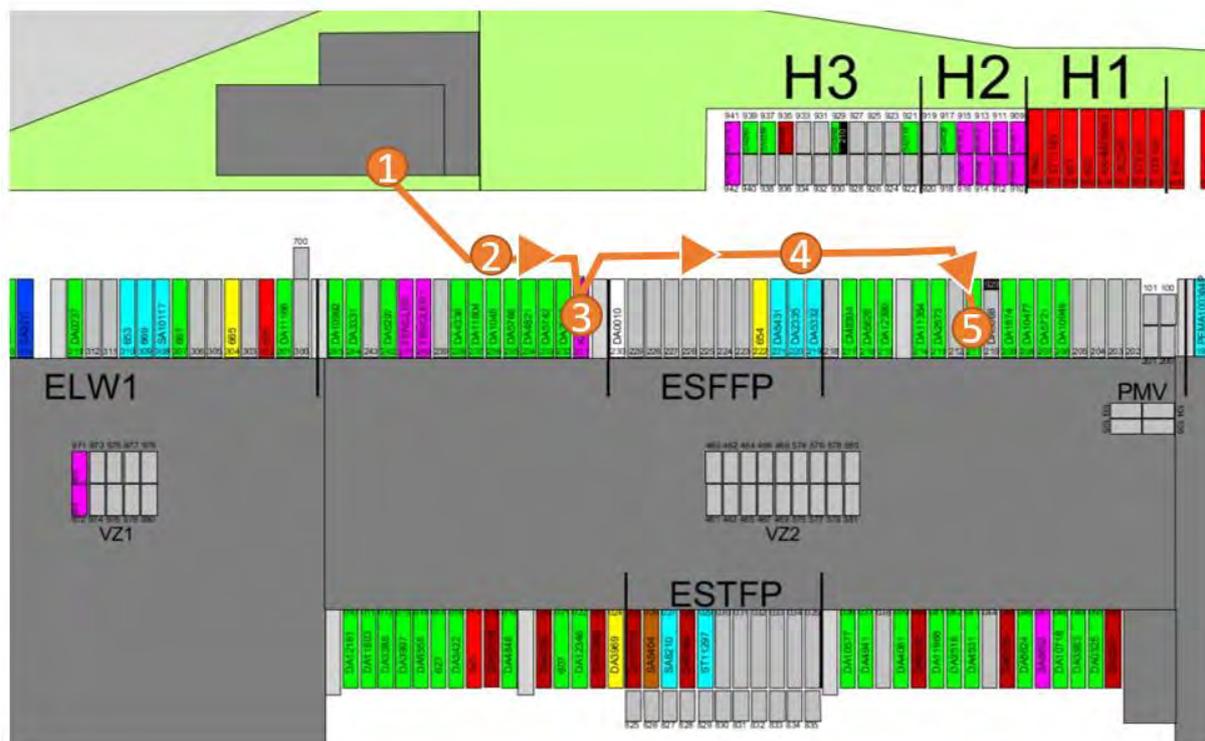


Abbildung 13: Typischer Ablauf im Hofverkehr - Rampe-Rampe

Vertiefende Analyse

Für die einzelnen Missionen (Nahverkehr, 3x Hofdienst) wurden Swimlane-Diagramme entworfen, die einen höheren Detaillierungsgrad aufweisen als die zuvor beschriebenen Ablaufdiagramme. Hierdurch können die IST-Prozesse in ihren Verantwortlichkeiten, Interaktionen und Abhängigkeiten nachvollzogen werden. Für komplexe Prozesse, wie das An- und Abdocken von Ladungsträgern an die Rampe, wurden vertiefende Ausschnitte erarbeitet. Die Ausarbeitungen standen den Projektpartnern in der Projektdatenbank zur Verfügung. Nachfolgende Abbildung 14 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt eines Swimlane-Diagramms.

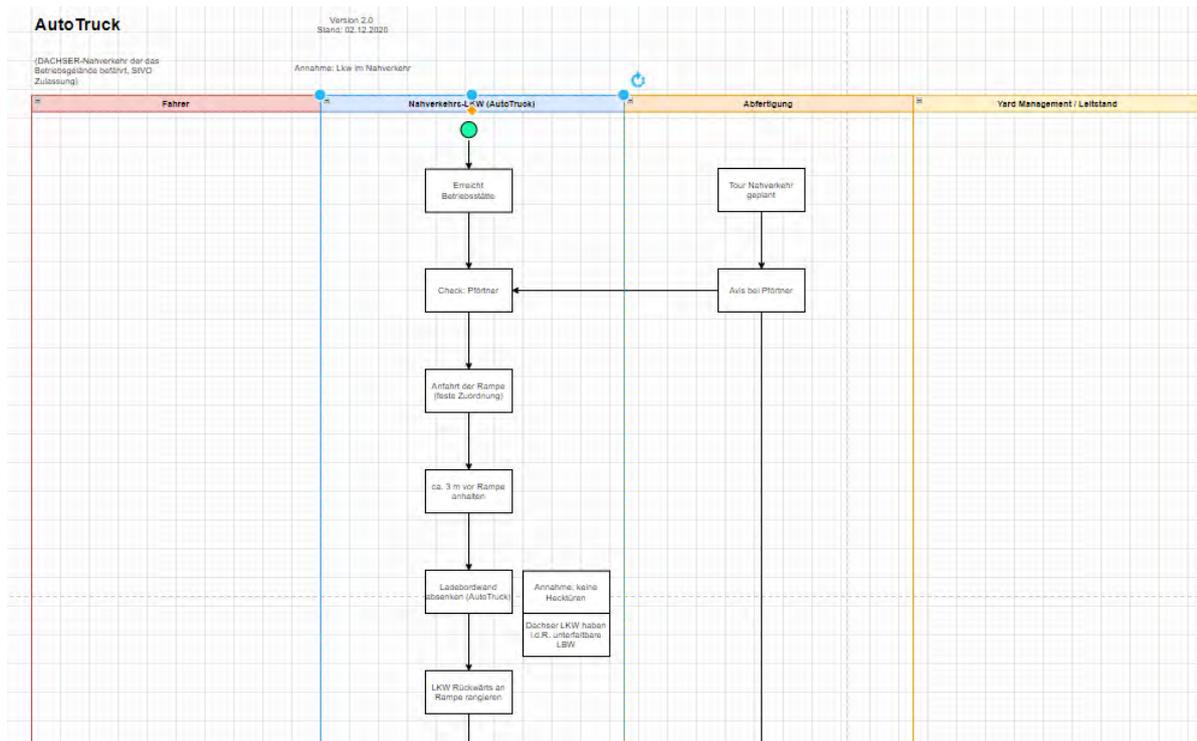


Abbildung 14: Beispiel Swimlane-Diagramm

Glossar

Das erstellte Glossar enthielt sämtliche relevanten Begriffe des Projekts und deren Definition, zumeist solche, 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 war es, für die Umsetzung im Rahmen des SAFE20-Projektes in AP 8 eine Lösung zu identifizieren, die dort umgesetzt wird.

Vorgehensweise

Die Analyse wurde in vier wesentlichen Schritten durchgeführt, die in Abbildung 15 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.

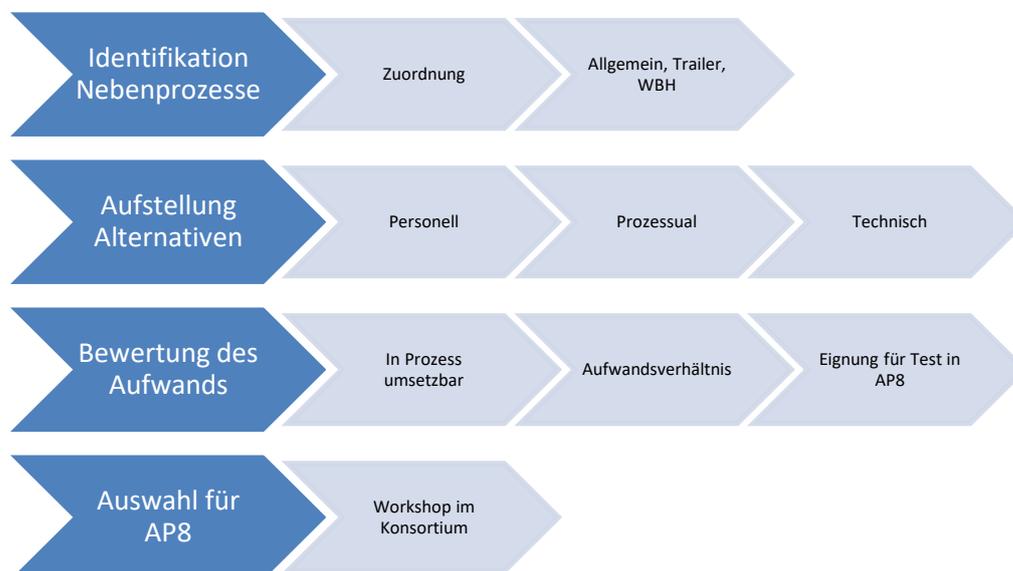


Abbildung 15: Vorgehensweise zur Identifikation von Nebenprozessen

Die Bewertung des jeweiligen Aufwands wurde darauf aufbauend für jede Alternative durchgeführt. Diese wurde wiederum nach drei Kriterien durchgeführt (vgl. Abbildung 16). 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 bei 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. Behelfslösungen 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.

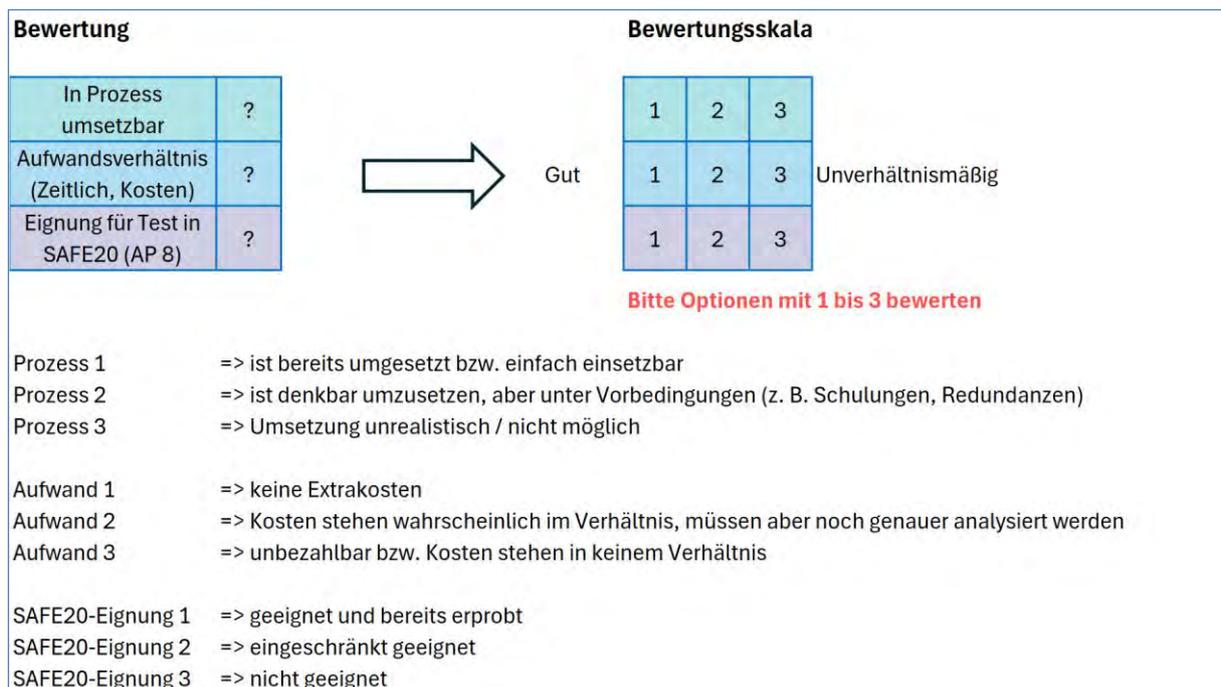


Abbildung 16: Bewertung der Alternativen für Nebenprozesse

Als letzter Schritt wurde je Nebenprozess eine Alternative ausgewählt, die im Rahmen des Projekts SAFE20 für den prototypischen Test in AP 8 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 17 dargestellt.

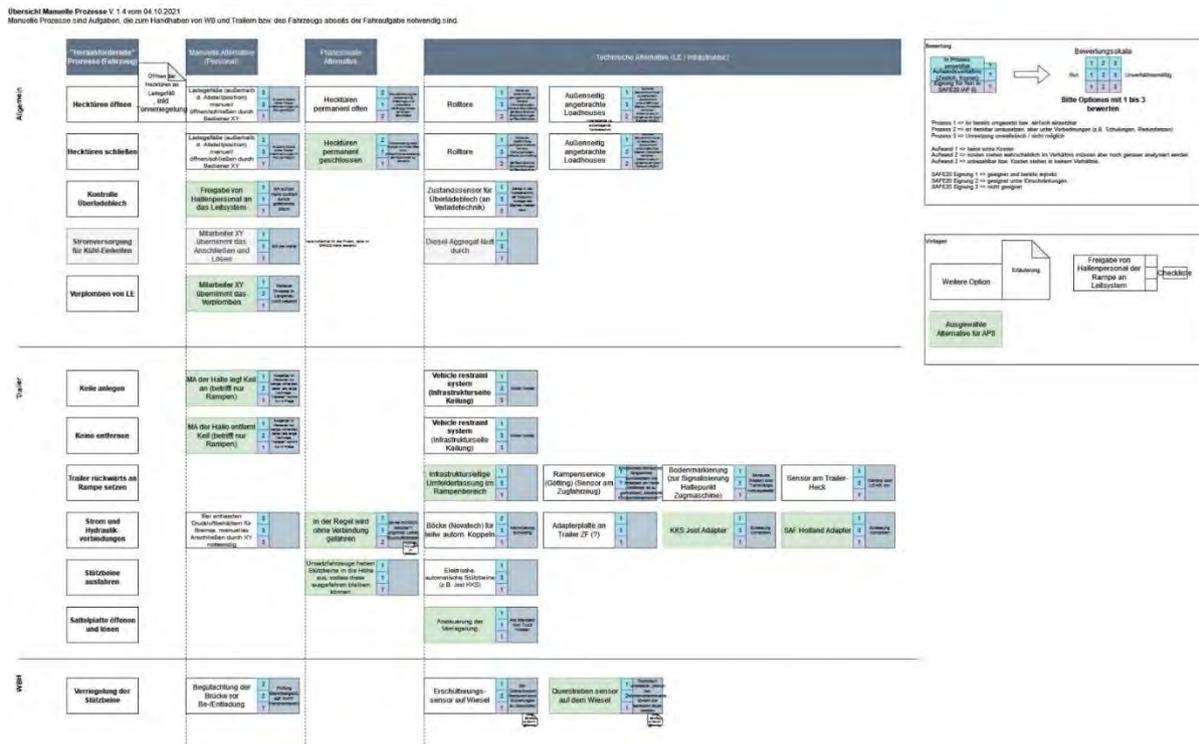


Abbildung 17: Nebenprozesse - Ergebnis der Analyse

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 Notaus Schalters.

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.

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-Methode¹² 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.

¹² (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
Übergabeplatz 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 infrastruktureseitig 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 1Tabelle 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 Ladegefäße 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 Ladegefäßen 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

2.3. 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 SICK und den anderen Projektpartnern 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 18). Das Interaktionsdiagramm enthält Informationen zu:

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

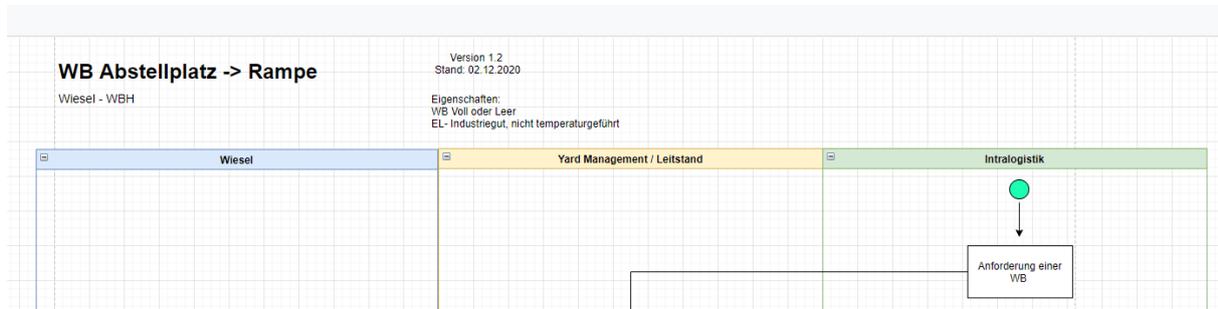


Abbildung 18: Ausschnitt Swimlane Diagramm

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.

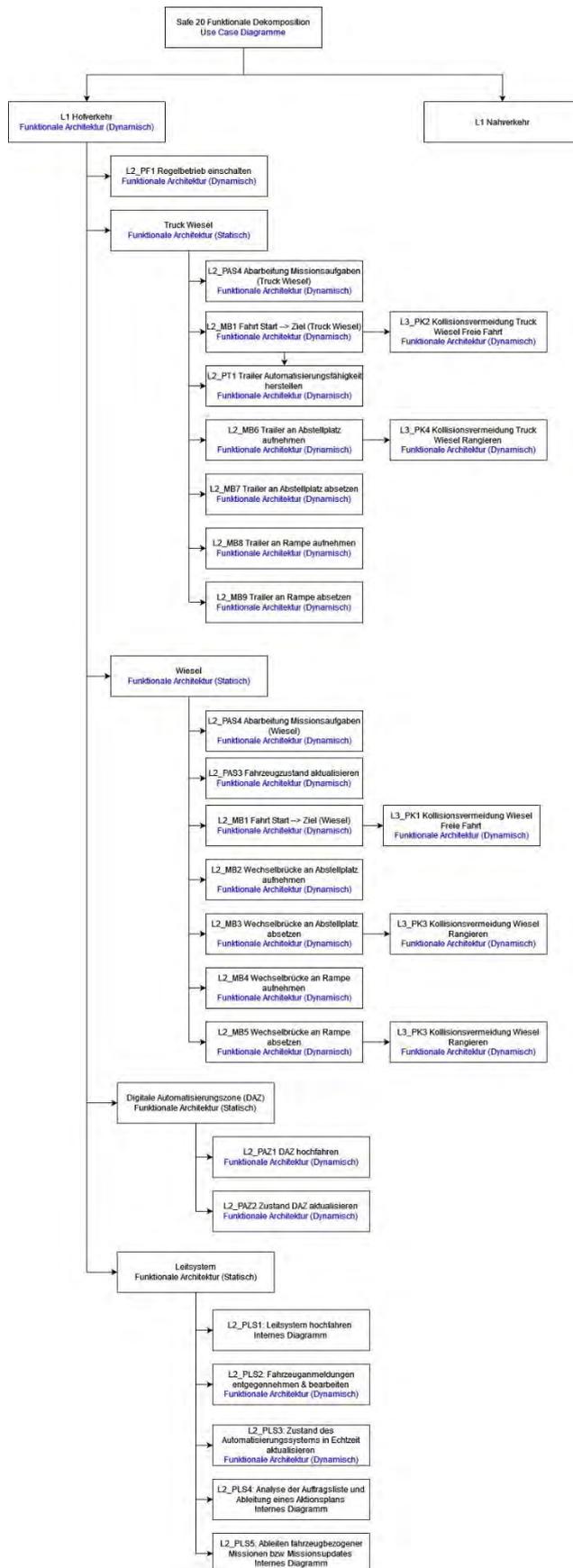


Abbildung 19: Übersicht der Swimlane Diagramme (Stand: 08.11.2021)

Jeder Kachel der in Abbildung 19 dargestellten Übersicht ist ein Swimlane-Diagramm eines Subsystems hinterlegt. Bei Bedarf können jeweils Abbildungen von Subsystemen in der Systemarchitektur angelegt werden.

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 Fahrzeug-Umfeldererkennung 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.

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.

3. Sicherheitskonzept (AP 3)

Für die in der Vorhabenbeschreibung angestrebten Automatisierungszonen spielte das Sicherheitskonzept eine zentrale Rolle. Ankerpunkt für das Sicherheitskonzept war dabei eine umfassende, auf den konkreten Anwendungsbereich erstellte Risikobeurteilung. Diese wurde basierend auf der genauen Untersuchung der Prozesse und den Umgebungsbedingungen auf dem Betriebshof des DACHSER Logistikzentrums Ulm erstellt. Die aus der Risikobeurteilung resultierenden risikomindernden Maßnahmen mussten bei deren technischer Gestaltung spezielle Integritätsanforderungen erfüllen. Neben den zu erfüllenden Sicherheitsfunktionen musste auch die Wirtschaftlichkeit genau betrachtet werden. Hier zeigte sich im Projekt, dass die manuellen Prozesse vonseiten des Betreibers nicht eins zu eins in den automatisierten Ablauf übernommen werden konnten, sondern angepasst werden mussten, um eine wirtschaftliche Automatisierung zu ermöglichen. Der Mensch als Teil der Automatisierungszone im gemischten Betrieb von teilautomatisierten und vollautomatisierten Fahrzeugen nimmt hierbei eine zentrale Rolle ein, sowohl im Sinne der Gefährdung als auch der Risikominderung. Das Sicherheitskonzept musste so gestaltet werden, dass insbesondere Personenschäden nach bestem Wissen und Gewissen ausgeschlossen werden, ohne dabei den Prozess zu stören oder die Automatisierung ineffizient zu machen. Durch Vermeiden überbestimmter Sicherheitsmaßnahmen sollte die Wirtschaftlichkeit und Robustheit der Lösung gefördert werden. Eine weitere Herausforderung stellte dabei auch ein richtlinienkonformer Betrieb von vollautomatisierten Fahrzeugen dar, da innerhalb der Anwendung auf dem Betriebshof die Anforderungen des öffentlichen Straßenverkehrs auf die Anforderungen im Industriebereich trafen. Dies wurde besonders beim Nahverkehrsfahrzeug deutlich, das beide Bereiche bedienen musste, sowie bei den autonomen Fahrzeugen für den Transport der Trailer und Wechselbrücken. Diese müssen das Betriebsgelände verlassen, um z. B. zur betriebszugehörigen Waschstraße oder Werkstatt zu fahren oder Ladungsträger abzuholen an Stellplätzen, die zum Betriebsgelände gehören, aber über das öffentliche Straßennetz leicht zugänglich sind.

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

Hofverkehr	Nahverkehr
	Übergang vom öffentlichen Straßenverkehr auf autonomes Fahren Betriebstätte
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 bei Ulm 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 20: Potenzielle Fahrwege und Einschätzung des maximal zu erwartetem 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“¹³

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.

¹³ (Mollbach & Albert, 2020)

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.

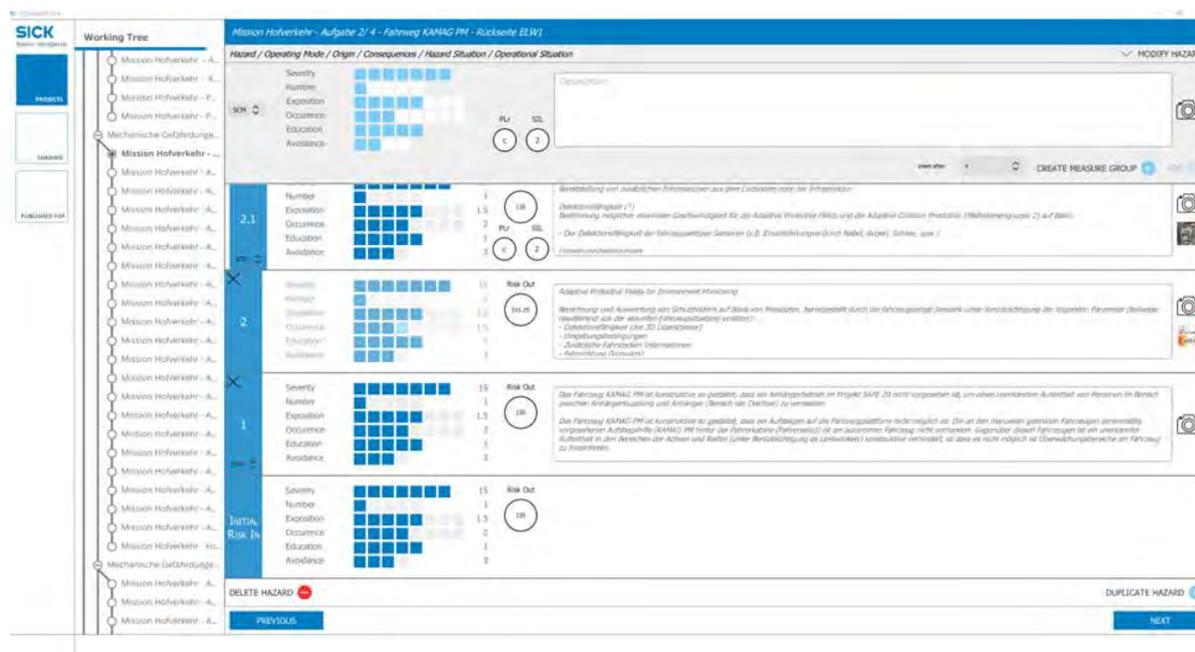


Abbildung 21: Ausschnitt aus der Risikobeurteilung, Fahrweg KAMAG PM – Rückseite Halle ELW1

3.2. Identifikation sicherheitsgerichteter Funktionen und funktionales Sicherheitskonzept (AP 3.2)

Inhalt des AP 3.2 war die Identifikation risikoreduzierender Maßnahmen für die im Rahmen der Risikobewertung festgestellten und bewerteten Gefährdungen. Im Rahmen von SAFE20 wurde hier ein vollständig iteratives Verfahren angewendet. Im Gegensatz zu etablierten Verfahren bestand die Anforderung darin, den jeweiligen Beitrag einzelner Maßnahmen zur Risikominderung auch quantitativ zu bewerten. Diese detaillierte Betrachtungsweise ermöglichte im weiteren Verlauf die funktionspezifische Betrachtung der Hinlänglichkeit (Beseitigung von Gefährdungen oder Erbringung einer hinreichenden Risikominderung, die unter Berücksichtigung des Standes der Technik zumindest den gesetzlichen Anforderungen entspricht – Spezifizierung gemäß Norm ISO 12100¹⁴). Entsprechende Funktionen sind in der Dokumentation der Risikobeurteilung als mögliche risikomindernde Maßnahmen gelistet.

Risikomindernde Maßnahmen können dabei sowohl inhärent sicheres Design, technische oder komplementäre Schutzmaßnahmen, als auch organisatorische Maßnahmen wie persönliche

¹⁴ (International Organization for Standardization (ISO), 2010)

Schutzausrüstung oder Hinweise umfassen. Mögliche und notwendige risikomindernde Maßnahmen wurden zunächst in die Risikobeurteilung aufgenommen und dort weiter beschrieben. Soweit es sich um technische oder komplementäre Schutzmaßnahmen handelt, wurden die entsprechenden Sicherheitsfunktionen in die funktionale Beschreibung aufgenommen und – um eine nahtlose Einbindung zu gewährleisten – systematisch in die im Rahmen von AP 2 erstellte funktionale Beschreibung und in die entsprechenden Sequenz-Diagramme integriert. Dies ermöglicht sowohl eine funktionale Zuordnung zu den jeweiligen Subsystemen und damit der Verantwortlichkeit als auch die Darstellung notwendiger Schnittstellen zu anderen Teilsystemen. Die entsprechenden Sicherheitsfunktionen sind in den L2-Diagrammen aus AP 2 aufgenommen und in L3-Diagrammen weiter spezifiziert.



Abbildung 22: Funktionale Dekomposition. Die einzelnen Ebenen entsprechen den L1- bis L3-Ebenen der Modellierungen der funktionalen Architektur in AP 2.

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 13849-1¹⁵ 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 26262¹⁶.

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. Siehe hierzu auch Kapitel 3.5 „Analytischer Nachweis umfelderfassender Sicherheitsfunktionen (AP 3.5)“.

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 22 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

¹⁵ (International Organization for Standardization (ISO), 2015)

¹⁶ (International Organization for Standardization (ISO), 2018)

– 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.

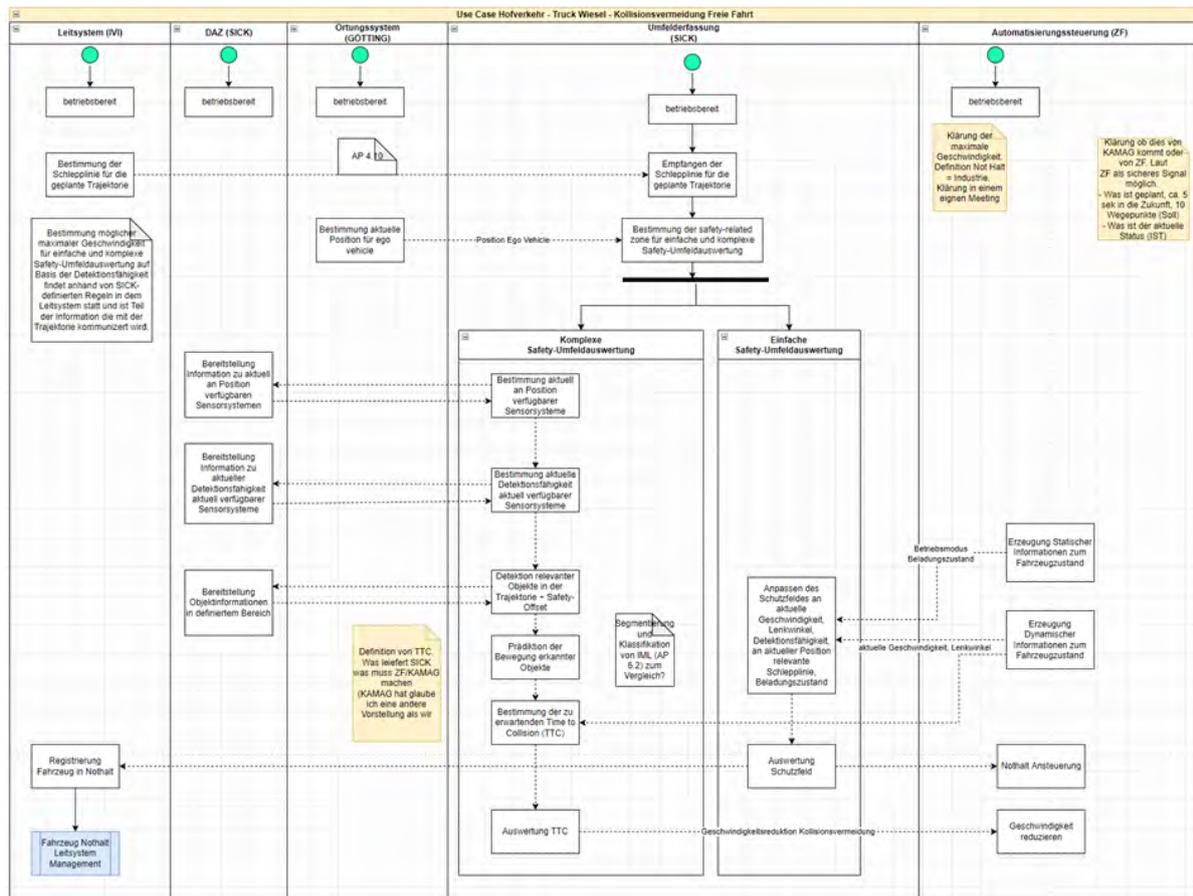


Abbildung 23: Exemplarisches Sequenz-Diagramm für die freie Fahrt (hier für den KAMAG PT)

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.

3.5. Analytischer Nachweis umfelderfassender Sicherheitsfunktionen (AP 3.5)

Die Analyse der umfelderfassenden Sicherheitsfunktionen wurde im AP 3.5 bearbeitet. Da im Rahmen von SAFE20 ein komplexer Use-Case betrachtet wird und fortschrittliche Sicherheitsfunktionen verwendet werden sollen, ist neben der Betrachtung von Integritätsanforderungen („Ausfallsicherheit“), wie sie beispielsweise durch Normen der

funktionalen Sicherheit wie ISO 13849-1 oder IEC 62061¹⁷ vorgesehen wird, auch eine auf Analyse basierende Bewertung der Detektionsfähigkeit der umfelderfassungs-basierten Sicherheitsfunktionen erforderlich. Die IEC/TS 62998-1¹⁸ liefert eine Basis, die hier herangezogen werden kann. Im Rahmen des AP 3.5 wurde ein Konzept für diese Analyse und Nachweisführung erarbeitet. Ziel der Analyse ist der Nachweis, dass Sicherheitsfunktionen, die Perzeptionssysteme nutzen, mit einer Güte ausgeführt werden, die dem jeweiligen Beitrag zur Risikominderung genügt.

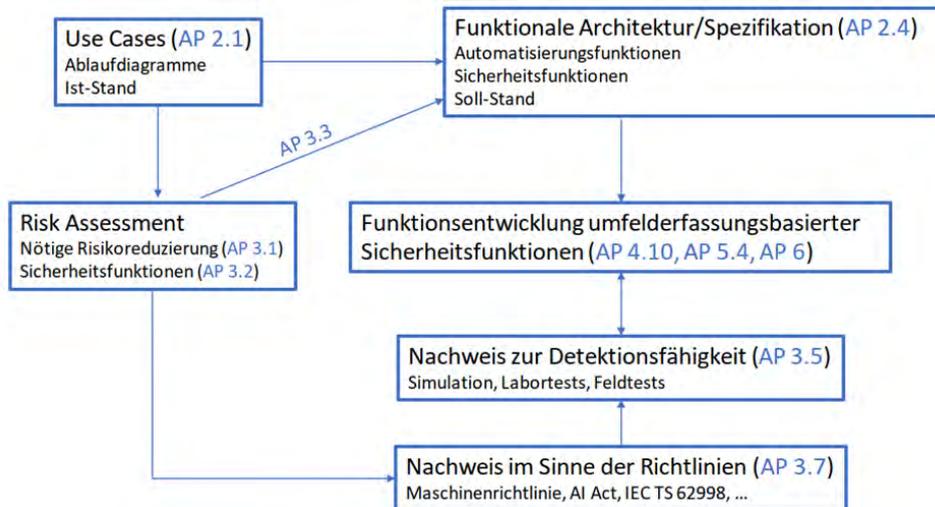


Abbildung 24: Einbettung des analytischen Nachweises umfelderfassungs-basierter Sicherheitsfunktionen in das Gesamtprojekt.

Die Analyse der umfelderfassungs-basierten Sicherheitsfunktionen umfasst insbesondere die adaptive Kollisionsvermeidung, die mittels Multi-Object-Tracking realisiert worden ist. Für die Nachweisführung werden unterschiedliche Methoden verwendet, die teilweise auf Vergleichen mit Referenzmesswerten und zum Teil auf simulationsbasierten Analysen basieren. Im Rahmen eines Verifikations- und Validationsplans wurden Labor-, Simulations- und Feldtests identifiziert, die nach Realisierung der umfelderfassenden Funktionen durchzuführen und zu dokumentieren sind. Entscheidend ist hierfür ein tiefes Verständnis des Gesamtsystems und die Identifikation der einzelnen Analyseaspekte, die für den Nachweis der Detektionseigenschaften notwendig sind. Während hier Aspekte wie Umwelteinflüsse vor allem in Labormessungen sinnvoll sind, eignen sich für die Untersuchung systembedingter Abhängigkeiten, die sich aus der Komplexität der Softwarefunktionen ergeben, vor allem Simulations- und Feldtests.

Für die simulationsgestützte Nachweisführung wurden Simulationsmodelle verwendet, die im Rahmen des AP 6 entwickelt wurden. Ziel war es, die in AP 2 identifizierten Use-Cases in ein virtuelles Modell zu übertragen, um so in der Lage zu sein, funktionale Eigenschaften insbesondere der Perzeptionssysteme zu untersuchen und zu verifizieren. Abbildung 25 zeigt ein Beispiel für ein simuliertes Szenario auf dem virtuellen Abbild des Betriebshofs in Langenau.

¹⁷ (International Electrotechnical Commission (IEC), 2021)

¹⁸ (International Electrotechnical Commission (IEC), 2019)

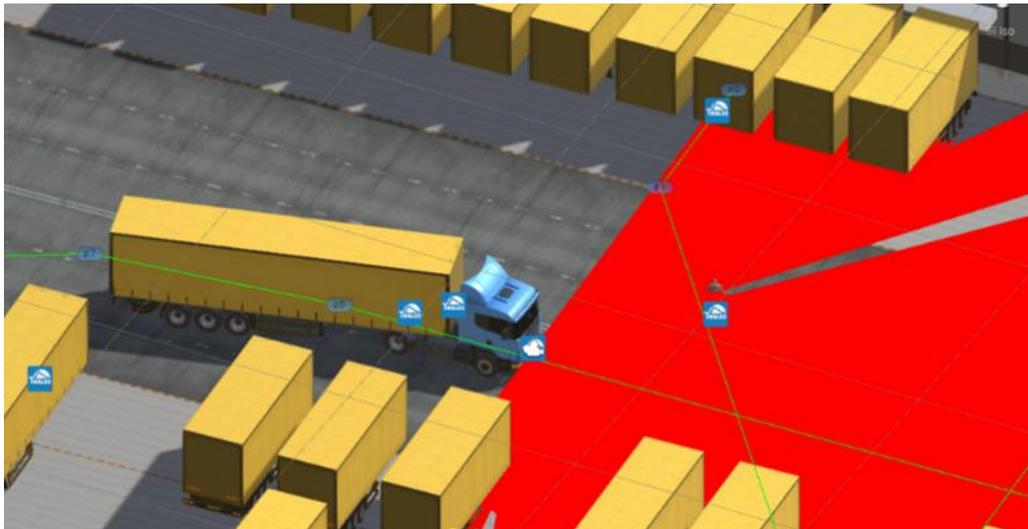


Abbildung 25: Ausschnitt aus der virtuellen Simulationsumgebung des Betriebsbhos in Langenau. Dargestellt ist ein Lkw mit On-board-Sensorik. Die Erfassungsbereiche der Sensoren sind in Rot dargestellt.

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 26 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.

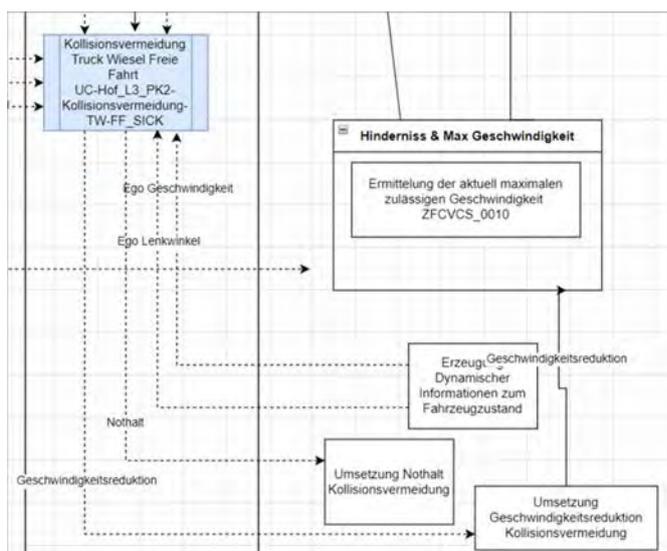


Abbildung 26: Sicherheitskritische Eingangsgrößen

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 AKTUELL¹⁹ – „Automatisiert fahrende Fahrzeuge in betrieblichen Bereichen“. Außerdem veröffentlichte die EU eine neue Maschinenverordnung²⁰ (MVO), 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.

¹⁹ (DGUV - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2022)

²⁰ (Europäische Union, 2023)

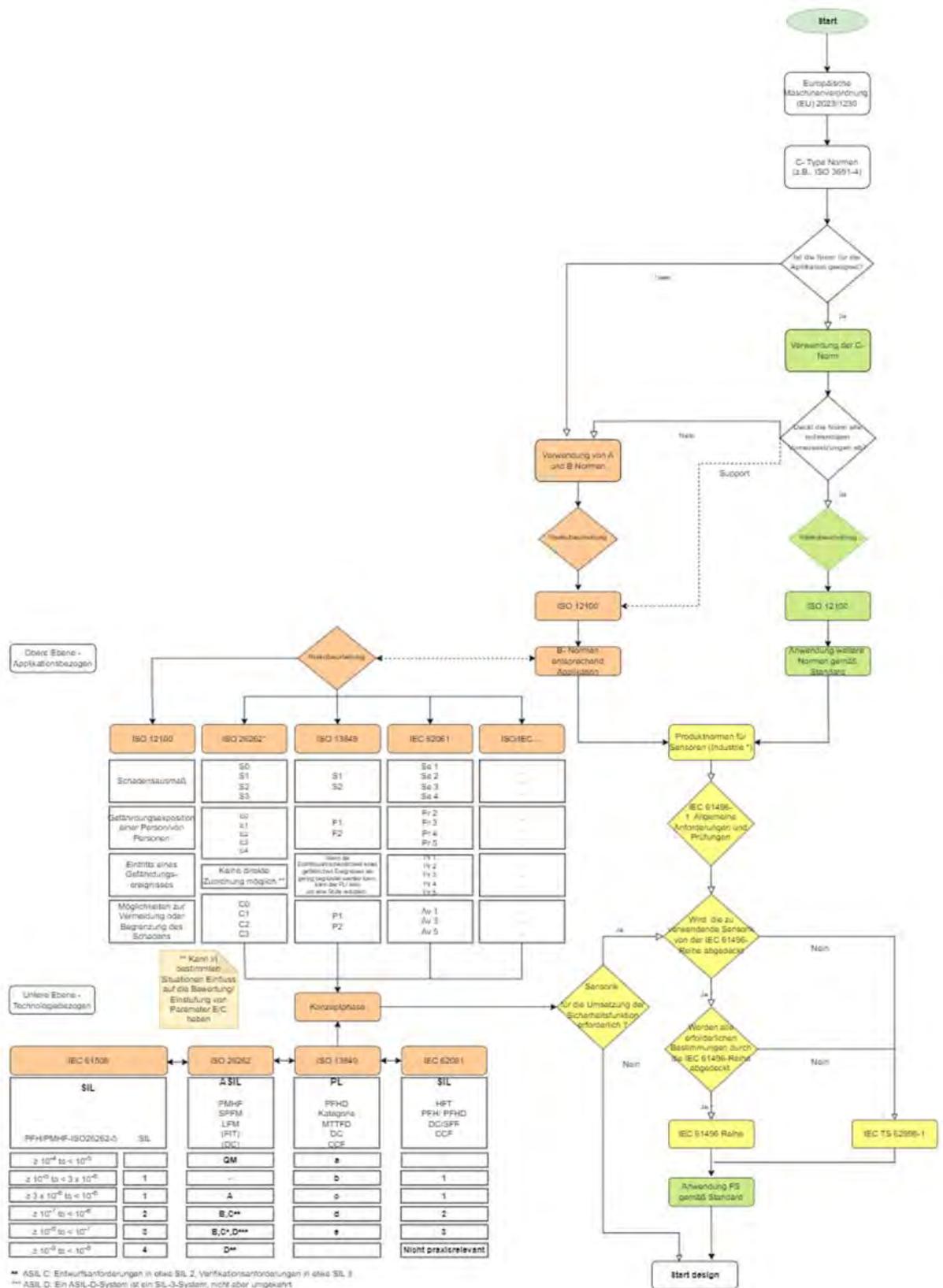


Abbildung 27: Ablaufdiagramm einer möglichen Umsetzung

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.

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 wurde 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 Umfeldfassungssysteme 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.

4. Sichere Fahrzeugtechnologien (AP 4)

Um den in Arbeitspaket 3 erarbeiteten Anforderungen des Gesamtsystems zu entsprechen, wurden in diesem Arbeitspaket die angewandten Fahrzeugtechnologien als Teilsysteme zuverlässig entwickelt und an die jeweiligen Eigenschaften der Einzelfahrzeuge (KAMAG Precision Truck (PT), KAMAG Precision Mover (PM) und AutoTruck) angepasst werden. Dabei galt es, mindestens den im Projekt angestrebten technologischen Reifegrad TRL 6 (Prototyp in Einsatzumgebung) zu erreichen.

Die zu erarbeiteten Lösungsansätze waren:

- Entwicklung eines sicheren Frameworks für die interne Kommunikation
- Entwicklung eines ausfallsicheren Notbremssystems
- Entwicklung eines KI-basiertes Reaktionsmodells für unvorhergesehene Hindernisse auf der Mission
- Entwicklung einer hoch performanten und funktional sicheren Rechnerhardware
- Einsatz einer lokalen Bahnplanung für das sichere Anfahren an Wechselbrücken, Semitrailer oder Rampen
- Entwicklung und Einsatz einer sicheren Nahfeld Sensorik
- Automatisiertes Handling des Aufnehmens, bzw. Absetzen von Wechselbrücken oder Semitrailern
- Einsatz einer hochverfügbaren Ortung mittels Fusionssystemen
- Entwicklung einer generischen Schnittstelle für den KAMAG PT

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 war es wichtig, dass sich die kommunizierenden Parteien aus Kompatibilitätsgründen auf eine gemeinsam verwendete ROS-Version einigten. 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-Standards²¹ 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.

²¹ (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2023)

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.

4.2. Sichere Notbremse (AP 4.2)

Ein grundlegender Bestandteil eines Sicherheitskonzepts ist das Überführen des Fahrzeugs in einen sicheren Zustand, wenn Fehler erkannt werden, die einen sicheren Betrieb des autonomen Fahrzeugs nicht mehr gewährleisten. In SAFE20 war der sichere Zustand der Stillstand des Fahrzeugs, der durch eine Notbremsung eingeleitet wird. Ein zweiter Punkt ist das verlässliche Stoppen des Fahrzeugs, wenn es sich auf drohendem Kollisionskurs mit Objekten in der Umgebung befindet, auch hier wird als letzte Eskalationsstufe eine Notbremsung eingeleitet. Die Notbremse führt dabei das Zugfahrzeug innerhalb eines definierten Bremsweges in den Stillstand. Dabei treten bei der Notbremse Aspekte wie verschleißarme Durchführung in den Hintergrund. Im normalen Betrieb wird für Verzögerungen daher nicht auf die Notbremse zurückgegriffen. Hauptanforderung an die Notbremse ist die Zuverlässigkeit.

Im Zugfahrzeug befindet sich in aller Regel schon ein elektronisches Bremspedal, das aus Sicherheitsgründen eine pneumatische Rückfallebene hat. Tritt der Fahrer das Pedal komplett durch und fällt die Elektronik aus, wird über ein Pneumatikventil noch Luft in den Bremskreislauf geleitet und das Fahrzeug verzögert. Zusätzlich kann der Fahrer als letzte Redundanzstufe (Ausfall der kompletten Betriebsbremse) über die per Hand betätigte Feststellbremse das Zugfahrzeug verzögern (s. a. Abbildung 28). Die vorhandene elektronische Schnittstelle kann somit zwar zum Verzögern für die Automatisierung verwendet werden, bei einem Ausfall dieses Interfaces gibt es aber in den heutigen manuell betriebenen Zugfahrzeugen keine Rückfallebene, welche nicht durch einen Fahrer betätigt werden müsste. Die Zuverlässigkeit ist somit bei fehlendem Fahrer nicht gegeben. Daher muss eine weitere Redundanz eingeführt werden, die durch die Automatisierung ausgelöst werden kann. Dabei wird auf die schon vorhandene manuell betätigte Feststellbremse zurückgegriffen und diese in die Automatisierung eingebunden. Üblicherweise werden hierzu in der vorhandenen

Feststellbremse zusätzliche elektrische Ventile verbaut, die durch ihre Beschaltung ein Entlüften und Belüften der Feststellbremse und somit das Einlegen bzw. Lösen der Federspeicher ermöglicht (s. Abbildung 28).

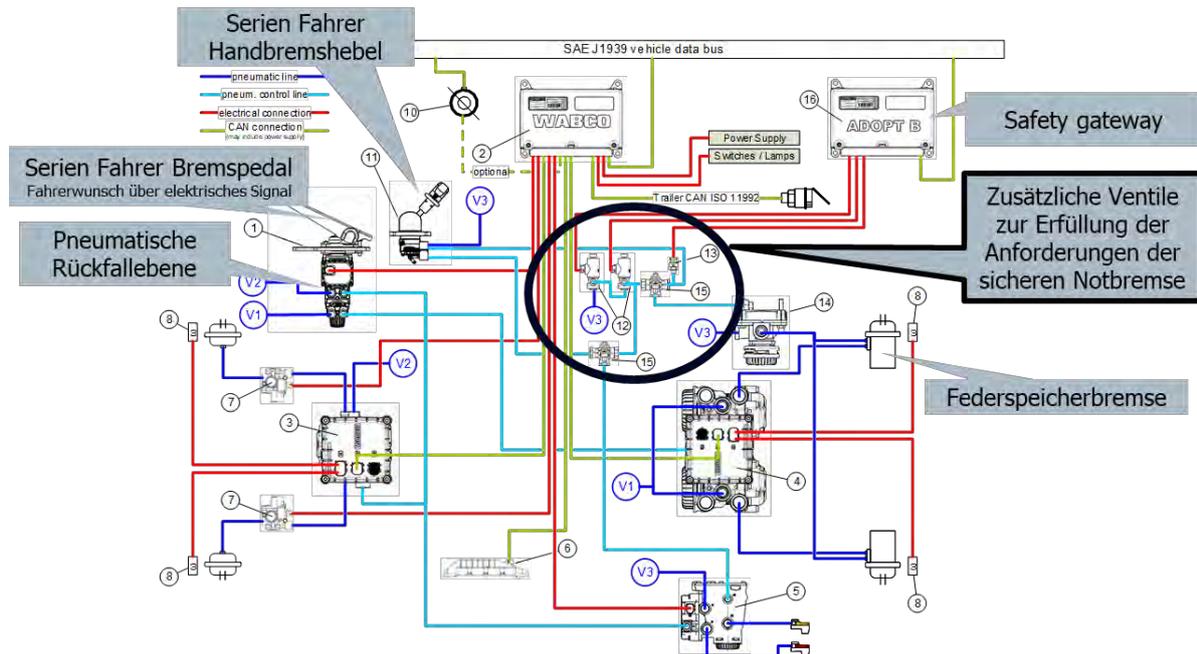


Abbildung 28: Serienbremsen-Bedienelemente eines Nutzfahrzeugs mit handbetätigter Feststellbremse und Einbindung der Feststellbremse durch zusätzliche Ventile in die Automatisierung

In diesem Arbeitspaket wurde untersucht, inwieweit sich eine schon vorhandene Serienlösung einer elektrisch angesteuerten Feststellbremse von ZF (interne Bezeichnung EPH = Elektro Pneumatische Handbremse) durch spezifische Beschaltung und ohne Einbau weiterer Ventile so anpassen lässt, dass sie die Anforderungen für das automatisierte Fahren erfüllt (Abbildung 29).

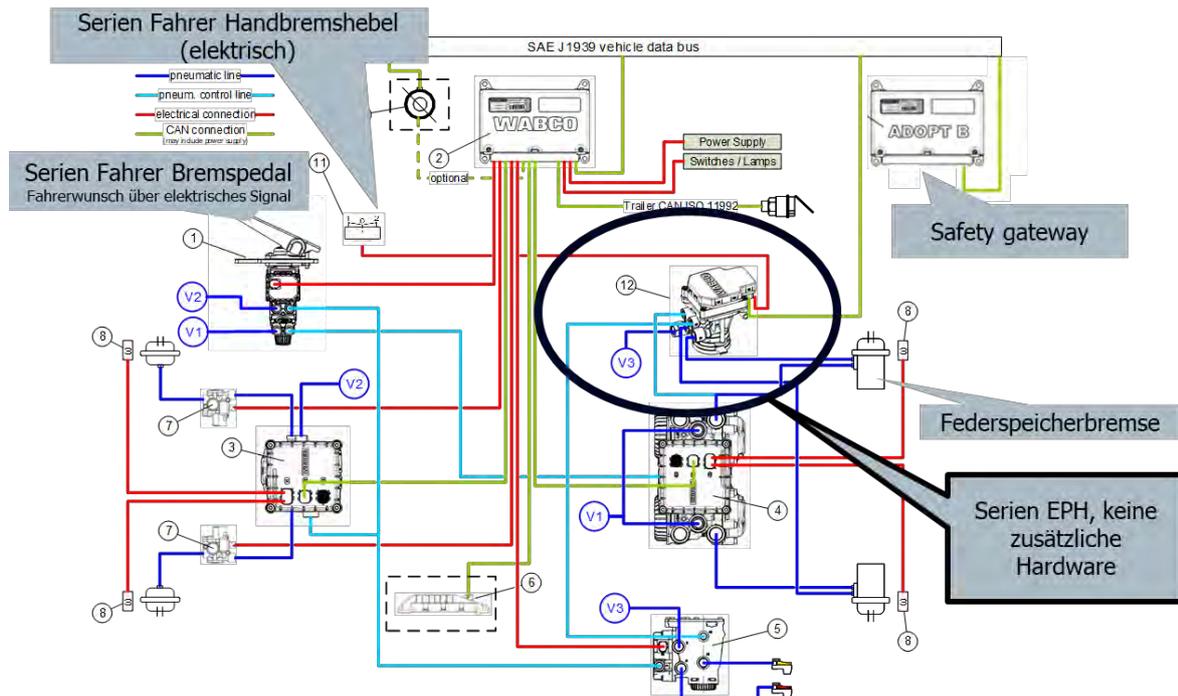


Abbildung 29: Serienkomponenten eines Nutzfahrzeugs mit EPH-Lösung, keine weiteren Hardwarekomponenten benötigt.

Die Ansteuerung dieser Lösung erfolgt dabei über ein Safety Gateway (auch als ADOPT B bezeichnet), welches Teil der ZF ADOPT Lösung ist (siehe auch AP 4.11). Die zu lösende Hauptproblematik ist, dass auch bei einem elektrischen Fehler (z. B. Stromausfall) der sichere Zustand durch Einleitung einer Notbremsung erreicht wird, welches bei einer manuell betätigten Feststellbremse nicht möglich ist.

Anwendungsfälle der ausfallsicheren EPH:

- Automatisierte Funktionen für private Grundstücke,
- Nicht öffentliche Straßen, auf denen plötzlicher Stillstand keine Gefahr darstellt,
- Für niedrigere Geschwindigkeiten wie z. B. im Yard-Bereich, Autobahnparkplätzen oder Baustellen.

Funktionsbeschreibung der ausfallsicheren EPH

Bei einem schweren Defekt der Betriebsbremsanlage oder einem kompletten Stromausfall wird das Fahrzeug mit Hilfe der ausfallsicheren Feststellbremse EPH, die die Feststellbremsanlage betätigt, sicher zum Stillstand gebracht.

Dies geschieht durch Aufrechterhaltung eines Steuerdrucks am Relaisventil mit Hilfe des Halteventils innerhalb des EPH-Modulators. Im Falle eines schwerwiegenden Fehlers im Betriebsbremsssystem oder eines vollständigen Stromausfalls wird das Halteventil stromlos geöffnet. Die Federspeicherbremsen werden entlüftet und die Feststellbremse wird angezogen.

Funktionale Sicherheitsanalyse der EPH

Die betrachtete Komponente ist die ausfallsichere Feststellbremse EPH (auch fail-safe EPH). Diese nutzt die serienmäßige EPH-Hardware und erweitert diese um zusätzliche Funktionalitäten, die die ausfallsichere Bremsfunktion in die EPH implementieren. Die Architektur sieht vor, dass die EPH-Hardware und -Software die Bremsfunktion realisieren und ADOPT bei Bedarf die ausfallsichere Bremsung anfordert. Dennoch muss eine Konstruktion gewählt werden, die das Bremsen des Fahrzeugs auch bei unzureichender elektrischer Versorgung oder Luftzufuhr ermöglicht. Dabei wurde in der Item-Architektur zwischen direkt analysierten Funktionen, indirekt analysierten Funktionen und nicht analysierten Funktionen unterschieden (Abbildung 30).

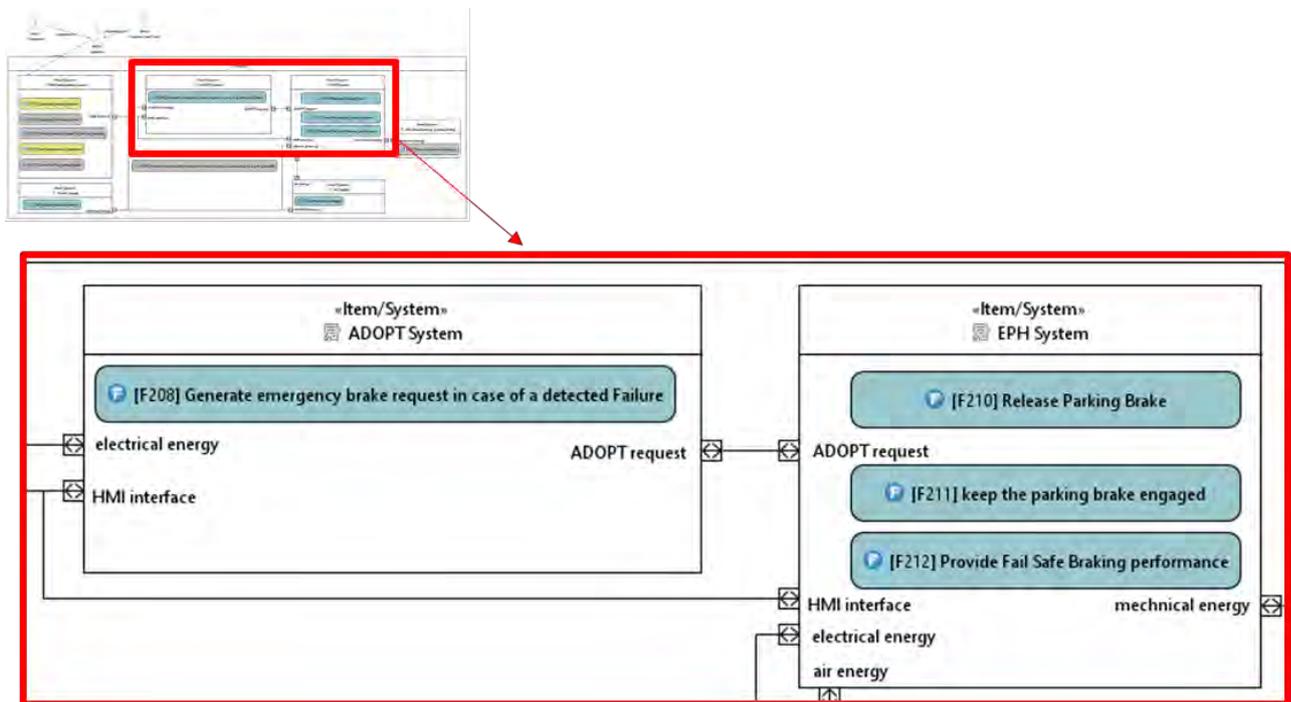


Abbildung 30: Item-Architektur und Hervorhebung der direkt analysierten Funktionen

Anschließend wurden die Sicherheitsziele und die Anforderungen an die funktionale Sicherheit aufgestellt. Für das Konzept der ausfallsicheren Feststellbremse EPH wurden 22 funktionale Anforderungen definiert (Abbildung 31), wobei der Automotive Safety Integrity Level (ASIL) mit dem höchsten Level D bewertet wurde.

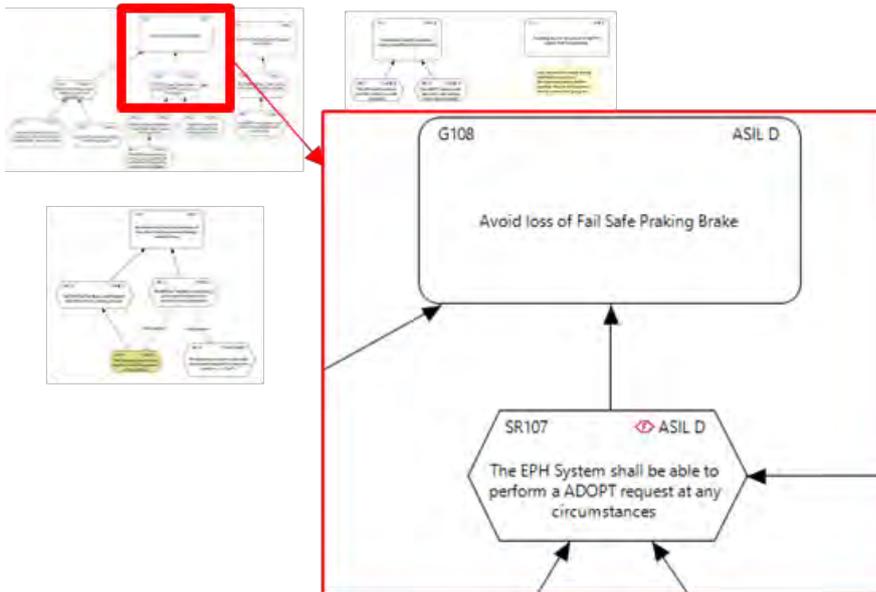


Abbildung 31: Ausschnitt Haupt-Sicherheitsziel und abgeleitete Haupt-Sicherheitsanforderung

Das Konzept der funktionalen Sicherheit zeigt, dass viele Sicherheitsfunktionen innerhalb der verschiedenen Steuerungen realisiert werden mussten, um eine sichere EPH-Funktion für die ausfallsichere Feststellbremse zu realisieren. Die meisten Sicherheitsfunktionen müssen im ADOPT oder im EPH-Controller implementiert werden (Abbildung 32), aber auch die Wahl des Betriebsmodus oder die Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeit müssen sicher umgesetzt werden.

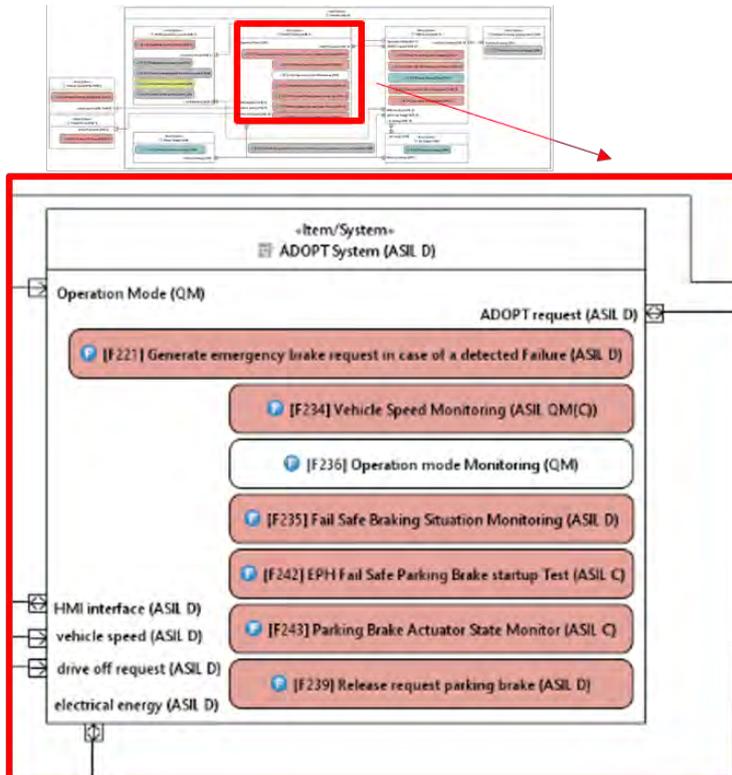


Abbildung 32: Sicherheitsfunktionen mit Fokus auf den Anteil von ADOPT

Teststatus

Aufbauend auf den erstellten Anforderungen wurden Testfälle definiert.

Alle Tests wurden im Rahmen des ersten Machbarkeitsnachweises (Proof of Concept) durchgeführt. In der ersten Testphase war das Ziel der Tests, die Schaltfunktionalität und die Steuerzeiten des EPH-Ventils an einem pneumatischen Prüfstand (Abbildung 33) zu überprüfen.



Abbildung 33: Laboraufbau mit EPH Modul

Zum Testen der definierten Reihenfolge und der Zeitpunkte für das Lösen und Einschalten der ausfallsicheren Feststellbremse EPH mit echten Bremszylindern und Volumenströmen wurde die vorgesehene EPH-Lösung in einem ZF-eigenen Versuchsfahrzeug eingebaut.

- EPH montiert im 6x2 Lkw Iveco Stralis parallel zur vorhandenen Feststellbremse.
- Funktionalität zum Umschalten in den autonomen Modus, implementiert für Testzwecke:
 - Ein-/Ausschalten des autonomen Modus mit einem einzigen Befehl,
 - Kontinuierliche Auswertung des Federspeicherbremsdrucks, um einen Druckverlust zu erkennen und entsprechende Maßnahmen einzuleiten (Warnung an den Fahrer und automatisches Nachfüllen über Brems-Anforderung im Stillstand).
- Erfolgreiche Tests zur Bewertung korrekter Vorbedingungen, des Timings und der Schaltabläufe von Ventilen.

Der Paralleleinbau wurde zusätzlich über Kugelhähne vorgenommen, um bei fehlerhaften Tests oder Ausfall der prototypischen Lösung jederzeit manuell auf das ursprüngliche System zurückzuschalten zu können. Bei einem Ausfall könnte das Fahrzeug durch die eingelegten Federspeicher dauerhaft eingebremst werden.



Abbildung 34: Kugelhähne zur manuellen Umschaltung zwischen der prototypischen ausfallsicheren Feststellbremse EPH und der klassischen Feststellbremse mit zusätzlichen elektrischen Ventilen im Versuchsfahrzeug

Hauptsächliches Risiko bei der Nutzung der ausfallsicheren Feststellbremse EPH war ein eventueller Ausfall der Spulen der dauerhaft bestromten Ventile oder Druckverlust über das Halteventil. Insgesamt wurden die Fahrversuche erfolgreich durchgeführt und die Grundfunktionalität der Umwandlung der EPH zu einer ausfallsicheren EPH konnte nachgewiesen werden.

Sichere Notbremse im SAFE20 Versuchsträger KAMAG PT

Die unterschiedlichen SAFE20-Partnerfunktionen wurden in dem von KAMAG zur Verfügung gestellten KAMAG PT verbaut. Funktional erfolgte die Ansteuerung der sicheren Notbremse (in Abbildung 35 als *Umsetzung Nothalt* bezeichnet) aus der Komponente Kollisionsvermeidung der Firma SICK (Signal *Nothalt*).

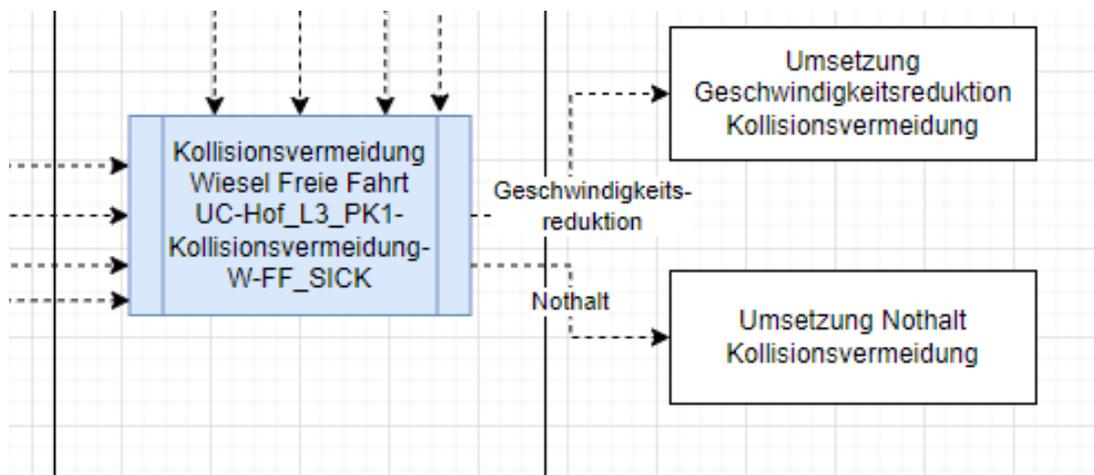


Abbildung 35: Auszug aus den Architekturen von AP2 Diagramm: UC-Hof_L2_MB1-Fahrt-Start-Ziel-Wiesel_Kamag

Dazu wurde ein unabhängiger direkter Signalweg von der Komponente Kollisionsvermeidung, welche die Auslösung der sicheren Notbremse durch die Schutzfeldfunktion berechnet, zu dem ADOPT Safety Gateway, das die sichere Notbremse durch Ansteuerung der entsprechenden Aktoren umsetzt, eingebaut. Dabei ist auch der zweite Pfad Geschwindigkeitsreduktion in Abbildung 35 sichtbar, der nicht über die sichere Notbremse umgesetzt wird, sondern über den nicht-redundanten

elektronischen Pfad der Betriebsbremse und das Schleppmoment des hydrostatischen Antriebs (siehe auch AP 4.11).

Das von ZF ursprünglich vorgesehene modifizierte Elektropneumatische Handbremsmodul (EPH) konnte aufgrund des zu kleinen Einbauraums in dem für den Feldtest genutzten KAMAG PT nicht genutzt werden. Alternativ wurde im KAMAG PT ein Ersatzsystem mit Komponenten aufgebaut, welches die gleiche Funktion einer Parkbremse für das automatisierte Fahren bereitstellt (Abbildung 28).

Die Fail Safe Park Brake wurde in das Fahrzeug integriert und in Bremstests erprobt. Da das Konzept eine redundante Bremsung aus Feststellbremse und Betriebsbremse vorsieht, waren zusätzlich zu Bremswegbetrachtungen auch Stabilitätsuntersuchungen notwendig, insbesondere hinsichtlich des Gespanns aus Zugmaschine und Sattelauflieger.

Aufgrund der Redundanz sind unterschiedliche Fehlerfälle möglich, in denen die sichere Notbremse immer noch die Mindestanforderungen hinsichtlich Fahrstabilität und Bremsweg erfüllen muss:

Redundante Bremsung: Verzögerung über Betriebsbremse + Feststellbremse

⇒ Standardfall, wenn beide Bremsen funktionsbereit sind.

Ausfall Betriebsbremse: Verzögerung nur über Feststellbremse

⇒ Zu untersuchender *worst case*, niedrigste Bremsperformance und Stabilität.

Ausfall Feststellbremse: Verzögerung nur über Betriebsbremse

⇒ Unkritisch, da dieser Fall einer normal üblichen Bremsung entspricht.

Die erreichbaren Bremswege wurden mit den Partnern abgestimmt und z. B. in der Berechnung der Schutzfeldfunktion berücksichtigt (Abbildung 36).

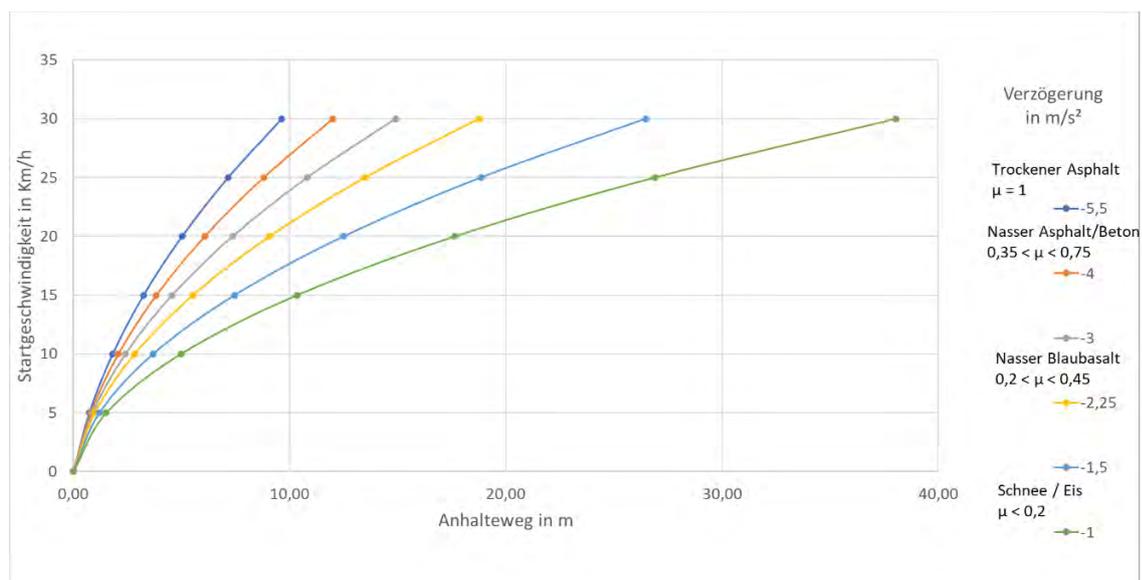


Abbildung 36: Verschiedene Bremswege, abhängig von der Geschwindigkeit und der erreichten Verzögerung (Annahme einer Totzeit von 0.4s und ohne Anstiegszeit (direkter Sprung auf Endverzögerung))

Dabei wurden für den Feldtest und die Versuche in Langenau die niedrigen Reibwerte bei Eis und Schnee auf der Fahrbahn ausgeschlossen. In Tests wurde nachgewiesen, dass das Fahrzeuggespann aus Zugmaschine und Auflieger die Bremswege unter den definierten Reibwertbedingungen und dem freigebenden Geschwindigkeitsbereich bis 20 km/h einhält und auch bei Ausfall der Betriebsbremse über die redundante Nutzung der Feststellbremse sicher zum Stillstand kommt. Die Tests wurden dabei als Failure-Injection-Tests durchgeführt, bei denen gezielt Fehler in das System eingespeist wurden, sodass jeweils das eine oder andere Bremssystem versagt.

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.

4.4. Funktional sichere, hochperformante Rechnerhardware (AP 4.4)

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung einer hoch performanten Rechnerhardware für den Einsatz in automatisierten Fahrzeugen. Dieses Arbeitspaket wurde vom Partner STW behandelt.

Architektur und Gesamtkonzept

Gemeinsam mit den Projektpartnern (vorrangig KAMAG) wurde die Gesamtsteuerungsarchitektur für den KAMAG PM sowie die Einbettung des HPX-Prototyps (hochperformante Rechnerplattform) in das Fahrzeugkonzept von KAMAG zur Erprobung mit Hilfe des SAFE20-Demonstrationsfahrzeugs erarbeitet. Dabei wurden die erforderlichen Schnittstellen sowie die zu implementierenden und integrierenden Algorithmen definiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der Systemarchitektur. Der grüne Rahmen mit dem Titel „STW Automation PC“ stellt die von dem Projektpartner STW im Rahmen des Projekts bereitgestellte Hardware HPX dar. Dabei verfügt der HPX im Wesentlichen über die Schnittstellen für CAN, Ethernet (u. a. auch eine 1Gbit/s Single-Pair-Ethernet-Schnittstelle) sowie seriellen Schnittstellen zur Kommunikation mit den Umfeld-Sensoren bzw. GNSS und IMU. Der HPX ist designt, um die Algorithmen für das Mission Management, Local und Global Path Planning, die Lokalisierung, Hinderniserkennung sowie das Aufnehmen und

Abstellen der Wechselbrücke sowie die Algorithmen für die Umfelderkennung und die KI für die Objekt- bzw. Trailer-Erkennung zu integrieren.

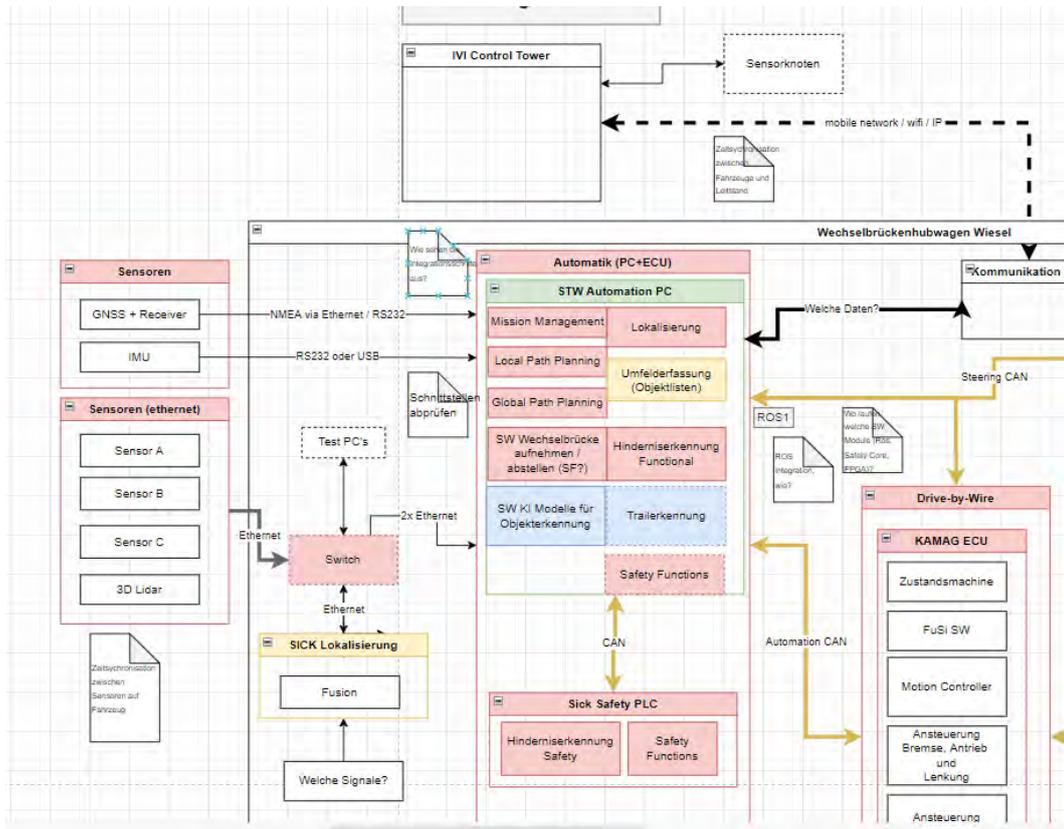


Abbildung 37: Systemarchitektur des HPX-Prototyps

Safety-Architektur der hochperformanten Rechnerhardware (HPX)

Um bei der sicherheitsgerichteten Entwicklung der Rechnerhardware die erforderlichen funktionalen Sicherheitsanforderungen ermitteln zu können, wurde gemäß der in der ISO 26262 geforderten Konzeptphase eine Systematik für eine Gefahren- und Risikoanalyse entwickelt, um ausgehend von den Use-Cases über die möglichen Gefahren- und Risikoeinschätzungen zu konkreten Sicherheitsanforderungen zu gelangen. Die Analyse hat ein erforderliches Sicherheitsintegritätslevel ASIL B für den Einsatz einer sicheren Rechnerhardware im Kontext des gesamten SAFE20 Funktionalen Sicherheitskonzepts ergeben.

Ziel des gewählten Konzepts war es, die funktionale Architektur so zu wählen, dass komplexe und rechenintensive Prozesse in einem nicht-sicheren Prozessor ausgeführt und die Ergebnisse der Berechnungen auf einem einfacheren, deutlich weniger performanten Prozessor plausibilisiert werden. Dadurch kann funktionale Sicherheit deutlich effizienter und kostengünstiger realisiert werden, ohne die Anforderungen an die Sicherheit herabzusetzen. Die Dekomposition der Sicherheitsfunktion in eine Normalfunktion und eine Überwachungsfunktion wurde in der technischen Sicherheitsstrategie berücksichtigt. Ein Sicherheitsintegritätslevel von ASIL B nach ISO

26262 lässt sich dabei in Funktionen nach ASIL B(B) für die Überwachungsfunktion und ASIL QM(B) für die Normalfunktion unterteilen. Grundlegende Diskussionen hinsichtlich der Eignung der Architektur wurden mit den Partnern KAMAG und SICK geführt. Im weiteren Projektverlauf wurde am Beispiel der im Abschnitt „Exemplarische Konzepte für die Sicherheitsfunktionen“ beschriebenen Funktionen die Eignung dieser Architektur evaluiert.

Gemäß Sicherheitskonzept werden für eine sichere Hinderniserkennung zwei unabhängige Mechanismen/Sensoren zur Detektion des Hindernisses herangezogen (z. B. Objekterkennung und -klassifizierung über Kameras und KI sowie 3D-LiDAR-Daten). Beide Mechanismen sollen zu einem vergleichbaren Ergebnis führen, welches auf dem Safety-Controller plausibilisiert wird. Die teils sehr rechenintensive Auswertung der Sensordaten wird im wesentlich performanteren Application-Core oder in der FPGA-Programmierlogik ausgeführt, während der Safety-Controller die Plausibilisierung vornimmt. Solange die Daten von den Sensoren sicher empfangen werden und die Ergebnisse der nicht-sicheren Berechnung wieder in der sicheren Umgebung plausibilisiert werden können und zu einer sicheren Reaktion (z. B. sichere CAN-Botschaft oder sicherer Digitalausgang zum Schalten eines sicheren Relais etc.) führen, ist die Durchgängigkeit der Sicherheitsfunktion gewährleistet.

Neben dem Plausibilisieren der Ergebnisse in der sicheren Umgebung muss auch die Überprüfung der Datenintegrität auf den Kommunikationskanälen (z. B. Ethernet und/oder CAN) abhängig vom jeweils hierfür verwendeten Sicherheitsmechanismus durchgeführt werden (s. Abschnitt).

Ein geeigneter Microcontroller wurde für die Funktion des Sicherheitscontrollers ausgewählt. Dieser bietet verschiedene sicherheitsgerichtete Funktionalitäten, wie z. B. Lock-Step-Betrieb und ECC-Speicherüberwachung. Als Betriebssystem wurde ein bereits verfügbares STW-eigenes Sicherheitsbetriebssystem verwendet.

Als Applikationscontroller wird ein MPSoC (Multiprocessor System on Chip) verwendet, der u. a. vier integrierte Controller-Cores und ein FPGA beinhaltet. Die leistungsfähige Controllerarchitektur bietet die Möglichkeit, Applikationen parallel und echtzeitfähig zu betreiben und das integrierte FPGA z. B. als Hardwarebeschleuniger für KI-Anwendungen zu verwenden.

Die grundlegende Safety-Architektur für die hochperformante Rechnerhardware wurde abschließend, wie im folgenden Bild dargestellt, definiert. Dabei überwacht der Safety-Controller alle sicherheitsrelevanten Prozesse bzw. Signalverarbeitungen entweder dadurch, dass ein Black-Channel-Ansatz gewählt wird, oder durch Plausibilisieren der vom nicht-sicheren Application-Core generierten Ergebnisse. Unabhängig davon kann der Safety-Controller eigenständig über seine direkt verbundenen Safety-Inputs, Safety-Outputs oder Kommunikationskanäle Sicherheitsfunktionen bedienen.

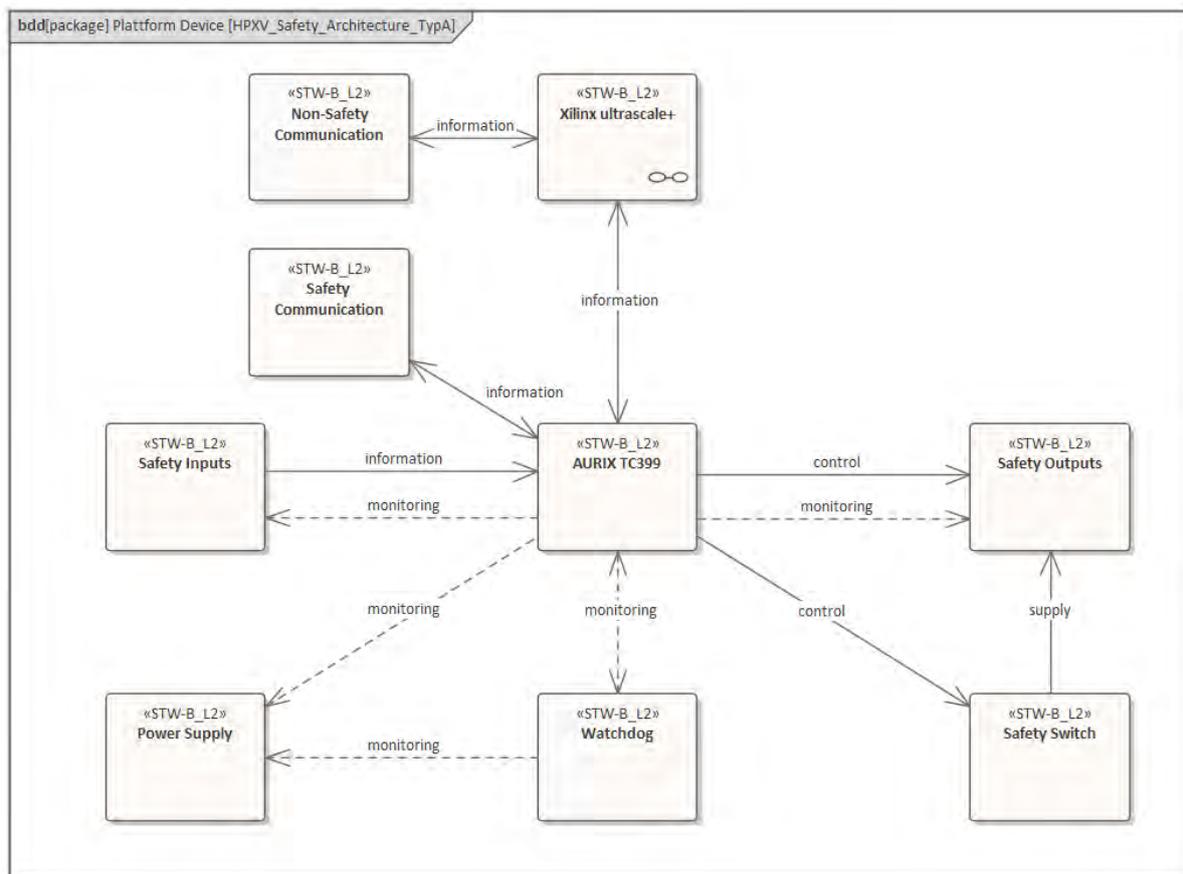


Abbildung 38: HPX-Sicherheitsarchitektur

Ethernet-Kameras oder Ethernet-basierte Lidar-Systeme können direkt über die Ethernet-Schnittstellen angeschlossen werden. Bei Verwendung des von SICK für Safety-Lidar eingesetzten CIP-Protokolls wird über den Black-Channel-Ansatz das Signal sicher im Safety-Controller entpackt. In Fehlerfall versetzt der Safety-Controller das System über einen sicheren Ausgang in den sicheren Zustand. Für Ethernet-Kameras wurden Latenz-Messungen durchgeführt. Die Latenz kann in sicherheitskritischen Systemen wichtig sein, um in der Verarbeitungskette die Fehlerreaktionszeit nicht zu überschreiten. Eine prototypische Implementierung einer kamerabasierten Umfelderkennung wurde im Projekt als Grundlage für eine spätere optische Objektdetektion umgesetzt.

Die Anbindung von GMSL2- oder FPD III-basierten Kameras ist ebenfalls in das Hardware-Design aufgenommen worden. Die dadurch verfügbaren seriellen Kameralinks ermöglichen gegenüber einer Ethernet-Anbindung die Realisierung einer einfacheren Synchronität der Kamerasignale zueinander und eine geringere Latenz. Die Synchronität der Kamerasignale ist für Kamerabildüberlagerungen von Vorteil.

Der Safety-Controller kann ein Testpattern in den Kameras aktivieren und auslesen und dieses mit dem Ergebnis der Signalverarbeitung durch den Application-Core vergleichen. Dabei müssen die Verarbeitungsschritte im Application-Core auch im Safety-Controller auf das Testpattern angewandt werden. Da der Safety-Controller deutlich weniger performant im Vergleich zu dem Application-Core

ist, muss das Testpattern entsprechend einfach gehalten sein, d. h. es werden deutlich weniger Pixel als bei der vollen Bildübertragung verwendet.

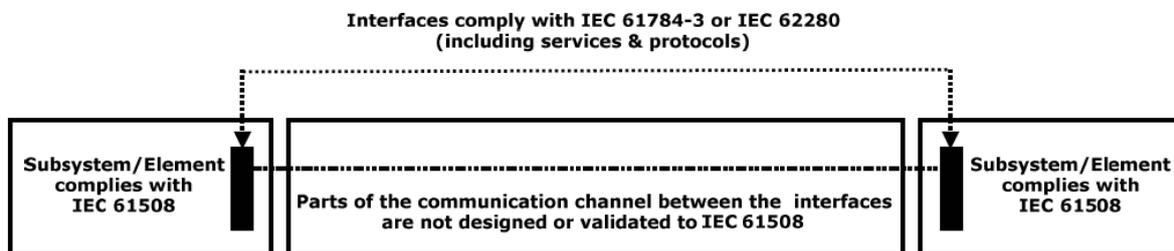


Figure 7 (b) Black channel

Abbildung 39: Black-Channel-Ansatz

Werden Ergebnisse des Application-Cores durch den Safety-Controller plausibilisiert, so sind in der Regel zusätzliche sichere Sensorsignale hinzuzuziehen. Der Safety-Controller überwacht dabei das Überschreiten von kritischen Systemgrenzen und versetzt das System im Bedarfsfall in den sicheren Zustand. Beispielsweise könnte so über den Application-Core eine KI-basierte Objekterkennung erfolgen, wobei die tatsächliche Existenz und der Abstand des Objekts über ein an den Safety-Controller angeschlossenes Safety-Lidar- oder Safety-Radar-System sicher erfasst und somit plausibilisiert wird. Zusammen mit der sicheren Ortsinformation des Objekts und der sicheren Geschwindigkeits- und Richtungsinformation wird so ein Notstopp über den Safety-Controller ausgelöst, während die eigentliche, nicht-sichere Objekterkennung und -klassifizierung an den Leitstand als Information weitergeleitet wird. So kann im Leitstand über weitere Maßnahmen entschieden werden, wie mit der Situation umgegangen werden soll und ggf. per Fernsteuerung eingegriffen werden.

Sichere Ethernet-basierte Kommunikation zwischen vernetzten Steuerungen bzw. High Performance Rechnern

Das Konzept zur sicheren Ethernet-basierten Kommunikation basiert auf einer Implementierung von EGSP (ESX Generic Safety Protocol) unter Verwendung von Zenoh²² als Transport-Layer. Dabei ist EGSP ein STW-eigenes Black-Channel-Protokoll zum sicheren Datenaustausch nach IEC61784-3²³ bis SIL2. Durch den Black-Channel-Ansatz gibt es keine Safety-Anforderungen an die Übertragungsstrecke. Die Sicherheitsanforderungen werden ausschließlich durch das Black-Channel-Protokoll des Transport-Layers erfüllt, sodass fehlerhaft übertragene Daten, fehlende Datenpakete oder die Verletzung von Zeitbedingungen auf der Empfängerseite sicher erkannt werden können.

²² <https://zenoh.io>

²³ (International Electrotechnical Commission (IEC), 2016)

Hauptfokus ist eine Übertragung über Ethernet, aber auch andere Übertragungstrecken sind möglich, z. B. CAN/CAN-FD, serielle Punkt-zu-Punkt-Übertragung oder Wifi.

Als Transport-Layer wurde anstatt des Standard-DDS (Data Distribution Service) das effizienter erscheinende Zenoh ausgewählt. Umgesetzt wurde eine Zenoh-Pico-Implementierung auf dem Safety-Controller. Für die Kommunikation bietet Zenoh wie auch DDS einen Publish/Subscribe-Mechanismus. Dabei kann eine Kommunikation zwischen zwei Steuerungen entweder von Client-to-Client über einen Router erfolgen oder direkt Peer-to-Peer. In einem ersten Implementierungsschritt wurde die Client-to-Client Kommunikation mit einem separaten Router umgesetzt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine vollwertige Zenoh-Implementierung, vergleichbar mit DDS, sehr umfangreich und nicht für den Einsatz auf einem Mikrocontroller gedacht ist. Der Zenoh-Pico-Stack hingegen zeigt sich als ausreichend performant und geeignet für die Kommunikation im embedded Bereich. Der Zenoh-Pico-Stack eignet sich demnach auch als Transport Layer für ein Black-Channel Safety Protokoll (wie z. B. EGSP) für eine sichere Kommunikation. In der folgenden Tabelle sind die gemäß IEC61784-3 von EGSP unterstützten Möglichkeiten zur Detektion von Kommunikationsfehlern grün gekennzeichnet.

IEC61784-3 assumes possible communication errors and specifies measures to detect them. EGSP uses the highlighted measures for error detection.

Comm error	Safety measures							
	Sequence number (see 3.3)	Time stamp (see 3.5)	Time expectation (see 3.4, 3.6)	Connection authentication (see 3.2)	Feedback measure	Data integrity measure (see 3.1)	Redundancy	Different integrity measure
Corruption					X	X		
Unintended repetition	X	X					X	
Incorrect sequence	X	X					X	
Loss	X				X		X	
Unaccepted delay		X	X					
Insertion	X	X		X	X		X	
Masquerade				X	X			X
Addressing				X				

Abbildung 40: EGSP-Fehlerabdeckung

Das Konzept ermöglicht nicht nur die gemäß dem Projektantrag angestrebte sichere und verteilte Kommunikation innerhalb der Rechner-Hardware (z. B. zwischen Safety-Controller- und MPSoC), sondern ermöglicht auch einen skalierbaren Ansatz hin zu einem Kommunikationsmechanismus zwischen Geräten/Steuerungen sowie für M2M-, V2X- und M2Cloud-Kommunikation. Dabei könnte

Zenoh z. B. zusammen mit ROS2 den in SAFE20 verwendeten IEEE 802.11p Standard²⁴ für V2X-Kommunikation²⁵ als darunterliegenden drahtlosen Übertragungsmechanismus verwenden und somit einen einfach zu nutzenden und leicht erweiterbaren Kommunikationsmechanismus bereitstellen.

Umgebungsaspekte für die HW technische Umsetzung

Während die funktionalen Anforderungen die Hardware-Architektur der zu entwickelnden Steuerungskomponente beeinflussen, spielen die nicht-funktionalen Anforderungen eine entscheidende Rolle bei der Bauteilauswahl, dem elektronischen Hardware-Design sowie dem mechanisch-konstruktiven Design. Die Steuerungskomponente darf weder durch Einflüsse einer erhöhten Temperatur noch durch EMV-Einflüsse die Gewährleistung der funktionalen Sicherheit beeinträchtigen.

Eine erhöhte Störfestigkeit im Sinne der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) solcher E/E/PE-Systeme ist explizit von der Funktionalen Sicherheit gefordert und wird in einem EMV-Standard zur Funktionalen Sicherheit z. B. in der Testart und den Störpegeln gemäß DIN EN 61000-6-2²⁶ festgelegt. Dieser Umstand wirkt auf die Ausgestaltung des Hardware-Designs (z. B. höhere Signalströme) und Abschirmung des Systems. Es wurden deshalb EMV-Messungen an einer bestehenden Prototyplösung durchgeführt.

Das Entwärmungskonzept wurde entsprechend den Umwelтанforderungen und der Einbausituation entworfen, simuliert und konstruktiv im Design umgesetzt. Der Fokus wurde hierbei auf die zusätzliche Entwärmung der Leiterkarte selbst neben den temperaturkritischen und begrenzenden Bauteilen gelegt. Dazu wurden Kühlkörper für die Leiterkarten hinzugefügt und diese flächig über Wärmeleitpads an die Leiterkarte angepasst, sodass nicht nur eine Entwärmung über die Bauteilgehäuse, sondern auch über die Leiterkarte selbst erfolgen kann. Hierdurch kann auf eine aktive Kühlung des HPX verzichtet werden, was die Zuverlässigkeit erhöht und Kosten senkt.

Exemplarische Konzepte für die Sicherheitsfunktionen

Zur exemplarischen Evaluierung der technischen Sicherheitsarchitektur wurden die folgenden beiden Sicherheitsfunktionen ausgewählt:

- Sicheres Aufnehmen der Wechselbrücken durch den KAMAG PM, insbesondere sicheres Umschalten der Lidar-Schutzzonen,
- Sichere Positionsbestimmung.

Für den Use-Case „Sicheres Aufnehmen der Wechselbrücken durch den KAMAG PM“ sowie das sichere Umschalten der Lidar-Schutzzonen“ wurde mit KAMAG ein Konzept für die Umsetzung der

²⁴ (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010)

²⁵ (Wikipedia, 2018)

²⁶ (Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2019)

erforderlichen Sicherheitsfunktionen diskutiert und auf die Architektur des HPX abgebildet. Grundlage hierzu bildet folgendes Use-Case-Diagramm:

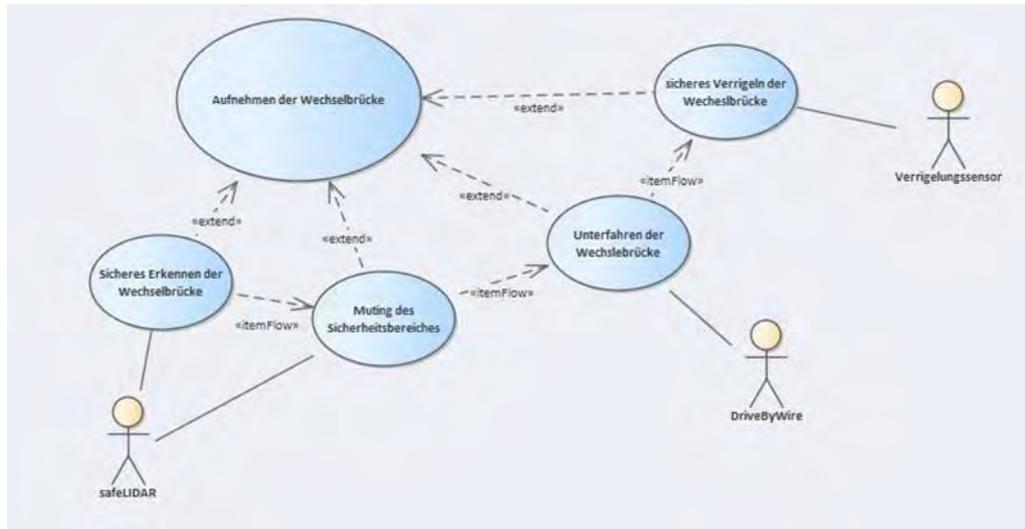


Abbildung 41: Use-Case-Diagramm "Sicheres Aufnehmen der Wechselbrücke"

Die Herausforderung hierbei liegt darin, die Verfügbarkeit der Funktionalität „Unterfahren der Wechselbrücke“ bereitzustellen, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen. Aus Sicherheitsgründen verfügt das Zugfahrzeug über ein Safety-Lidar, so dass bei autonomer Rückwärtsfahrt ein sich im Gefahrenbereich befindliches Objekt oder eine Person detektiert und das Fahrzeug gestoppt werden kann. Solange dieser Mechanismus aktiviert ist, würde die Wechselbrücke ebenfalls als Hindernis erkannt und ein Annähern und somit auch ein Unterfahren der Wechselbrücke verhindert. Die Schutzzone muss also sicher beim Erkennen der Wechselbrücke ausgeschaltet bzw. die Reaktion auf das Erkennen einer Verletzung des Gefahrenbereichs muss beim Rückwärtsanfahren an die Wechselbrücke deaktiviert werden. Ebenso muss diese Funktionalität nach dem Abkoppeln der Wechselbrücke und dem Entfernen des Zugfahrzeugs wieder sicher aktiviert werden. In beiden Fällen muss also das Vorhandensein der Wechselbrücke und ihr Abstand erkannt werden. Hierzu kann das Scan-Bild des Safety-Lidars, neben der Information über die Verletzung einer Schutzzone, auch die Reflexionen der vier Stützen der Wechselbrücke übermitteln. Die Geometrie der Stützen ist dem System grundsätzlich bekannt. Zusammen mit ermittelten Odometriedaten wie Lenkwinkel und Geschwindigkeit kann eine Trajektorie berechnet und somit für die zeitliche Veränderung der Bildpunkte der Stützen eine Erwartungshaltung bestimmt werden, die mit Hilfe des tatsächlichen Scan-Bildes plausibilisiert werden kann. Das folgende Bild illustriert diese Anfahrtsituation an die Wechselbrücke:

Sicheres Unterfahren der Wechselbrücke
(sicheres Umschalten der Schutzfelder)

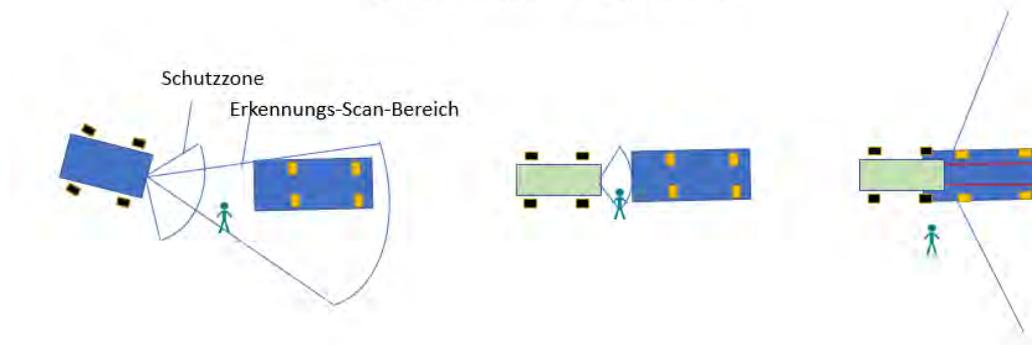


Abbildung 42: Sicheres Unterfahren der Wechselbrücke

Für den Use-Case „Sichere Positionsbestimmung“ wurde zusammen mit den Projektpartnern KAMAG und SICK die im folgenden Bild dargestellte Aufteilung zwischen sicheren und nicht-sicheren Funktionalitäten diskutiert und so ein mögliches Realisierungskonzept auf der hochperformanten Rechnerhardware erarbeitet.

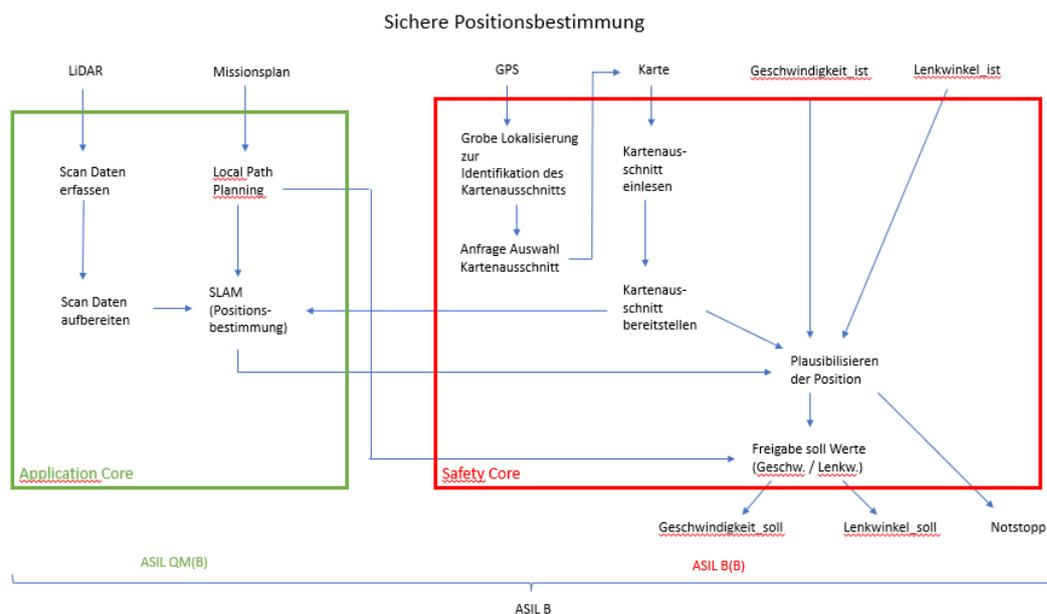


Abbildung 43: Sichere Positionsbestimmung

Validierung der Funktionalen Sicherheit

Zur Analyse und Verifikation des Designs der Rechnerhardware wurde eine Design-FMEA und für exemplarische Sicherheitsfunktionen eine FMEDA durchgeführt. Nachdem für den verwendeten Safety-Controller bereits technische Berichte zur Beurteilung der Funktionalen Sicherheit existieren und dieser im Sinne eines System Element out of Context betrachtet werden kann, wurde der Fokus auf neue Sicherheitsfunktionen wie z. B. die sichere Kommunikation über Ethernet mit EGSP oder den sicheren Sensorsignalempfang gelegt. Bei dem Empfang von Sensorsignalen wurde insbesondere der sichere Empfang von Videosignalen über eine GMSL2-Schnittstelle betrachtet. Ziel der

Verifikation ist der Nachweis der Erreichbarkeit des durch die Risiko- und Gefahrenanalyse ermittelten Sicherheitsintegritäts-Levels ASIL B gemäß ISO 26262.

Die Ergebnisse in Abbildung 44 weisen das Erreichen des Sicherheitsintegritäts-Levels ASIL B nach.

ISO 13849:2023 / IEC 61508:2010 / ISO 26262:2018 / ISO 25119:2018					
Parameter	Abbreviation	Required Value	Achieved Value	Pass / Fail	Remark
Safety function + reaction + level:	SF	Safe Communication via Ethernet using the protocol EGSP (ID 205353)			
Diagnostic coverage:	DC	≥ 90%	99,0%	Pass	Excl. Soft-errors
		≥ 60%	99,0%	Pass	Excl. Soft-errors
Mean time to dangerous failure:	MTTF _{0/DC}	≥ 30 y	157,7 y	Pass	Excl. Soft-errors
Average frequency of dangerous failure:	PFH	≤ 150 EXP-9 1/h	40,5 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Safe failure fraction:	SFF	≥ 90%	99,9%	Pass	Incl. Soft-errors
Probabilistic Metric for random Hardware Failures:	PMHF	≤ 100 EXP-9 1/h	40,5 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric:	SPFM	≥ 90%	99,0%	Pass	Excl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric for Soft-Errors:	SPFM_SE	≥ 90%	99,9%	Pass	Only Soft-errors
Latent Fault Metric:	LFM	≥ 60%	100,0%	Pass	Excl. Soft-errors
ISO 13849:2023 / IEC 61508:2010 / ISO 26262:2018 / ISO 25119:2018					
Parameter	Abbreviation	Required Value	Achieved Value	Pass / Fail	Remark
AURIX(Application Core)	SF	Safe video signal reception and control data routing using GMSL2 deserializer (ID 205341)			
Diagnostic coverage:	DC	≥ 90%	95,3%	Pass	Excl. Soft-errors
		≥ 60%	95,3%	Pass	Excl. Soft-errors
Mean time to dangerous failure:	MTTF _{0/DC}	≥ 30 y	518,0 y	Pass	Excl. Soft-errors
Average frequency of dangerous failure:	PFH	≤ 150 EXP-9 1/h	43,6 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Safe failure fraction:	SFF	≥ 90%	99,9%	Pass	Incl. Soft-errors
Probabilistic Metric for random Hardware Failures:	PMHF	≤ 100 EXP-9 1/h	43,6 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric:	SPFM	≥ 90%	95,6%	Pass	Excl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric for Soft-Errors:	SPFM_SE	≥ 90%	99,9%	Pass	Only Soft-errors
Latent Fault Metric:	LFM	≥ 60%	100,0%	Pass	Excl. Soft-errors

Abbildung 44: FMEDA für exemplarische Sicherheitsfunktionen

Wird z. B. ASIL B für eine Umgebungsüberwachung eines Fahrzeugs mit Assistenzfunktionen angestrebt, so kann dies über eine SOTIF-Argumentation erfolgen, indem unterschiedliche Sensoren zur Umfeldüberwachung eingesetzt und somit die Schwächen jedes Sensors durch diversitäre Redundanzen kompensiert werden. Hierzu sind für die Sicherheitsfunktion isolierte Kanäle für die unterschiedlichen Sensoren mit jeweils mindestens ASIL A erforderlich.

Werden Kameras zur Umfelderkennung eingesetzt, so erfordert dies eine hohe Rechenperformance. In diesem Fall sind die isolierten Kanäle entweder über einen Isolated Design Flow in der Programmierlogik des FPGA (Field Programmable Gate Array) abzubilden oder auf einzelnen isolierten Cores des Applikationsprozessors. Alternativ kann auch ein Kanal über den Applikationsprozessor und der zweite Kanal über die Programmierlogik abgebildet werden.

Generell lassen sich mit der gewählten Rechnerarchitektur Sicherheitsintegritätslevel bis zu ASIL D erreichen, indem neben dem Safety-Controller auch die Programmierlogik des FPGA und/oder der Applikationsprozessor im MPSoC (Multiprozessor System-on-Chip) sicher implementiert werden. ASIL D kann z. B. für Lenkbewegungen bei hohen Geschwindigkeiten in einer autonom fahrenden Maschine erforderlich sein. Zur Realisierung benötigt man eine diversitäre Redundanz, indem unterschiedliche Sensoren und Logikeinheiten zur Überwachung verwendet werden. ASIL D kann dann über die Dekomposition ASIL B(D) über zwei für die Sicherheitsfunktion isolierte Kanäle abgebildet werden

4.5. Lokale Bahnplanung (AP 4.5)

Ziel des APs war eine Online-Bahnplanung, mit der die Rangiervorgänge zum Andocken an eine Rampe unterstützt werden. Neben der Möglichkeit einer Vorgabe eines festen Streckenlayouts sollen mit der Online-Planung eine relative Positionierung an einem Zielobjekt und ein reduzierter Inbetriebnahmeaufwand erreicht werden.

Als erster Schritt zur Berechnung einer Bahn ist eine Erkennung der zur Verfügung stehenden Fläche notwendig. Die Freiräume müssen zur Beurteilung von einer Sensorik (z. B. Lidar) eingesehen werden können. Im folgenden Bild sind beispielhaft Freiflächen grün markiert. Über die gelben Bereiche kann keine Aussage getroffen werden, weil der Bereich nicht von dem Sensor eingesehen wurde. Die roten und violetten Bereiche zeigen an, dass dort mehrfach Hindernisse erkannt wurden. Darüber hinaus kann ein Schutzbereich als Puffer vor der Grenze definiert werden. Somit kann eine lokale Karte erstellt werden, die laufend aktualisiert die Freiflächen vor den Messpunkten innerhalb der Systemgrenze veröffentlicht.

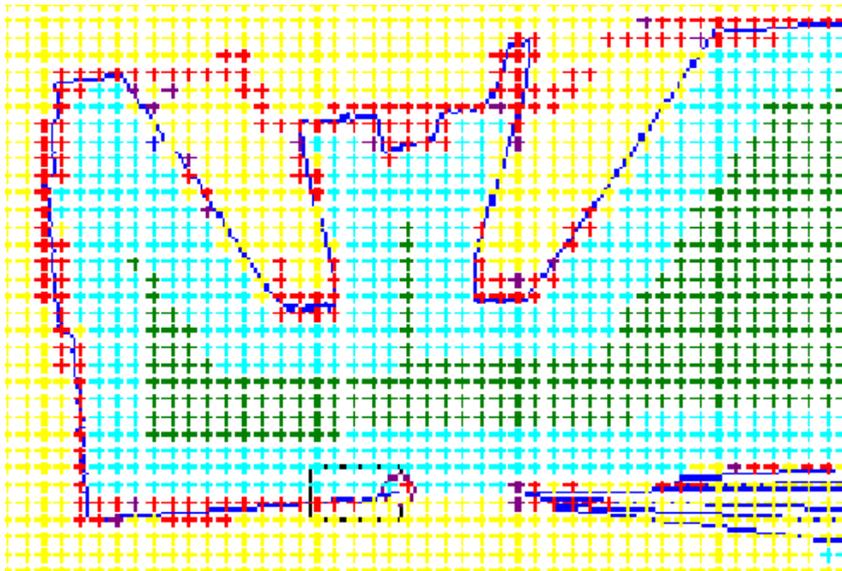


Abbildung 45: Belegungsgitter mit Schutzbereich

Im nächsten Schritt muss zur Berechnung der Bahn ein Zielvektor automatisch bestimmt werden, der in diesem Fall der anzufahrenden Rampe entspricht. Um eine möglichst exakte Positionierung zu gewährleisten, soll der relative Vektor zwischen Fahrzeug und Rampe ermittelt werden. Zur Peilung sollen entweder geometrische Ausprägungen der Rampe oder Reflektoren identifiziert und lokalisiert werden. Dabei wurden im Projektverlauf drei verschiedene Konzepte untersucht: (1) Sensor am Zugfahrzeug, (2) Sensor am Heck des Anhängers und (3) stationärer Sensor an der Rampe. Die Ansätze haben für die verschiedenen Fahrzeuge mit/ohne Anhänger differenzierte Vor- und Nachteile sowie wirtschaftliche Auswirkungen. Im Projektverlauf wurde zur Umsetzung mit dem KAMAG PT ein Verfahren mit einem am Anhängerheck montierten Lidar-Sensor mit vier Ebenen ausgewählt. Aus den Messpunkten wurden die Punkte für die Weiterverarbeitung genutzt, die sich in einem rechteckigen Bereich um die zuletzt geschätzte Position der Rampe befinden. Als Startwert

wurde ein definierbares Suchfenster genutzt. Innerhalb dieses Rechtecks wurde nach den Konturen in der Reihe der Messpunkte gesucht, die der gesuchten Geometrie vor einem weiter entfernten Hintergrund entsprechen. Es konnte gezeigt werden, dass die Rampe ab einem Abstand von ca. 8 m erkannt wird.

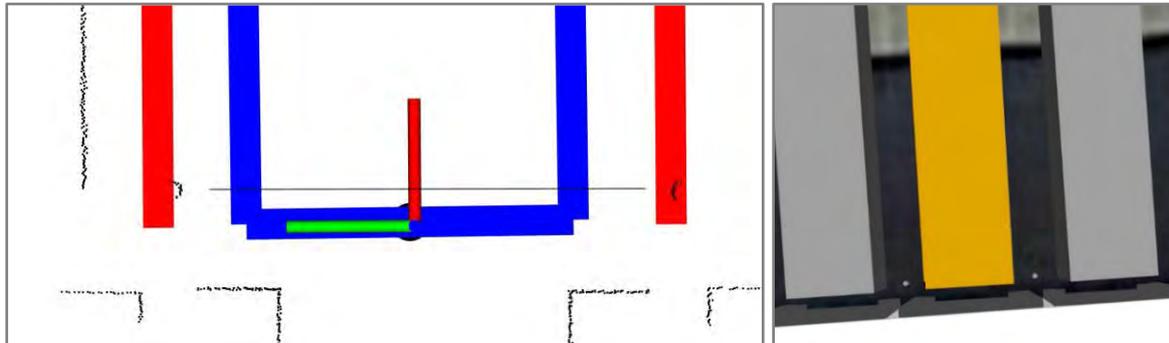


Abbildung 46: Heck des Anhängers (blau) und Messpunkte

Auf Grundlage der freien Fläche sowie des Start- und Zielvektors konnte ein Algorithmus entwickelt werden, der eine physisch fahrbare Verbindung berechnet. Dabei wurden die notwendigen Randbedingungen (Fahrzeugkinematik, Kurvenradien, Lenkgeschwindigkeiten, max. Lenkwinkel etc.) berücksichtigt. Es wurden nur die Kurvenverläufe angewendet, die ohne Fahrtrichtungswechsel geeignet sind. Der minimale Krümmungsradius wird im Wesentlichen von der geplanten Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Mit den berechneten Bahnen wurden verschiedene Fahrversuche gemacht. Dabei wurde das Verhalten bei einem statischen und bei einem veränderlichen Zielpunkt berücksichtigt.

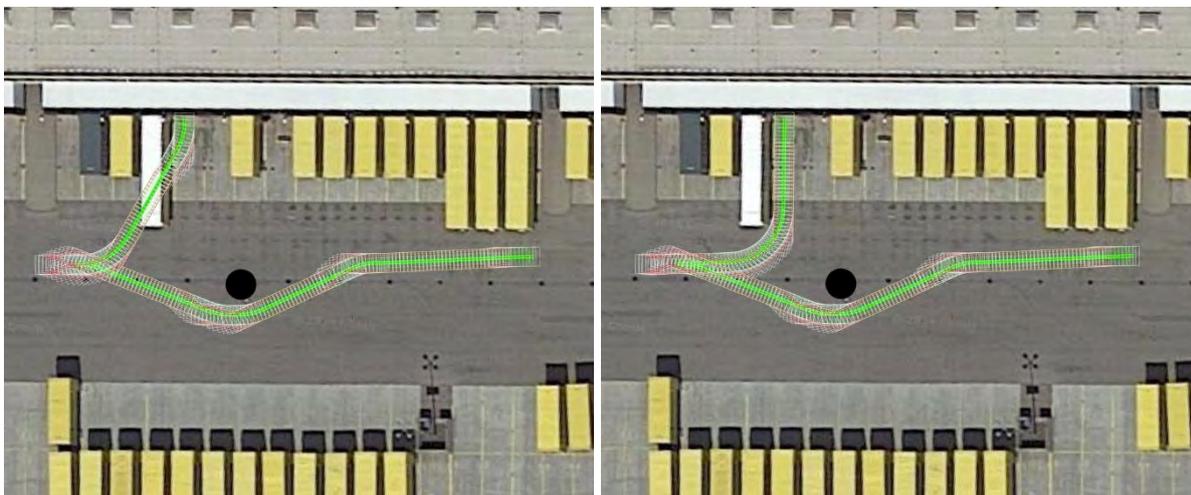


Abbildung 47: Visualisierung einer online Bahnplanung

Zur Berechnung der Trajektorie wurden zwei Ansätze umgesetzt, um unterschiedlichen Anforderungen genügen zu können. Erstens wurde ein Programmpaket für Bézierkurven entwickelt, die sich wegen ihrer mathematisch guten Handhabbarkeit und ihres homogenen Kurvenverlaufs gut zur Bahnplanung eignen. Explizit erzeugt dieser Algorithmus eine Bézierkurve vom Polynomgrad 3, d. h. eine Kurve, die von vier Konstruktionspunkten P_0 bis P_3 definiert wird. Aus der berechneten

Kurve wird eine Liste äquidistanter Punkte erzeugt, die für die externe Schnittstelle benötigt wird. Zweitens wurde ein Ansatz zur Bahnplanung gewählt, der auf dem sog. Dubins-Pfad beruht. Grundlage ist die kürzeste Kurve, die Start- und Endpose auf einer Ebene unter Berücksichtigung der Krümmung verbindet. Dabei werden Abschnitte von Geraden, Kreisen sowie deren Verbindungen genutzt. Neben der primären Aufgabe der Bahnplanung wird auch die Hüllkurve der Bewegung untersucht, so dass die zur Verfügung stehende Fläche mit der Planung abgeglichen werden kann. Weiterhin ist der Krümmungsverlauf der geplanten Bahn entscheidend für die Qualität der Bahn, so dass bspw. bei Übergängen einzelner Segmente keine Sprünge im Soll-Lenkwinkel entstehen.

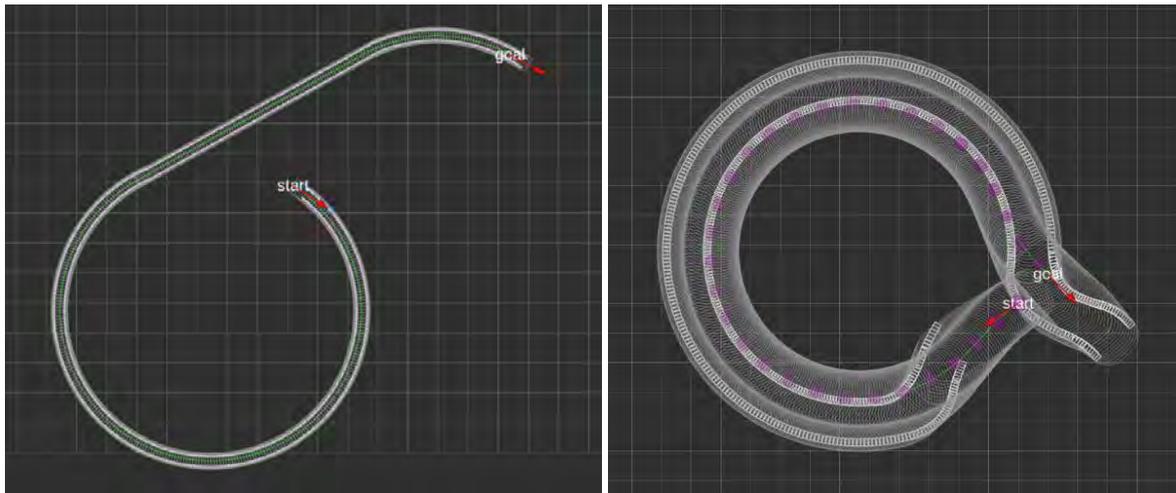


Abbildung 48: Visualisierung einer Online-Bahnplanung mit dem Ansatz Dubins-Pfad

Im abschließenden Schritt wurde eine Schnittstelle zur Übertragung der Bahn an die Fahrzeugsteuerung implementiert, damit die online geplanten Bahnen mit dem Fahrzeug umgesetzt werden konnten. Das Zusammenspiel wurde mit dem KAMAG PT über die seitens ZF implementierte Schnittstelle „ADOPT“ erprobt. Der Algorithmus transferiert die Informationen der geplanten Bahn zyklisch in eine Kette von Posen mit zugeordneten Soll-Zeitpunkten und -Geschwindigkeiten und überträgt diese an das Fahrzeug. Dabei hat jede Pose sechs Freiheitsgrade, wodurch sowohl eine zwei- als auch dreidimensionale Beschreibung realisiert werden kann. Die Reihenfolge der einzelnen Posen beginnt am Fahrzeug und wird zum Ziel hochgezählt. Durch diese Eigenschaft der Schnittstelle kann beispielsweise ein Zwischenziel bestimmt werden, bis zu dem gefahren werden kann, während ab dem Zwischenziel eine Neuplanung geprüft wird.

Die Projektpartner haben sich darauf verständigt, dass das Rangiermanöver in der Regel von links stattfinden soll, da das dem typischen Prozess mit Fahrer entspricht. Bei der Startposition befindet sich das Fahrzeug also auf der entfernten Fahrspur, sodass zwar mehr Platz für die Kurve zur Verfügung steht, aber die Gegenfahrspur gekreuzt werden muss. Sobald eine Prüfung des Gegenverkehrs stattgefunden hat, kann eine Freigabe für die Rückwärtsfahrt erfolgen. Idealerweise findet dann der Vorgang in einem Zug statt, so dass nicht zwischendurch von der Rückwärtsfahrt auf eine Vorwärtsfahrt umgeschaltet werden muss. Zudem muss im Prozess (mittels übergeordneter Steuerung oder Sensor) ausgewählt werden, ob die benachbarten Parkplätze für die Bahnplanung genutzt werden können oder ob vollständig innerhalb der zugewiesenen Zone vor der Rampe

gefahren wird, wobei insbesondere beim KAMAG PT aufgrund der Abmessungen ein sehr geringer Spielraum zur Verfügung steht.

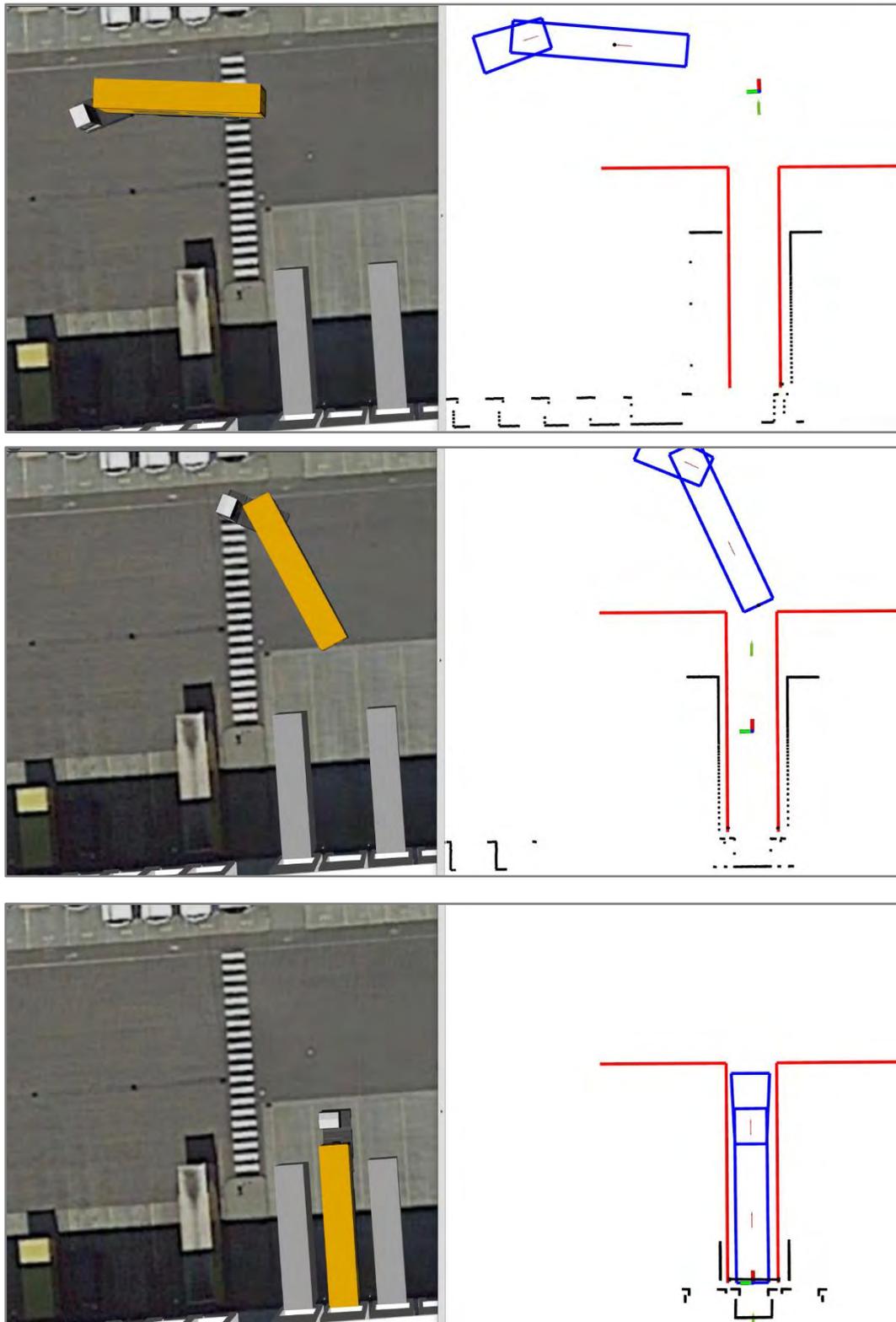


Abbildung 49: Ablauf der Bahnplanung zum Andocken an eine Rampe mit Anhänger

4.6. Sichere Nahfeldsensorik für Lkw (AP 4.6)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Integration einer Sensorik komplementär zu den bereits vorhandenen Sicherheitssystemen, z. B. der Schutzfeldüberwachung, in das Gesamtkonzept. Diese sollte die bestehenden Sicherheitssysteme weder ersetzen noch selbst alleiniges Mittel zur Gewährleistung der Sicherheit sein, sondern eine zusätzliche „Sicht“ auf die Umgebungssituation ermöglichen.

Zu Beginn der sicherheitsbezogenen Untersuchung der Prozesskette für die verschiedenen Fahrzeuge und Ladungen stellte sich heraus, dass eine zusätzliche Nahfeldüberwachung mittels „Bluetooth Low Energy“-basierter Objektlokalisierung (BLE) vorteilhaft ist und sich insbesondere gut ins Gesamtkonzept integrieren lässt. Als eindeutige Vorteile der gewählten Technologie sind dabei stückzahlbedingt niedrige Kosten der notwendigen Hardware- und Softwarelösungen, Möglichkeit zur bidirektionalen Kommunikation mit dem Objekt (Warnung im Gefahrfall) sowie die Wetter- und Beleuchtungsunabhängigkeit zu nennen. Die Bestimmung einer relativen Richtung bzw. mittels Triangulation auch einer Relativposition ist ein Anwendungsfall, der explizit im Bluetooth-Standard ab Version 5.1²⁷ vorgesehen ist und mittels der beschriebenen Funktionen „Angle of Arrival“ (AoA) sowie „Angle of Departure“ (AoD) umgesetzt werden kann. Allerdings existierten zum Zeitpunkt der Antragstellung fast ausschließlich Anwendungen im Innenbereich, bspw. zur Unterstützung der Navigation innerhalb von Gebäuden, sodass der Einsatz im Bereich eines Logistikhofs ein Novum darstellt.

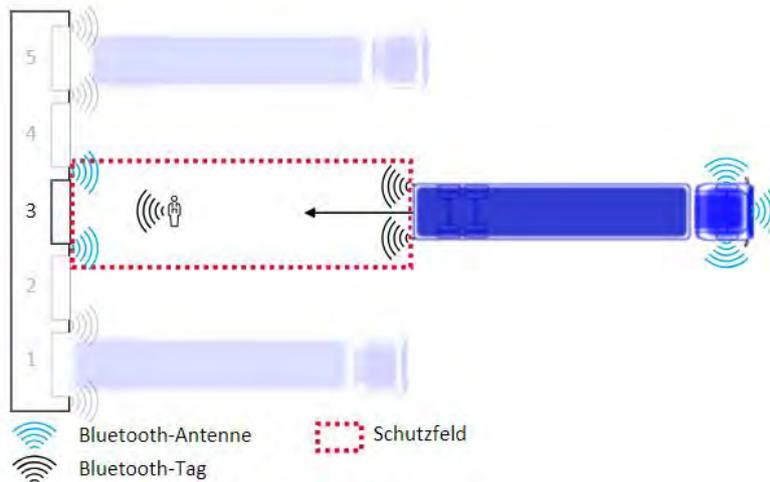
Im Laufe der Sicherheitsanalyse stellte sich heraus, dass insbesondere die rückwärtige Annäherung der Truck-Trailer-Kombination an eine Laderampe einen kritischen Prozessabschnitt darstellt, da die am Zugfahrzeug installierte Sensorik aufgrund der Achsen des Sattelauflegers keine ausreichende Rundumsicht auf den Rampen-/Torvorbereich erlaubt. Diese „Überwachungslücke“ stellte einen idealen Anwendungsfall für den Einsatz der Bluetooth-basierten Objektlokalisierungstechnologie dar.

Vorarbeiten im Entwicklungslabor in Hannover

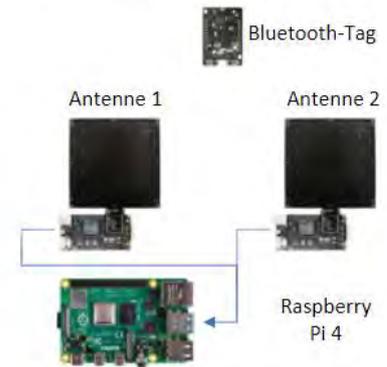
Nach Entwicklung eines Hardware-/Software- sowie eines Kommunikationskonzepts, wurde das System ab Juli 2022 im Labor der Produktinnovation am ZF-Standort in Hannover entwickelt und im November 2023 am Feldversuchsstandort, dem DACHSER Logistikzentrum Ulm, installiert.

²⁷ (Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), 2019)

Anwendungsfall Rampenanfahrt



Systemkomponenten



Aufgaben

- Winkel- und Positionsbestimmung
- Objektdaten zur Verfügung stellen

Abbildung 50: Anwendungsfall Rampenanfahrt sowie verwendete Systemkomponenten

Abbildung 50 gibt einen Überblick über die zu überwachende Fahrsituation sowie die dazu verwendeten Systemkomponenten. Da sich im Verlauf der Diskussionen mit dem Projektpartner DACHSER herausstellte, dass eine Montage von sog. Bluetooth-Tags, d. h. Bluetooth-Sendern, auf der Rückseite von Anhängern aufgrund des nichtstandortgebundenen Wechselverkehrs und der hohen Anzahl von im Verkehr befindlichen Anhängern keine ökonomisch tragfähige Lösung darstellt, entfielen diese.

Im Rahmen der Entwicklung im Labor konnten einige signifikante Verbesserungen erzielt werden, die in Tabelle 7 gegenübergestellt sind.

Tabelle 7: Übersicht der Verbesserung wesentlicher Parameter des Objektlokalisierungssystems (keine Nachbearbeitung)

Metrik	Startwert	Nach Verbesserung
Positionsungenauigkeit (95 % aller Messwerte innerhalb eines Kreises mit Durchmesser D)	D = 1,5 m	D = 0,9 m (- 40 %)
Latenz (Zeit zwischen Positionsveränderung des Objekts und aktualisierter Position)	t = 4 s	t = 1,1 s (- 72,5 %)
Aktualisierungsrate	f = 6 Hz	f = 33 Hz (+550 %)

Insbesondere die deutliche Erhöhung der Aktualisierungsrate bei gleichzeitiger Reduktion der Systemlatenz ermöglichte eine nachgelagerte verbesserte Positionsschätzung mittels Kalman-Filter. Dieser mathematische Ansatz verfolgt das Ziel, das Messwertrauschen innerhalb von Prozessen zu quantifizieren und auf Basis einer vorgegebenen Prozessbeschreibung einen Rückschluss auf den

tatsächlichen Wert der Messgröße zu ziehen^{28 29}. Da die Implementierung des Ansatzes eine schrittweise Datenverarbeitung ermöglichte, konnte die Positionsungenauigkeit auf ca. 0,5 m verbessert werden, während Latenz und Aktualisierungsrate sich nicht bzw. nur innerhalb des Bestimmungsbereichs änderten.

Feldversuch auf dem ZF-Testgelände in Jevern bei Hannover Sommer 2023

Nach initialer Entwicklung im Labor war es notwendig, die Leistungsfähigkeit des Systems unter Annäherung an die Realbedingungen zu überprüfen. Da zu diesem Zeitpunkt die finale Installationsanordnung für den Feldtest in Langenau noch nicht definiert war, wurde unter Zuhilfenahme realistischer Größen eine exemplarische Antennenkonstellation festgelegt. Neben dem Bluetooth-Tag an der zu verfolgenden Person wurden zusätzlich zwei Tags am Heck des verwendeten Sattelaufliegers befestigt, um die Annäherung an die fiktive Laderampe zu überwachen. Die exakten Positionen der verfolgten Objekte wurden hierbei mittels eines Lidar-Referenzensors des Kooperationspartners SICK erfasst, sodass auch Aussagen über die Lokalisierungsgenauigkeit sowie die Systemlatenz getroffen werden konnten. Die Ergebnisse wurden genutzt, um die in Tabelle 7 aufgelisteten Werte zu bestätigen, bevor die finale Planungs- und Vorbereitungsphase für den Feldtest in Langenau begann.

Der Grundgedanke und die Funktionsweise des Ansatzes konnten den Projektpartnern im Rahmen eines Konsortialtreffens am 14. Juni 2023 auf dem Testgelände demonstriert werden.

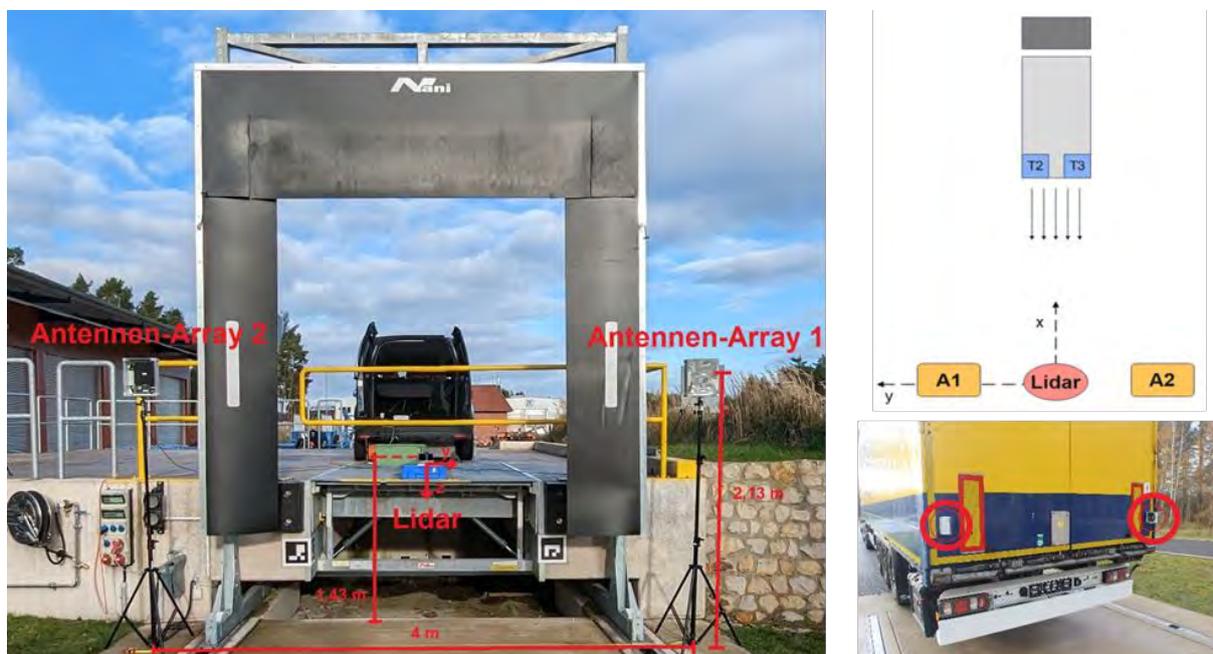


Abbildung 51: Überblicksdarstellung des Versuchsaufbaus zur Validierung der Lokalisierungsgenauigkeit und Dynamik auf dem ZF-Testgelände

²⁸ (Khobahi, 2017)

²⁹ (Wikipedia, 2006)

Feldversuch auf dem Logistikhof des Projektpartners DACHSER SE in Langenau

Wie in Abbildung 52 dargestellt, wurden im November 2023 insgesamt vier Bluetooth-Antennen in Schutzgehäusen in betriebsgerechten Höhen von 3,4 m bis 4,8 m im Bereich der Laderampe 163 des DACHSER Logistikzentrums installiert. Anordnung und Ausrichtung wurden nach vorherigen Simulationen so gewählt, dass ein Kompromiss aus Genauigkeit und Abdeckungsbereich erzielt werden konnte. Die für die Lokalisierung notwendigen Sender/Tags wurden in wetterfesten Gehäusen untergebracht und können magnetisch an Kleidung bzw. Warnwesten befestigt werden (s. Abbildung 53).

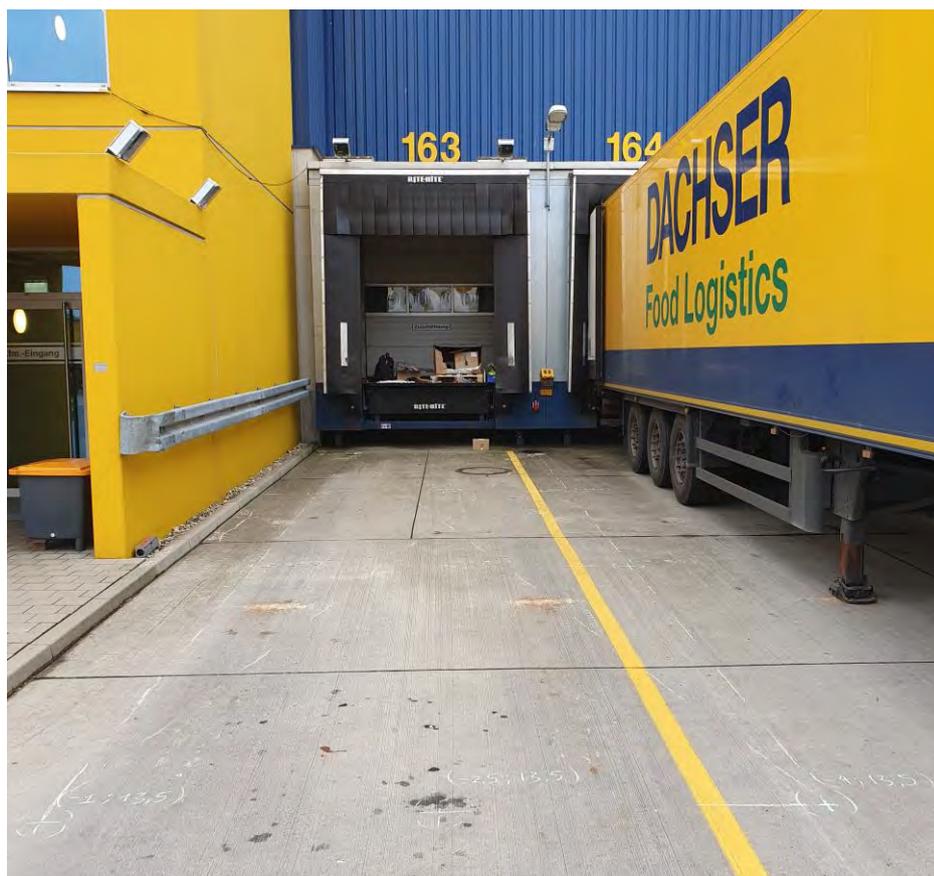


Abbildung 52: Infrastrukturseitig installierte Antennen zur Überwachung des Laderampenvorbereichs



Abbildung 53: Zur Lokalisierung notwendige Bluetooth-Tags können magnetisch an der Kleidung befestigt werden

Nach erfolgter Inbetriebnahme sowie der Durchführung einer Messkampagne zur Überprüfung der Lokalisierungsgenauigkeit wurden im Januar 2024 Optimierungen für die Positionsschätzungen angewendet sowie eine orange Warnleuchte (s. Abbildung 54) installiert, die insbesondere bei Dunkelheit den detektierten Personen eine unmittelbare Rückmeldung über ihre Erfassung gibt, aber gleichzeitig den Sicherheitsfahrer sowie andere Personen in der Nähe auf eine potenzielle Gefahrensituation hinweist. Insbesondere konnten in diesem Zeitraum die Auswirkungen der veränderlichen Umgebung auf die Lokalisierungsgenauigkeit untersucht werden. Hier zeigte sich, dass insbesondere das Vorhandensein eines zur Ent-/Beladung vor der benachbarten Laderampe abgestellten Kühlanhängers Signalreflexionen erzeugte, welche das Lokalisierungssystem initial störten, aber durch die nachgelagerte Positionsschätzung mittels Kalman-Filter bis auf sehr seltene Fälle eliminiert werden konnten.



Abbildung 54: Foto der Installation des Bluetooth-basierten Lokalisierungssystems auf dem DACHSER-Betriebshof in Langenau mit aktivierter Warnleuchte

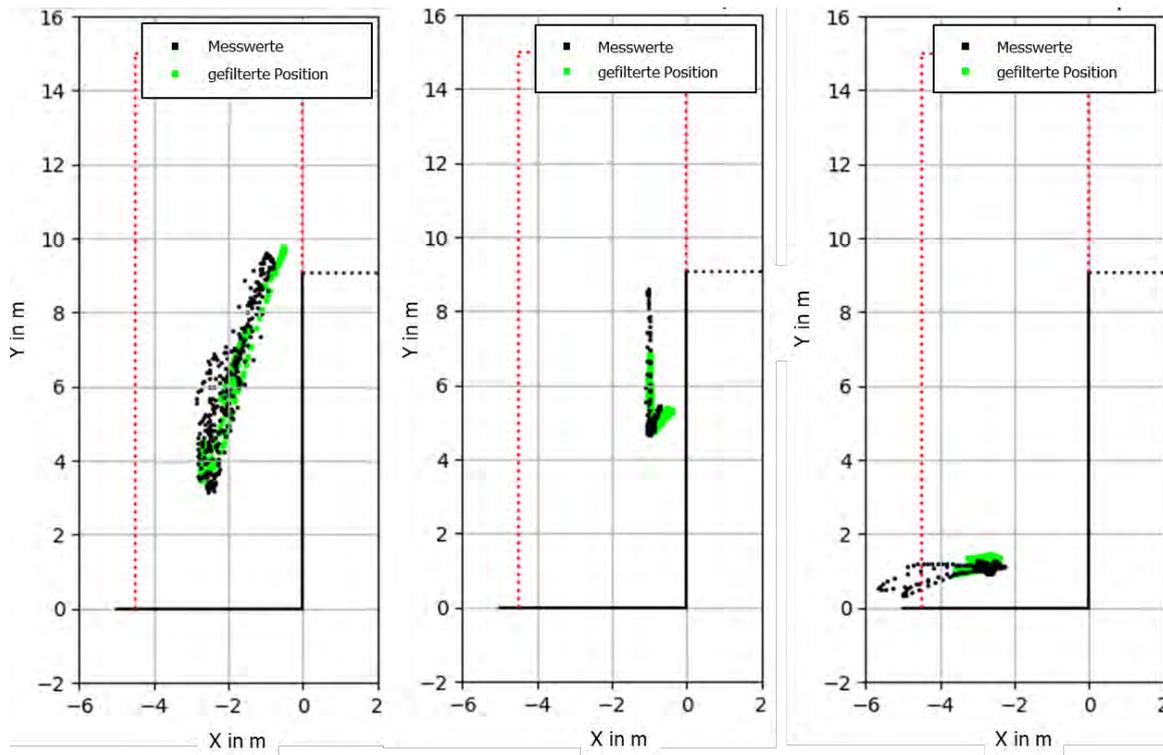


Abbildung 55: Verbesserung der Positionsschätzung mittels Kalman-Filterung während verschiedener Bewegungen eines Fußgängers mit Bluetooth-Tag

Bei einem erneuten Besuch im Februar 2024 konnte auch die Kommunikation mit dem Fahrzeug erfolgreich validiert werden, womit die letzte Teilaufgabe im Rahmen des Anwendungsfalls abgeschlossen wurde. Die hierfür zum Einsatz kommende V2X-Funktechnologie wurde ebenfalls genutzt, um die Präsenz von querenden Fußgängern auf dem Fußgängerüberweg zu signalisieren bzw. die Freigabe für die erhöhte Fahrgeschwindigkeit von ≥ 20 km/h zu erteilen. Tritt eine Person mit Bluetooth-Tag in die frei parametrierbare Überwachungszone ein, wechselt deren Zustand auf „BELEGT“ und es werden via V2X entsprechende Nachrichten an das automatisiert fahrende Fahrzeug KAMAG PT übermittelt, sodass beispielsweise eine automatisierte Anfahrt unterbrochen werden kann. Verlässt die Person die Überwachungszone, erfolgt unmittelbar die Freigabe durch Übermittlung des Zustands „FREI“, sodass die Anfahrt fortgesetzt werden kann.

Aufgrund der Komplexität der involvierten prototypischen Systeme und der Dynamik der Umgebungsbedingungen (Verfügbarkeit einer stabilen Funkverbindung mit dem KAMAG PT) wirkte sich hier vorteilhaft aus, dass alle HW- und SW-Komponenten für die Lokalisierung und sowie die Kommunikation des Lokalisierungsergebnisses unter anderem auch auf Robustheit ausgelegt waren. Durch eine kontinuierliche Überwachung ließen sich Fehlerfälle erkennen und durch geeignete Maßnahmen (z. B. automatischer Neustart der SW-Komponente) unmittelbar automatisiert beheben.

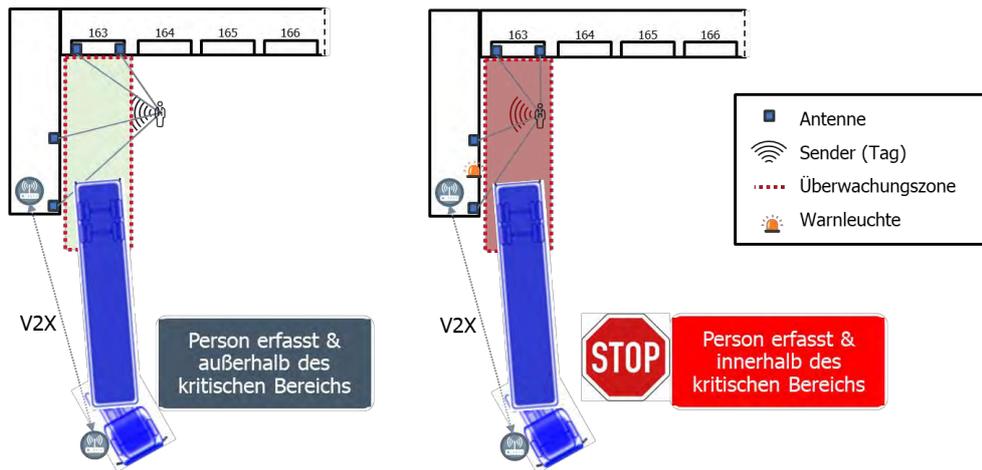


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Installation des Bluetooth-basierten Lokalisierungssystems auf dem DACHSER-Betriebshof in Langenau mit zu erfassender Person



Abbildung 57: Bei der Detektion von Personen im Gefahrenbereich wird die Warnleuchte aktiviert und das Fahrzeug gestoppt (Ausschnitt aus SAFE20-Projektfilm).

4.7. Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)

Im Hofbetrieb gibt es zwei Arten von Ladungsträgern: die Wechselbrücke und den Auflieger (s. Abbildung 58). In diesem Arbeitspaket wird das Handling des Aufliegers, auch Sattelaufliieger oder Semi-Trailer genannt, behandelt.



Abbildung 58: Arten von Ladungsträgern: links: Auflieger, rechts: Wechselbrücke

Auflieger fahren dabei mit dem hinteren Teil auf eigener Achse und werden mit dem vorderen Teil von einer Zugmaschine aufgenommen (aufgesattelt). Zum Abstellen besitzen Auflieger daher im vorderen Bereich Stützfüße. Die Verbindung zwischen Zugmaschine und Auflieger erfolgt durch einen sogenannten Königszapfen des Aufliegers, welcher von der Sattelkupplung der Zugmaschine aufgenommen und verriegelt wird. Der Königszapfen ermöglicht eine freie Drehung um die vertikale Achse, wodurch Knickwinkel von 90° zwischen Zugmaschine und Auflieger möglich sind.

Die Aufgabe der Terminal-Zugmaschine im Rahmen des Hofverkehrs besteht darin, Auflieger an die Rampen und Parkplätze des Logistikhofs zu manövrieren. Ein wichtiger Punkt ist hier das An- und Abkuppeln des Aufliegers, das eine Teilaufgabe der in AP 2 (s. a. Abbildung 59) beschriebenen Missionen ist und in diesem Arbeitspaket umgesetzt wurde.

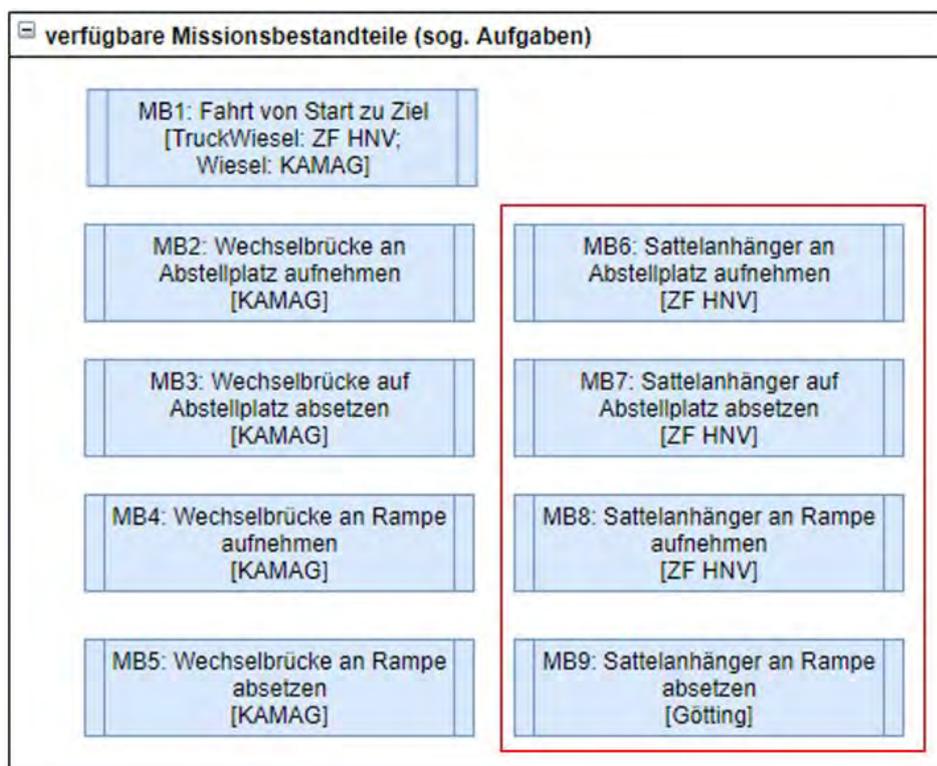


Abbildung 59: Rot umrandet: Missionsbestandteile, welche das Auf- und Absatteln des Aufliegers (Sattelanhänger) als Teilaufgabe enthalten

In SAFE20 wurde dazu von KAMAG ein Fahrzeug mit der Bezeichnung KAMAG Precision Truck (PT) zur Verfügung gestellt. Dieses Zugfahrzeug wurde für den automatisierten Einsatz umgebaut. Detaillierte Beschreibungen der Automatisierung des Fahrzeugs finden sich im Kapitel „Schnittstelle autonomes Fahren (AP 4.11)“. Zusätzlich wurde von DACHSER ein Auflieger gestellt, der mit den notwendigen Komponenten zum automatisierten Kuppeln nachgerüstet wurde.

Mission Aufnehmen, Absetzen des Aufliegers

Basierend auf den theoretischen Überlegungen aus AP 2 und AP 3 wurde die Automatisierungssteuerung zum automatischen Aufnehmen und Absetzen des Aufliegers erstellt. Diese unterteilt sich in drei Hauptkomponenten:

1. Die direkte Ansteuerung aller beteiligten Aktoren und Sensoren (Liftarm, Sattelplattenverriegelung, Stecker stecken etc.) zum Kuppeln des Aufliegers und die zur Verfügungstellung eines generischen Interfaces zu diesen Aktoren. Diese im Projekt SAFE20 *Hitch Controller* genannte Komponente wurde von KAMAG in den KAMAG PT integriert.
2. Der übergeordnete *virtuelle Fahrer* von ZF, welcher sich an diesem generischen Interface bedient und zusätzlich die Aufgaben „Lokalisierung des Aufliegers“, „Planung der Anfahrt-Trajektorie“ und „Ablaufsteuerung des Kuppelvorgangs“ übernimmt.
3. Das ADOPT (Autonomous Driving Open Platform Technology), welches die Fahrtrajektorie umsetzt, die Schnittstelle vom *virtuellen Fahrer* zum Zugfahrzeug darstellt und die Sicherheitsaufgaben erfüllt.

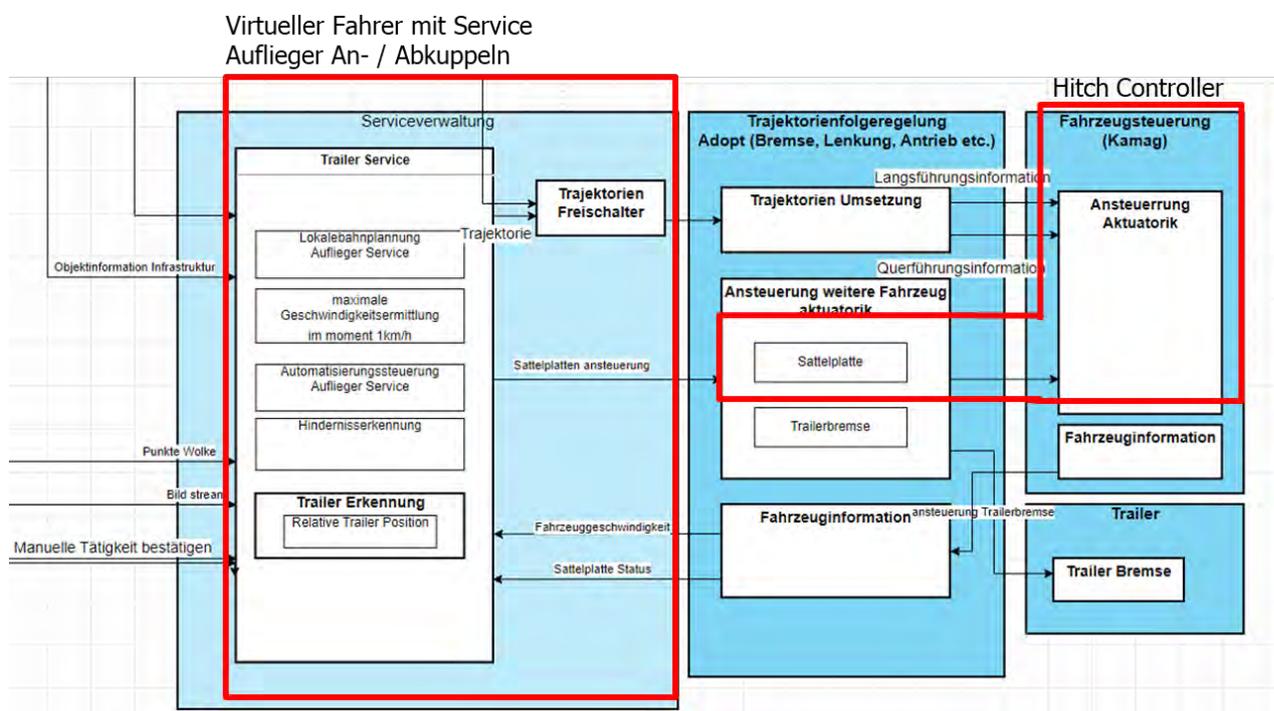


Abbildung 60: Aus AP 3 erarbeitet: 1. Architektorentwurf inklusive der späteren Zuordnung der Hauptkomponenten des An-/Abkuppelns

Dabei wurde der im AP 3 erarbeitete Architektorentwurf (s. Abbildung 60) während der Umsetzung weiter verfeinert.

Aufbauend auf den finalen Architekturen wurden detaillierte Sicherheitsbetrachtungen und Ablaufdiagramme für den Vorgang des automatischen Kuppelns erarbeitet, wobei für alle Ein- und Ausgänge der beteiligten Komponenten Sicherheitsanforderungen abgeleitet und bewertet wurden.

Aufnehmen des Aufliegers

Der gesamte Prozess des Aufnehmens des Aufliegers kann in die folgenden Hauptaufgaben unterteilt werden, die Nummerierung entspricht der Darstellung in Abbildung 61:

1. Erkennen und Anfahren des Aufliegers
2. Kuppeln des Aufliegers
3. Versorgungsleitungen herstellen
4. Auflieger sicher abstellen
5. Abschließende Höhenanpassung des Aufliegers



Abbildung 61: Aufgaben des automatischen Aufnehmens des Aufliegers

Damit der Auflieger von der Zugfahrzeugsensorik erkannt wird, ist es notwendig, dass das Fahrzeug bereits grob vor dem Auflieger ausgerichtet ist (der Sensor muss den Auflieger erfassen können). Dies wird durch die vorangegangene Fahrmission sichergestellt (Abbildung 62: Fahrt von A zu B). Dabei sind die Stellplätze und Rampen auf dem Hof durchnummeriert. Die einzelnen Fahraufträge zum Transportieren des Aufliegers setzen sich dabei aus eindeutigen Nummern zusammen, bestehend aus der Startposition, wo der Auflieger aktuell steht, und der Zielposition. Die Stellplatzkoordinaten und die Nummern sind dabei in der digitalen Hofkarte hinterlegt und werden über die Mission übermittelt. Die initiale Aufliegeridentifikation ist somit durch die Ausrichtung des Zugfahrzeugs durch die vorherige Mission gegeben (Abbildung 62: Position B).

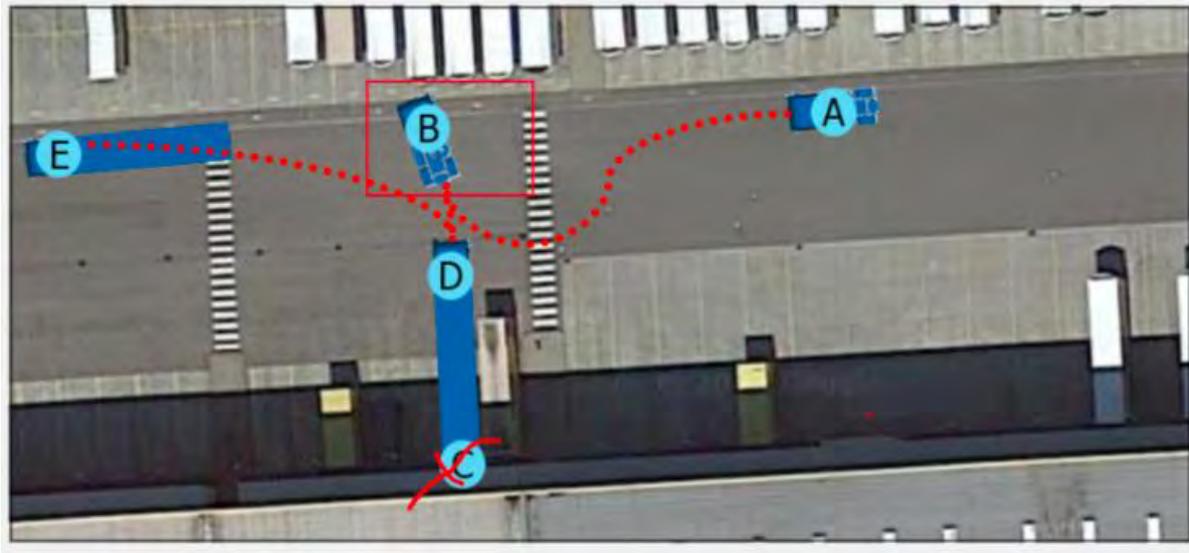


Abbildung 62: Skizze der Teilsegmente des Missionsbestandteils MB9, B zu D entspricht der Anfahrt des automatischen Ankuppelns

Eine weitere Identifikation war bei den durchgeführten Versuchen nicht mehr notwendig. Um den Abtransport eventuell falsch abgestellter Auflieger zu verhindern, kann eine Bestätigung über eine nach dem Kuppeln ausgelesene einzigartige ID des Aufliegers erfolgen.

Während das Erreichen der Startposition (Abbildung 62: Position B) für das automatische Ankuppeln durch die vorherige Mission auf einer absoluten lokalen Lokalisierung in Hofkoordinaten basiert, ist die Annäherung an den Auflieger (Abbildung 62: Zielpunkt D) eine Methode, die rein relative Positionen zwischen Fahrzeug und Auflieger verwendet. Für den Ankuppelvorgang müssen der seitliche Versatz ΔY zwischen Königszapfen C und Sattelkupplung A, sowie die Drehung $\Delta \Psi$ zwischen der Längsachse des Aufliegers B und des Zugfahrzeugs auf null reduziert werden (siehe Abbildung 63).

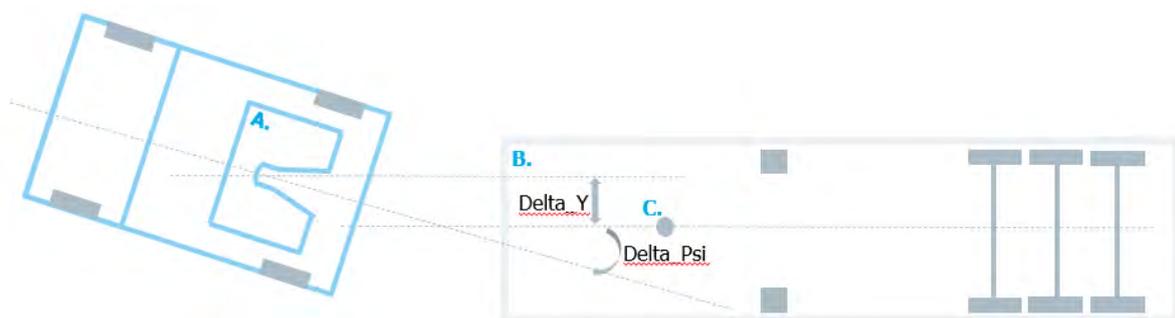


Abbildung 63: Anfahrt an den Auflieger und relevante Größen für die Querführung: Sattelplatte A der Zugmaschine und Königszapfen C des Aufliegers B

Im Rahmen von SAFE20 wurde der KAMAG PT mit mehreren Lidar-Sensoren der Firma SICK ausgestattet. Für das Erkennen des Aufliegers wurde im KAMAG PT auf den hinteren Lidar des Fahrzeugs zurückgegriffen. Der DACHSER-Auflieger wurde mit fest montierten, zylinderförmigen, retroreflektierenden Markierungen ausgerüstet.

Durch die bekannte Geometrie des Aufliegers und den bekannten Montagepositionen der Reflektoren und des Lidar-Sensors, kann die exakte Position des Aufliegers relativ zum Fahrzeug bestimmt werden.

KAMAG Coupling

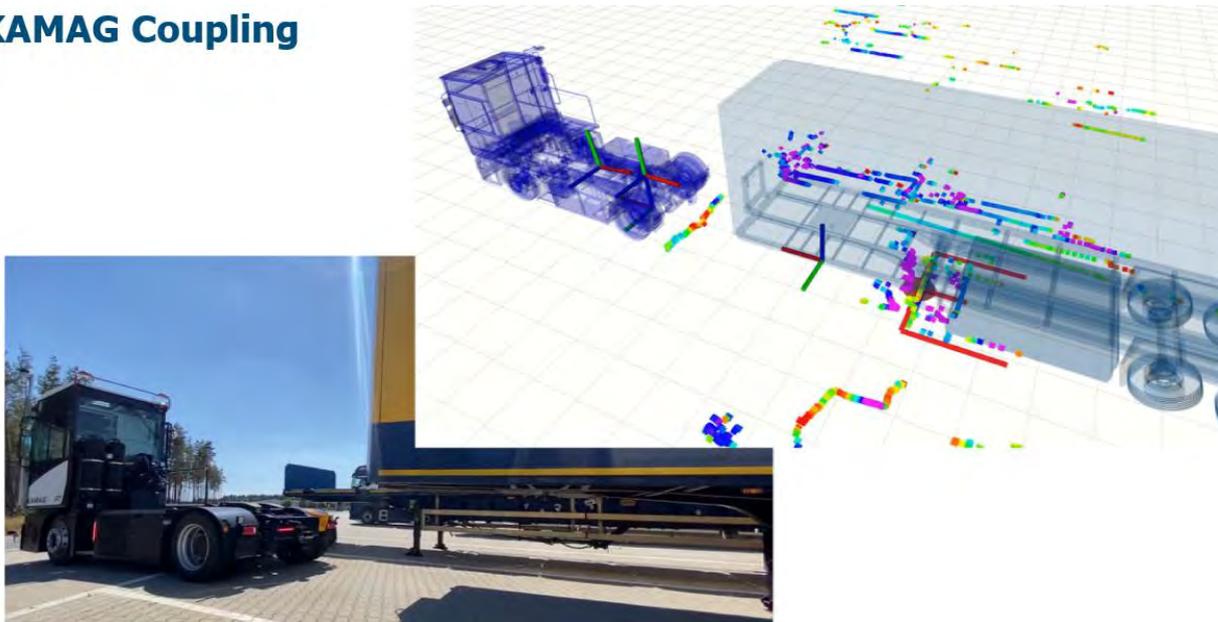


Abbildung 64: Live-Sensordarstellung des automatisierten Kupplungsvorgangs

Hierzu werden die erfassten Abweichungen von der Endposition an die ADOPT-Fahrzeugregelung (siehe Kap. 4.11 „Schnittstelle autonomes Fahren (AP 4.11)“) weitergegeben und ausgeregelt.

Hinsichtlich der ausgearbeiteten Sicherheitsbetrachtungen stellen das Unterfahren des Aufliegers und der Kupplungsprozess ein hohes Gefährdungspotenzial dar. Gleichzeitig ist das Erkennen von Personen durch die Sensorik stark eingeschränkt, da die Sensorik den Bereich des Aufliegers bewusst ausblenden muss, um keine fehlerhafte Schutzfeldverletzung zu erzeugen. Die Konzepte in SAFE20 sehen hierfür hauptsächlich eine niedrige Geschwindigkeit, akustische Warnsignale und außen angebrachte gut erreichbare Not-Halt-Auslöser vor, welche in den zuvor erwähnten Sicherheitsbetrachtungen dokumentiert und mit den beteiligten Partnern abgestimmt wurden.

Kuppeln des Aufliegers (Hubarm + Sattelkupplung)

Nachdem das Zugfahrzeug unter den Auflieger gefahren ist, erfolgt das Ankuppeln. Entscheidend dabei ist, dass spätestens beim Fahren unter den Auflieger, wie in Abbildung 65 dargestellt, die Abweichungen unter einer definierten Toleranzgrenze liegen, damit der Königszapfen C von der Sattelkupplung A eingefangen werden kann. Dabei besitzt die Sattelkupplung eine V-Förmige Öffnung, die bei einer nicht exakten mittigen Ausrichtung des Aufliegers den Königszapfen über die seitlichen Flanken (1.) in die Mitte zur spielfreien Endposition (4.) führt. Dabei gibt die maximale Öffnungsweite (3.) die maximal erlaubte laterale Abweichung des Königszapfen an, bei der eine Kupplung noch erfolgen kann.



Abbildung 65: Sattelplatte A des Zugfahrzeugs fängt den leicht seitlich versetzten Königszapfen C des Aufliegers B (D Stützen, E Räder) auf.

Anzustreben ist dabei eine minimale Abweichung, da jegliche seitliche Verschiebung des Königszapfens bedeutet, dass der gesamte Auflieger im vorderen Bereich seitlich verschoben wird. Vor allem wenn die Aufliegerstützen D noch Bodenkontakt haben und noch nicht die volle Last auf der Sattelkupplung liegt, schieben diese seitlich über den Untergrund. Auch die Räder des Aufliegers E sind in diesem Moment noch über die Feststellbremse eingebremst. Zur Verschleißminimierung ist somit eine möglichst exakte Vorpositionierung anzustreben.

Für dieses Manöver muss von der Fahrzeugregelung eine besonders niedrige Fahrgeschwindigkeit bereitgestellt werden, um ein sanftes Verriegeln zu ermöglichen und die aufgestellten Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Aufgrund des hydrostatischen Antriebs des KAMAG PT konnte die Geschwindigkeit auf 1 km/h abgesenkt werden.

Der Kupplungsprozess besteht dabei aus den folgenden Schritten:

1. Unterfahren des Aufliegers bis ca. 1 m vor die Endposition,
2. Sattelplatte anheben bis knapp unter den Boden des Aufliegers,
3. Rückwärtsfahren,
4. bis der Königszapfen von der Sattelkupplung erfasst wird und die Sattelkupplung verriegelt,
5. Versorgungsleitungen herstellen (Elektrisch + Druckluft),
6. Abfahrbereitschaft des Aufliegers herstellen (Liftarm der Sattelkupplung in die finale Abfahrposition heben und die Auflieger-Feststellbremse lösen).



Abbildung 66: Ablauf des Kupplungsprozess am KAMAG PT

Im Kupplungsprozess ist zudem der Hitch Controller eingebunden, welcher über das Interface zum virtuellen Fahrer die Schritte 2, 4, 5 und 6 auf Anforderung des *virtuellen Fahrers* ausführt und bei erfolgreicher Durchführung bestätigt. Dazu ist die Sattelplatte des Zugfahrzeugs mit mehreren induktiven Näherungssensoren ausgestattet, welche z. B. die Einstellung der richtigen Sattelplattenhöhe über den Liftarm oder die erfolgreiche Verriegelung des Königszapfens überwachen.

Versorgungsleitungen (Druckluft und Elektrik) herstellen

Ziel ist es, den Auflieger sicher zu bewegen, was eine Verbindung der Druckluft- und Elektroleitungen erfordert. Dieses Problem kann derzeit nicht gelöst werden, ohne den Auflieger zu modifizieren. Das manuelle Kuppeln der Druckluft- und Elektrokabel ist ein zeitaufwändiger Vorgang, der beim Rangieren im Hofverkehr von Fahrern teilweise übersprungen wird. Obwohl der Auflieger theoretisch ohne gekoppelte Druckluftleitungen manövriert werden kann, wenn die Feststellbremsen gelöst werden, ist dies aus Sicherheitsgründen nicht zu empfehlen.

In SAFE20 wurde das Funktionsmuster eines für die Automatisierung des Kuppelvorgangs notwendigen, elektrisch ansteuerbaren Aufliegerversorgungssystems des assoziierten Partners SAF-HOLLAND für diese Aufgabe verwendet. Zusammen mit SAF-HOLLAND konnte dieses System zusätzlich um ein aktuell von ZF in der Entwicklung befindliches Konzept zur erweiterten Datenkommunikation zwischen Auflieger und Zugmaschine mit dem Namen TT-Link erweitert werden.

Der TT-Link ermöglicht eine erweiterte Kommunikation zwischen Auflieger und Zugmaschine:

- 2x Datenverbindung (z. B. Automotive Ethernet 1000BaseT1)
- 2x Spannungsversorgung (2x UBAT + 2x GND)

Eine der Datenverbindungen zum Auflieger wurde genutzt, um eine Rückfahrkamera und einen Lidar mit dem Netzwerk des *virtuellen Fahrers* (ROS-Netzwerk) des Zugfahrzeugs zu verbinden. Der Lidar wurde dabei zur Ortung der Rampenposition durch den Projektpartner Götting KG verwendet. Die zweite Datenverbindung dient zur CAN-Anbindung an die Automatisierungsplattform des Zugfahrzeugs und zur Ansteuerung einer im Auflieger verbauten elektronischen Feststellbremse.

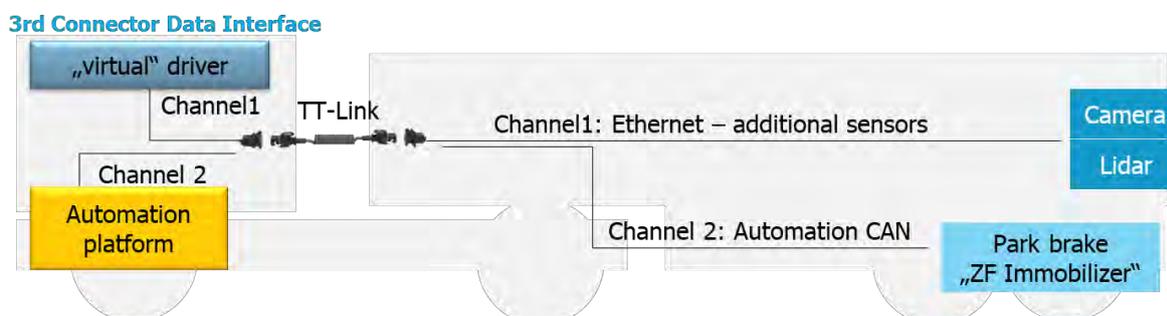


Abbildung 67: Erweiterung der Zugfahrzeug Netzwerke auf den Auflieger

Auflieger sicher abstellen

Um ein sicheres Abstellen des Aufliegers zu gewährleisten, wird eine elektrische Feststellbremse benötigt. Zu diesem Zweck wurde der Auflieger mit einer von ZF entwickelten elektrischen Wegfahrsperrung (ZF Immobilizer) für Auflieger nachgerüstet. Ein weiteres Steuergerät ist so konzipiert worden, dass es die normalerweise über ein Dashboard des Aufliegers manuell eingelegte Wegfahrsperrung dem Automatisierungs-CAN im Auflieger zur Verfügung stellt. Über den TT-Link kann die Automatisierung des Zugfahrzeugs die Wegfahrsperrung somit als automatisierte Feststellbremse des Aufliegers verwenden. Die automatisierte Feststellbremse des Aufliegers wird immer am Ende des Kupplungsvorgangs gelöst und zu Beginn des Entkuppelns eingelegt. Dabei stellt die Feststellbremse über ihre Federspeicher sicher, dass auch bei komplettem Luftverlust der Auflieger noch weiterhin sicher eingebremst wird.

Abschließende Höhenanpassung des Aufliegers

Im Vergleich zu den im Fernverkehr eingesetzten Zugmaschinen hat die Terminalzugmaschine den Vorteil, dass die Sattelplatte nicht direkt am Fahrzeugrahmen befestigt ist, sondern an einem hydraulischen Liftarm. Dieser Liftarm kann von der Kabine aus über eine elektrische Schnittstelle in der Höhe verstellt werden. Zwar lässt sich die Sattelkupplung bei den meisten Standardtraktoren auch über die übliche elektronisch gesteuerte Luftfederung (ECAS) in der Höhe verstellen, der verfügbare Verstellbereich ist jedoch deutlich kleiner. Der Liftarm ermöglicht es, den Auflieger so weit anzuheben, dass das Fahren möglich ist, ohne die Höhe der Aufliegerstützen zu verändern (Abbildung 68).



Abbildung 68: Stützfüße in ausgefahrener Position mit noch ausreichender Bodenfreiheit durch über den Liftarm angehobenen Auflieger

Dies ist auch das übliche Verfahren in der Hoflogistik, da die Höhenverstellung der Stützfüße des Aufliegers manuell erfolgen muss und viel Zeit in Anspruch nimmt. Für die Automatisierung bedeutet dies, dass die Stützfüße keine Aktuatoren benötigen und während des Hofbetriebs immer auf der gleichen Höhe bleiben.

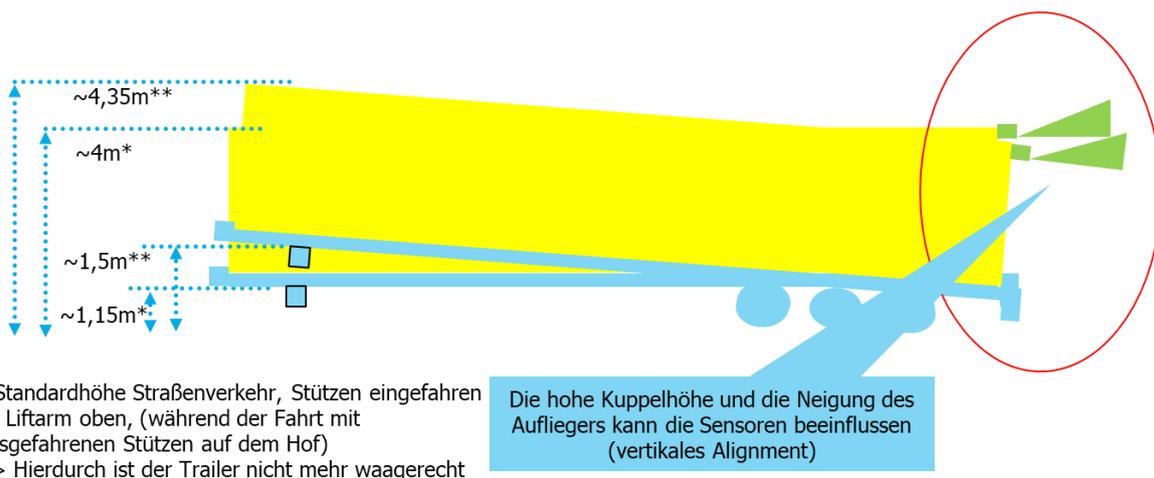


Abbildung 69: Höhenunterschied des Aufliegers bei Straßenfahrt (Stützen eingefahren) und auf dem Hof (Stützen ausgefahren)

Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass der Auflieger vorne deutlich weiter angehoben wird als im Straßenverkehr und dadurch nicht mehr waagrecht ist. Da auf dem Hof der Auflieger immer in diesem Zustand bewegt wird, wurden die am Auflieger verbauten Sensoren auf diese Höhe kalibriert. Sollen die Sensoren aber auch im Straßenverkehr genutzt werden, wo der Auflieger mit eingefahrenen Stützen waagrecht auf seine Standardhöhe gebracht wird, muss die Sensorik entweder durch Auto-Kalibrierung oder zwei separat hinterlegte Kalibrier-Parametersätze, die über ein zusätzliches Signal (z. B. der gemessenen Liftarmhöhe) umgeschaltet werden, angepasst werden.

Absetzen des Aufliegers

Das Absetzen des Aufliegers gestaltet sich einfacher als das Aufnehmen. Da nach dem Absetzen und Entriegeln gerade unter dem Auflieger hervor gefahren wird (der Königszapfen befindet sich schon mittig zentriert in der Sattelkupplung), entfällt der Vorgang des Ausregelns eines relativen Querversatzes und einer Drehung. Der Vorgang könnte auch ohne den rückwärtigen Lidar ausgeführt werden. Im Projekt wurde er noch genutzt, um den Abstand zum Auflieger und damit die finale Schlussposition des abgekuppeltem Zugfahrzeugs vor dem Auflieger zu bestimmen. Selbst wenn der Zug mit einem Knick zwischen Auflieger und Zugfahrzeug abgestellt wurde, sollte gerade herausgefahren werden, da der Königszapfen dann immer entlang der mittleren Achse des Zugfahrzeugs und Sattelplatte geführt wird.

Eine Besonderheit, die erst während der praktischen Versuche aufgefallen ist, ist die Längenänderung des Zuges beim Liften des Aufliegers. Da der Liftarm der Zugmaschine sich auf einer Kreisbahn bewegt, wird der Auflieger beim Anheben nach vorne gezogen und beim Absenken nach hinten geschoben.

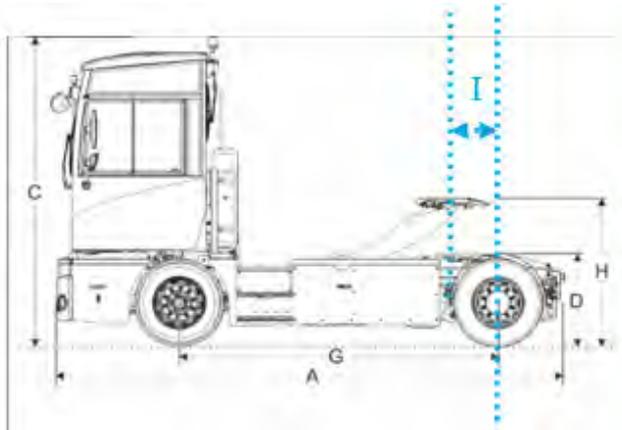


Abbildung 70: Sattelplatte verändert Abstand I in Fahrtrichtung relativ zum Zugfahrzeug bei veränderter Sattelplattenhöhe

Wird dieser Vorgang nun im Stand bei sowohl eingebremsten Auflieger als auch Zugmaschine ausgeführt, treten hohe Kräfte an dem Liftarm auf. Das Zugfahrzeug oder der Auflieger werden letztendlich über die blockierten Räder geschoben. Ist das Gespann nicht eingebremst, kann es aufgrund der leichten Neigung an den Stellplätzen (damit Regenwasser abfließt) anfangen zu rollen und seine finale Position verlassen. Vorzugsweise wird daher nur eine Seite eingebremst, wobei beim Abstellen an der Rampe der Auflieger beim Absetzen nach hinten durch die Rampe blockiert ist. Optimal wäre es daher, nur den Auflieger einzubremsen und dem Zugfahrzeug zu erlauben, nach vorne auszuweichen. Dies kann über die automatisierte Auflieger-Feststellbremse erfolgen.

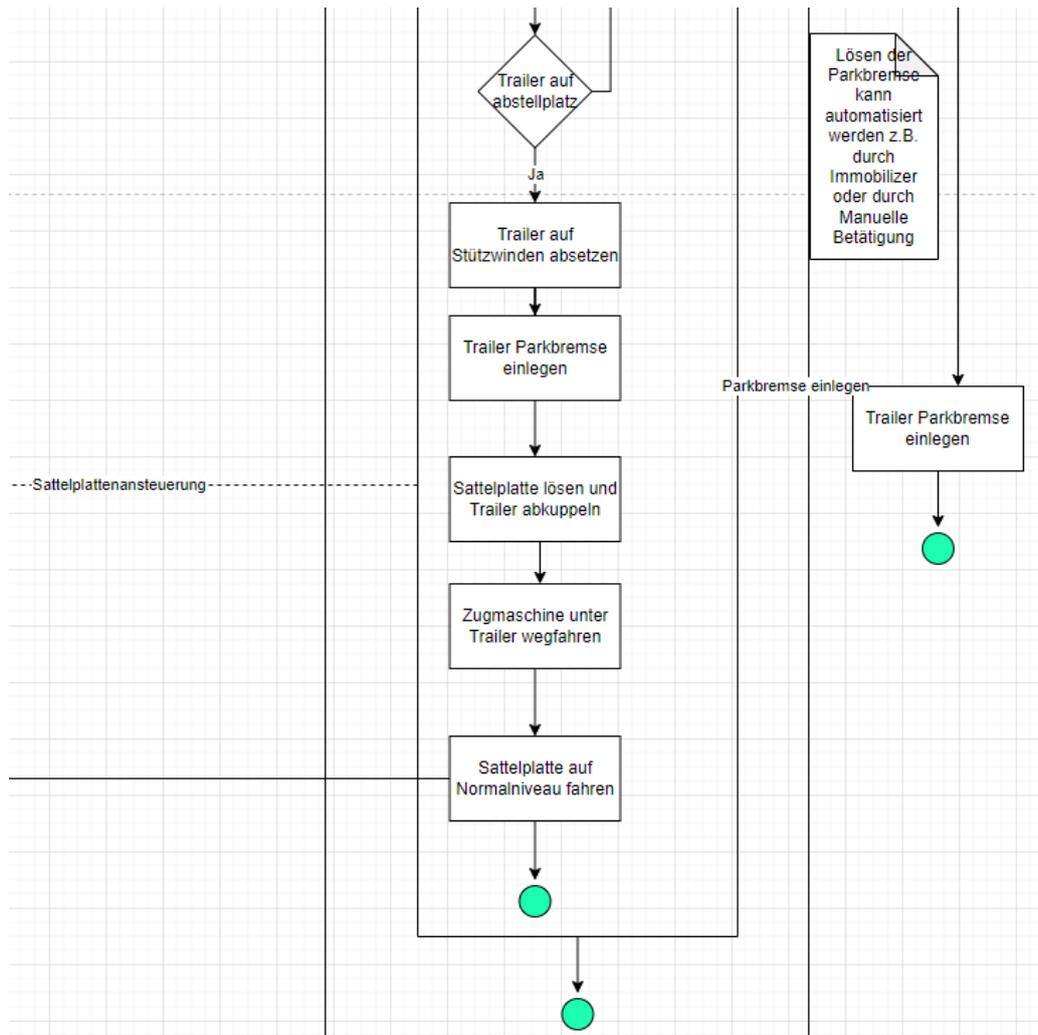


Abbildung 71: Ablauf des Absetzens (Auszug aus UC-Hof_L2_MB7-SAH-Abstellplatz-absetzen)

In Abbildung 71 sind die einzelnen Schritte des Absetzens basierend auf einem Auszug der in AP 2 erstellten Ablaufdiagramme dargestellt. Größtenteils läuft der Vorgang invers zu dem Vorgang „Aufnehmen“ ab. Dabei muss diesmal, anstatt die Sattelplatte unter den Aufliegerboden zu führen (siehe auch Kupplungsprozess Vorgang 2), der gesamte Auflieger auf seine Stützfüße (Stützwinden in Abbildung 71) gestellt werden. Die Bewegung des Liftarms nach unten muss rechtzeitig gestoppt werden, da dieser ansonsten nach dem Aufsetzen der Stützfüße auf dem Boden am Königszapfen zieht und eine Verspannung zwischen Sattelplatte und Auflieger erzeugt, die eine Entriegelung des Königszapfen blockieren könnte. Im Gegensatz zu dem ursprünglich am Ende des Ablaufdiagramms dargestellten Normalniveau, welches die Standardhöhe für die Straßenfahrt bei einer Zugmaschine mit elektronischer Luftfederung bedeutet, wurde der Liftarm mit der Sattelplatte bei der Terminal-Zugmaschine komplett in die unterste Position gefahren.

Fahrt / Rangieren mit Sattelauflieger

Zum Erledigen der Aufgaben auf dem Logistikhof sind neben dem Aufnehmen und Absetzen weitere Fahrmanöver/Services notwendig (s. a. Abbildung 59, S. 103). Da diese Aufgaben teilweise von

unterschiedlichen Komponenten ausgeführt werden, gibt es in der Automatisierungsteuerung eine als „Sequencer“ bezeichnete Instanz (modelliert als endliche Zustandsmaschine), welche die empfangenen Missionen in einzelne Fahrdienste (Services) unterteilt.

Zu diesem Zweck wurden folgende Fahrdienste für die automatisierte Terminalzugmaschine zur Verfügung gestellt:

- Vorwärtsfahren
- Rückwärtsfahren
- Auflieger an die Rampe / Abstellplatz fahren
- Aufnehmen / Absetzen des Aufliegers

Eine Mission kann dabei aus einer Kombination verschiedener Missionsbestandteile (s. a. Abbildung 59, S. 103) und ein Missionsbestandteil wiederum aus der Kombination mehrerer Fahrdienste (siehe auch Abbildung 62) zusammengesetzt sein. Der Sequencer übernimmt dabei jeweils den Aufruf und das Beenden der diesen Fahrdienst ausführenden Komponente und übergibt die für die Ausführung notwendigen Informationen. Eine Mission stellt somit letztendlich eine Verkettung von nacheinander aufgerufenen Fahrdiensten dar.

Vorwärtsfahren

Bei den Vorwärtsfahrten mit Auflieger sind insbesondere die Schleppkurven des Aufliegers zu berücksichtigen. Dabei fallen diese größer aus als bei einem Drehschemel-Anhänger oder einem Fahrzeug mit Wechselbrücke. Dies wurde beim Design des *virtuellen Fahrers* berücksichtigt, indem dieser fortlaufend durch eine interne Bahnplanung vorausschauend während der Fahrt eine Trajektorie aus den vorgegebenen Zugfahrzeug- und Aufliegerabmessungen berechnet und die Kurvenbereiche so durchfährt, dass es keine Verletzung des übergeordneten vorgegebenen Fahrschlauchs gibt. Dabei müssen in den engen Kurven des Logistikhofs die übergeordneten Fahrschläuche ausreichend breit ausgelegt sein. Sollte ein Durchfahren einer Kurve ohne Verletzung der Randbereiche des Fahrschlauchs nicht möglich sein, hält das Fahrzeug an.



Abbildung 72: Autonome Fahrt auf der ZF Testbahn in Jevern mit Auflieger, rechts Onlinevisualisierung

Bei der Vorwärtsfahrt stellt sich immer ein stabiler Knickwinkel zwischen Zugfahrzeug und Auflieger ein, sodass in dem Fahrregler selbst, abgesehen von der Überwachung der Schleppkurven in der Pfadplanung, dieser nicht berücksichtigt werden muss. Die Knickwinkelbestimmung während der Vorwärtsfahrt kann ohne zusätzliche Sensorik auskommen und allein aus den Bewegungsinformationen des Zugfahrzeugs berechnet werden.



Abbildung 73: Autonome Fahrt um eine Kurve mit Sicherheitsfahrer in der Kabine auf dem DACHSER Betriebsgelände in Langenau

Rückwärtsfahren

Beim Rückwärtsfahren wird der Auflieger geschoben und der Knickwinkel zeigt ein instabiles Verhalten. Ohne fortlaufende Lenkkorrekturen würde der Zug komplett einknicken und der Auflieger letztendlich mit der Kabine kollidieren. Durch das instabile Verhalten ist es auch nicht mehr möglich, den Knickwinkel aus der Bewegung des Zugfahrzeugs zu bestimmen, daher wurde an der Sattelkupplung ein zusätzlicher Knickwinkelsensor angebracht.

Auflieger an die Rampe / Abstellplatz fahren

Das Rangieren des Aufliegers an die Rampe oder auf einen Abstellplatz erfolgt immer rückwärts. Erschwerend stellte sich hierbei die Positionsbestimmung des Aufliegers heraus. Da die Ortung über Lidar und GNSS relativ zum Zugfahrzeug erfolgt, wird die Position des Aufliegers über den gemessenen Knickwinkel und die bekannte Aufliegergeometrie errechnet. Aufgrund der Länge des Aufliegers erzeugen dabei schon kleine Messfehler in der Orientierung des Zugfahrzeugs oder Abweichungen im Knickwinkelsensor hohe Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung des Hecks des Aufliegers (Abbildung 74).

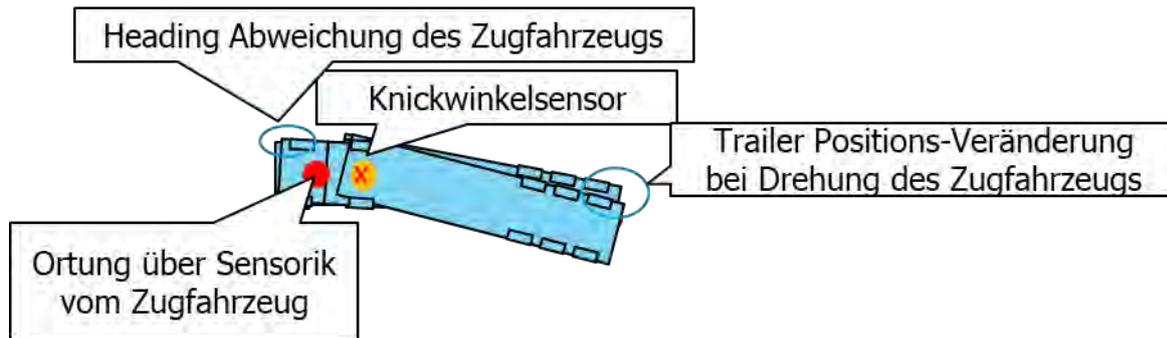


Abbildung 74: Problematik der Heading-Abweichung Zugfahrzeug und Auflieger-Heckposition

Insbesondere das Heck muss aber beim Anfahren an die Laderampen sehr genau positioniert werden. Aus diesem Grund wurde der Auflieger am Heck mit einem zusätzlichen Lidar ausgerüstet, welcher bei Anfahrt an die Rampe die Positionsbestimmung unterstützt und von der Götting KG in AP 4.10 untersucht wurde.



Abbildung 75: Rückwärtiger Lidar am Aufliegerheck

4.8. Sicheres automatisches Handling Wechselbrücke (AP 4.8)

Im Folgenden werden die Arbeiten zum sicheren Handling von Wechselbrücken beschrieben.

Hardwareausrüstung des Hubtischs

Um die sichere Handhabung einer Wechselbrücke gewährleisten zu können, wurde der Hubtisch mit verschiedenen Sensoren und Aktoren ausgerüstet.

Neben dem vorhandenen festen Containeranschlag wurde ein hydraulisch ausfahrbarer Containeranschlag angebaut. Dies ermöglicht das sichere Handling beider Wechselbrücken-Typen, C782 und C745, da sie aufgrund der unterschiedlichen Größen auch unterschiedliche Positionen auf dem Hubtisch haben. Außerdem sind die Twistlocks hydraulisch ansteuerbar und deren Zustand (geöffnet und verriegelt) wird sicher überwacht.

Zusätzlich wurden mehrere sichere Näherungsschalter an unterschiedlichen Positionen auf dem Hubtisch angebracht. Der sichere Beladungszustand wird durch eine entsprechende Kombination der Output-Signale dieser Näherungsschalter festgestellt.

Das Detektieren der Beladung des Fahrzeugs ist notwendig, da sich die Konturen des Fahrzeugs abhängig von der Ladung ändern. Außerdem kann auf diese Weise sichergestellt werden, dass nur korrekt geladene und verriegelte Wechselbrücken transportiert werden.



Abbildung 76: Ausrüstung des Wechselbrückenhubwagens für ein sicheres Wechselbrücken-Handling

Ermitteln des sicheren Beladungszustands

Sicheres Erkennen des Zustands „Unbeladen“

Vom Zustand „Unbeladen“ kann dann ausgegangen werden, wenn die Position „Hubtisch ganz unten“ sicher erkannt wird, die Twistlocks geöffnet sind und die Näherungsschalter zur Erkennung der Wechselbrücke den Zustand „Frei“ detektieren.

Sicheres Erkennen des Zustands „Sicher beladen“

Nach dem Anheben und der Prüfung der Position wird die hydraulische Containerverriegelung geschlossen. Der Zustand der Verriegelung wird dabei überwacht. Ist die Verriegelung geschlossen und die vorher ermittelte Position der Wechselbrücke immer noch gültig, kann angenommen werden, dass der Aufnahmeprozess erfolgreich war und das Fahrzeug sicher beladen ist.

Sollte nach dem Verriegeln einer oder mehrere der Näherungsschalter zur Erkennung der Brückenposition den Zustand „Frei“ senden, deutet dies darauf hin, dass entweder die falsche Brückengröße gewählt wurde und die Verriegelung den Container angehoben hat, dass die Brücke

falsch bzw. schlecht positioniert war und beim Verriegeln verschoben wurde oder die Verriegelung aus anderen Gründen nicht in die dafür vorgesehene Öffnung an der Brücke greifen konnte. In diesem Fall war der Beladungsvorgang nicht erfolgreich und es müssen Maßnahmen ergriffen werden.

Sicheres Erkennen der Position des Wechselbrücke auf der Hubtisch

Bei einer 745er Brücke wird vor dem Unterfahren der hydraulische Containeranschlag ausgefahren, bei einer 782er Brücke wird dieser vor dem Unterfahren eingefahren. Die Position des hydraulischen Containeranschlags wird dabei detektiert. Die Twistlocks müssen geöffnet sein.

Es wird so lange unterfahren, bis die Wippe an dem entsprechenden Containeranschlag aktiviert wird und diese den Zustand „Erkannt“ meldet. Während und nach dem Anheben erkennen die Näherungsschalter neben den Twistlocks, dass eine Brücke aufliegt, dabei müssen die Näherungsschalter auf beiden Seiten denselben Zustand annehmen. Ist dies der Fall und wird die Brücke immer noch am Containeranschlag erkannt, kann angenommen werden, dass eine Brücke korrekt auf dem Hubtisch aufliegt. Dies gibt noch keine Auskunft darüber, dass die Brücke gesichert ist.

Sicheres Unterfahren einen Wechselbrücke

Beim Unterfahren bewegt sich das Fahrzeug rückwärts und unbeladen unter die Wechselbrücke, dabei befindet sich der Gefahrenbereich ebenfalls unter der Wechselbrücke.

Für das Projekt SAFE 20 wurden Sicherheitsscanner von SICK (SICK Outdoor Scan) mit einem PL d verwendet. Da es oft reguläre und statische Hindernisse direkt hinter den Abstell- und Aufnahmepositionen gibt (wie Wände, Überladerampe, etc.), werden die Schutzfelder der Sicherheitsscanner häufig fälschlicherweise ausgelöst. Aus diesem Grund wurde der folgende Prozess fahrzeugseitig umgesetzt.

Bevor das Unterfahrmanöver gestartet wird, fährt das Fahrzeug vor den Stellplatz und prüft, ob darauf eine Wechselbrücke steht sowie deren Position. Wurde die Brücke erkannt, wird mittels Lidar-Daten der Bereich um und unter der Wechselbrücke auf Personen und Hindernisse gescannt. Sollte die Erkennung ausgelöst werden, wird die Mission abgebrochen. Wenn keine Objekte erkannt werden, werden die Schutzfelder abgeschaltet und das Fahrzeug fährt rückwärts mit einer limitierten Geschwindigkeit von 1 km/h unter die Wechselbrücke. Dabei wird ein akustisches Warnsignal aktiviert.

Nachdem die Wechselbrücke bis zum entsprechenden Anschlag unterfahren wurde, erfolgt das Anheben des Hubtisches. Am Ende des Prozesses wird mittels des sicheren Näherungsschalters geprüft, ob die Wechselbrücke richtig geladen wurde. Wenn ein Sensor-Signal nicht stimmt, wird die Mission abgebrochen. Das Fahrzeug kann im automatischen Modus nur mit dem Zustand „Sicher beladen“ oder „Sicher unbeladen“ fahren.

Sicheres Abstellen einer Wechselbrücke

Das Abstellen einer Wechselbrücke erfolgt auf ähnliche Weise wie das Aufnehmen. Zuerst wird rückwärts vor den entsprechenden Stellplatz oder das Gate gefahren. Der Gefahrenbereich befindet sich hierbei auf dem Stellplatz oder dem Gate hinter dem beladenen Fahrzeug. Es werden die gleichen Sicherheitsscanner verwendet wie beim Aufnehmen einer Wechselbrücke.

Der folgende Prozess wird fahrzeugseitig umgesetzt:

Von der Vorposition wird der Gefahrenbereich auf Objekte und Personen gescannt, im Falle einer Detektion wird die Mission abgebrochen. Wenn keine Objekte erkannt werden, werden die Schutzfelder abgeschaltet und das Fahrzeug fährt mit einer begrenzten Geschwindigkeit von 1 km/h rückwärts bis zur kartierten Position. Dabei wird das akustische Warnsignal aktiviert. Danach erfolgt das Abstellen der Wechselbrücke. Am Ende des Prozesses wird mittels des sicheren Näherungsschalters geprüft, dass der Hubtisch unbeladen ist. Wenn ein Sensor-Signal nicht stimmt, wird die Mission abgebrochen. Ziel ist es, die Weiterentwicklung so voranzutreiben, dass Sicherheitsscanner verwendet werden können, die eine adaptive Schutzfeld-Konfiguration ermöglichen. Damit könnte man die Schutzfelder sowohl beim Unterfahren einer Brücke als auch beim Abstellen am Gate bis zum Schluss aktiv lassen.

4.9. Sicheres Handling Verteiler-Lkw (AP 4.9)

Das Ziel des Arbeitspakets bestand darin, das komplette Fahrzeugsteuerungssystem des im Vorgängerprojekt AutoTruck³⁰ 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 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.

³⁰ (Fraunhofer IVI, 2019)

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 Trajektorien-Folgeregung 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 Folgeregung dient.

Für den Verteiler-Lkw wurde ein neues Regelungskonzept entwickelt und umgesetzt, das die Anforderungen im SAFE20-Kontext erfüllt. Resultat ist eine Pfadfolgeregung 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.

4.10. Hochverfügbare Ortung mittels Fusionssystem (AP 4.10)

Das Ziel des APs ist ein Ortungssystem, welches die Sensorquellen (Odometrie, GNSS, Lidar etc.) so zusammenführt, dass als Ausgangswert ein möglichst präziser, rauschfreier und aktueller Wert für die Pose (Position und Orientierung) ausgegeben werden kann. Als wesentlicher Bestandteil dieses Systems sollte für die Berechnung der Pose eine globale Lokalisierung durch Lidar-Daten entwickelt werden. Mittels eines SLAM-Verfahrens (Simultaneous Localization and Mapping) werden die Daten zu einer Karte zusammengefügt, die als Grundlage für eine automatische Bestimmung der Ego-Pose des Fahrzeugs dient.

Zur Vereinfachung und Ausweitung der Testmöglichkeiten mit realen Fahrzeugen wurde intensiv an einer Simulationsumgebung für das Mapping und die Lokalisierung gearbeitet. In der Umgebung (aufbauend auf der Software Gazebo) können Fahrzeuge, statische und dynamische Hindernisse sowie Sensoren erzeugt werden. Bei den Sensoren werden die relevanten Parameter berücksichtigt (z. B. Reichweite, Auflösung, verschiedene Fehler). Mit den generierten Sensordaten konnten die Algorithmen zur Fusion einfach, aber mit hoher Aussagekraft, getestet werden. Beispielsweise konnten nach einer Kartenaufnahme störende Hindernisse eingebracht werden, die das Scanbild einschränken, um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit zu analysieren. Die Simulationsumgebung umfasst zum einen das Fahrzeugmodell eines Lkws mit Anhänger und zum anderen den Betriebshof von DACHSER mit den wesentlichen Hallen, den Rampen, einigen Bäumen/Büschen sowie exemplarischen Gegenständen. Die Entfernung zwischen Königszapfen und Drehpunkt des Anhängers bei der Rückwärtsfahrt wird in der Realität u. a. durch die Hubhöhe der Kupplung, die Beladung, den Reifendruck und die Bodenverhältnisse beeinflusst, so dass kein fester Wert ermittelt werden konnte. Daher kann der Wert in der Simulation zusätzlich variiert werden.



Abbildung 77: Fahrzeugmodell des KAMAG PT mit Anhänger



Abbildung 78: Simulationsumgebung des DACHSER Logistikzentrums in Langenau

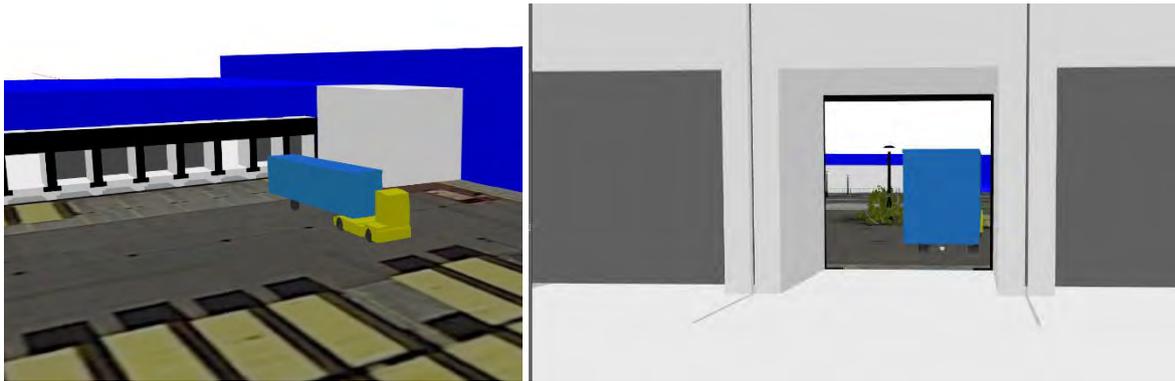


Abbildung 79: Innen- und Außenansicht von Verladetoren bei DACHSER in Gazebo

Im Projektverlauf wurden verschiedene Versionen der Karte des Betriebshofs erstellt, die die Konturen der Objekte auf Scanhöhe darstellen. Dabei kamen sowohl simulierte als auch reale Daten von Messungen auf dem Betriebshof von DACHSER in Langenau zum Einsatz.

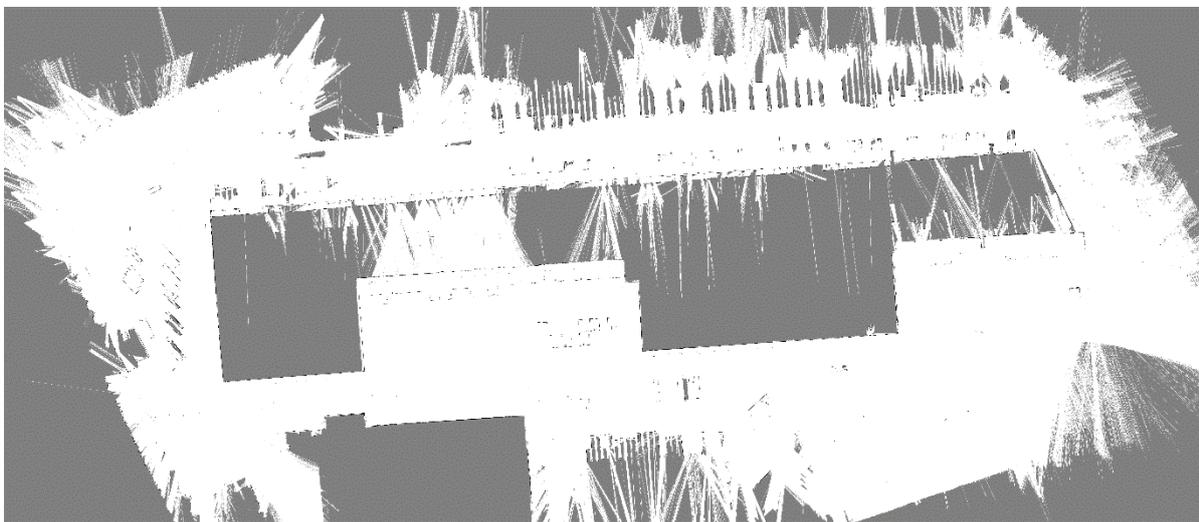


Abbildung 80: Karte des Betriebsgeländes von DACHSER in Langenau

Anhand der Modelle konnten Bereiche mit guten oder schlechten Eigenschaften der einzelnen Fusionsbestandteile identifiziert werden. Beispielsweise können Orte mit schwierigen Bedingungen für die Lokalisierung mittels Lidarsensoren (z. B. keine Konturen oder weit entfernt, hohe Dynamik, Verdeckungen) bestimmt werden, sodass dort eine niedrige Gewichtung dieses Bestandteils in die Fusion eingeht. Folgende Grafik zeigt die Eignung der Flächen ohne Berücksichtigung der Dynamik (verdeckte Sicht durch stehende oder fahrende Wechselbrücken/Trailer, andere Fahrzeuge).

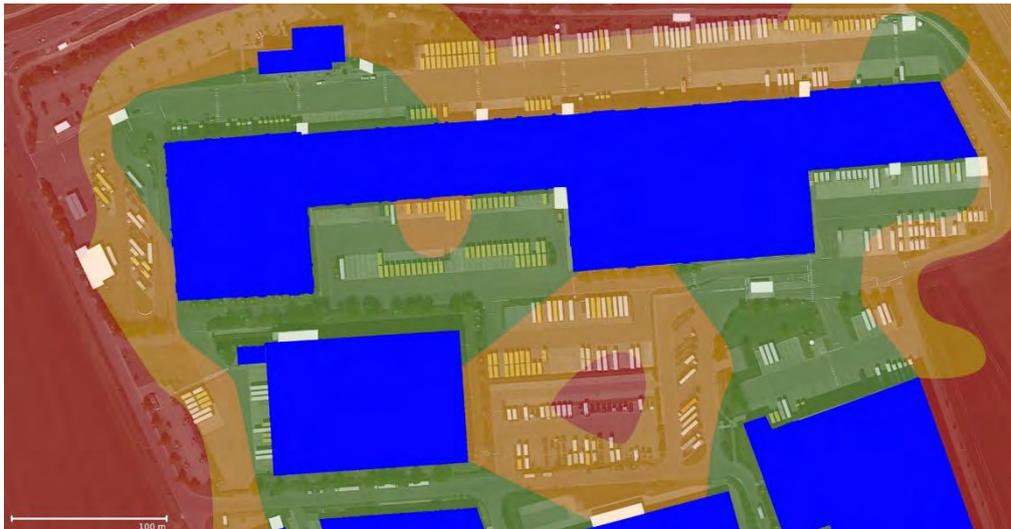


Abbildung 81: Eignung der Laserlokalisierung am Standort von DACHSER

Hinsichtlich der Positionsrechnung wurde die Verwendung von Partikel-Filtern intensiv untersucht. Zum einen wurde ein open-source AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) angewendet. Da dieser bei den Versuchen nicht immer optimale Ergebnisse gezeigt hat, wurde zum anderen ein selbstentwickelter Partikel-Filter (PFL) im Projekt eingesetzt. Ein Vergleich zeigt, dass der AMCL bei einer vollständigen und aktuellen Kartenbasis einen glatteren Kurvenverlauf ermöglicht. In einer dynamischen Umgebung, insbesondere bei fehlenden Informationen, konnte mit dem PFL aber ein deutlich stabileres Verhalten erreicht werden. Um diesen wichtigen Effekt zu stärken, wurde eine Funktion zum automatischen Aktualisieren der Karte während des Betriebs entwickelt. Dabei bleibt eine grundlegende Karte, die bei der Inbetriebnahme erstellt wurde, erhalten. Darüber hinaus gibt es aber einen Layer mit einer online erstellten Karte, die bei der Fahrt regelmäßig aktualisiert wird. Mit der Kombination können Strecken überbrückt werden, in denen sich die Umgebung im Vergleich mit der Basiskarte deutlich verändert hat. Es ist dazu allerdings notwendig, dass die Beobachtungen zur Aktualisierung der Karte in regelmäßigen Abständen erfolgen.

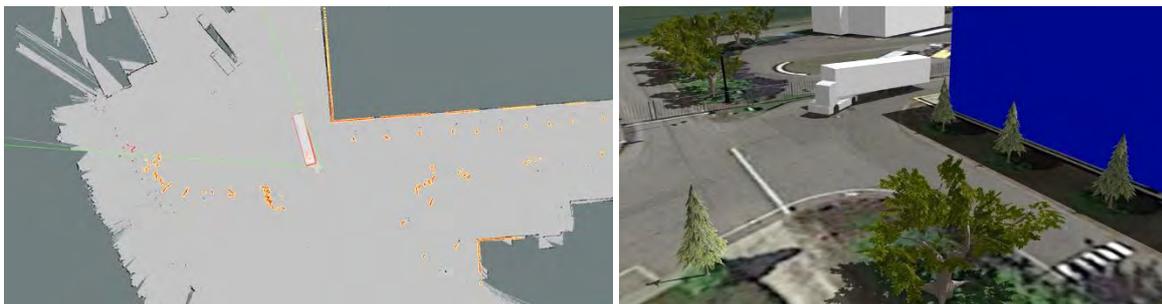


Abbildung 82: Visualisierung der Lidar-Lokalisierung mit PFL

Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit ohne Einschränkungen der Verfügbarkeit wurden verschiedene Maßnahmen analysiert und eingeführt. Für die Lidar-basierte Komponente wurde die Winkelabhängigkeit des Sichtbereichs (Field of View – FOV) betrachtet. Da es durch die Auswahl der Sensorik oder die Anbringung am Fahrzeug Einschränkungen des Öffnungswinkels geben kann,

wurde die Auswirkung auf die Genauigkeit methodisch untersucht. In günstigen Umgebungen kann im Allgemeinen ein Öffnungswinkel zwischen 180° und 360° als ausreichend angesehen werden. Mit 90° FOV sind die Ergebnisse in vielen Umgebungen nicht mehr ausreichend für eine Regelung des Fahrzeugs. Mit den Ergebnissen wurde das Konzept zur Fusion der Pose entsprechend angepasst.

Als weitere Maßnahme zur Stabilisierung der Pose wurde eine Funktion zur Berechnung einer Odometrie aus Lidardaten entwickelt. Diese Lidar-Odometrie wird als zusätzlicher Bestandteil der Fusion genutzt. Die Anwendung der Lidarsensoren ermöglicht eine fahrzeugunabhängige Berechnung ohne Radencoder und ist insbesondere vorteilhaft bei blockierten oder rutschenden Rädern (z. B. bei einer Notbremsung). Zur Berechnung wird die Distanz und Drehung von Features in aufeinanderfolgenden Scans verfolgt, um so einen Rückschluss auf die Bewegung des Sensors (und somit letztlich des Fahrzeugs) ziehen zu können. Weiterhin wurde die Software des Lokalisierungssystems mit einem Filter für mitbewegte Anbauteile (z. B. Anhänger) erweitert. Der vorrangige Zweck ist die Entfernung des Trailers aus dem Laserscan, damit die Lokalisierung (insbesondere das Online-Mapping) nicht verschlechtert wird. Die Funktion nutzt als Input die Kontur sowie ggf. den Drehpunkt und den Knickwinkel der auszublenkenden Objekte. Die Kombinierbarkeit mit anderen Laserfiltern oder eine Mehrfachnutzung ist gegeben.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Fusionssystems ist das GNSS (Global Navigation Satellite System). Das System wurde im KAMAG PT für die lokalen Bedingungen konfiguriert und in Betrieb genommen. Softwareseitig wurde die Integration zur Übersetzung der Daten aus dem GNSS-Empfänger in das ROS-Format erfolgreich durchgeführt, sodass eine zweite globale Pose zur Verfügung steht.

Um den Integrations- und Testaufwand für die beteiligten Partner niedrig zu halten, wurde im Projektverlauf beschlossen, dass das relative Peilungsverfahren zur Erkennung der Rampe als weitere Eingangsquelle in das Fusionssystem einbezogen werden soll. Für diesen Anwendungsfall wird die Lokalisierung mit der Rampeninformation fusioniert, sodass die Regelung in der Nähe der Rampe präziser wird. Bei der Fusion ist eine Parametertuning entscheidend, welche Informationen bei welchen Bedingungen unterschiedlich stark gewichtet werden.

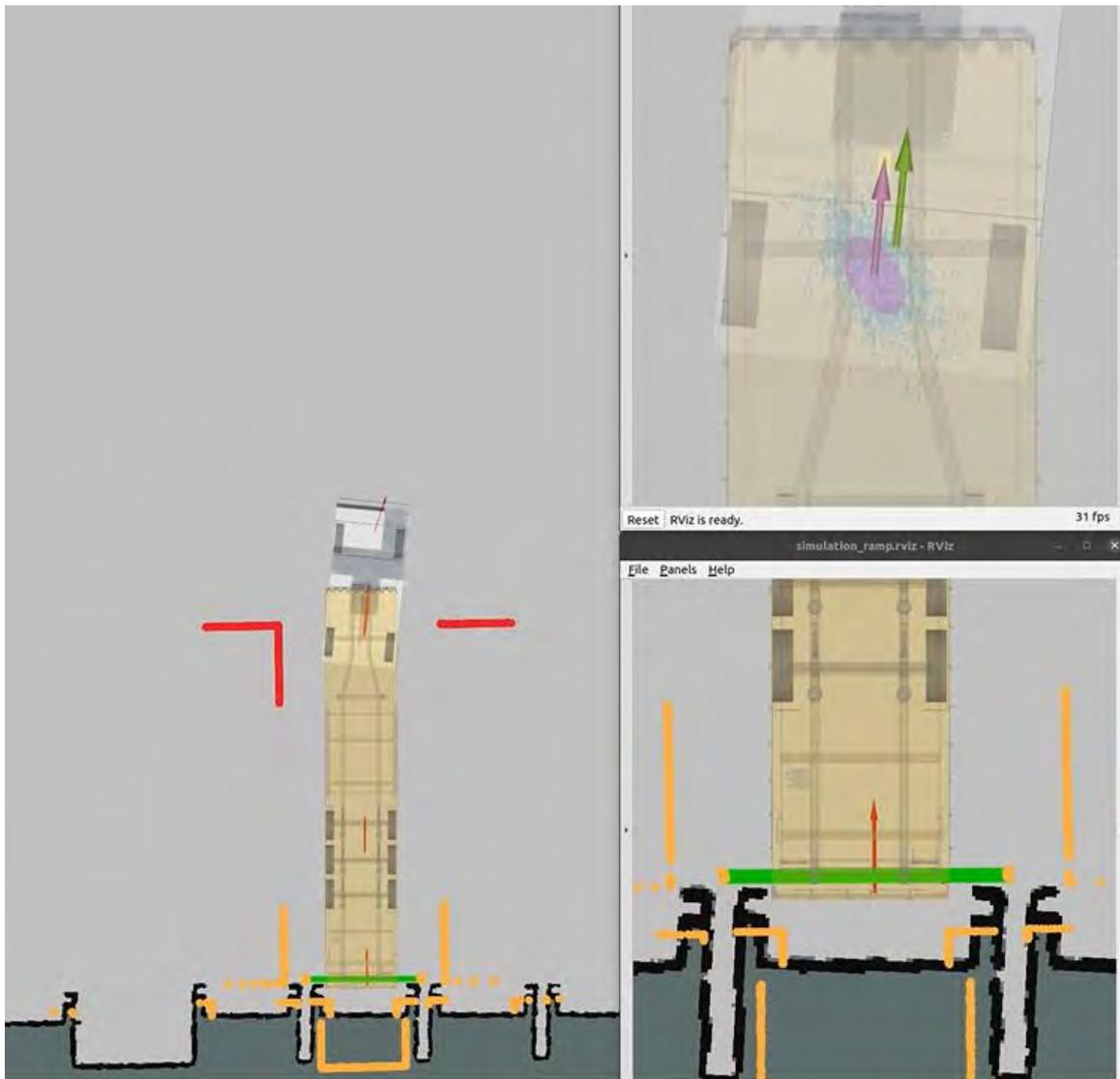


Abbildung 83: Visualisierung der Fusion aus Rampenerkennung und globaler Lokalisierung

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass das Peilungsverfahren einen deutlichen Einfluss auf die Genauigkeit haben kann: Wenn die Bedingungen für die globale Lokalisierung (z. B. mittels GNSS) sehr gut ist, kann eine Lokalisierungsgenauigkeit im Bereich der Antennen von ca. 2 cm erreicht werden. Da die Frequenz der GNSS-Pose zudem sehr hoch ist, ist in diesem Fall der Einfluss des Peilungsverfahrens durch die niedrigere Berechnungshäufigkeit und der schlechteren Varianz gering. Wenn die globale Lokalisierung allerdings gestört ist, z. B. bei verdeckter Sicht der Lidar-Lokalisierung, dann hat das Peilungsverfahren einen wesentlichen positiven Anteil am Ergebnis.

Ergänzend wurde im Projektverlauf an der Bestimmung eines Qualitätsindikators für das Lokalisierungssystem gearbeitet. Das Ziel war es, den Status des Fusionssystems für die verbundenen Steuerungen in einfacher Weise darzustellen, damit eine entsprechende Reaktion erfolgen kann. Beispielsweise sollte bei einer unzureichenden Genauigkeit der Pose folglich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs vermindert werden. Dazu werden die einzelnen Informationen des Lokalisierungssystems

miteinander verglichen und deren zeitlicher Verlauf plausibilisiert. Als Ergebnis können Aussagen zur Wahrscheinlichkeit und Qualität getroffen werden.

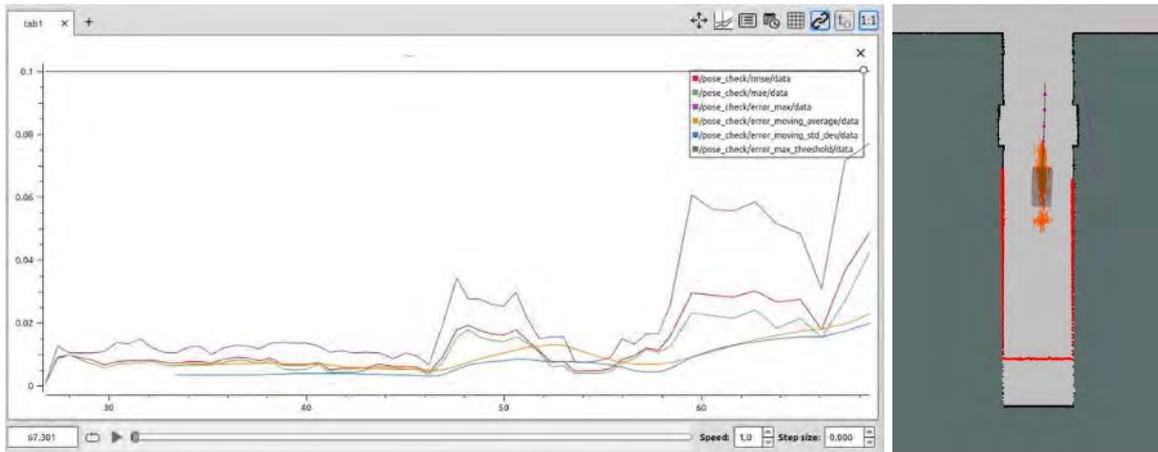


Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Qualität der Lidar-Lokalisierung mit aktueller Szene (rechts)

Zur Vereinfachung der Komplexität wird dann mittels einer ternären (dreiwertigen) Logik ein Lokalisierungsstatus ausgegeben.

- „Grün“: Alle Lokalisierungsquellen sind in Betrieb genommen (z. B. Mapping für die Lidar-Lokalisierung) und die Schnittstellen sind online. Zusätzlich sind die aktiven (notwendigen) Quellen verfügbar, also unter den aktuellen Bedingungen funktionsfähig. Die Odometrie liefert regelmäßig Daten. Die Update-Rate wird überwacht. Die Qualität der fusionierten Pose liegt innerhalb eines erlaubten Schwellwerts. Es sind keine Einschränkungen für den Fahrbetrieb zu erwarten.
- „Gelb“: Wie grün, aber es wird eine andere Schwelle für die Qualität erlaubt. Die Fahrgeschwindigkeit sollte ggf. reduziert werden.
- „Rot“: Mindestens eine aktive Quelle ist gestört oder die Qualität unterschreitet ein Mindestmaß. Die berechnete Pose ist außerhalb eines erlaubten Bereichs (Geofencing). Die Pose sollte nicht verwendet werden bzw. das Fahrzeug sollte stoppen.

Das entwickelte Fusionssystem hat eine erfolgreiche Möglichkeit geschaffen, die Stärken der unterschiedlichen Verfahren zu einer kombinierten Information zu verarbeiten, die die Schwächen einzelner Bestandteile ausgleichen kann. Somit kann eine durchgehend stabile Pose an die Fahrzeugregelung übergeben werden.

4.11. Schnittstelle autonomes Fahren (AP 4.11)

Die Automatisierung eines Fahrzeugs wird in der Regel auf Basis eines vorhandenen, manuell geführten Serienfahrzeugs aufgebaut. Ziel ist es, Kosten und Zeit für die Entwicklung des automatisierten Fahrzeugs zu reduzieren, das nur in Kleinserien oder sogar als Einzelstück produziert wird. So wird das Ursprungsfahrzeug um die für die Automatisierung notwendigen Komponenten erweitert.

Die daraus resultierende Fahrzeugarchitektur kann in die folgenden drei Bereiche unterteilt werden (Abbildung 85):

- das Originalfahrzeug,
- die Automatisierungsplattform,
- der virtuelle Fahrer.

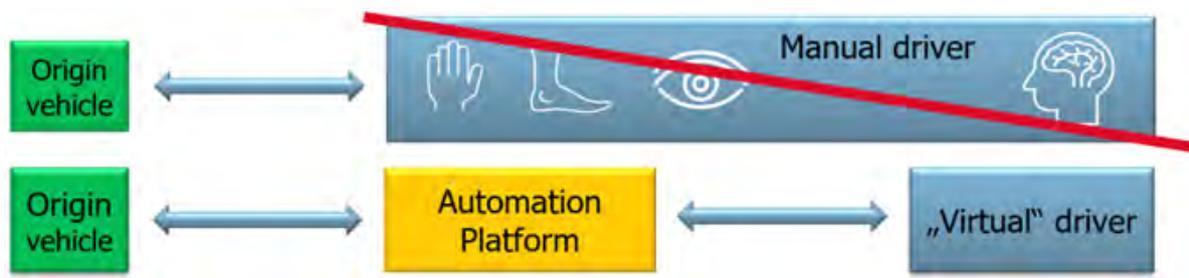


Abbildung 85: Komponenten der Fahrzeugautomatisierung und der entsprechende Teil des menschlichen Fahrers, der ersetzt wird.

Originalfahrzeug

Dazu gehört das ursprüngliche Serienfahrzeug, das von einem Fahrer manuell gesteuert wird. Die Kommunikation erfolgt hauptsächlich über einen Fahrzeug-CAN-Bus nach dem Standard SAE J1939³¹, einem standardisierten Kommunikationsprotokoll für Nutzfahrzeuge. Über diesen CAN-Bus werden auch die Eingaben des Fahrers zur manuellen Steuerung des Fahrzeugs kommuniziert. Da das Originalfahrzeug dem freigegebenen und getesteten Serienzustand entspricht, ist dies die Rückfall-Ebene im Falle eines Automatisierungsausfalls. Ziel ist es, möglichst viele Funktionen und Komponenten aus dem Originalfahrzeug wiederzuverwenden, um den Aufwand und die Kosten für die Automatisierung so gering wie möglich zu halten. Im Rahmen von SAFE20 wurden zwei Hofschlepper von KAMAG verwendet: ein KAMAG PT zum Transport von Sattelaufliegern und ein KAMAG PM zum Transport von Wechselbrücken. Bei dem KAMAG PT handelt es sich um ein dieselbetriebenes Fahrzeug mit einem durch den Fahrer manuell gesteuerten hydrostatischen Fahrtrieb und hydrostatischer Lenkung. Der KAMAG PM ist mit einem Elektroantrieb ausgerüstet.

Automatisierungsplattform

Um das Fahrzeug zu automatisieren, werden zusätzliche Aktuatoren, Sensoren und Steuerungsfunktionen benötigt. Im weitesten Sinne ersetzen diese Erweiterungen die Füße, Hände und Augen des menschlichen Fahrers.

³¹ (Society of Automotive Engineers (SAE), 2011)

Ein Beispiel für einen automatisierten Aktuator kann das verwendete Bremssystem (s. Abbildung 86) sein. Neben den im Kapitel 4.2 beschriebenen notwendigen Umbaumaßnahmen der sicheren Notbremse, bei der das Ziel ein minimaler Bremsweg ist, ist das Ziel bei einer normalen autonomen Fahrt in aller Regel, an einem bestimmten Punkt zielgenau anzuhalten (z. B. Haltelinien, Rangieren an die Rampe, Ankuppeln des Aufliegers). Der Fahrer macht dies durch gezielte Betätigung der Beschleunigungs- und Bremspedale. So kann z. B. der hydrostatische Antrieb oder auch ein Elektromotor schon ein hohes Schleppmoment erzeugen, welches allein zum zielgenauen Anhalten geeignet ist. Für die Automatisierung muss eine Abstandsregelung umgesetzt werden, welche die Aktoren hydrostatischer Antrieb/Elektromotor und Betriebsbremse entsprechend ansteuert.

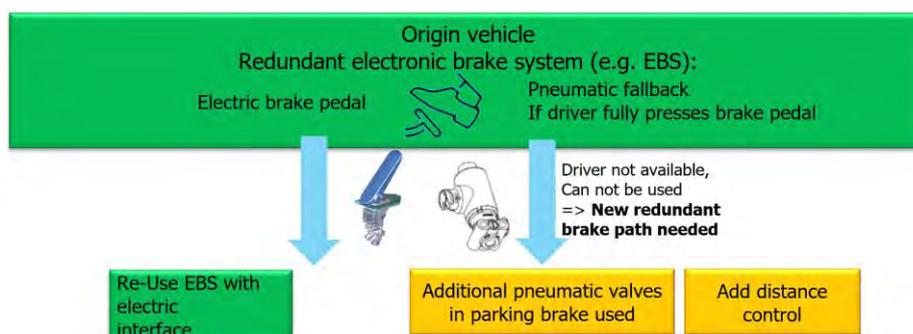


Abbildung 86: Beispiel für eine automatisierte Komponente: Das Ursprungsfahrzeug ist grün eingefärbt, die durch die Automatisierungsplattform zusätzlich hinzugefügten Komponenten sind gelb eingefärbt.

Neben der Bremse mussten weitere Komponenten, wie z. B. der hydrostatische Antrieb, die hydrostatische Lenkung und die Sattelkupplung (siehe auch Kap. 4.7 „Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)“) automatisiert werden. Im Laufe des Projekts wurden daher verschiedene detaillierte Architekturen erstellt, um die Modifikationen des Fahrzeugs im Detail zu definieren.

Um diese Umgebung zu realisieren, wurde eine Entwicklungsplattform von ZF namens Autonomous Driving Open Platform Technology (ADOPT) eingesetzt.

Die Hauptaufgaben von ADOPT sind:

1. Zuverlässige Überwachung von Sicherheitseinrichtungen (z. B. Not-Aus), Fahrereingriffen (falls Teil des Konzepts) und Fehlern in externen Steuergeräten
2. Überführung des Fahrzeugs in einen sicheren Zustand im Fehlerfall
3. Überwachung und Trennung der Prototypenfunktionen vom Originalfahrzeug
4. Kommunikation und Steuerung von Fahrzeugsensoren und -aktoren
5. Bereitstellung einer generischen Schnittstelle für die Fahrzeugautomatisierung

Die im Rahmen des Projekts untersuchten Automatisierungsfunktionen und -komponenten werden nach der Zielsetzung *Level 5: Autonomes Fahren* entwickelt. Die Fahraufgaben sind selbstständig vom Fahrzeug ohne zusätzliches Personal im Fahrzeug durchzuführen. Auf dieser Basis wurde ein umfassendes Sicherheitskonzept erstellt und die geplanten Maßnahmen in den Fahrzeugen getestet.

Da die Eignung der entwickelten Funktionen hauptsächlich erst innerhalb der Testphase des Projekts untersucht wurde, war im Testbetrieb ein zusätzlicher Sicherheitsfahrer nötig.

Der Sicherheitsfahrer hatte die Aufgabe, den automatisierten Ablauf zu überwachen und im Notfall einzugreifen. Die ADOPT-Plattform und ihre Sicherheitsstrategie stellen sicher, dass jeder Eingriff des Fahrers erkannt wird. Dabei wurde jeder Eingriff des Fahrers als ein Fehler angesehen, das Fahrzeug durch einen Nothalt in den sicheren Zustand überführt und die Automatisierung mittels Safety Gateway sicher vom Fahrzeug getrennt (s. Abbildung 87). Dieses Design unterscheidet sich von der üblichen Variante, bei der ein Sicherheitsfahrer fest vorgesehen ist, der im Fehlerfall die Steuerung des Fahrzeugs übernehmen muss.

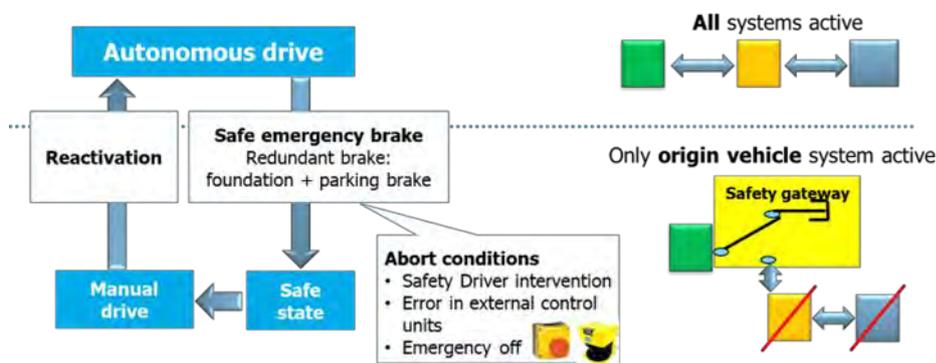


Abbildung 87: Sicherheitskonzept, Umschalten vom automatisierten Fahren in den abgesicherten Modus über eine Notbremse und Trennen der zusätzlichen Automatisierungskomponenten

Neben dem Nothalt, bei dem zwar das Interface der Automatisierung getrennt wird, die Automatisierung aber selbst weiter aktiv bleibt, gibt es noch den Notaus.

Der Notaus erfolgt entweder über Betätigung des Notausschalters oder der Erkennung schwerwiegender Fehler in der Automatisierung (z. B. Hardwarefehler). In diesem Fall wird die komplette Automatisierung elektrisch abgeschaltet.

Bei einem Nothalt kann nach Beseitigung des Auslösers die noch eingeschaltete Automatisierung sofort wieder in den autonomen Betrieb wechseln. Dies ist nach einem Notaus nicht möglich. Aufgrund der Abschaltung müssen alle Automatisierungskomponenten erst wieder hochfahren und die jeweiligen Initialisierungsphasen durchlaufen.

Zentrale Komponente ist dabei ein Safety Gateway genanntes Steuergerät innerhalb ADOPT, welches die Sicherheitsaufgaben übernimmt. Neben den Nothalt- und Notaus-Funktionalitäten wurden auf diesem weitere in AP 2 erarbeitete Sicherheitsmaßnahmen umgesetzt. Darunter fällt z. B. das Beleuchtungskonzept zur eindeutigen Signalisierung des aktuellen Betriebszustands der Automatisierung für außenstehende Personen oder eine *smooth drive off* genannte Funktion, welche von der ISO 3691-4³² abgeleitet wurde. Diese lässt bei jedem Anfahren des Fahrzeugs zuerst einen Warnton ertönen und limitiert die Fahrzeuggeschwindigkeit in den ersten Sekunden auf 1 km/h.

³² (International Organization for Standardization (ISO), 2020)

Diese Funktion soll es Außenstehenden ermöglichen, sich rechtzeitig aus dem Gefahrenbereich des Fahrzeugs zu entfernen.

Zusätzlich wurden in der ADOPT-Plattform Teile der Längs- und Querführung des Fahrzeugs umgesetzt. Dabei handelte es sich um kaskadierte Regelungen, bei denen die ADOPT-Plattform hauptsächlich die inneren Regelkreise mit direktem Zugriff auf die fahrzeugspezifische Aktorik übernimmt und der äußere Regelkreis durch den *virtuellen Fahrer* abgebildet wird. Für die Längsregelung bedeutete dies z. B. die Ausregelung eines von Lokalisierung, Karte und Mission abgeleiteten Geschwindigkeitsprofils des *virtuellen Fahrers*, welches an ADOPT übergeben wird und durch Regelung des Dieselmotors, des hydrostatischen Antriebs und der Betriebsbremse umgesetzt wird. Hier werden bevorzugt auch Verzögerungen durch das Schleppmoment des hydrostatischen Antriebs genutzt und die verschleißbehaftete Betriebsbremse möglichst nur bei einer Notbremsung verwendet. Die meiste Zeit wird die Fahrgeschwindigkeit somit über den hydrostatischen Antrieb geregelt. Die Besonderheit des hydrostatischen Antriebs ist seine variable, von der Drehzahl des Dieselmotors unabhängig einstellbare Übersetzung, wobei die hohe Nicht-Linearität und der begrenzte Stellbereich der Aktoren des hydrostatischen Antriebs die Geschwindigkeitsregelung erschwerten und aus diesem Grund zusätzlich die Motordrehzahl mit in den Regelkreis eingebunden wurde.

Virtueller Fahrer

ADOPT bietet eine Schnittstelle zur Ansprache der Fahrzeug-Aktoren und -Sensoren über eine vereinfachte generische Schnittstelle. Diese Schnittstelle wird vom *virtuellen Fahrer* verwendet. Dieser enthält die komplexen Automatisierungsfunktionen, die die Intelligenz des menschlichen Fahrers ersetzen sollen und sich in folgende Teilbereiche unterteilen lassen: Planung, Steuerung, Wahrnehmung und Lokalisierung.

Im Rahmen von SAFE20 wurde der *virtuelle Fahrer* in einem ROS-Netzwerk implementiert. Als zentrale Komponente befindet sich der ROS-Master in diesem Netzwerk, welcher mit der generischen Schnittstelle von ADOPT und der Kommunikation zum Leitstand verbunden ist. Vom Leitstand werden die Missionen empfangen, wobei der VDA 5050-Standard als Kommunikationsprotokoll für die Missionen ausgewählt wurde. Dabei handelt es sich um eine offene Kommunikationsschnittstelle zwischen fahrerlosen Transportsystemen. Die Architektur ist so konzipiert, dass keine zeitkritischen Informationen zwischen dem Leitstand und dem automatisierten Fahrzeug übertragen werden. Die Missionen werden als Ganzes an das Fahrzeug gesendet und von diesem Schritt für Schritt abgearbeitet.

Da der Leitstand und die Fahrzeugautomatisierung separat entwickelte Komponenten sind, wurde ein MQTT-Server verwendet, um Missionen zwischen dem Leitstand und dem Fahrzeug per Funk auszutauschen. Dies ermöglicht die Entwicklung der Fahrzeugautomatisierung und die Integration von Fahrzeugkomponenten unabhängig vom Leitstand, indem in der Entwicklungsphase Testmissionen direkt an den MQTT-Server gesendet werden. In dem ROS-Netzwerk sind dabei die unterschiedlichen Aufgaben der SAFE20-Partner zusammengeführt.

Infrastruktur

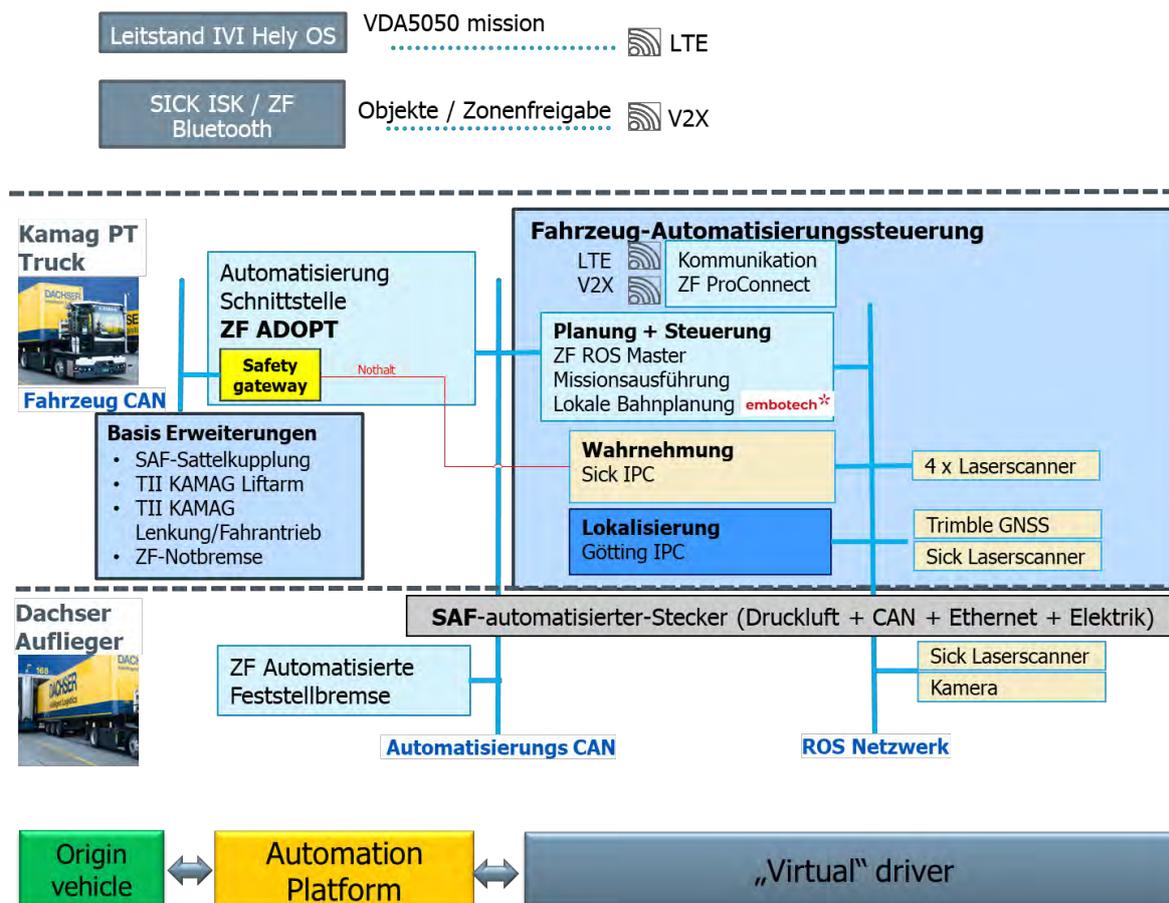


Abbildung 88: Aufbau des virtuellen Fahrers mit der Automatisierung im Projekt

So gibt es zwei weitere Rechner (IPC) im ROS-Netzwerk. Einer übernimmt dabei die Aufgaben der Lokalisierung und wurde durch die Götting KG auf Basis ihres Arbeitspaket 4.10 zur Verfügung gestellt. Für die Lokalisierung wird ein Trimble GNSS und SICK-Laserscanner verwendet und die ermittelte Position wird über das ROS-Netzwerk verteilt. Der zweite Rechner kümmert sich um die Wahrnehmung und wurde von SICK gestellt. Neben der ROS-Anbindung ist dieser auch direkt mit dem ADOPT-Sicherheitsgateway verbunden, um bei einer Schutzfeldverletzung einen Nothalt über eine sichere Kommunikationsleitung auszulösen. Dabei wurden auf dem Rechner die Erkenntnisse aus AP 6.1 / 6.2 „Sichere Umfeld-/Objekterfassung“ umgesetzt. Zusätzlich erhält er Informationen von den Infrastrukturknoten, welche über eine V2X-Kommunikation mittels der von ZF bereitgestellten ProConnect an das autonome Fahrzeug übermittelt und dort mit den durch die Fahrzeugsensorik erfassten Objekten fusioniert werden. Die Fahrzeugsensorik für die Lokalisierung und Ortung ist dabei direkt in das ROS-Netzwerk eingebunden.

Während der Integrationsphase wurde zusätzlich ein Konzept zur Zusammenführung der unterschiedlichen Geschwindigkeitsvorgaben mit den Partnern erarbeitet und innerhalb des *virtuellen Fahrers* umgesetzt (Abbildung 89).

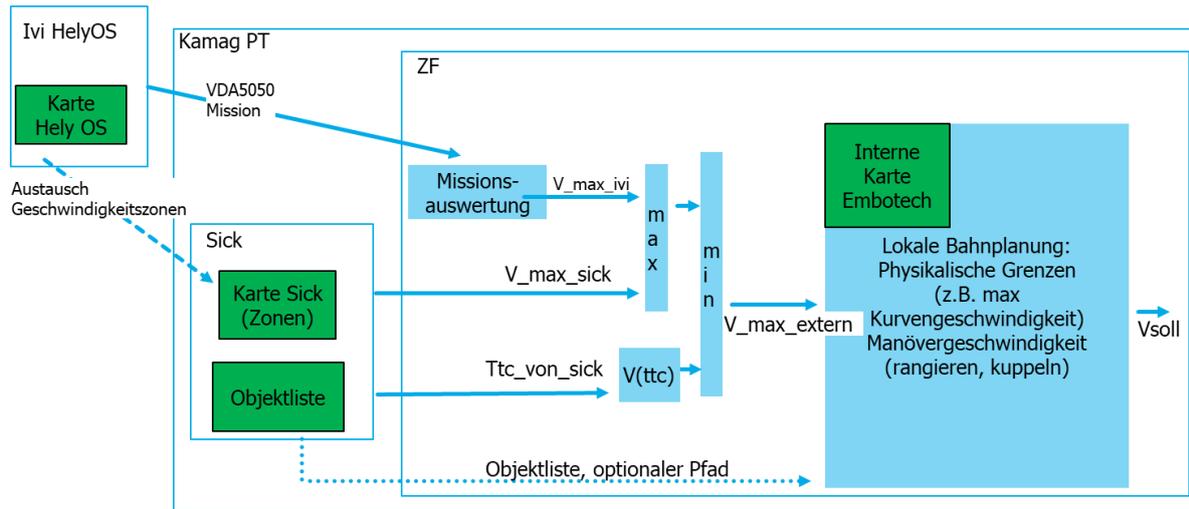


Abbildung 89: Verarbeitung der unterschiedlichen Geschwindigkeitsvorgaben

Der aufgebaute KAMAG PT wurde anschließend sowohl auf der ZF-Testbahn in Jevern als auch im DACHSER Logistikzentrum Ulm praktisch erprobt (siehe auch Kap. 7 „Schrittweise Systemintegration (AP 7)“).

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.

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 Bindergliedern 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).

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 Trajektorien-Folgerregelung 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 90. Ein Beispiel zweier simulierter Fahrzeuge auf dem ebenfalls simulierten DACHSER-Betriebshof zeigt Abbildung 91. Das Konzept der verteilten Simulationsumgebung wurde erfolgreich in zwei wissenschaftlichen Konferenzbeiträgen^{33 34} publiziert.

³³ (Keppler, Kramer, Koch, Wagner, & Janschek, Jan. 2022)

³⁴ (Kramer, Keppler, & Janschek, Mar. 2022)

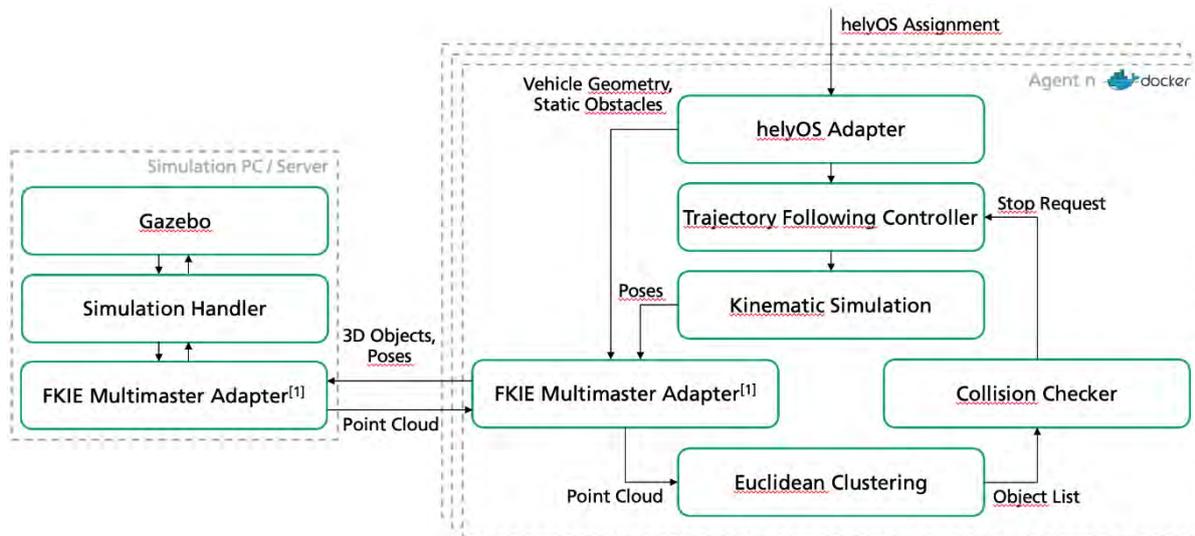


Abbildung 90: Konzept der Simulationsumgebung mit n jeweils in einem Docker-Container simulierten Agenten und dem gemeinsamen Gazebo-Umgebungsmodell des DACHSER-Betriebshofs

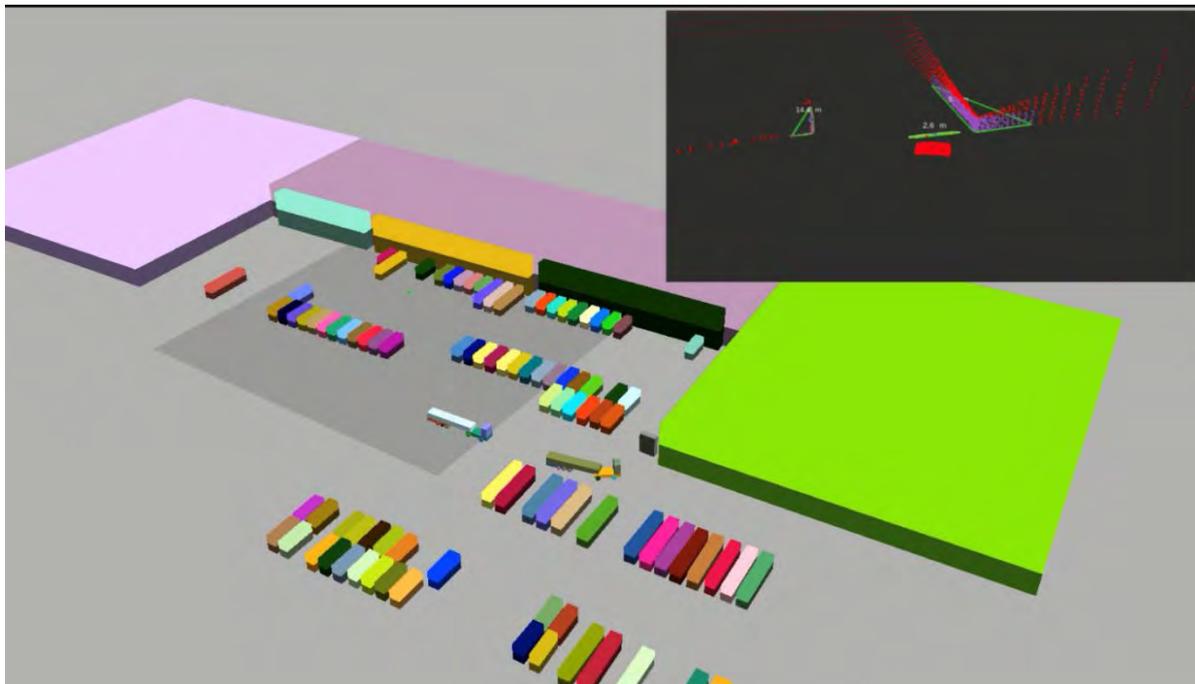


Abbildung 91: Simulierter Betriebshof mit zwei ebenfalls simulierten Fahrzeugen, die Laser-Scandaten aus deren Umgebung erhalten

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-Leitstandsystem eingebunden werden kann.

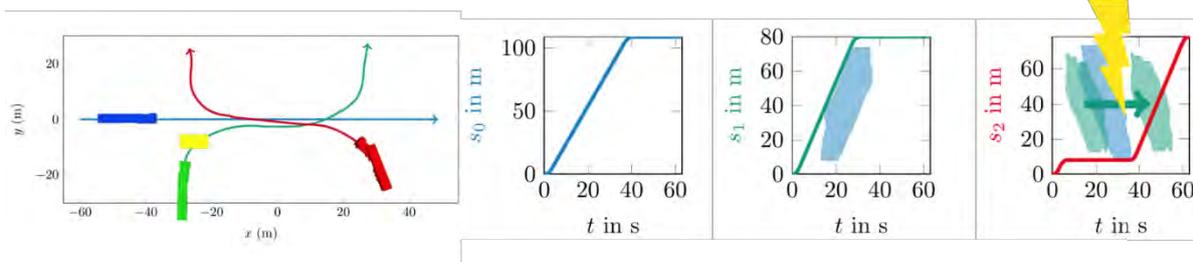


Abbildung 92: Beispielszenario, errechnete Geschwindigkeitsprofile (blau, grün, rot) und Störung (gelb)

Abbildung 92 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. al³⁵ 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 leitstandseitig 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 93 in dunkelgrün dargestellt, zu einem Konfliktbereich zusammengefasst.

³⁵ (Čáp, Gregoire, & Frazzoli, Oct. 2016)

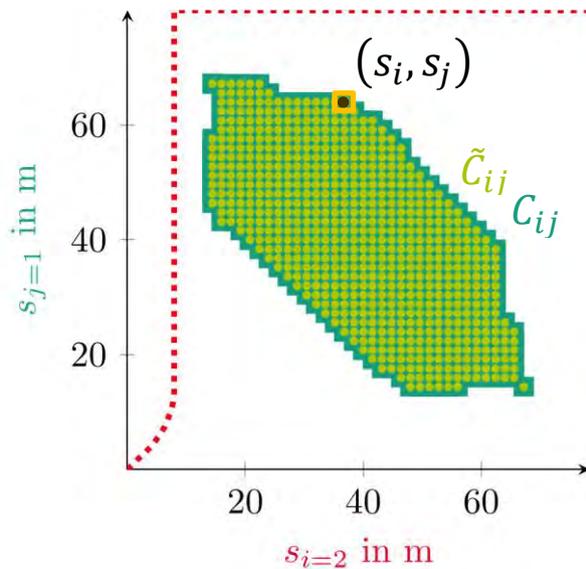


Abbildung 93: RMTRUCK Koordinationsraum mit originaler Trajektorienabstimmung zwischen Agent 1 und Agent 2 (rot gestrichelt) und Konfliktbereich (dunkelgrün)

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 94 dargestellt. Mittels zufällig generierter Szenarien wurden statistisch signifikante Daten zur Evaluation des Algorithmus gegenüber dem Stand der Technik erhoben, die nun in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung genutzt werden.

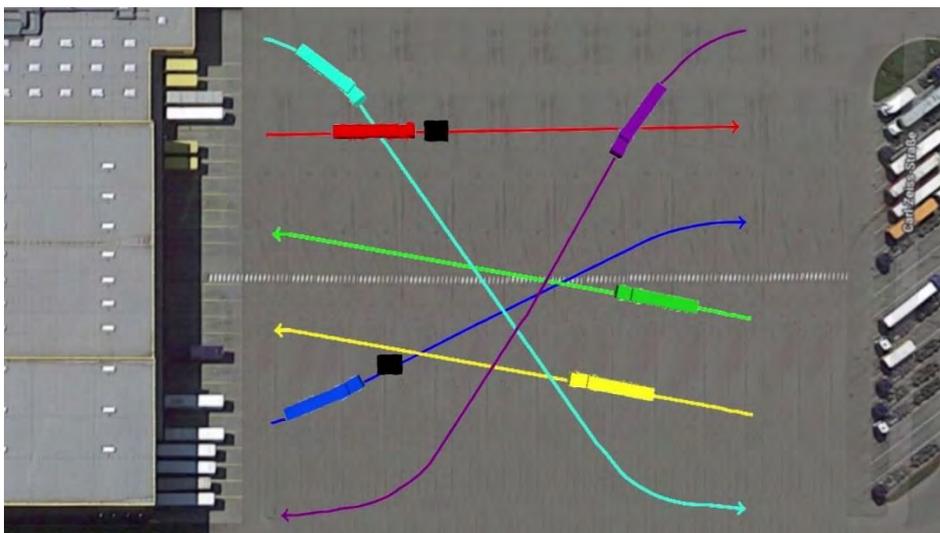


Abbildung 94: Beispielszenario mit sechs Agenten und zufällig eingestreuten Störungen

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 95 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 Durchfahrmöglichkeiten in der City-Map zu generieren.



Abbildung 95: 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 krümmungstetige Splines enthalten, damit die Krümmungsinformation für den Regler zur Verfügung steht, siehe Abbildung 96. Weiterhin sind Informationen zur Geschwindigkeit, wie auch Bereiche mit unterschiedlichen erlaubten Maximalgeschwindigkeiten sowie Punkte, an denen während der Fahrt kurz gestoppt werden soll, enthalten.

nicht möglich, das eigensichere Abfahren umzusetzen. Die Softwarestruktur des Reglers ist jedoch entsprechend vorbereitet, sodass er 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 Spurabweichungen bei hohen Geschwindigkeiten und Querschleunigungen, siehe Abbildung 97.

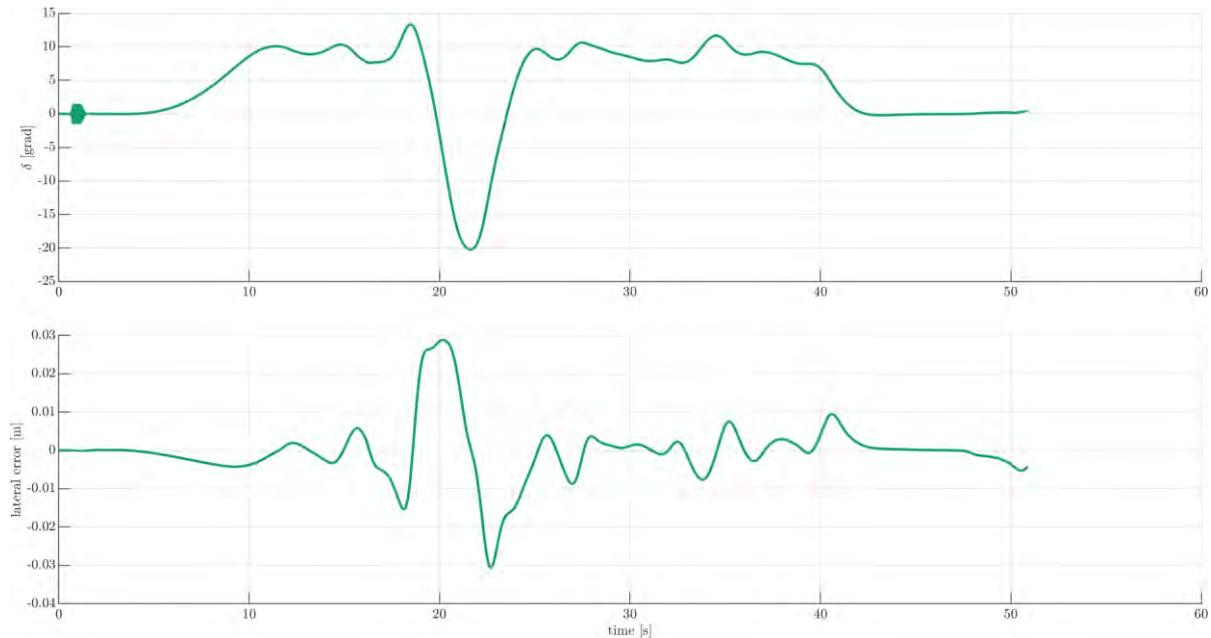


Abbildung 97: Lenkwinkel und Spurbabweichung für eine simulierte Fahrt mit dem Verteiler-Lkw auf dem Testgelände des Fraunhofer IVI mit Umfahrung eines statischen Hindernisses mit dem kinematischen Zustandsregler. Die Geschwindigkeit beträgt $5 \frac{m}{s}$ und führt zu einer maximalen Querbewegung von $2,5 \frac{m}{s^2}$.

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.

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, Infrastrukturnoten 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 98. 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 98: 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 Infrastrukturnoten freies Geleit vermelden. Andernfalls muss die Zielgeschwindigkeit verringert und eine Bremsbereitschaft vorbereitet werden, wie in Abbildung 99 schematisch anhand eines Fußgängerüberwegs dargestellt.



Abbildung 99: Dezentralisierter Einsatz von Infrastrukturknoten zur Erweiterung des Objekterfassungssystems (schematische Darstellung aus SAFE20-Erklärfilm, ISK mit grünen Wellen dargestellt).

Auswahl der Kommunikationstechnologien

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-Netzpläne³⁶ 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 100.

³⁶ (Telekom Deutschland GmbH, 2022)

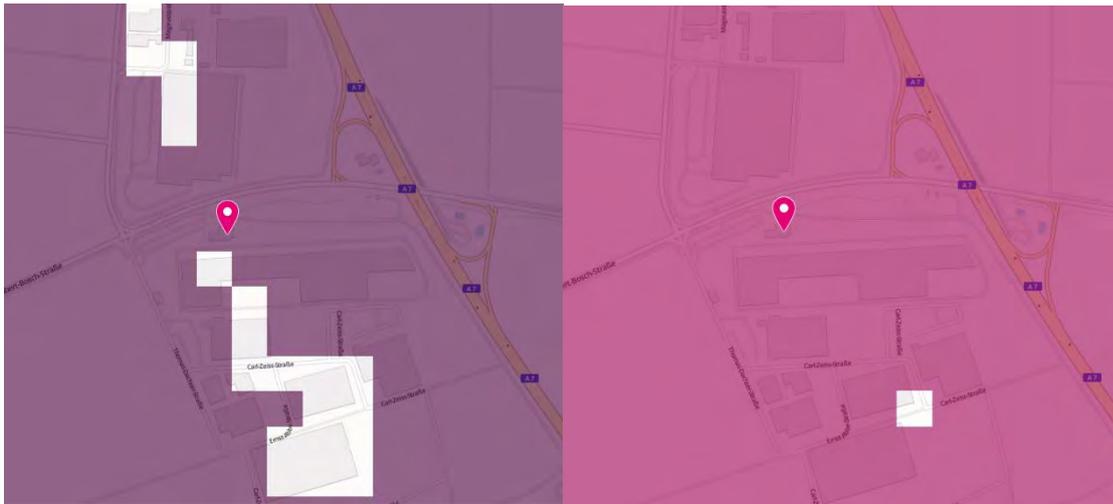


Abbildung 100: Netzabdeckung von 5G (links) und 4G (rechts) Mobilfunknetzen am Standort in Langenau

Im Anschluss 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 101 gezeigt, integriert. Hier sind die einzelnen Komponenten Leitstand, Infrastrukturknoten mit Überwachungssensorik, Zugfahrzeug (Truck) und Anhänger (Trailer) aufgeführt.

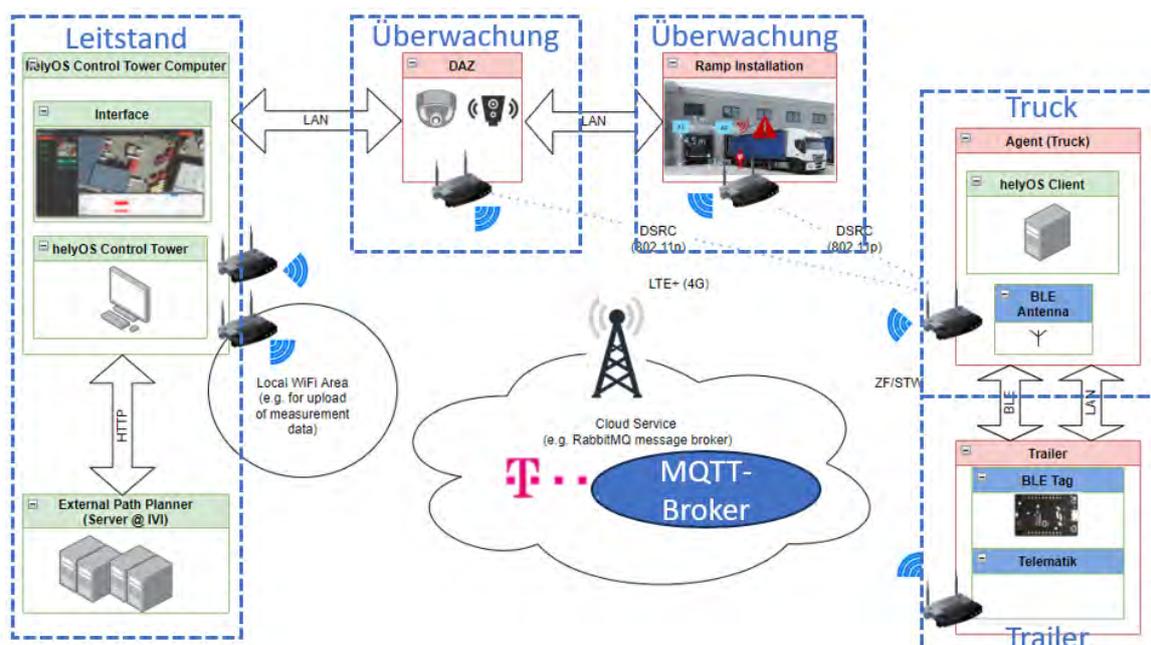


Abbildung 101: Kommunikationsnetzwerk SAFE20

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.

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 102 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 den Abbildung 103 und Abbildung 104 zu sehen.



Abbildung 102: Überwachte Zonen auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau



Abbildung 103: Infrastrukturknoten im Süden des DACHSER-Betriebshofs Langenau



Abbildung 104: 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.

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, Architekturentwürfe, 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 veröffentlicht, die eine Systemübersicht, Anweisungen und Beispiele enthält³⁷. Darüber hinaus wurde ein neues Repository mit einem Beispiel für eine vollständige Leitstand-Anwendung mit Hilfe von helyOS veröffentlicht³⁸.

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 VDA 5050-Protokolls mit helyOS abgeschlossen. Dieser Adapter ermöglicht die Übermittlung von Fahrzeugdaten an helyOS durch standardisierte VDA 5050-Nachrichten über das MQTT-Protokoll.

Durch den Fokus der VDA 5050, 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 VDA 5050-Protokolls, gemäß den Vorschlägen von ZF und den Ergebnissen der

³⁷ (Fraunhofer IVI, 2024)

³⁸ (Fraunhofer IVI, 2023)

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-Betriebshof verwendet. Während dieser Fahrttests wurden komplexe Fahrmissionen, die mithilfe von TruckTrix-City berechnet wurden, von einem helyOS-eigenen Nachrichtenformat in sogenannte VDA 5050-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.

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 der Auftragnehmer TU Dresden die App-Entwicklung ohne Eingriffe in das helyOS-Leitstandsystem in der DACHSER-Niederlassung Langenau trotzdem realitätsnah gemäß den SAFE20-Vorgaben vornehmen konnte.

Die Fakultät „Technisches Design“ der TUD hat ein umfassendes Konzept für die UI/UX der Anwendung erarbeitet. Dieses Konzept wurde in Abbildung 105 als Gesamtdarstellung und in Abbildung 106 mit einer Detailansicht visualisiert und veranschaulicht die Funktionen und das Design der Benutzeroberfläche.

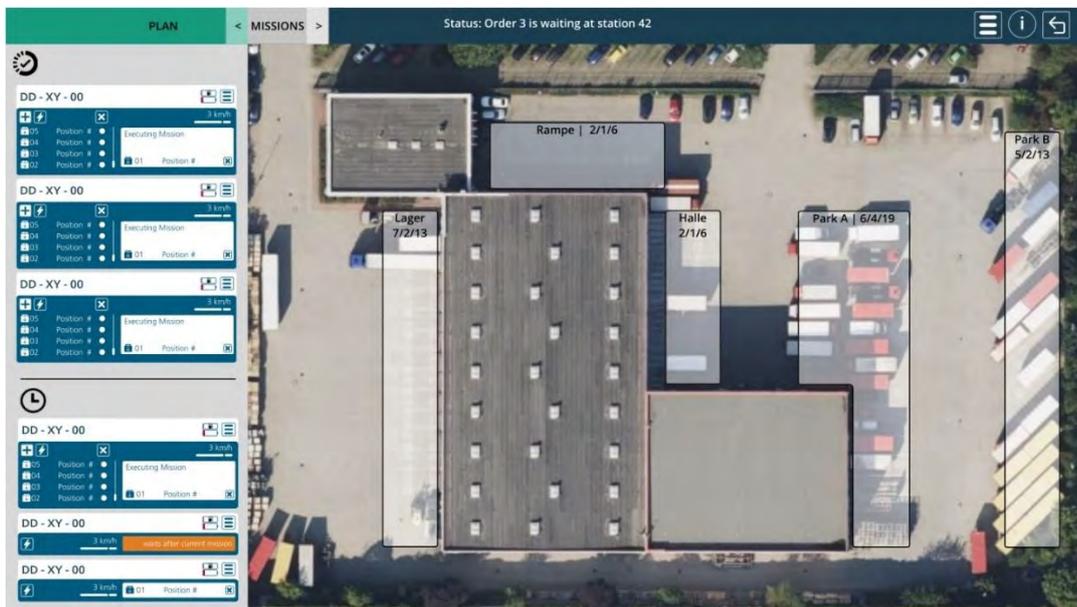


Abbildung 105: Übersicht des Nutzerinterface-Konzepts für Logistikhof-Anwendungen

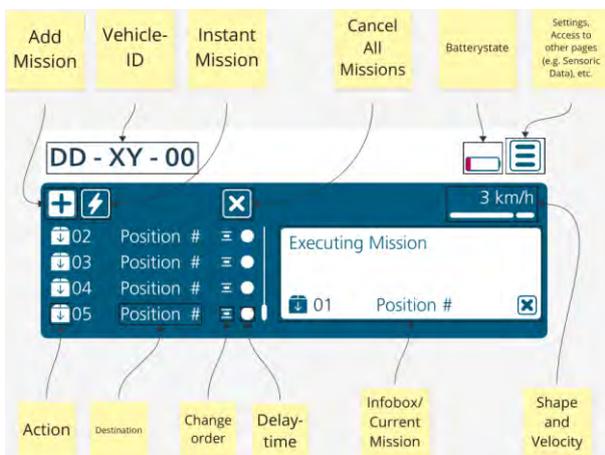


Abbildung 106: Fahrzeugdetails mit Beschriftung zur Erläuterung der Funktion

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 107 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 Haltaufgaben an Stoppschildern einfügt, implementiert und erfolgreich in Betrieb genommen.



Abbildung 107: Mit TruckTrix-City berechneter Pfad für eine Pick-Mission auf dem DACHSER-Betriebshof Langenau

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

In diesem Arbeitspaket sollte die Ortung von Wechselbrücken und Semi-Trailern erarbeitet werden. Dafür sollte ZF sogenannte SolarTags, also Komponenten, die auf der Oberseite von Trailern angebracht werden und sich mittels Solarpanels selbst versorgen sollten, bereitstellen.

Durch den Ausstieg von ZF Openmatics (Friedrichshafen) und der damit verbundenen Abkündigung der geplanten Bluetooth-SolarTags stand diese Option nicht mehr zur Verfügung, so dass sich ZF CVS entschloss, auf Basis von AP 4.6 die dort eingesetzten Bluetooth-Tags und -Antennen als weiteren Use-Case zur Objektlokalisierung in der Automatisierungszone zu erproben (weitere Informationen siehe Kapitel 4.6 „Sichere Nahfeldsensorik für Lkw“).

Der Partner SICK sollte dieselbe Aufgabe mittels UWB-Technologie erörtern. Die Verwendung von RED-konformen UWB-Funkgeräten im Außenbereich ist in der EU stark reglementiert (RED: Radio Equipment Directive, Funkgeräterichtlinie³⁹). Die normativen Rahmenbedingungen dafür sind in den harmonisierten europäischen Normen ETSI EN 302 065 beschrieben, wobei die Norm EN 302 065-1⁴⁰, breit gefasst, den allgemeinen Einsatz von UWB zum Zwecke der Kommunikation behandelt, EN 302 065-2⁴¹ den Einsatz in Ortungssystemen, EN 302 065-3(-1)⁴² die Anwendung in und auf bodengestützten Fahrzeugen und die weiteren Normen den Einsatz an Bord von Flugzeugen und als UWB-Materialerkennungsgeräte.

Echtzeitortungssysteme (RTLS, Real Time Location Systems) wie das Vorliegende sind in vielen Fällen konform mit der Norm EN 302 065-2 (aktuell V2.1.1), aber auch über Konformität mit der Norm EN 302 065-1 (aktuell V2.1.1) ist die Zulassung möglich. Die zulässigen Grenzwerte der beiden Substandards weichen nur in wenigen Funkbändern voneinander ab, wobei die EN 302 065-2 unter bestimmten Voraussetzungen entspanntere Grenzwerte zulässt.

Während mobile UWB-Funkgeräte im Außenbereich gemäß beider Subnormen zulässig sind, ist nur in der EN 302 065-2 der Einsatz der für RTLS benötigten, fest montierten UWB-Funkgeräte im Außenbereich vorgesehen. Sie unterscheidet abhängig vom nutzbaren Frequenzband zwischen LT1- und LT2-Ortsverfolgungssystemen. Nur LT2-Geräte, die eine der definierten Störungsminderungstechniken im Frequenzbereich von 3.1 bis 4.8 GHz einsetzen, sind für die fest montierte Anwendung im Außenbereich mit tauglichen Sendeleistungen zulassungsfähig.

³⁹ (Europäische Union, 2014)

⁴⁰ (European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2016)

⁴¹ (European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2016)

⁴² (European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2021)

Table 4: Maximum value of mean power spectral density (e.i.r.p) limit for LT2 equipment (ECC/REC(11)09 [i.8])

Frequency (GHz)	Mean power spectral density (e.i.r.p) (dBm/MHz)			
	Fixed outdoor		Mobile and fixed indoor	
	Without DAA	With DAA	Without DAA	With DAA
$f \leq 1,6$	-90			
$1,6 < f \leq 2,7$	-85			
$2,7 < f \leq 3,1$	-70			
$3,1 < f \leq 3,4$	-70	-41,3 (see note 1)	-70	-41,3 (see note 1)
$3,4 < f \leq 3,8$	-41,3 (see note 1)		-41,3 (see notes 1 and 2)	
$3,8 < f \leq 4,8$	-41,3 (see notes 1 and 3)		-41,3 (see notes 1 and 2)	
$4,8 < f \leq 6$	-70			
$6 < f \leq 10,6$	-70			
$f > 10,6$	-85			

NOTE 1: A maximum duty cycle of 5 % per transmitter per second and a maximum $T_{on} = 25$ ms also apply.
 NOTE 2: The duty cycle should also be limited to 1,5 % per transmitter on time (T_{on}) per minute, or equipment should implement an alternative mitigation technique that provides at least equivalent protection.
 NOTE 3: The maximum mean e.i.r.p. spectral density in the band 4,2 GHz to 4,4 GHz for emissions that appear 30° or greater above the horizontal plane should be less than -47,3 dBm/MHz, see clause 4.6.1.4 (ECC/REC(11)09 [i.8]).

- **LT1 systems:** These systems, operating in the 6 GHz to 9 GHz region (see CEPT Report 45 [i.13]), are intended for general location tracking of people and objects. They operate on an unlicensed basis. The transmitting terminals in these systems are mobile (indoors or outdoors), or fixed (indoors only). Fixed outdoor LT1 transmitters are not permitted. Typically, LT1 transmitters are mobile location tracking tags which are attached to people or objects, and tags are tracked using a fixed receiver infrastructure to only receive the UWB emission emitted by the tags, ETSI EG 201 399 [i.1].
- **LT2 systems:** These systems, operating in the 3,1 GHz to 4,8 GHz region (see ECC/REC(11)09 [i.8]), are intended for person and object tracking and industrial applications at well-defined locations. The transmitting terminals in these systems may be located indoors or outdoors, and may be fixed or mobile. They operate at fixed sites and may be subject to registration and authorization, provided local coordination with possible interference victims has been performed, ECC Report 167 [i.10] and ECC Report 170 [i.11].

Abbildung 108: Standard 302065-2 LT1 LT2

Jedes EU-Mitgliedsland muss den Durchführungsbeschluss 2019/785⁴³ der Europäischen Kommission über die Harmonisierung der Funkfrequenzen für Ultrabreitbandgeräte in der Union umsetzen, der die in den Normen EN 302 065-x genannten Bedingungen aufgreift. In Deutschland erfolgte dies mittels der Vfg. 135/2019, „Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung durch Ultrabreitbandgeräte (UWB)“⁴⁴.

Der Einsatz fest im Außenbereich montierter UWB-Funkgeräte als Teil von Ortungssystemen ist aktuell nur in Ländern möglich, die die Empfehlung ECC/REC/(11)09⁴⁵ des ECC (Electronic Communication Committee, innerhalb der CEPT) umgesetzt haben, die den Einsatz von LT2-Ortsverfolgungssystemen beschreibt. Ein Beispiel hierfür ist Tschechien.

Abbildung 109 zeigt den letzten dokumentierten Stand der Umsetzungen gemäß ERC Recommendation 70-03 (Seite 46, Annex d):

⁴³ (Europäische Union, 2019)

⁴⁴ (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2019)

⁴⁵ (Electronic Communications Committee (ECC), 2011)

Annexes to ECC/REC 70-03	ALB	AND	AZE	BEL	BGR	BUL	CYP	CZE	D	DNK	E	EST	F	FIN	G	GRC	HUN	HRV	I	IRL	ISL	LE	LTU	LVA	LUX	MCO	MKD	MNO	NLD	NOR	POL	ROU	RUS	S	SRB	SLO	SVK	SVN	TUR	UKR		
Annex e2: 76-77 GHz ECC/DEC(16)01	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
ANNEX 6: RADIODETERMINATION APPLICATIONS																																										
Annex a: 30 MHz-12.4 GHz ECC/DEC(06)08	Y	U	L	U	Y	N	Y	N	U	Y	L	Y	Y	L	Y	L	N	N	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	N
Annex b: 2200-8000 MHz ECC/DEC(07)01	Y	L	L	Y	L	N	Y	L	Y	Y	L	Y	Y	L	Y	L	Y	Y	Y	L	Y	Y	Y	L	L	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	L	L	Y	Y	Y	Y	N	N
Annex c: 2400-2483.5 MHz	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Annex d: 3100-4800 MHz ECC/REC(11)09	Y	Y	U	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	N	P	P	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	U	N	Y	U	Y	Y	Y	U	U	U	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N
Annex e: 3100-4800 MHz ECC/REC(11)10	Y	Y	U	Y	Y	N	Y	Y	N	Y	N	P	P	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	U	N	Y	U	Y	Y	Y	U	U	U	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N
Annex f1: 4700-7700 MHz	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	

Highlighted yellow = not implemented or no information Y = implemented L = limited implementation P = planned U = under study N = not implemented R = not regulated

Abbildung 109: Stand der Umsetzungen der Empfehlung ECC/REC/(11)09 in den EU-Mitgliedsländern

Da Deutschland die Empfehlung ECC/REC/(11)09 des ECC wegen bestehender Nutzer im Band, u. a. für militärische Nutzung, nicht umgesetzt hat, sind LT2-Ortsverfolgungssysteme nicht in der Vfg. 135/2019 gelistet. Daher ist aktuell nur der Einsatz mobiler UWB-Funkgeräte im Außenbereich möglich. Gemäß der Definition eines Funkgeräts in der RED, welche ebenfalls reine Receiver umfasst, ist bei strikter Interpretation auch kein Außeneinsatz fest montierter reiner UWB-Receiver zulässig.

Zum aktuellen Zeitpunkt werden die UWB-Normen überarbeitet und weniger strikte Formulierungen sind wahrscheinlich. Ein Indiz dafür gibt die im November 2022 veröffentlichte Ergänzung (Amendment) der ECC Decision (06)04⁴⁶, gemäß derer auch UWB-Ortsverfolgungssysteme im 6-8,5-GHz-Band mit Auflagen als im Außenbereich fest montierte Geräte eingesetzt werden können. Diese Empfehlung ist nicht zwingend für die EU-Mitgliedsstaaten (genauer: CEPT countries), kann aber von interessierten Staaten umgesetzt werden. Bei Umsetzung durch mindestens einen Staat kann ETSI neue harmonisierte Normen veröffentlichen, welche von der Europäischen Kommission mit einer Aktualisierung der Durchführungsbeschlusses als verpflichtend für alle Mitgliedsstaaten festgelegt werden können. Auf diese Weise wird aller Voraussicht nach dem Einsatz von UWB-Funkgeräten mit festem Montageort im Außenbereich der Weg geebnet werden.

Für SAFE20 wurden die Ergebnisse von UWB-Indoortests herangezogen und für die Bewertung im Outdoorbereich bei DACHSER neu ausgewertet. Die Indoortestumgebung und das DACHSER-Betriebsgelände weisen ähnliche Charakteristiken auf, was das Aufkommen von metallischen Hindernissen betrifft. Im Testversuch gibt es metallische Maschinen und Regale, an denen die UWB-Signale reflektieren konnten. Vergleichbar dazu gibt es auf dem DACHSER-Gelände Wechselbrücken und Anhänger aus Metall, an denen ebenfalls UWB-Signale reflektieren. Dies hat Einfluss auf die Positionsgenauigkeit.

In den Abbildung 110 bis Abbildung 112 sind ein Schema der Testumgebung, Setup und Ergebnisse dargestellt. Es wurde an 50 Positionen die Genauigkeit der UWB-Lokalisierung mit Hilfe eines Referenzsystems bestimmt und ausgewertet. Die euklidische Messgenauigkeit war an allen Positionen ≤1,4 m, während die Messunsicherheit kleiner als 6,5 m war. Für den Einsatzfall auf dem DACHSER-Betriebsgelände ist zu erwarten, dass Personen nur mit einer höheren Messunsicherheit zwischen Wechselbrücken oder Trailern geortet werden können. Dies bedeutet, dass ein größerer

⁴⁶ (Electronic Communications Committee (ECC), 2022)

Bereich überwacht werden muss, zum Beispiel wenn ein Wechselbrückenumsetzer ein Verladetor rückwärts anfährt, um eine Wechselbücke abzustellen. In diesem Fall müssen die Stellplätze der benachbarten Tore mitüberwacht und ggf. frühzeitig risikominimierende Maßnahmen ergriffen werden, wenn sich im Überwachungsbereich eine Person aufhält, wie z. B. die Reduzierung der Geschwindigkeit des Wechselbrückenumsetzers.

Die aus diesem Arbeitspaket resultierenden Ergebnissen haben gezeigt, dass sich eine Lokalisierung von Personen mittels UWB im Rahmen von SAFE20 unter den aktuellen regulatorischen Umständen nicht realisieren lässt. Durch eine Umsetzung mittels alternativer Funktechnologie durch den Partner ZF CV Systems konnte jedoch eine allgemeine Eignung im kleinen Maßstab nachgewiesen werden. Sobald sich die Regularien für UWB in Deutschland ändern, wird dieser Ansatz erneut evaluiert.

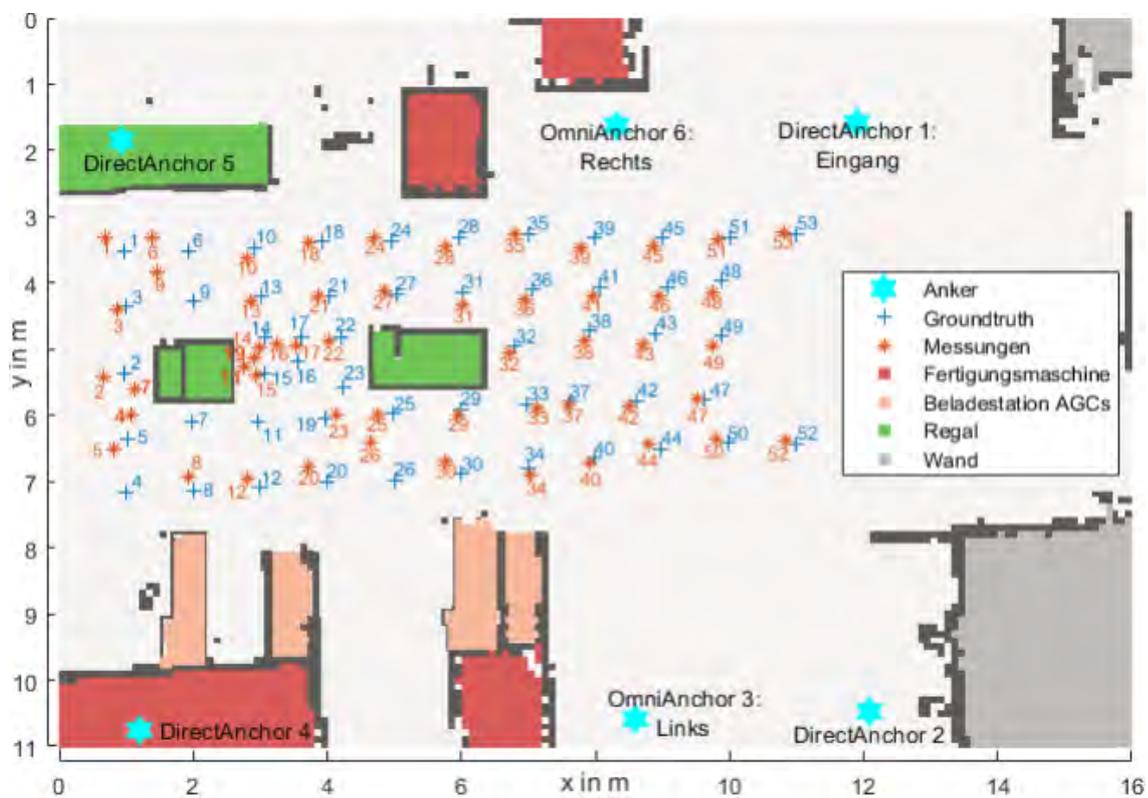


Abbildung 110: Wahre und gemessene Positionen in der Testumgebung

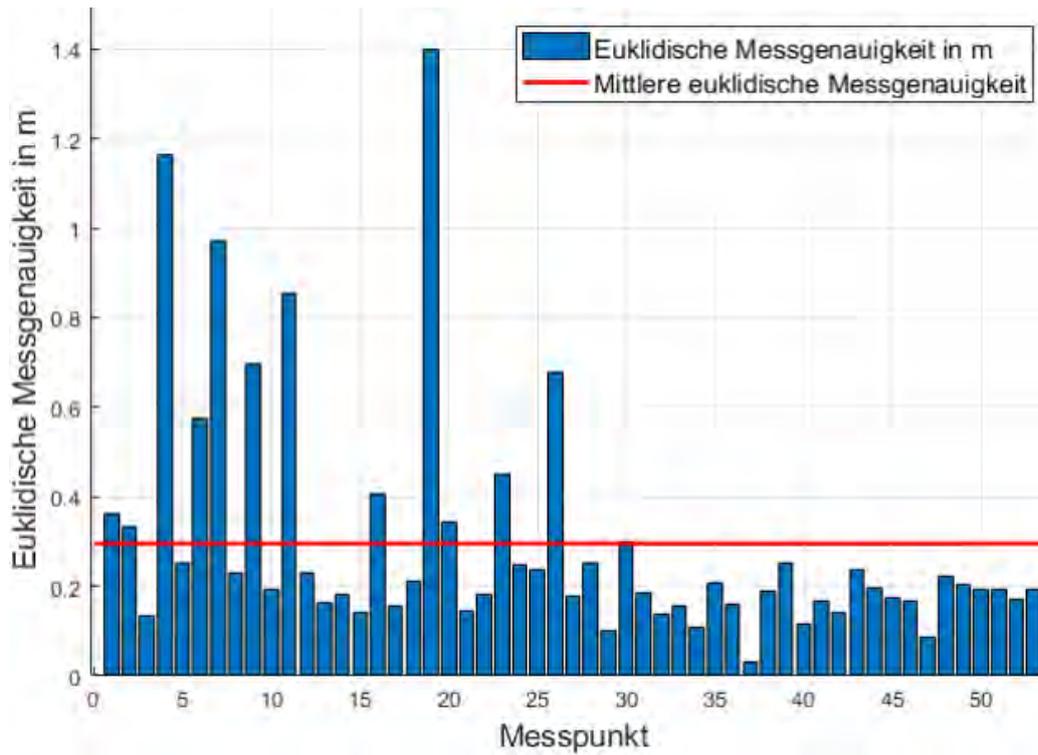


Abbildung 111: Messgenauigkeit an den verschiedenen Messpositionen

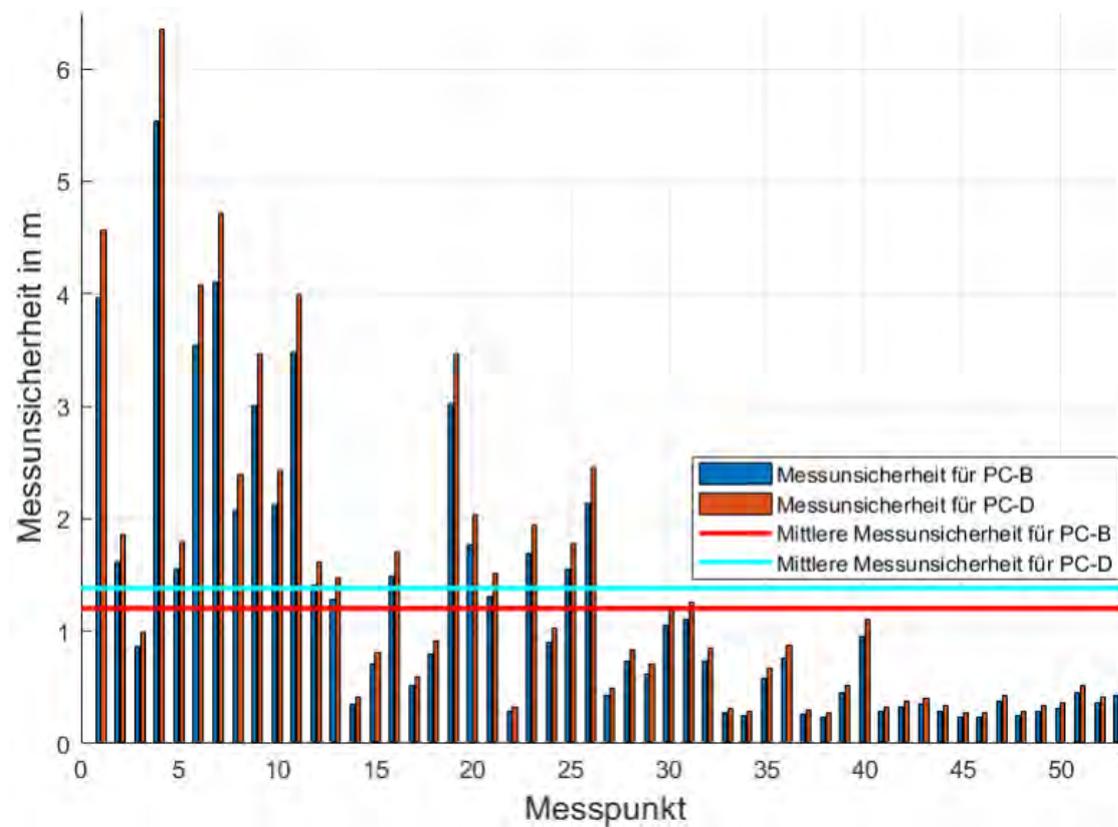


Abbildung 112: Messunsicherheit an den verschiedenen Messpositionen in der Testumgebung, dargestellt durch die Größe der längsten Halbachse der Konfidenzellipse für die beiden Performanceklassen B und D

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 Manöverplanung, der 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.

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 (siehe dazu Kapitel 8.2 „Evaluierung des Testbetriebs (AP 8.2)“, Abschnitt Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeit).

6.1. Sichere Umfeld-/Objekterfassung für Lkw (AP 6.1) / Sichere Umfeld-/Objekterfassung für Sonderfahrzeuge (AP 6.2)

Das in AP 3.3 erarbeitete zweistufige Sicherheitskonzept umfasst einerseits eine an klassischen Sicherheitslösungen orientierte Auswertung von Schutzfeldern im Bereich vor den bewegten Fahrzeugen (Adaptive Protective Field) und andererseits eine adaptive Kollisionsvermeidung (Adaptive Collision Prediction), welche – gestützt auf Fahrzeug- und Infrastrukturdaten – bewegte Objekte detektiert und mittels Objekttracking Position, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung ermittelt.

Kollisionsvorhersage: Sensorauswahl

Für eine geeignete Auswahl an Sensoren zur sicheren Umfeld- und Objekterfassung, basierend auf dem in AP 3 erarbeiteten Sicherheitskonzept, wurden alle relevanten Aufgaben, die durch eine intelligente Kombination aus Sensorik und Algorithmik gelöst werden können, herausgearbeitet und hinsichtlich ihrer Anforderungen analysiert. Diese Aufgaben umfassen vor allem die sichere Umfelderkennung

- während der Fahrwege,
- beim Vorziehen des Fahrzeugs aus der Parklücke/von der Rampe (mit/ohne Wechselbrücke),
- beim rückwärtigen Rangieren zur Aufnahme der Wechselbrücke mit dem KAMAG PM bzw. KAMAG PT mit Trailer,
- beim rückwärtigen Rangieren zum Abladen der Wechselbrücke/des Trailers in einer Parklücke/an der Rampe.

Basierend auf diesen Anforderungen und Aufgaben ist eine Auflistung von potenziell geeigneten Sensoren entstanden, die hinsichtlich ihrer Sensoreigenschaften und Messdaten genauer untersucht wurden:

Tabelle 8: Übersicht der technischen Daten der Sensoren laut Datenblatt. Es ist anzumerken, dass sich die Reichweiten, Remissionen und Auflösung von Lidar- und Radar-Sensoren nicht direkt vergleichen lassen.

	Reichweite bei 90% Remission (bei 10%)	Lagen	Winkelauflösung	Öffnungswinkel	Typ	Gewicht
LDMRS	150m (30m)	8	0.25° 0.5°	85° horiz. 4.2-6.4° vertikal	3D-Lidar	0.77kg
LMS150	50m (18m)	1	0.25°-0.5° horiz.	270° horiz.	2D-Lidar	1.1kg
LRS4xxx	130m (40m)	1	0.02°- 0.24°	Bis zu 360° horiz.	2D-Lidar	1.7kg
MRS1xxx	30m (16m)	4	0.25° (bis zu 0.0625 interlaced)	275° horiz. 7.5° vertikal	Mehrlagen-Lidar	1.2kg
MRS6xxx	75 m (30m)	24	0.13° horiz. 0.625° vertikal	120° horiz. 15° vertikal	3D-Lidar	2.2- 2.4 kg
Ouster OS1	120m (40m)	64	512, 1024, or 2048 points	360° horiz. 33.2° vertikal	3D-Lidar	0.395 kg
RMS1000	100m bei 10m ² RCS 50m bei 1 m ² RCS	-	-	120° horiz. 8° vertikal	2D-Radar	0.3kg
TiM571	25m ohne Angabe der Remission (8m)	1	0.33° horiz.	270° horiz.	2D-Lidar	0.25kg
Velodyne Puck 16	100m (ohne Angabe der Remission)	16	0.1° - 0.4° horiz. 2° vertikal	360° horiz. 30° vertikal	3D-Lidar	0.83kg

Für erste Messdatenaufzeichnungen wurde ein Messfahrzeug mit realitätsnahen Dimensionen eines Trucks (bzgl. Front/Breite) konzipiert und aufgebaut.



Abbildung 113: Messfahrzeug mit realitätsnaher Breite, verbauter Sensorik, Datenverarbeitungseinheit und Spannungsversorgung.

Als zentrale Recheneinheit wurde ein Industrie-PC (IPC) der Firma Adlink (MXE-5500) eingebaut, auf dem Ubuntu 20.04 als Betriebssystem installiert wurde. Diese bietet ausreichend Kapazitäten und Schnittstellen für die angeschlossene Peripherie.

Die Sensorik wurde hinsichtlich ihrer Eignung für die sichere Umfelderkennung während der „reinen“ Fahrwege untersucht. Wichtige Auswahlkriterien sind hierbei:

- Reichweite (bis zu ~50 m für die Umsetzung der Adaptive Collision Prediction)
- Horizontaler (und ggf. vertikaler) Öffnungswinkel
- Horizontale (und ggf. vertikale) Winkelauflösung (eine geringe Winkelauflösung bedeutet potenziell nur noch wenige Messpunkte auf weit entfernten Objekten)
- Sensorgröße/-gewicht, da diese am Fahrzeug befestigt werden müssen
- Aufnahmefrequenz

Zusätzlich dazu wurden die Messdaten qualitativ hinsichtlich ihrer anschließenden algorithmischen Eignung analysiert.

Für die Testaufnahmen wurde der Messwagen mit ca. 80 m freier Sicht auf einem planaren Weg positioniert, anschließend bewegten sich Personen vor dem Messwagen mit einem Abstand von bis zu 50 m. In den Tabelle 9 bis Tabelle 11 kann ein Eindruck der Messdaten gewonnen werden.

Tabelle 9: Visuelle Messdateneindrücke des LDMRS. Die Person rechts im Bild bewegt sich zwischen 5-50 m auf den Messwagen zu. In der untersten Zeile sind die Daten des LDMRS dargestellt.

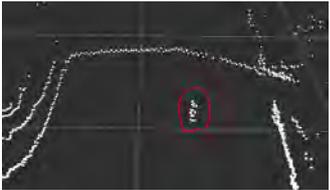
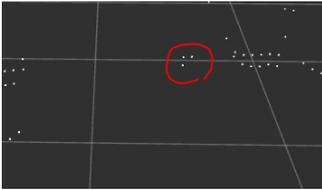
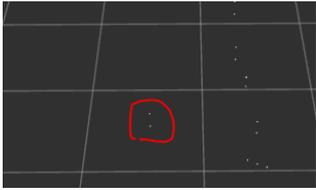
Reichweite	5 m	30 m	50 m
Kamera			
LDMRS			

Tabelle 10: Visualisierung von Beispielszenen während Messaufnahmen mit dem LMS150, LDMRS4xxx sowie MRS1xxx. Der LMS150 konnte ab 30 m die sich vom Messwagen wegbewegenden Personen nicht mehr erfassen.

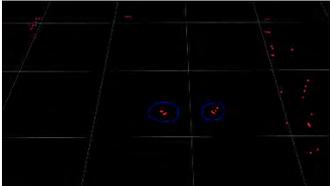
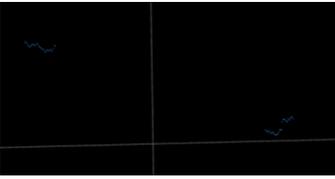
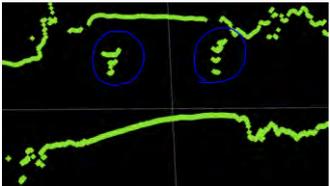
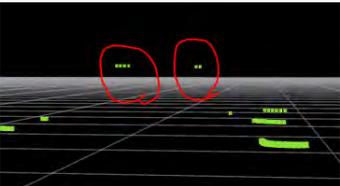
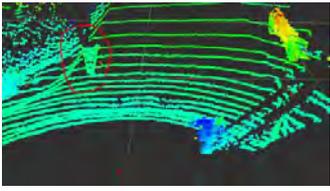
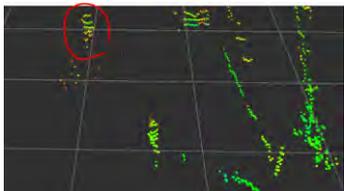
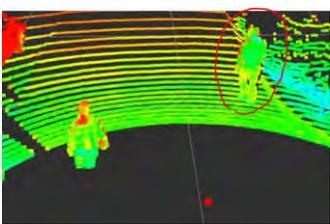
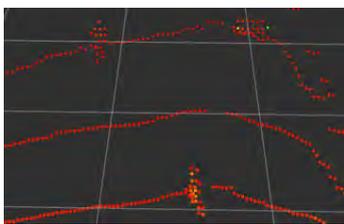
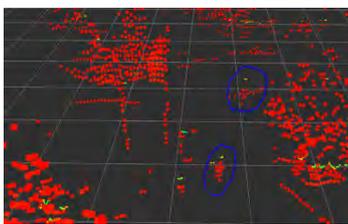
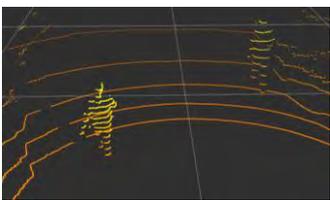
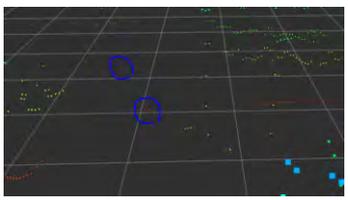
Reichweite	5 m	30 m	50 m
Kamera			
LMS150		(nicht sichtbar)	(nicht sichtbar)
LRS4xxx			
MRS1xxx			(nicht sichtbar)

Tabelle 11: Visualisierung von Beispielszenen während Messaufnahmen mit dem MRS6xxx, Ouster, Velodyne sowie dem Radar Sensor RMS2xxx.

Reichweite	5 m	30 m	50 m
Kamera			
MRS6xxx			
Ouster OS1			
RMS2xxx	(sichtbar)	(sichtbar)	(sichtbar)
Velodyne, VLP-16			

Während der Evaluation hat sich gezeigt, dass die Sensoren LMS150, MRS1xxx sowie LDMRS und Velodyne das Reichweitenkriterium von 50 m nicht oder nur unzureichend erfüllen. Dies ist auch in den Tabellen mit den visuellen Eindrücken ersichtlich. Der MRS6xxx liefert trotz des geringen vertikalen Öffnungswinkels und eines relativ starken Tiefenrauschens im Nahbereich solide 3D-Scandaten in Hinblick auf die Personen. Leider ist der Sensor, im Vergleich zu den anderen Sensoren, relativ groß und schwer und eignet sich daher nur eingeschränkt für die Montage am Fahrzeug.

Bezüglich der Laserscanner erfüllen sowohl der Ouster als auch der LRS4xxx alle oben genannten Anforderungen. Der LRS4xxx hat eine Winkelauflösung von bis zu 0.02° und trifft somit auch in 50 m Reichweite potenzielle Objekte sehr gut. Allerdings handelt es sich hierbei um einen 2D-Sensor. Je nach Anbauhöhe des Sensors und Neigung des Untergrunds und des Fahrzeugs werden unterschiedliche Bereiche des Körpers einer Person getroffen und müssen algorithmisch

berücksichtigt werden. Weiterhin darf der Sensor nicht zu hoch am Fahrzeug angebracht sein, da auch liegende und sitzende Personen tendenziell erkannt werden sollen.

Auch eine Unterscheidung zwischen Personen und anderen Objekten, insbesondere wenn sich diese nicht bewegen, kann mit 2D-Daten eine größere Herausforderung darstellen, da weniger Informationen vorhanden sind. Im Projektzeitraum wurde sich daher darauf geeinigt, den Ouster mit seinen 3D-Scandaten für die weitere Entwicklung von Algorithmen im Bereich der Adaptive Collision Prediction zu verwenden. Weiterhin soll durch die Arbeit mit dem 3D-Sensor ein besseres Verständnis von Anforderungen und Komplexität bezüglich aktueller State-of-the-Art Methoden im Bereich 3D -Punktwolkenverarbeitung erzielt werden, die wiederum für aktuelle und zukünftige SICK 3D-Sensorik eingesetzt werden können.

Um die Auswirkung verschiedener Montagepositionen der Lidar-Sensoren am Fahrzeug zu evaluieren, wurde der Betriebshof Langenau möglichst detailgetreu in der Simulationsumgebung Unity nachgebildet (vgl. Abbildung 114 und Abbildung 115).



Abbildung 114: Übersicht der Modellierung des DACHSER-Betriebshofs Langenau in der Simulationsumgebung Unity.

Diese Simulationsergebnisse sind in den Aufbau des Test-Messwagens mit eingeflossen.

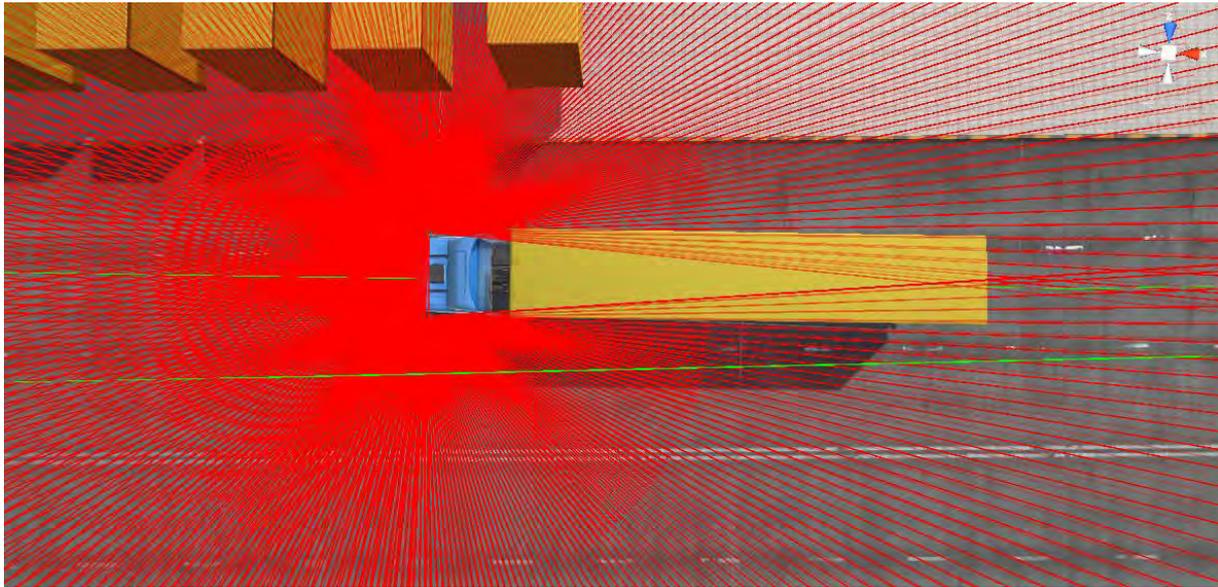


Abbildung 115: Simulation der Sichtfeldabdeckung mittels zwei SICK Laserscannern.

Kollisionsvorhersage: Konzept

Es wurde ein Konzept für die Kollisionsvorhersage entwickelt und implementiert. Die Kollisionsvorhersage stellt die Basis für ein vorausschauendes Fahren und ein frühzeitiges Erkennen und Vermeiden von gefährlichen Situationen dar.

Die Vorhersage basiert auf der Objektwahrnehmung, welche einen 32-lagigen Ouster Lidar-Sensor als Eingang verwendet. Aus den 3D-Punktwolken des Lidar-Sensors werden Objekte extrahiert, getrackt und für eine Kollisionsvorhersage verwendet.

Als Basis für die Implementierung der Wahrnehmungsfunktion wird die Open-Source Perception Pipeline von Autoware⁴⁷ verwendet, welche von SICK integriert, parametrisiert, durch Funktionen wie Background Filter und Collision Prediction erweitert und komponentenweise (Segmentierung) ausgetauscht wurde.

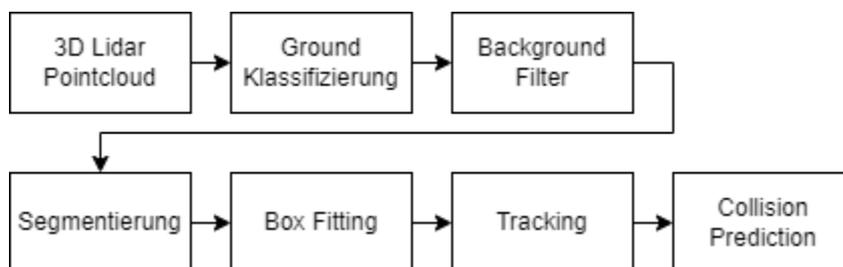


Abbildung 116: Prozesskette Kollisionsvorhersage

⁴⁷ (The Autoware Foundation, 2022)

Im ersten Prozessschritt werden Bodenpunkte in der Punktwolke identifiziert und entfernt. Dies hat den Hintergrund, dass der Boden für Kollisionen nicht relevant ist und es die Segmentierung erleichtert, da die Nicht-Bodenpunkte freistehende Objektcluster bilden. Die Bodenpunktklassifizierung geschieht strahlbasiert. Alle Punkte mit demselben horizontalen Messwinkel werden zu einem Strahl zusammengefasst. Innerhalb eines Strahles wird für alle Punkte mit aufsteigender Distanz eine lokale Steigung berechnet. Die Bodenklassifizierung geschieht dann mittels eines Steigungsschwellwerts.

Im nächsten Schritt werden Hintergrundpunkte identifiziert. Hintergrundpunkte sind Punkte, die außerhalb der möglichen Fahrbahn oder Höhe liegen und daher nicht relevant sind. Durch das Entfernen dieser Punkte kann einerseits die Laufzeit der Algorithmen optimiert werden, zum anderen lässt sich die Anzahl an falschen Kollisionsvorhersagen reduzieren, indem schwer trackbare Objekte, z. B. Randbepflanzung, entfernt werden. Der Hintergrundfilter nutzt die Fahrzeuglokalisierung und eine Gridmap, in welcher zuvor händisch die gesamte Fahrfläche eingezeichnet wurde. Mittels der aktuellen Pose der Fahrzeuglokalisierung werden die Punkte auf die Karte projiziert und so in Vordergrund und Hintergrund klassifiziert.

Danach werden alle Vordergrundpunkte segmentiert. Hierfür wird ein Curved-Voxel Clustering Ansatz verwendet⁴⁸, welcher die 3D Punkte in sphärische Koordinaten überträgt und diese in dem sphärischen Koordinatenraum zu Voxel zusammenfasst, um so effizient Nachbarschaftsbeziehungen aufzulösen. Output der Segmentierung sind Clusterlabel für jeden Punkt. Ein Cluster beschreibt dabei jeweils ein detektiertes Objekt.

Diese Cluster werden im nächsten Schritt als Boxen abstrahiert, indem jeweils ein Rechteck auf die Clusterpunkte gefittet wird. Das Fitting verwendet ein Closeness-Kriterium: Es optimiert die Box dahingehend, dass möglichst viele Clusterpunkte möglichst nah an der Boxgrenze liegen⁴⁹. Dieses Box-Model eignet sich gut, um Fahrzeuge, Trailer oder Personen darzustellen, und hat dabei keinen allzu großen Abstraktionsfehler.

Diese Boxen dienen zusammen mit der ermittelten Fahrzeugposition des Lokalisierungssystems als Input für das Tracking. Die Boxen werden anhand der Fahrzeugposition in das globale Kartenkoordinatensystem transformiert, wodurch das Tracking ebenfalls in Kartenkoordinaten rechnet. Somit wird die Eigenbewegung des Fahrzeugs kompensiert und die spätere Objekt-Fusion in Kartenkoordinaten ermöglicht.

Das Tracking basiert auf einem IMM-UKF-PDA Tracker (**I**nteracting-**M**ultiple-**M**odel **U**nscented-**K**alman-**F**ilter **P**robabilistic-**D**ata-**A**ssociation Tracker)^{50 51}. Es werden Unscented-Kalman-Filter (UKF)

⁴⁸ (Park, Wang, Hunjung, & Kang, 2019)

⁴⁹ (Zhang, Xu, Dong, & Dolan, June 2017)

⁵⁰ (Abdul Rachman, 2017)

⁵¹ (Schreier, 2016)

zum Schätzen der Boxpose und Dynamik verwendet. Der geschätzte Zustand ist dabei eine 2D-Pose, mit linearer Geschwindigkeit und Drehrate.

Je Boxobjekt laufen mehrere UKF mit unterschiedlichen Dynamikmodellen parallel und werden anhand ihrer Trackingwahrscheinlichkeit gewichtet und fusioniert. Dies ermöglicht ein adaptives Tracking unterschiedlicher Objektklassen, wie Fußgänger, Lkw und stationärer Objekte, welche jeweils unterschiedliche Dynamiken vorweisen. Das Tracking klassifiziert dadurch Objekte in die Klassen

- Objekt mit konstanter Geschwindigkeit,
- Objekt mit konstanter Geschwindigkeit und konstanter Drehrate,
- Objekt mit zufälliger Bewegung.

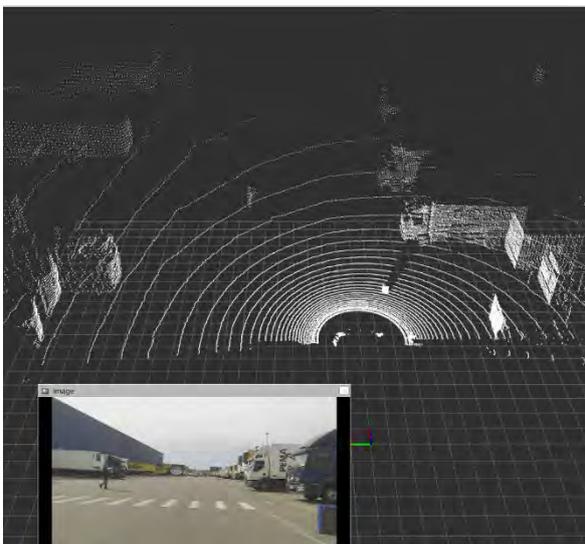


Abbildung 117: Rohes 3D-Punktwolke vom Ouster Sensor.

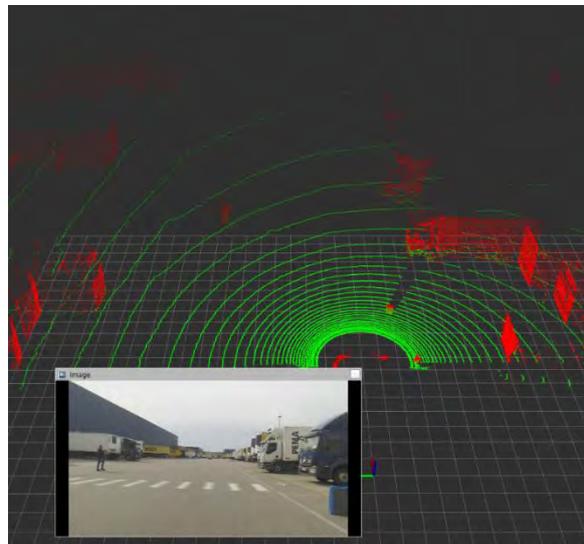


Abbildung 118: Bodenklassifizierung. Boden (grün), restliche Punkte (rot).

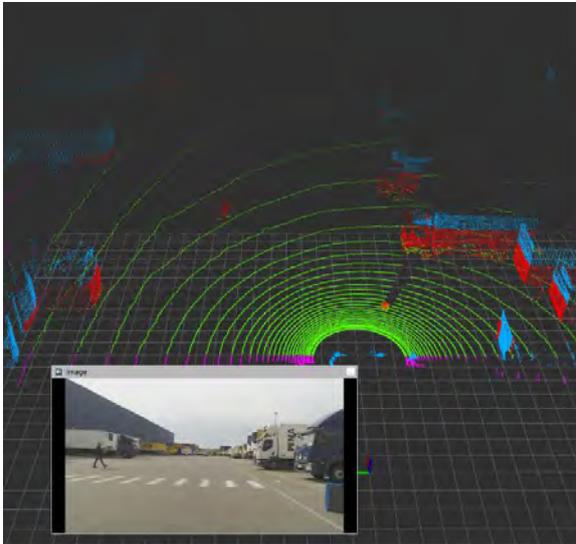


Abbildung 119: Background Klassifizierung.
Hintergrundpunkte (blau).

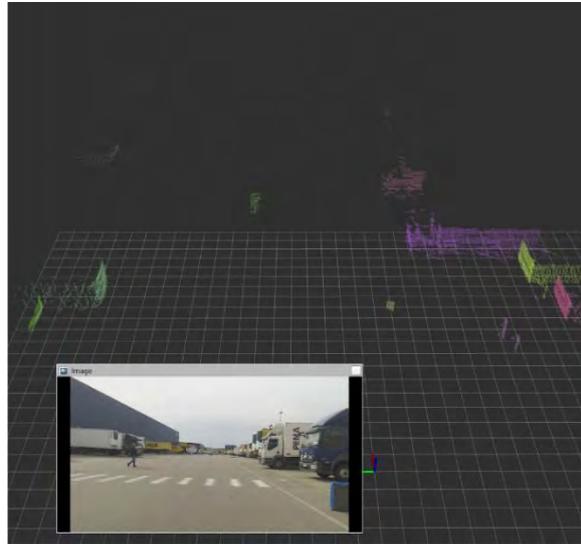


Abbildung 120: Segmentierung. Punkte eingefärbt nach
Clusterzugehörigkeit.

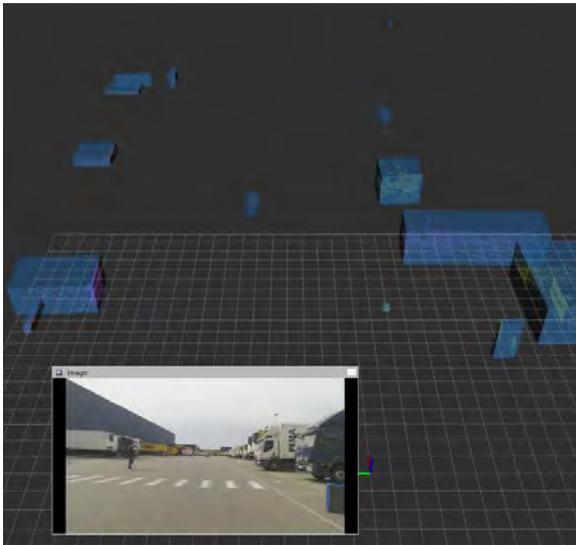


Abbildung 121: Box Fitting



Abbildung 122: Getrackte Objekte mit ID und
Geschwindigkeitsvektor (grün).

Diese Liste an getrackten Objektboxen sowie die geplante Fahrzeugtrajektorie und die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit dienen dann zur Vorhersage zukünftiger Kollisionen. Hierzu werden mit definierten Zeitschritten die Position der eigenen Fahrzeugbox und die Position der Objektboxen gesampelt (Abbildung 123).

Die geplante Fahrzeugtrajektorie vom Fahrplaner liegt als Liste von 2D-Posen vor. Das Sampeln der eigenen Fahrzeugboxpose geschieht, indem zu jedem Zeitschritt unter Annahme konstanter

Geschwindigkeit zwischen den geplanten Posen interpoliert wird. Das Sampeln der detektierten Objekte geschieht, indem die Objektboxen zu jedem Zeitschritt anhand der getrackten Objektgeschwindigkeit linear extrapoliert werden.

Auf Basis der gesampelten Boxposition werden dann zu jedem Zeitpunkt Überschneidungen zwischen der eigenen Fahrzeugbox und den Objektboxen geprüft und der früheste Kollisionszeitpunkt als Time-to-Collision (TTC) ausgegeben.

Für das Sampling wird als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand eine Schrittweite von 10 ms verwendet. Unter der Annahme, dass sich das eigene Fahrzeug und andere Objekte jeweils mit maximal 20 km/h bewegen, ergibt sich eine Ungenauigkeit der Kollisionsposition von maximal 11 cm. Um diese Ungenauigkeit und die Ungenauigkeit der getrackten Objekte zu kompensieren, können die Kollisionsboxen vergrößert werden, um eine konservativere TTC-Schätzung zu erhalten.

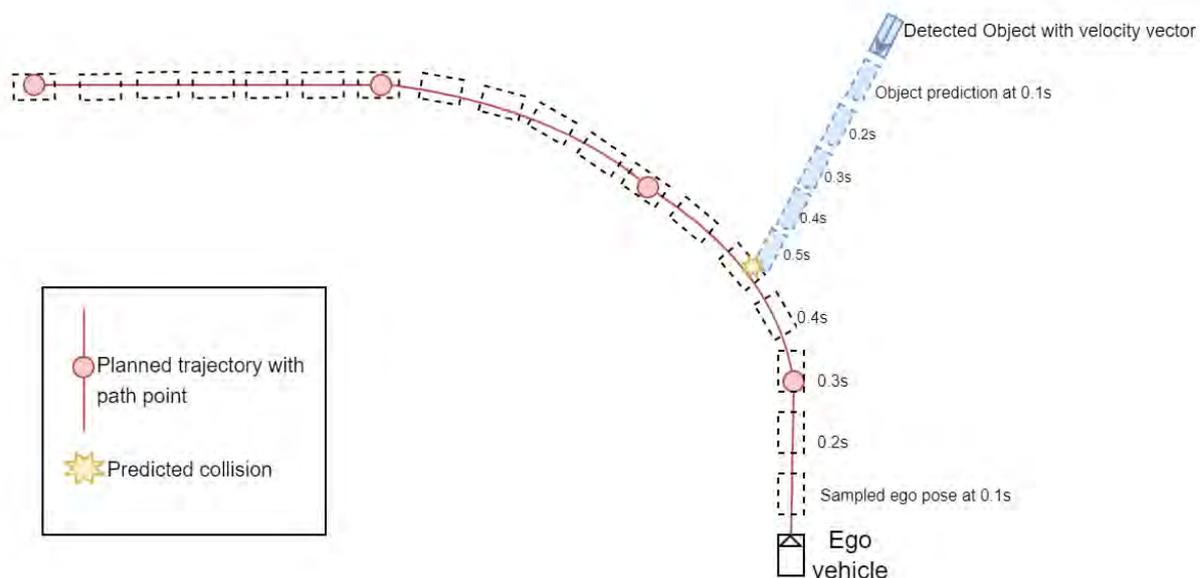


Abbildung 123: Kollisionsvorhersage

Kollisionsvorhersage: Evaluation

Um eine genauere Aussage über die Qualität der Objekterkennung und des Trackings zu machen, wurde eine Evaluation durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurden Punktwolken Daten händisch gelabelt. Es wurden mehrere Labelling Tools evaluiert und sich für das OpenSource Tool „SUSTECHPoints“ entschieden, da dieses Tool auf Grund seiner PCL⁵²-Schnittstelle einfach zu integrieren ist und einige SmartLabelling-Funktionen mit sich bringt, wie Clustering, Objekt-Fitting und Track-Bearbeitung.

⁵² Point Cloud Library

Anhand des Szenarienkatalogs (Tabelle 14: Szenarienkatalog für die Messkampagne) wurde für jedes Szenario ein kurzer Datensatz aus der durchgeführten Messkampagne im März 2023 ausgewählt und gelabelt. Beim Labeln wurde sich darauf beschränkt, Fußgänger, alle sich bewegenden Objekte, wie Autos und Trucks, sowie generell Hindernisse im Fahrtweg zu labeln. Somit wurden insgesamt 343 Sekunden an Ground Truth (GT) Daten von kritischen Situationen erzeugt.

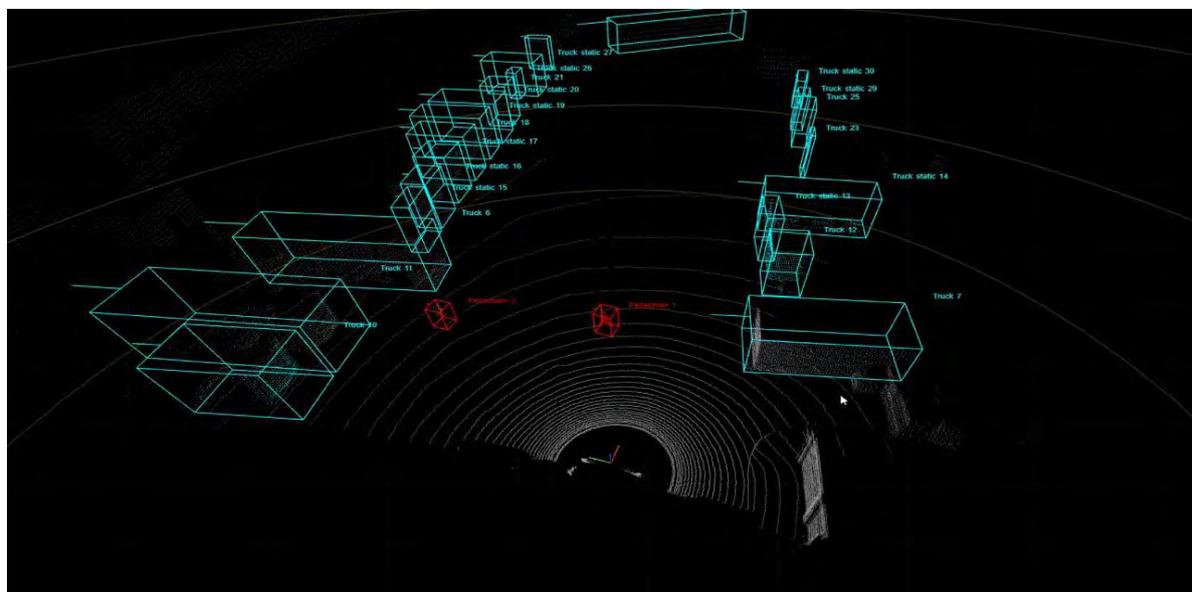


Abbildung 124: Gelabelte Szene mit geparkten Trailern (blau) und Fußgängern (rot)

Es wurden unterschiedliche Metriken zur Auswertung verwendet. DUT (Device-Under-Test) beschreibt im Folgenden den zu evaluierenden Objektoutput der Wahrnehmungsfunktion, GT (Ground Truth) die händisch gelabelten Objekte.

Zur Auswertung wird eine einfache Detektionsrate genutzt. Hierzu wird eine n-to-n Assoziation verwendet. Das bedeutet, dass ein GT-Objekt mit mehreren DUT-Objekten assoziiert werden kann und dass ein DUT-Objekt mit mehreren GT-Objekten assoziiert werden kann. Zwei Objekte werden miteinander assoziiert, wenn entweder ihre Grundflächen überlappen oder ihre Mittelpunkte nah beieinander sind. Die Detektionsrate errechnet sich durch die Anzahl aller GT-Objekte mit mindestens einem assoziierten DUT-Objekt, geteilt durch die Anzahl aller GT-Objekte.

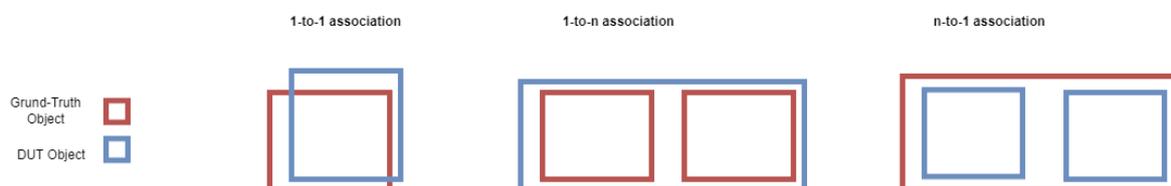


Abbildung 125: Unterschiedliche Assoziationsmethoden

Um eine genauere Aussage über die Qualität der Objektposition und Größe zu machen, wird die detektierte Objektfläche als Maß verwendet. Dies ist die Fläche des GT-Objekts, die durch ein DUT-Objekt abgedeckt ist. Die detektierten Objekte sollten möglichst gut die tatsächliche Objekt-Fläche abdecken, um ein sicheres Anhalten und Umfahren von Hindernissen zu gewährleisten.



Abbildung 126: Detektierte Objektfläche

Als letzte Metrik wird der Geschwindigkeitsfehler verwendet, da die Objektgeschwindigkeit für die Kollisionsvorhersage und Objektprädiktion notwendig ist. Dies wird durch die Differenz des DUT- und GT-Objektgeschwindigkeitsvektors ermittelt, wodurch sowohl die Geschwindigkeitsrichtung als auch die Geschwindigkeitsamplitude einbezogen wird.

Die GT-Objektgeschwindigkeit konnte nicht direkt gelabelt werden, daher muss die GT-Geschwindigkeit durch numerische Ableitung der gelabelten Objektpositionen gebildet werden. Daher ist die GT-Geschwindigkeit durch ungenaue Labelpositionen beeinflusst, gibt aber immer noch ein grobes Maß für die Geschwindigkeitsqualität.

Des Weiteren wird angenommen, dass die restliche, nicht gelabelte Umgebung statisch ist und daher die Geschwindigkeit 0 haben muss. Somit werden DUT-Objekte, welche zu keinem GT-Objekt assoziiert sind, gegen 0 Geschwindigkeit verglichen.

Die Evaluationsmetriken wurden per Szenario und Objekttyp (Fußgänger, Truck, statische Umgebung) aufgeteilt. Folgende Szenarien sind dabei enthalten:

- sX: Referenziert auf den Szenarienkatalog und das dortige Szenario Nr. X,
- crossing: Enthält eine Kreuzungssituation mit Querverkehr,
- peopleBetweenTrailer: Enthält Fußgänger, die sich zwischen abgestellten Containern bewegen und hinter diesen hervorkommen,
- standing: Ego-Fahrzeug steht am Straßenrand, mit viel Lkw- und Fußgängerverkehr.

Detektionsrate: Es zeigen sich insgesamt hohe Detektionsraten von 98%, wobei die Detektion von Trucks mit 99,6% etwas besser gelingt als von Fußgängern (97,6%) (Abbildung 127). Dies lässt sich vor allem durch die Objektgröße begründen; so lassen sich Lkws deutlich einfacher auf großen Distanzen detektieren als Fußgänger, die in 50m Entfernung nur noch ein paar einzelne Scanpunkte aufweisen.

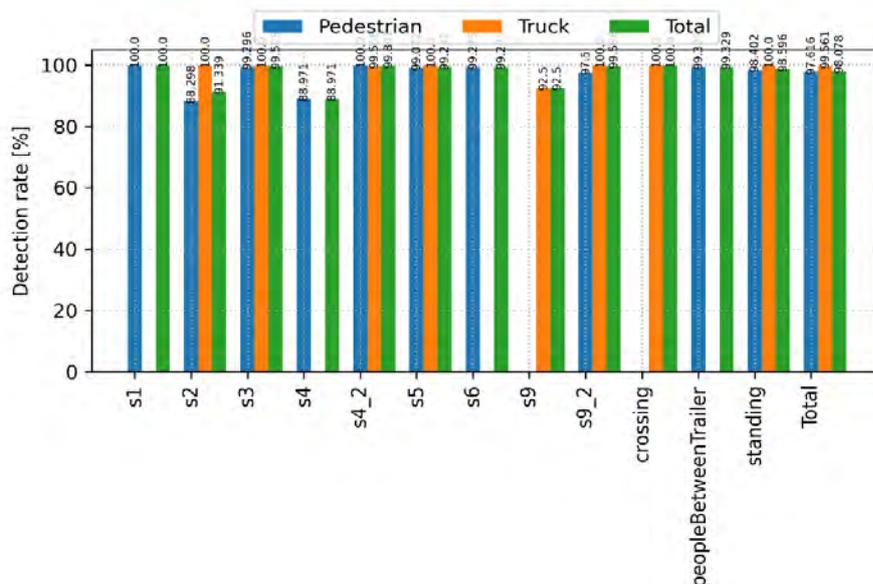


Abbildung 127: Detektionsrate, aufgeteilt nach Szenario und Objekttyp

Detektionsflächenrate: Bei den Flächen der detektierten Objekte können wir insgesamt 78.1% der GT-Objekte abdecken (Abbildung 128). Diese geringe Rate hat unterschiedliche Hintergründe. So liegt die Fußgängerflächenrate sogar nur bei 72.5%, was damit zusammenhängt, dass sich Fußgänger relativ schlecht eindeutig in rechteckige Boxen fitten lassen. So gibt es zwischen GT und DUT oft größere Unterschiede bezüglich der Größe und Ausrichtung der Boxen (Abbildung 129). Bei den Trucks besteht zum Teil das Problem, dass diese als mehrere kleine Objekte mit geringerer Tiefe erkannt werden (Abbildung 130).

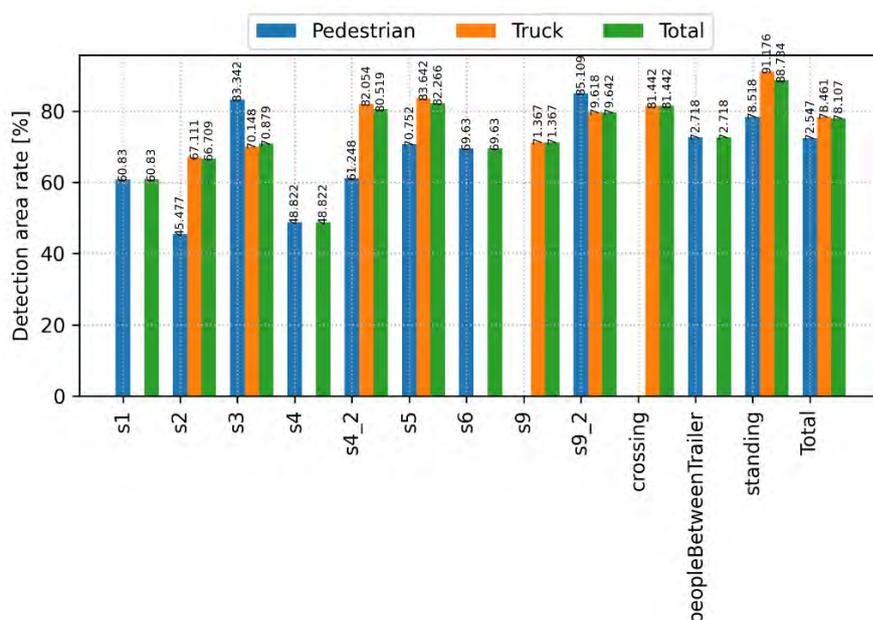


Abbildung 128: Detektionsflächenrate, aufgeteilt nach Szenario und Objekttyp

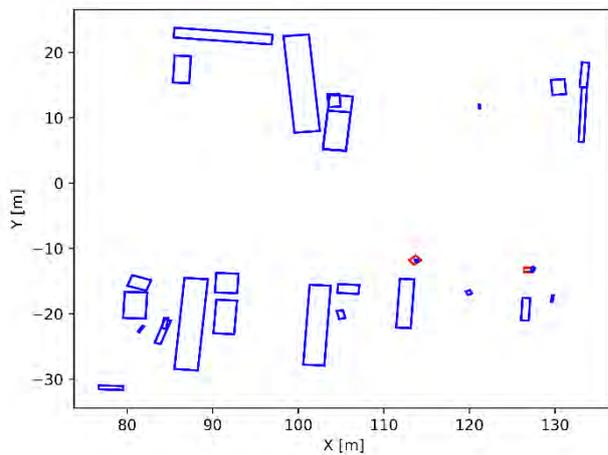


Abbildung 129: GT-Objekte (rot) und DUT-Objekte (blau). Fußgänger erscheinen im DUT oft kleiner

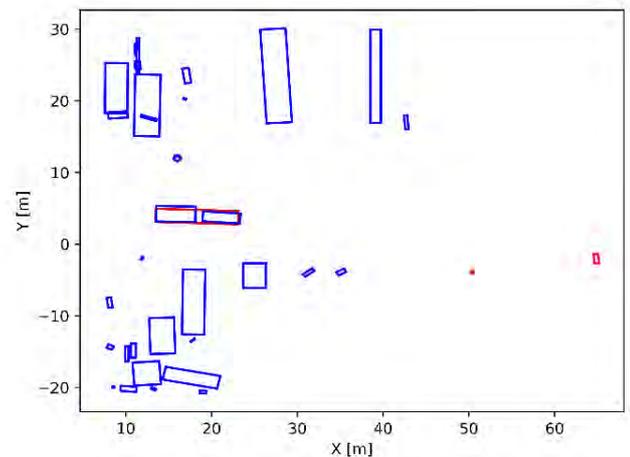


Abbildung 130: GT-Objekte (rot) und-DUT Objekte (blau). Trucks sind im DUT häufig geteilt und decken daher weniger Fläche ab

Geschwindigkeitsfehler: Hier zeigt sich, dass die Geschwindigkeit von Fußgängern deutlich besser bestimmt werden kann (Std Error: 1.4m/s) als die von Trucks (Standardfehler: 4.3m/s) (Abbildung 131). Fußgänger sind insgesamt kleiner, was es einfacher macht, die Geschwindigkeit eines einfachen Mittelpunkts zu tracken. Bei Trucks ist dies schwieriger, da sich der Objektmittelpunkt je nach Blickwinkel verschieben kann. Hier sollte eher die Geschwindigkeit eines fixen Eckpunkts getrackt werden (siehe Abschnitt „Kollisionsvorhersage: Verbesserungen“). Auch zerfallen die detektierten Trucks bei der Segmentierung häufig in einzelne kleinere Objekte, was das Tracking und die Geschwindigkeitsschätzung erschwert.

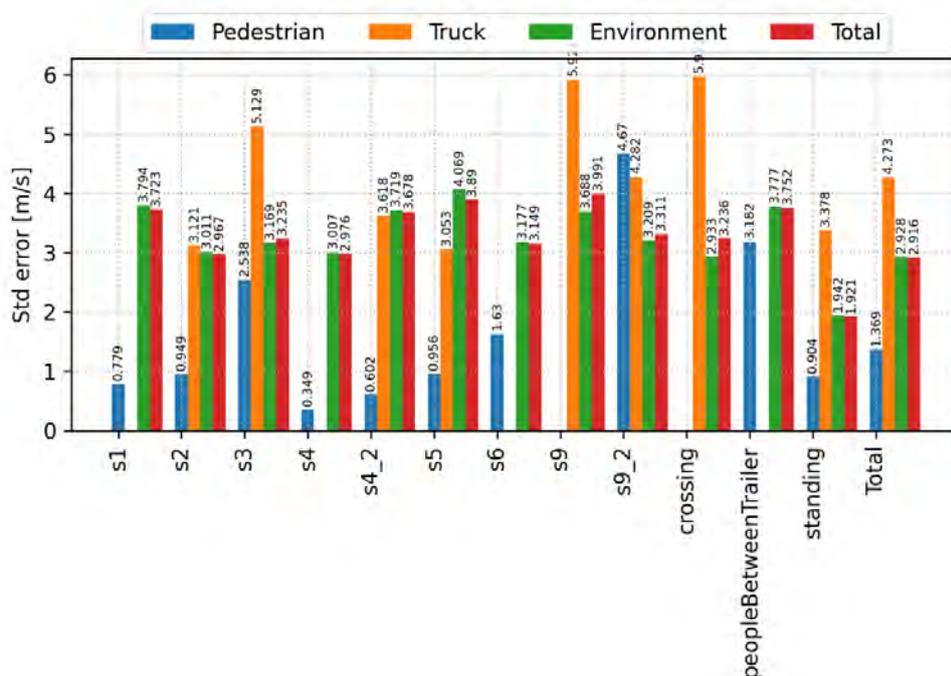


Abbildung 131: Geschwindigkeitsfehler, aufgeteilt nach Szenario und Objekttyp

Kollisionsvorhersage: Verbesserungen

Um die zuvor beschriebenen Probleme der Objektgeschwindigkeitsschätzung zu verbessern, wurde ein alternativer Objekttracking-Ansatz integriert und getestet. DATMO⁵³ (Detection and Tracking of Moving Objects) ist eine Boxtracking Library, die Boxeckpunkte anstatt Boxmittelpunkte trackt. DATMO trackt dabei den am dichtesten zum Sensor gelagerten Boxeckpunkt und enthält Mechanismen, um intelligent zwischen Eckpunkten zu wechseln, wenn sich das Objekt bewegt.

Wichtig bei der Eckpunktauswahl ist die Betrachtung von Verdeckung. Durch eine teilweise Objektverdeckung durch ein sich bewegendes Objekt kann es so wirken, als ob sich die verdeckte Ecke des verdeckten Objektes bewegt, was zu einer falschen Geschwindigkeitsschätzung führt. Eine entsprechende Verdeckungserkennung wurde implementiert und getestet (Abbildung 132 und Abbildung 133). Dieser Ansatz des Eckpunkttrackings liefert vielversprechende Ergebnisse und zeigt, dass die Probleme der Geschwindigkeitsschätzung gelöst werden können.

⁵³ (Konstantinidis, 2023)

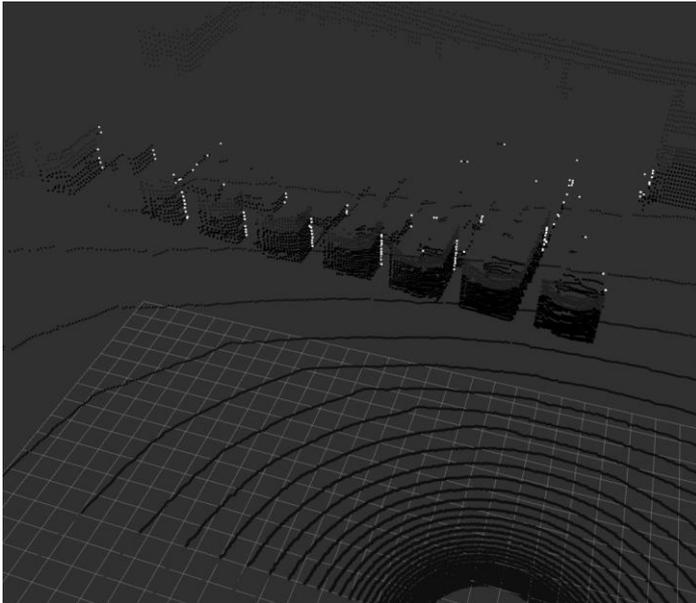


Abbildung 132: Verdeckungserkennung. Verdeckte Scanpunkte in weiß.

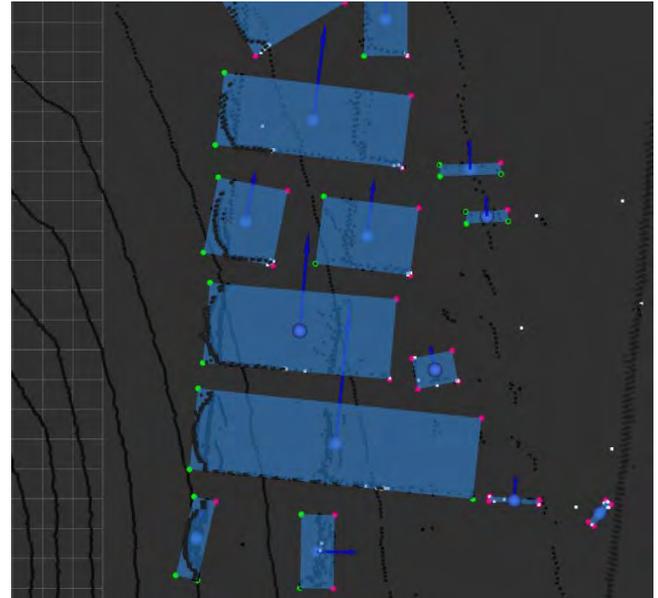


Abbildung 133: Eckpunkerkennung. Sichtbare Eckpunkte in grün, verdeckte Eckpunkte in rot.

Adaptive Protective Field: Konzept

Das adaptive Schutzfeld dient als risikoreduzierende Maßnahme im Rahmen des Sicherheitskonzepts. Das Fahrzeug ist mit mehreren Lidar-Sensoren ausgestattet, die Daten jedes Sensors werden separat verarbeitet.

Das adaptive Schutzfeld basiert auf der Fahrzeugbewegung, Bremsbeschleunigung, Reaktionszeit des Systems etc. und hängt von folgenden Faktoren ab:

- Aktuelle Geschwindigkeit
- Aktueller Lenkwinkel

Das Schutzfeld passt sich an weitere Fahrzeugsignale an (z. B. Gangrichtung, Kupplungszustand des Anhängers). Zusätzlich werden Hofoperationen unterstützt (z. B. das Ankuppeln des Anhängers). Wird das Schutzfeld verletzt, zum Beispiel durch Personen oder andere Hindernisse, wird umgehend ein Nothalt eingeleitet.

Adaptive Protective Field: Sensorauswahl und Feldkonfiguration

Auf Basis der Sensorevaluation (s. o.) fiel die Entscheidung für die Sensorik für die Schutzfeldüberwachung auf den SICK MRS1000.

Technische Daten:

- HDDM mit Multi- Echo- Technologie
- 4 Lagen Scanner

- Outdoor geeignet (IP67)
- Öffnungswinkel: Horizontal 275 ° und vertikal 7,5 ° (über 4 Messebenen)
- Arbeitsbereich für Safety Umfeldauswertung 0,2...12m bei 6% Remission
- 32 statische Felder zur Auswertung im Gerät parametrierbar

Die beiden MRS 1000 wurden jeweils rechts und links an der Fahrzeugkabine angebracht, um einen guten Überwachungsbereich nach vorne und seitlich am Fahrzeug zu realisieren.



Abbildung 134: Anbaupositionen der MRS 1000 seitlich am Messfahrzeug

Die Länge der Felder bestimmte sich nach der Dauer, über welche anhand eines kinematischen Modells die aktuelle Bewegung des Fahrzeuges in die Zukunft projiziert wird. Dabei wurde von einer Dauer von 2 Sekunden (Anhaltezeit) ausgegangen. Entsprechend der Betrachtung gemeinsam mit den Partnern wurde von einer Reaktionszeit (inkl. Sensorverarbeitung) von 0,4 Sekunden ausgegangen. Damit lässt dies eine Bremszeit von 1,6 Sekunden zu und verlangt bei 20 km/h (5,6 m/s) eine Verzögerung von 3.5m/s^2 . Da Lkws in der Regel eine Verzögerung von 7m/s^2 haben, war für diese Anwendung m_y Werte bis 0,5 zu tolerieren, um die 2 Sekunden Anhaltezeit zu garantieren.

Entsprechend der Fahrzeugdaten des KAMAG PM (Radstand, Fahrzeuglänge, Fahrzeugbreite, Wenderadius) wurden die Felder in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Lenkwinkels berechnet und entsprechend in den beiden Laserscannern konfiguriert.

Die insgesamt 64 zur Verfügung stehenden Felder für die erste Messkampagne am 22.03.2022 teilten sich wie folgt auf die Scanner auf:

Tabelle 12: Übersicht der Aufteilung der 64 Schutzfelder abhängig von Sensor und Lenkwinkel.

Scanner 1	Geschwindigkeitsabhängig	Scanner 2	Geschwindigkeitsabhängig
Geradeausfahrt	8 Felder Nahbereich (bis 12km/h)	Geradeausfahrt	8 Felder Fernbereich (bis 20km/h)
Kurvenfahrt links 1°-10°	8 Felder (bis 20km/h)	Kurvenfahrt rechts 1°-10°	8 Felder (bis 20km/h)
Kurvenfahrt links 10°-25°	8 Felder (bis 15km/h)	Kurvenfahrt rechts 10°-25°	8 Felder (bis 15km/h)
Kurvenfahrt links 25°-35°	8 Felder (bis 15km/h)	Kurvenfahrt rechts 25°-35°	8 Felder (bis 15km/h)

Die beiden MRS wurden für die erste Messkampagne über Kopf montiert, bei einer Anbauhöhe von 524 mm am Fahrzeug. Dabei detektierten die ersten beiden Lagen jeweils in 6 m und 12 m den Boden.

Die Auswertung der ersten Messfahrt zeigte, dass der Ansatz der „Adaptive Protective Fields“ sehr vielversprechend ist und sich in der ersten Messfahrt bewährte. Bei der Auswertung der Daten und dem anschließenden Vergleich mit den Videoaufzeichnungen fiel jedoch auf, dass der Winkelbereich für die Kurvenfahrten mit 10° für die Feldbereiche recht groß gewählt worden ist. Bedingt durch die maximale Anzahl von 32 Feldern, die in den Geräten hinterlegt werden kann, kam es immer wieder zu Feldverletzungen durch statische Objekte entlang der Fahrstrecke.

Aus diesem Grund wurde für die zweite Messkampagne ein dritter Scanner zusätzlich montiert, um die Anzahl der Felder auf 96 Schutzfelder zu erhöhen. Damit stand bis zu einem Winkelbereich von 15° eine feinere Skalierung je Feldbereich zu Verfügung.

Für die zweite Messkampagne am 31.05.2022 wurde ein weiterer MRS 1000 Laserscanner mittig im Frontbereich des Fahrzeuges angebracht. Dieser wurde wie auch die beiden anderen Scanner auf einer Montagehöhe von 524 mm angebracht. Die Aufteilung der Scanner und der insgesamt 96 Felder wurde wie folgt umgesetzt.

Tabelle 13: Übersicht der Aufteilung der 96 Schutzfelder abhängig von Sensor und Lenkwinkel.

Scanner 1	Geschwindigkeitsabhängig	Scanner 2	Geschwindigkeitsabhängig
Geradeausfahrt	8 Felder Nahbereich (bis 12km/h)	Geradeausfahrt	8 Felder Fernbereich (bis 20km/h)
Kurvenfahrt links 1°-10°	8 Felder (bis 20km/h)	Kurvenfahrt rechts 1°-10°	8 Felder (bis 20km/h)
Kurvenfahrt links 10°-25°	8 Felder (bis 15km/h)	Kurvenfahrt rechts 10°-25°	8 Felder (bis 15km/h)
Kurvenfahrt links 25°-35°	8 Felder (bis 15km/h)	Kurvenfahrt rechts 25°-35°	8 Felder (bis 15km/h)

Die drei MRS wurden gegenüber der ersten Messkampagne nicht über Kopf montiert, da sich bei der Auswertung der Daten herausstellte, dass die unterste, stark in den Boden gerichtete Lage keinen Mehrwert für die Detektion von Hindernissen und Personen brachte und somit eine weitere nach oben gerichtete Lage mehr Scanpunkte auf detektierten Objekten und damit eine verbesserte Erkennung ermöglicht.

Messaufbau

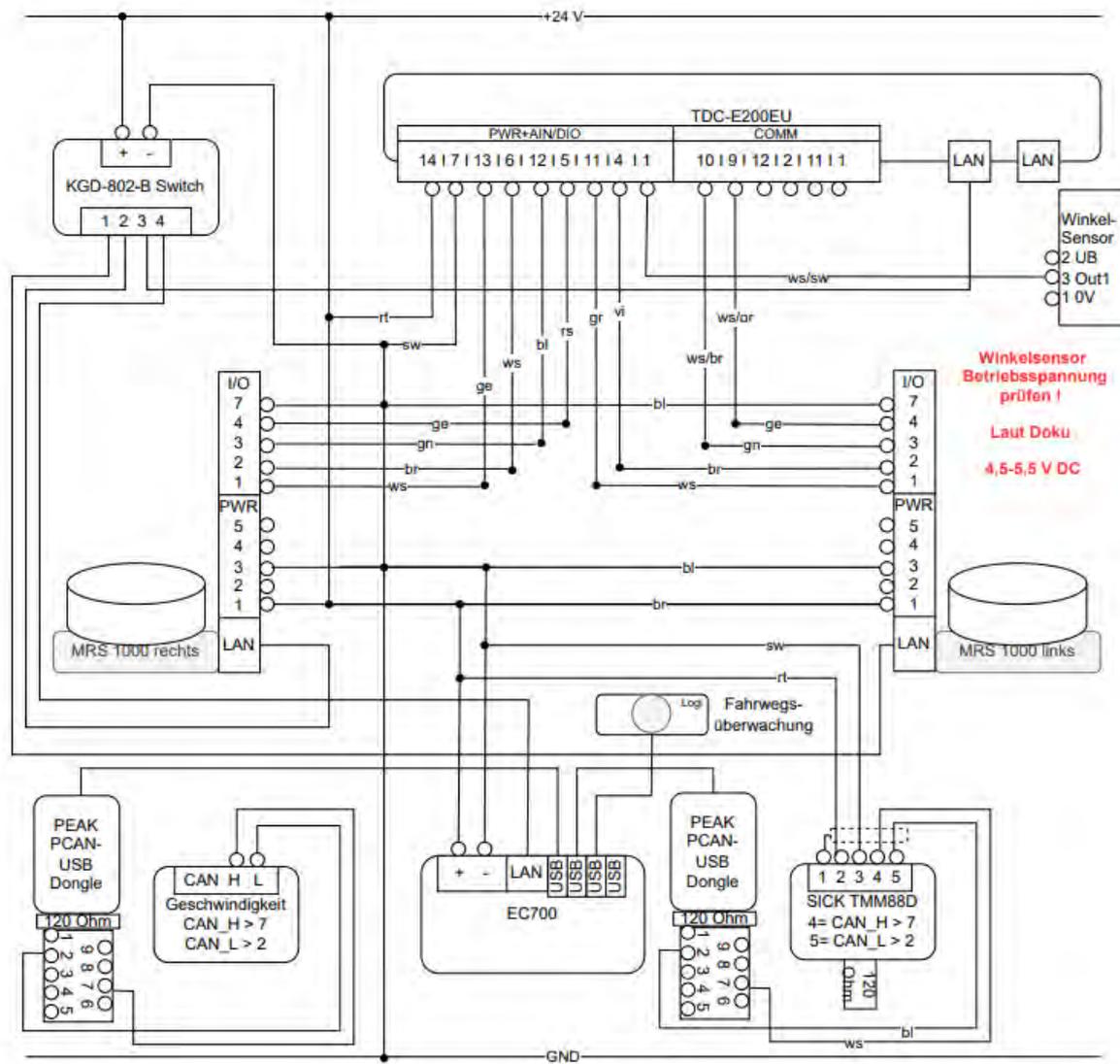


Abbildung 135: Schaltbild für den Messaufbau

Schnittstellen zum Fahrzeug:

- Geschwindigkeitsübermittlung (CAN-Bus)
- Lenkwinkel (Analogsignal)

Sensoren zur Auswertung:

- 2/3 MRS 1000 Lidarscanner (1./ 2. Messkampagne) zur Fahrwegüberwachung
- Neigungserkennung (SICK TMM88 Dynamic – AJI090 Can Bus)
- 2 USB-Kameras zu Videoaufzeichnung (Zuordnung von Schutzfeldverletzungen anhand von Bildinformationen)

Datenspeicherung:

- IPC EC700

Die Schutzfelder der äußeren MRS 1000 wurden gruppiert und auf entsprechende Ausgänge der Scanner parametrisiert, um über die Webansicht der TDC (Telematic Data Collector) eine visuelle Kontrolle bei Feldverletzungen während der Fahrt angezeigt zu bekommen. Der dritte Scanner in der Messkampagne 2 wurde ausschließlich durch eine Ethernet-Verbindung ins System eingebunden.

Bei beiden Messkampagnen ging es um eine Untersuchung des Normalbetriebs und des möglichen Einflusses des Konzepts „Adaptive Protective Field“ auf die Verfügbarkeit in diesem Normalbetrieb. Zu diesem Zweck wurden Standardszenarien wie das freie Fahren auf dem Betriebshof, das Auf- und Abnehmen von Wechselbrücken und stärkere Bremsvorgänge ausgeführt und die Ausgabe der Schutzfeldüberwachung protokolliert. Da die getesteten Szenarien keine sicherheitsrelevanten Szenarien darstellten, sondern lediglich den Normalbetrieb abbildeten, war es wünschenswert, hier keine Reaktion des Sicherheitskonzepts (also keine Verletzung der Schutzfelder) zu sehen.

Bei der zweiten Messkampagne wurde die Anzahl der Schutzfelder erhöht und es wurde verstärkt darauf geachtet, dass die Testfahrer die vereinbarten maximalen Geschwindigkeiten einhalten.

Messdatenauswertung

Zum Sammeln der Daten, die während der Messkampagnen entstanden, wurde ein SICK-internes Tool verwendet. Es wurden dabei, neben Kamerabildern, Daten zu Lenkwinkel, Beschleunigung und Geschwindigkeit des Fahrzeugs, die Punktwolken der Lidar-Sensoren und der Zustand der Schutzfelder gespeichert. Diese Daten wurden anschließend in das offene rosbag-Format konvertiert. Ausgehend von den rosbags wurde mit Python-Skripten eine Visualisierung programmiert.

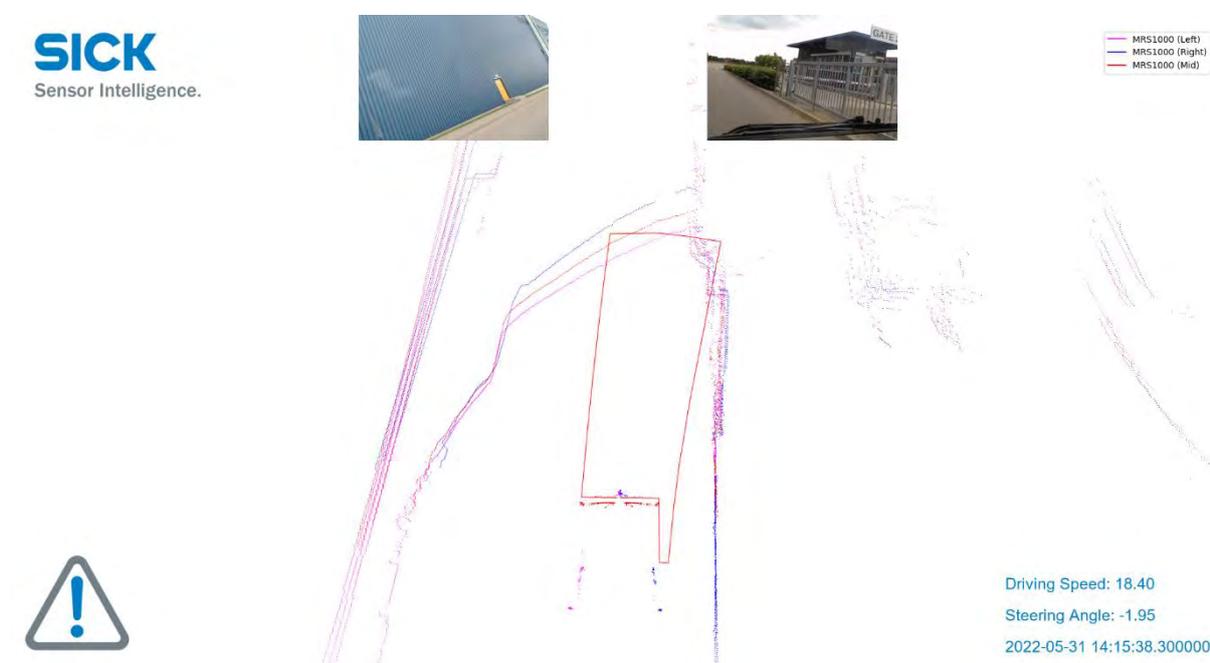


Abbildung 136: Visualisierung der Schutzfeldverletzung

In dieser Visualisierung wird das anhand des aktuellen Lenkwinkels und der aktuellen Geschwindigkeit ermittelte Schutzfeld dargestellt und dessen Zustand farblich kodiert. Zur

Plausibilisierung können dabei die Kamerabilder, aber auch die Rohdaten der Sensoren herangezogen werden. Der obige Screenshot zeigt eine Szene, in der ein Schutzfeld durch die Vegetation am Fahrrad verletz wurde.

Neben der Visualisierung wurden aus den gesammelten Daten automatisiert die Momente der Schutzfeldverletzungen extrahiert und für jeden dieser Momente dezidierte Videosequenzen und Bilder, wie das oben verwendete, erzeugt. Bei der anschließenden Auswertung zeigt sich dann, dass die Erhöhung der Feldanzahl und die neue Aufteilung der Feldbereiche eine signifikante Verbesserung ermöglichte und die Anzahl von Fehlabschaltungen deutlich reduziert werden konnte.

Die Auswertung der ersten beiden Messkampagnen zeigte aber auch auf, dass es im Bereich der Routen zu Problemen kommen kann, bedingt durch bauliche und vegetationspezifische Objekte, die sich sehr nah am Fahrbahnrand befinden.



Abbildung 137: Bereiche von Schutzfeldauslösungen, Betriebshof Langenau

Die roten Bereiche zeigen die Bereiche, in denen es zu Auslösungen kam, wenn sich das Fahrzeug den Bäumen, Sträuchern, Zäunen und Gebäuden näherte. Da das Fahrzeug bei den Messfahrten noch manuell bedient wurde, konnte dies durch eine angepasste Routenplanung und durch eine dynamische Anpassung des Fahrverhalten des Fahrzeugs im Zuge der „Adaptive Collision Prediction“ im späteren autonomen Betrieb verhindert werden.

Nachdem zunächst zur Bewertung des Konzepts „Adaptive Protective Field“ eine Implementierung der Schutzfeldberechnung zur Anwendung auf zuvor aufgenommenen Daten erfolgt war, wurde abschließend eine Implementierung in ROS erstellt, die einen Live-Betrieb ermöglicht.

Hierbei wurde die Auswertung bestimmter statischer Schutzfelder für diskrete Lenkwinkel und Geschwindigkeitsbereiche direkt im Gerät durch eine Berechnung auf der im Fahrzeug verbauten Hardware (DIMA500 Industrie-PC) ersetzt, bei der anhand der aktuellen Geschwindigkeit und des

aktuellen Lenkwinkels dynamisch das zugehörige Schutzfeld berechnet und anschließend ausgewertet wurde.

Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Fahrzeugsignale über das ROS-Framework bereitgestellt wurden, wurde die aktuelle Geschwindigkeit über den CAN-Bus des Fahrzeuges empfangen und der aktuelle Lenkwinkel über ein per MQTT übermitteltes Signal eines Lenkwinkelsensors an der vorderen Fahrzeugachse. Diese Werte wurden anschließend mit den empfangenen Messdaten der MRS1000-Lidarsensoren zeitlich synchronisiert.

Das aktuelle Schutzfeld wird mittels des „kinematic bicycle model“⁵⁴ berechnet, welches bei einer geringen Querbewegung des autonomen Fahrzeugs eine ausreichende Näherung der Fahrzeugbewegung darstellt⁵⁵.

Zur Auswertung wird für alle innerhalb des Schutzfelds liegenden Scanpunkte eine Bodendetektion durchgeführt, bei der die zum Boden gehörigen Scanpunkte herausgefiltert werden. Die verbliebenen Scanpunkte werden anschließend räumlich geclustert und schließlich wird anhand der Dimensionen eines jeden Clusters bewertet, ob eine Feldverletzung vorliegt.

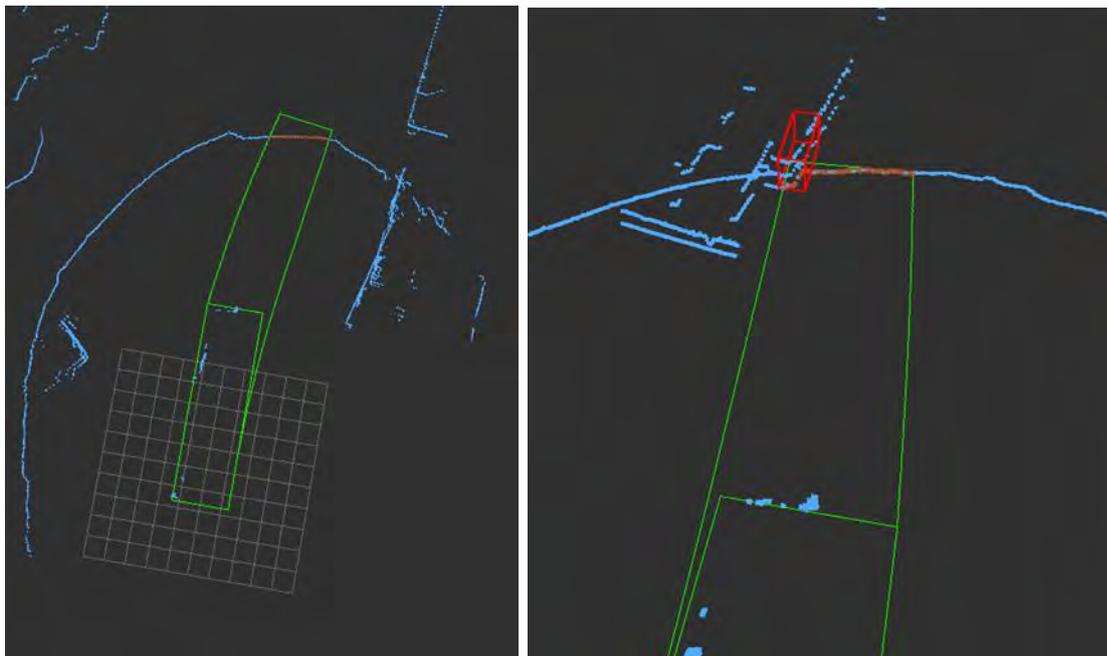


Abbildung 138: Autonomes Fahrzeug mit dynamisch berechnetem Schutzfeld.

Mittels der Daten der beiden Mesekampagnen im März bzw. Mai 2022 wurde ein Live-Betrieb des Systems simuliert und eine Evaluierung der Erkennung von Schutzfeldverletzungen durchgeführt.

Da mit diesem Vorgehen keine Limitierung auf eine festgelegte Anzahl einzelner Schutzfelder mehr besteht, sondern das aktuelle Schutzfeld jeweils dynamisch berechnet wird, kann auf den in der Mitte der Fahrzeugfront eingepflanzten MRS1000-Sensor verzichtet werden. Es werden für die Applikation

⁵⁴ (Rajamani, 2012)

⁵⁵ (Polack, Altché, d'Andréa-Novel, & de La Fortelle, 2017)

„Adaptive Protective Field“ also je ein MRS1000 Lidar-Sensor an der rechten bzw. linken vorderen Ecke des Fahrzeugs verwendet.

Die Auswertung erfolgt dabei getrennt für beide MRS1000, um im Rahmen des funktionalen Sicherheitskonzepts eine gewisse Redundanz zu erzeugen.

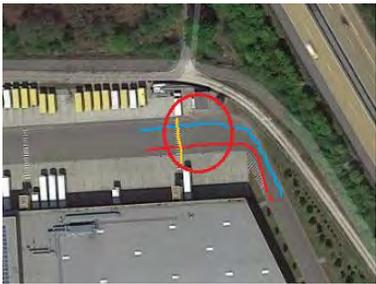


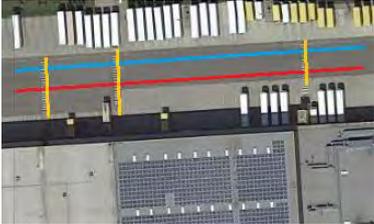
Abbildung 139: KAMAG PM mit zwei MRS1000 Sensoren (hellblau) and den vorderen Fahrzeugecken.

Feldtests

Umfangreiche Feldtests wurden durchgeführt, um die Effektivität der implementierten Schutzfeldberechnung und anschließenden Detektion von Feldverletzungen zu evaluieren. Dazu wurden anhand des erarbeiteten Sicherheitskonzepts die folgende Liste relevanter Szenarien erstellt und im Rahmen einer dritten Messkampagne im März 2023 in Langenau durchgeführt und aufgezeichnet.

Tabelle 14: Szenarienatalog für die Messkampagne

Pos.	Position auf dem Betriebshof (Bilddarstellung)	Informationen	Bemerkungen zur Messaufnahme
1		Personen passieren den Zebrastreifen zum Raucherhaus. Fahrzeuge müssen den Zebrastreifen aus beiden Fahrtrichtungen passieren. Wenn möglich, mit Trailer/Wechselbrücke (WB) an beiden Seiten vom Halleneingang (zwischen dem Betriebsweg).	Personen - Simulation durch Prüfkörper

2		<p>Personen passieren die drei Zebrastreifen. Fahrzeuge müssen die Zebrastreifen aus beiden Fahrtrichtungen passieren. Wenn möglich, mit Trailer/WB an beiden Seiten des Halleneingangs. Für die Messreihe mindestens einen Zebrastreifen berücksichtigen.</p>	<p>Personen - Simulation durch Prüfkörper</p>
3		<p>Personen passieren den Zebrastreifen direkt aus dem Drehkreuz. Fahrzeugannäherung aus beiden Richtungen. Berücksichtigung, dass hinter dem Drehkreuz Personen direkt am Fahrweg stehen.</p>	<p>Personen - Simulation durch Prüfkörper</p>
4		<p>Fußgänger parallel zur Fahrbahn. Weg ist Teil der Fahrbahn (optisch abgetrennt). Messaufnahmen bei parallelen Bewegungen zum Fahrweg und entgegenkommenden oder parallel fahrenden Lkw.</p>	<p>Personen - Simulation durch Prüfkörper</p>
5		<p>Abschattung Zebrastreifen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Überholendes Fahrzeug - Parkendes Fahrzeug 	<p>Personen - Simulation durch Prüfkörper</p>

<p>6</p>		<p>Fahrzeug kommt von links und Person kommt hinter dem Gebäudevorsprung hervor.</p> <p>Test mit 6 km/h, Anfahren an Zebrastreifen.</p>	<p>Personen - Simulation durch Prüfkörper</p>
<p>7</p>		<p>Rückwärtiges Rangieren vor die Rampe mit 6 km/h.</p> <p>Personen im Gefahrenbereich (hinter/seitlich* bei 6 km/h).</p> <p>Test der Überwachung, ob Personen im Bereich sind.</p> <p>*Person geht seitlich in den Gefahrenbereich bei rückwärtigem Rangieren.</p>	<p>Personen - Simulation durch Prüfkörper</p>
<p>8</p>		<p>Fahrzeugannäherungen an der Einfahrtsmündung und Querverkehr aus und in den außenliegenden Hallenbereich. Personen die den Zebrastreifen kreuzen.</p>	<p>Personen - Simulation durch Prüfkörper</p>
<p>9</p>		<p>Gegenverkehr - vorzugsweise bei 20 km/h.</p>	

10		Abbiegevorgänge bei Gegenverkehr.	
11		Abbiegevorgänge bei Gegenverkehr. Fahrzeuge können bis zu 20 km/h fahren.	

In allen Situationen, in denen entsprechend nah an Hindernisse herangefahren wurde, erfolgte die Auslösung des Schutzfeldes rechtzeitig, um eine Kollision zu verhindern.

Hier zeigte sich allerdings auch, dass es bei der Verwendung eines Schutzfeldes, basierend auf den vom Fahrzeug empfangenen Bewegungsdaten (Lenkwinkel und Geschwindigkeit) und einer konservativen Schätzung in Form einer Dauer von zwei Sekunden für Reaktionszeit und Bremszeit, in zahlreichen der hochdynamischen evaluierten Szenarien im Umfeld des Betriebshofs zu Feldverletzungen kam, ohne dass eine unmittelbare Kollisionsgefahr bestand, die eine Notbremsung rechtfertigen würde.

Um diese unerwünschten Feldverletzungen und die damit verbundenen initiierten Nothaltesignale zu vermeiden, wurde das Schutzfeldkonzept insofern erweitert, dass die Länge des Schutzfeldes an die Reaktionszeit des Systems und eine mögliche Bremsbeschleunigung von 2.25 m/s^2 (von den Projektpartnern ermittelter Wert für eine Bremsung auf nassem Asphalt) angepasst wird. Dadurch ergibt sich durchweg ein kürzeres Schutzfeld als mit der vorherigen konservativen Schätzung, sodass ein Großteil der falsch positiven Detektionen eliminiert werden konnte.

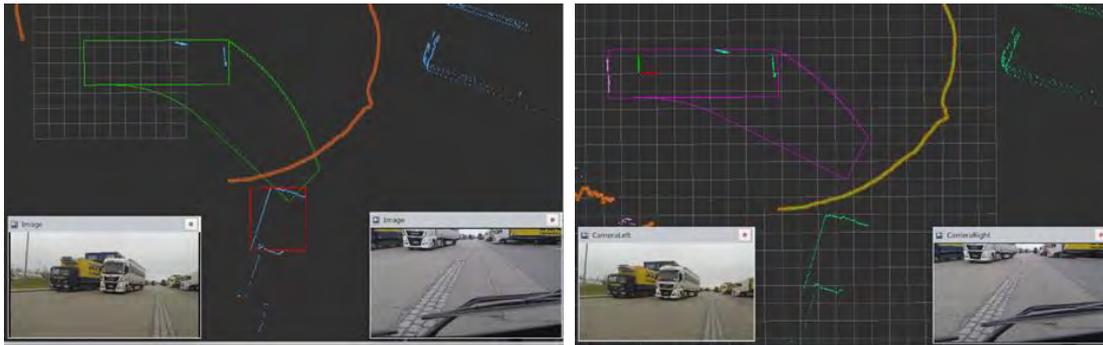


Abbildung 140: Links: Schutzfeldberechnung mittels konservativer Schätzung der Bremszeit, rechts: Schutzfeldberechnung basierend auf Reaktionszeit und Bremsbeschleunigung.

Gleichzeitig wurde anhand der aufgezeichneten Daten sichergestellt, dass alle Auslösungen des Schutzfeldes an Hindernissen weiterhin zuverlässig und rechtzeitig erfolgen.

Darüber hinaus wurde die Algorithmik für die Detektion von Feldverletzungen bzgl. der Laufzeit optimiert.

Für die Rückwärtsfahrt wurde ein zusätzlicher MRS1000-Lidar an der Rückseite des Fahrzeugs mittig installiert und ebenfalls separat ausgewertet.

Vom 24.-25. Oktober 2023 wurden weitere Tests in Jeversen durchgeführt. Dieses Mal lag der Fokus auf funktionalen Tests der Schutzfeldsysteme. Hierbei wurden verschiedene Szenarien mit Hilfe einer Schaumstoffmatte getestet, wie zum Beispiel Vorwärtsfahrt auf ein Hindernis, Rückwärtsfahrt auf ein Hindernis, Ankuppelungsversuch mit Hindernis (vgl. Abbildung 141). Die Auslösung des Schutzfeldes und ein entsprechend eingeleiteter Nothalt erfolgte in allen Szenarien bevor das Hindernis erreicht wurde. Weiterhin wurden neue Messdaten mit dem KAMAG PT und einem Trailer in verschiedenen Situationen (z. B. Ankuppelungsmanöver, rückwärtiges Rangieren, Kurvenfahrt mit Trailer) aufgenommen.



Abbildung 141: Test der Schutzfeldfunktion mit Hilfe einer Schaumstoffmatte beim Ankuppelungsmanöver

Die Grundlage für die Berechnung des Schutzfeldes wurde auf die Nutzung der vom Fahrzeug bereitgestellten Krümmung anstelle des extern gemessenen Lenkwinkels umgestellt. Zusätzlich wurde eine By-Pass-Zone für die eigenen Reifen eingeführt, die bei einem entsprechend großen

Lenkwinkel aktiv wird. Dadurch wird vermieden, dass die Reifen im Schutzfeldbereich unbeabsichtigt eine Notbremsung auslösen.

Das Clustering der Scanpunkte für die Erkennung von Schutzfeldverletzungen wurde optimiert und es wurden Filter für Wettereinflüsse wie z. B. Regen im Nahbereich der Sensoren hinzugefügt.

Weiterhin wurden Timeouts implementiert, um bei Ausfällen von Systemkomponenten oder Verzögerungen über bestimmten Schwellenwerten automatisch eine Notbremsung auszulösen.

Für den Ankupplungsvorgang des Trailers an das Fahrzeug werden die ermittelte Distanz zwischen Trailer und Fahrzeug sowie der aktuelle Kuppelzustand und Trailerwinkel genutzt, um Schutzfeldverletzungen durch den eigenen Trailer während des Ankuppelns und während der Fahrt zu verhindern.

Zusätzlich wird der Zustand der Gangschaltung berücksichtigt, wobei ein eingelegter Gang bei stillstehendem Fahrzeug ein statisches Schutzfeld in der entsprechenden Richtung aktiviert.

Einleitung Nothalt

Um bei einer Verletzung des Schutzfeldes umgehend reagieren zu können, erfolgt die Kommunikation des Nothaltessignals nicht wie die sonstige Kommunikation zwischen den Fahrzeugsystemen über das ROS-Framework, sondern unmittelbar über eine Relaisschaltung. Bei einer Schutzfeldverletzung werden entsprechende Schaltausgänge an der Recheneinheit, auf der der Adaptive-Protective-Field-Algorithmus läuft, aktiviert. Die Schaltausgänge sind mit dem sicheren Gateway von ZF verbunden und lösen eine sofortige Notbremsung des Fahrzeugs aus. Das Schaltverhalten ist pro-aktiv umgesetzt. Per default wird immer die Notbremse aktiviert, bis das Schutzfeld als frei erkannt wurde. Ein Timeout sorgt dafür, dass auch im Falle eines Ausfalls der Schutzfeldfunktion die Notbremse ausgelöst und ein sicherer Zustand erreicht wird.

Test und Erprobung der Komponente „Adaptive Protective Field“

Im Zuge der Test- und Erprobungsphase im vierten Quartal 2023 wurde die Schutzfeldfunktion im laufenden Mischbetrieb getestet und evaluiert.

Beim Fahren in der Nähe von Wechselbrücken stellte sich heraus, dass überhängende Teile aufgrund der räumlichen Gegebenheiten und der Anbauposition der Sensoren nicht erkannt werden. Alle vier Ebenen der MRS1000-Sensoren messen bei geringem Abstand zur Wechselbrücke unter dieser hindurch, wodurch der überhängende Teil nicht detektiert wird. Daraus ergibt sich für zukünftige Umsetzungen der Bedarf, Lidar-Sensorik mit mehr Sensorebenen oder 3D-Sensoren zu integrieren, um eine vollständige Erfassung der Umgebung zu gewährleisten. Abgesehen davon erfolgte in allen Situationen, in denen entsprechend nah an Hindernisse herangefahren wurde, die Auslösung des Schutzfeldes rechtzeitig, um eine Kollision zu verhindern. Hier spielt auch die Komponente „Adaptive Collision Prediction“ eine wesentliche Rolle. Normalerweise wird beim Annähern an ein Hindernis frühzeitig eine Komfort-Bremsung aufgrund der Kollisionswarnung eingeleitet, sodass es gar nicht erst zu einer Schutzfeldverletzung kommt.

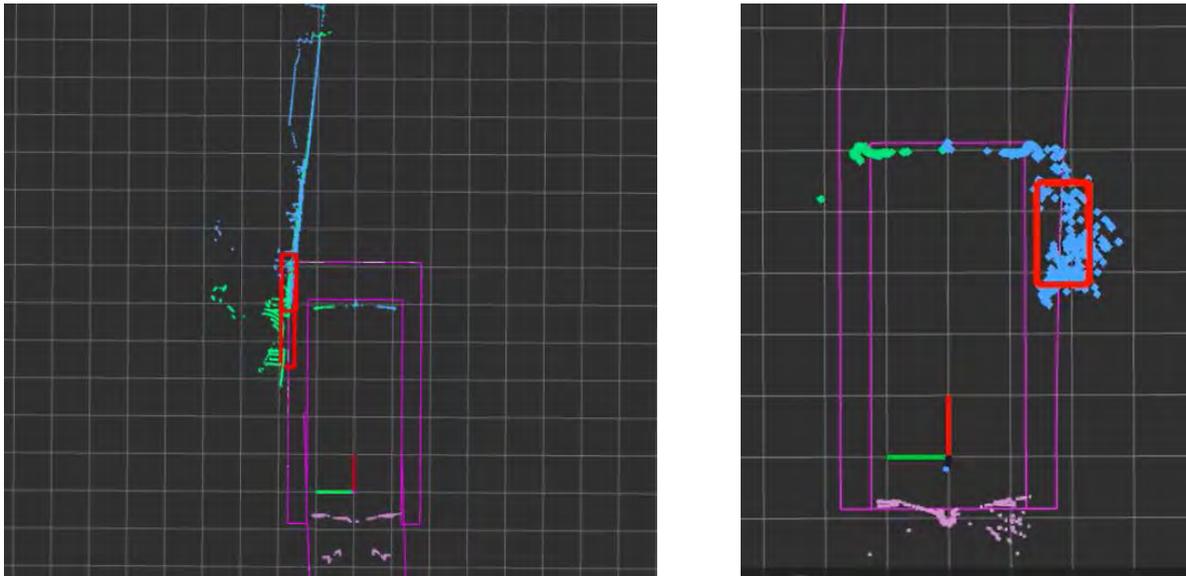


Abbildung 142: Links: Auslösung des Schutzfeldes durch ein überholendes Fahrzeug, welches beim Wiedereinscheren den Weg des autonomen Fahrzeuges eng schneidet. Rechts: Schutzfeldauslösung durch starkes Spritzwasser

Im Rahmen der Erprobungsfahrten wurde als wiederkehrende Herausforderung bei der Schutzfeldauslösung das Auftreten von False Positives identifiziert, die durch verschiedene Umweltbedingungen verursacht werden, zum Beispiel:

- **Schnee und starker Regen:** Starker Schneefall sowie Starkregen können durch Cluster von Messpunkten im Schutzfeldbereich zur Auslösung und entsprechendem Nothalt führen.
- **Starkes Spritzwasser von Reifen:** Beim Durchfahren von Regenpfützen können große Mengen an Spritzwasser die Schutzfeldsensoren aktivieren und eine unnötige Schutzfeldreaktion auslösen.

Diese Situationen erfordern eine Weiterentwicklung der Sensortechnologie und der Algorithmen, um die Robustheit des Schutzfeldes unter widrigen Bedingungen zu erhöhen und Fehlalarme zu reduzieren.

Während der Erprobung stellte sich heraus, dass die seitliche Breite des Schutzfeldes neben dem Fahrzeug, die basierend auf den Daten aus den vorhergehenden Messkampagnen in Langenau, bei denen das Fahrzeug von einem Fahrer gesteuert wurde, auf 100 mm festgelegt wurde, zu sehr nahen Vorbeifahrten an Hindernissen wie parkenden Fahrzeugen führte. Diese Nähe war für den Sicherheitsfahrer inakzeptabel und erforderte eine Anpassung des seitlichen Schutzfeldes. Daraufhin wurde in Absprache mit dem Projektkonsortium eine seitliche Verbreiterung des Schutzfeldes neben dem Fahrzeug festgelegt. In Anlehnung an das Mindestquersmaß für Körper nach DIN EN ISO 13854⁵⁶ und DIN EN ISO 13857⁵⁷ wurde eine seitliche Breite von 500 mm neben dem Fahrzeug gewählt, als Abwägung zwischen Risikominimierung und gleichzeitig der Möglichkeit, im

⁵⁶ (Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2019)

⁵⁷ (Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2019)

Mischbetrieb hinreichend störungsfrei fahren und an Hindernissen (z. B. parkenden Fahrzeugen, Vegetation, Gegenverkehr, Schneewehen) vorbeifahren zu können.

Dies führte dazu, dass das autonome Fahrzeug Hindernisse immer mit einem seitlichen Mindestabstand von 0,5 m passieren musste. War dieser Abstand nicht möglich, konnte das Fahrzeug nicht autonom an einem Hindernis vorbeifahren. Im weiteren Verlauf der Erprobungsphase zeigte sich jedoch, dass ein effizienter Betrieb ohne unnötige Nothalte möglich ist, wenn bestimmte Rahmenbedingungen eingehalten werden. Beispielsweise müssen Schneehaufen nahe dem Fahrbahnrand oder seitlich hereinragende Vegetation entfernt werden, um einen reibungslosen und sicheren autonomen Betrieb zu gewährleisten.

6.2. Sichere Umfeld-/Objekterfassung mit Infrastruktur-Sensorknoten für sicherheitsgerichtete Funktionen (AP 6.3)

Der Betriebshof von DACHSER verfügt über mehrere Fußgängerüberwege, die zu oder von den Gebäuden wegführen. Einige dieser Überwege befinden sich hinter Kurvenbereichen oder können generell durch abgestellte Container für heranfahrende Fahrzeuge schlecht eingesehen werden. Mittels Infrastruktursensorik an ausgewählten Überwegen sollten daher automatisch Personen, die die Straße überqueren, erkannt und Warnungen an die herannahenden automatisierten Fahrzeuge geschickt werden.

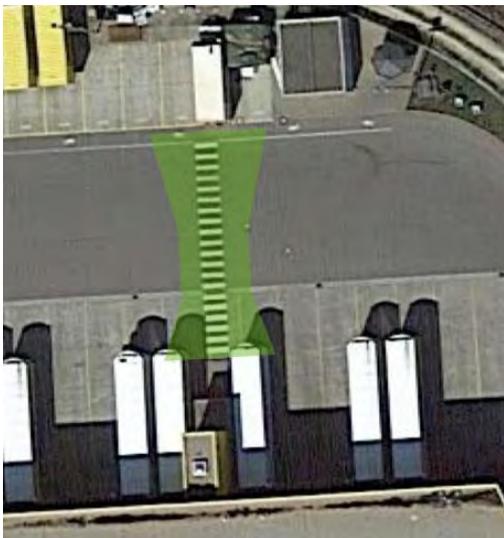


Abbildung 143: Ansicht eines typischen Zebrastreifens auf dem Betriebshof von DACHSER in Langenau.

Für die Realisierung der Detektion von Personen wurden verschiedenen Sensoren bzw. Sensorkombinationen, in Hinblick auf mögliche Anbaupositionen vor Ort analysiert. Für einen Großteil der schlecht einsehbaren Zebrastreifen kam nur die Gebäudeseite als Anbauposition in Frage, da sich auf der gegenüberliegenden Seite die Parkplätze für die Wechselbrücken befinden und somit die freie Sicht auf den zu überwachenden Zebrastreifen von dieser Seite aus eingeschränkt ist. Ein Anbau von Sensorik direkt vor den Parkplätzen ist nicht praktikabel, da einerseits zusätzliche Strukturen zur Befestigung benötigt werden, die den laufenden Betrieb stören würden. Andererseits

müsste die eingesetzte Sensorik einen Öffnungswinkel von fast 180° aufweisen, um auch auf Fußgänger reagieren zu können, die schräg von der Seite die Straße überqueren (vgl. Abbildung 148: In grün dargestellt ist der beobachtete Bereich, den Fußgänger auf dem Gelände zumeist wählen, um die Straße zu überqueren). Um sichtbare Beschädigungen durch die Anbringung zu vermeiden, wurde sich darauf geeinigt, jegliche Sensorik auf den Dächern über den Ein-/Ausgängen des Gebäudekomplexes zu befestigen. Dies bietet außerdem den Vorteil, dass, neben einer ausreichenden Distanz zum eigentlichen Zebrastreifen, keine Verdeckungen durch Personen oder kleinere Objekte entstehen.

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen wurden alle 2D-Lidar-Sensoren für das SAFE20-Projekt ausgeschlossen. 3D-Lidar-Sensoren, wie der MRS6000, wären prinzipiell für die Lösung des Problems geeignet, haben jedoch einen hohen Einkaufspreis. Da der Betriebshof über eine Vielzahl von Zebrastreifen verfügt, die alle separat mit Sensorik ausgestattet werden müssten, wurde entschieden, eine günstigere Lösung, bestehend aus Radar und Kamera, zu testen.

Radar-Sensorik bietet neben einer hohen Reichweite auch die Möglichkeit, direkt die Geschwindigkeit von Objekten zu ermitteln. Weiterhin hat der in diesem Projekt eingesetzte SICK Radar-Sensor RMS2xxx den Vorteil, dass zugleich ein Tracking auf dem Sensor selbst ausgeführt wird und als Output getrackte Objekte zurückgeliefert werden. Ergänzend zum Radar wurde evaluiert, inwieweit eine Kamera die Detektion von Personen verbessert. Da der Betriebshof im Bereich der Zebrastreifen ausreichend beleuchtet ist, liefert die Kamera auch in der Nacht ausreichend gute Bilder für eine Erkennung von Personen.

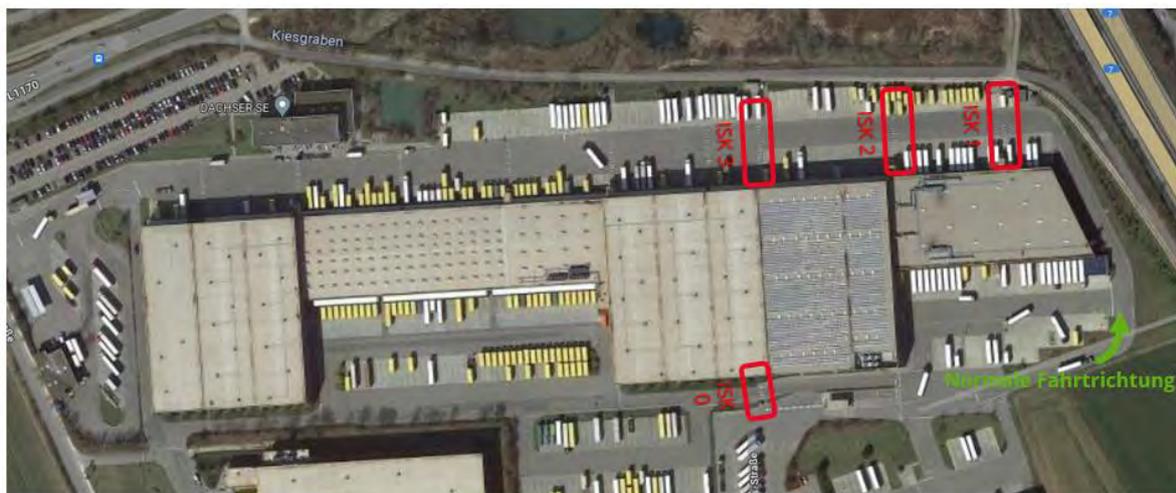


Abbildung 144: Oben: Darstellung des Betriebshofs. Die rot markierten Bereiche zeigen die durch einen Infrastrukturknoten (ISK) überwachten Bereich.

Auf dem DACHSER Betriebshof wurden insgesamt vier Zonen ausgesucht, die exemplarisch mit einem Infrastrukturknoten ausgestattet wurden (vgl. Abbildung 144). Der Bereich im Süden (ISK 0) wurde gewählt, da dort Personen direkt vom Drehkreuz auf die Straße treten und somit erst spät von einem anfahrenden Fahrzeug gesehen werden. Im Norden wurde der Zebrastreifen direkt hinter der Kurve (ISK 1) als eine potenzielle Gefahrenzone erfasst, da auch hier ein herankommendes Fahrzeug spät den vollständigen Zebrastreifen einsehen und aus der Halle kommende Personen erkennen kann. Weiterhin befindet sich in diesem Bereich ein überdachter Pausenplatz, sodass der angrenzende Zebrastreifen stärker frequentiert ist. Die verbliebenen zwei Zebrastreifen (ISK 2 und 3) wurden gewählt, um einen längeren Bereich mittels Infrastruktursensorik abzudecken. Diese größere Überwachungszone soll ermöglichen, auf Geschwindigkeiten von mindestens 20 km/h zu beschleunigen, sofern jede Infrastruktur in diesem Bereich frühzeitig signalisiert, dass die jeweiligen Bereiche frei sind.

Zur Erprobung der Algorithmen, basierend auf Radar- und Kamerasensorik, wurden Testdaten an den Standorten von ISK 0 und ISK 1 über mehrere Tage während einer Messkampagne gesammelt. Die Standorte für ISK 2 und 3 ähneln den Bedingungen von ISK 1, sodass hier keine zusätzlichen Aufnahmen vonnöten waren.

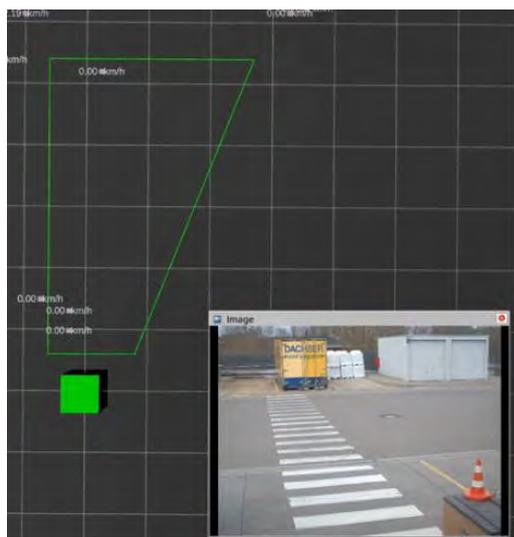


Abbildung 145: Darstellung der Kamera- und Radardaten aus Sicht der Infrastruktursensorik: Das grüne Polygon zeigt den zu überwachenden Bereich in globalen Koordinaten.

Das Konzept zur Detektion von relevanten Objekten im Bereich von Zebrastreifen sah zunächst vor, dass eine „Region of Interest“ vom Nutzer definiert, in der eine Überwachung stattfinden soll (vgl. Abbildung 145). Eine Hintergrundausblendung, die sich laufend aktualisiert, sorgt dafür, dass alle statischen Objekte, die der Radar-Sensor detektiert, ausgeblendet werden. Weiterhin werden Radarobjekte, hervorgerufen durch bspw. vorbeifahrende Fahrzeuge, auf Basis von Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung herausgefiltert. Die verbliebenen Radarobjekte werden auf Basis von Bewegungsrichtung, Position und Trackingalter analysiert. Anhand dieser Betrachtung wird entschieden, ob der zu überwachende Bereich frei oder durch eine Person belegt („infringed“) ist (vgl. Abbildung 146).

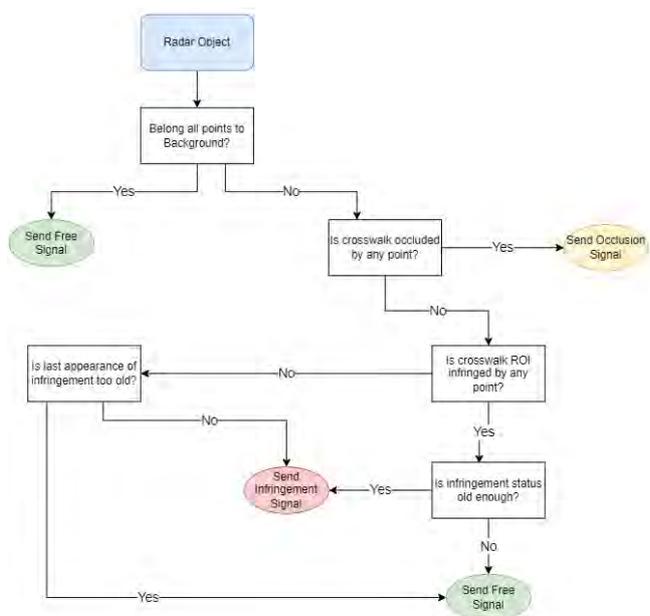


Abbildung 146: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Belegung eines Zebrastreifens durch Personen auf Basis von Radardaten.

Die Erweiterung des Konzepts mit einer zusätzlichen Kamera (vgl. Abbildung 147) dient dazu, den Anteil an falsch positiven Detektionen zu reduzieren. Hierbei werden die Bilder der Kamera zunächst hinsichtlich des Kontrasts und der Helligkeit angepasst, sodass der Bereich um den Zebrastreifen möglichst gut sichtbar ist. Anschließend wird die Qualität des Bildes automatisch anhand des Entropiewertes bewertet.

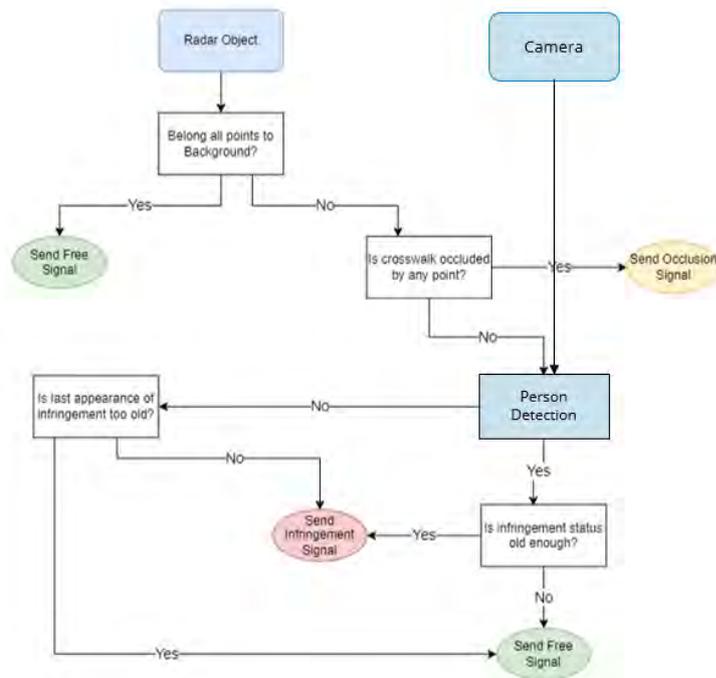


Abbildung 147: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Belegung eines Zebrastreifens durch Personen auf Basis von Radar- und Kameradaten.

Wird das Bild als gültig markiert, wird dieses an ein Convolutional Neural Network für Personendetektion weitergeleitet. Als Ergebnis liefert dieses Netzwerk für jede detektierte Person eine Bounding Box sowie einen Konfidenzwert. Für die Überwachung des Zebrastreifens betrachten wir in diesem Zusammenhang lediglich Detektionen innerhalb dieses Bereichs mit einem Konfidenzwert über 85%. Die gefilterten, kamerabasierten Detektionen werden mit den Radardetektionen anschließend fusioniert, wobei auf eine exakte räumliche Fusion verzichtet wird. In folgenden Situationen wird nun die ISK als belegt angezeigt:

- Wenn sowohl eine Person in den Radardaten als auch in den Kameradaten im Bereich des Zebrastreifens detektiert wird,
- Wenn nur in den Radardaten eine Person detektiert wird und die Kameradaten als ungültig gekennzeichnet sind

Das ISK-Signal wird abschließend über V2X-Kommunikation mittels der von ZF bereitgestellten ProConnect an das autonome Fahrzeug übermittelt und dort mit den durch die Fahrzeugsensorik erfassten Objekten fusioniert.

Da Zebrastreifen generell nicht von einem Fahrzeug überfahren werden sollten, sobald sich eine Person darauf befindet, wurde im Rahmen des Projekts darauf verzichtet, die exakte Position der

Personen in der Gefahrenzone zu erfassen. Stattdessen wird ein Polygon, das den gesamten Zebrastreifen umfasst, an das Fahrzeug als Objekt im Einheitskoordinatensystem der Automatisierungszone übermittelt (vgl. Abbildung 148). Die Transformation in das Automatisierungskordinatensystem erfolgt auf Basis der bekannten Position der Infrastruktursensorik innerhalb der von SICK erstellten Karte, die als Grundlage zur Lokalisierung verwendet wird.

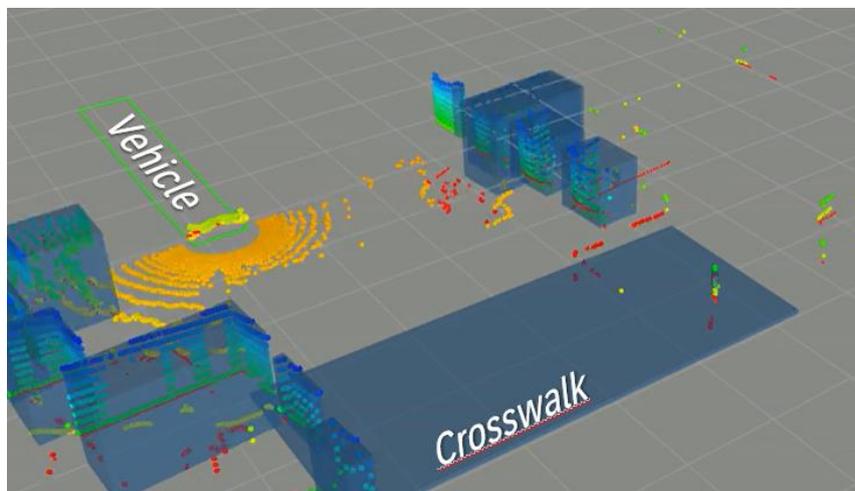


Abbildung 148: Ansicht des Zebrastreifenobjekts und weiteren getrackten Objekten aus der Sicht des Fahrzeugs.

Sowohl die auf einem einzelnen Radarsensor basierende Umsetzung als auch die Kombination aus Radar- und Kamerasensorik wurden auf ausgewählten Daten der oben erwähnten Messkampagne getestet (vgl. Abbildung 149 und Abbildung 150). Die Versuche haben gezeigt, dass mit nur einem Radarsensor mindestens 85% der der Feldverletzungen korrekt erkannt werden. Der Anteil an falsch positiven Meldungen ist bei diesem Ansatz relativ hoch, u. a. bedingt durch Mehrfachreflexionen, die bisher nicht weggefiltert werden konnten. Die Integration der Kamera hat zu einer stabileren Klassifikation der relevanten Objekte und somit besseren Gesamtergebnissen geführt.

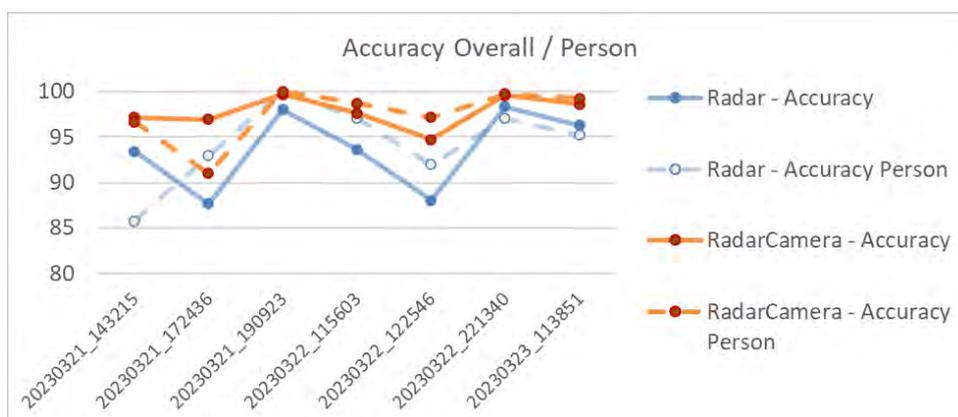


Abbildung 149: Vergleich der Accuracy in Bezug auf alle Klassen (durchgehende Linie) sowie nur für die Klasse „Person“ (gestrichelte Linie) zwischen dem radarbasierten (blau) und radar-kamera-basierten (rot) Ansatz. Der auf zwei Sensoren beruhende Ansatz ist in nahezu allen Testdaten besser.

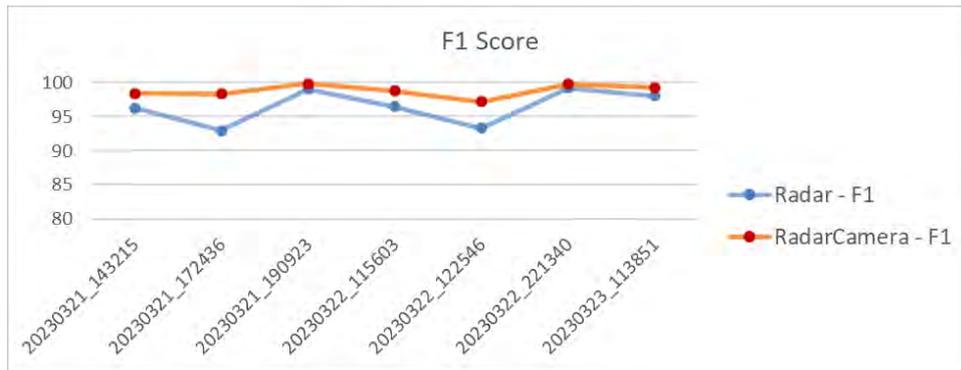


Abbildung 150: Vergleich des F1 Scores zwischen radar-basierten und radar-kamera-basiertem Ansatz.

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

In diesem Kapitel wird das digitale Echtzeit-Abbild der Automatisierungszone (DAZ) beschrieben, das durch die Fusion von HD-Karten und Live-Umgebungsdaten von Infrastruktur-Sensorknoten (ISK) und Fahrzeugen entsteht, um eine hochpräzise und aktuelle Darstellung des Verkehrsraums zu gewährleisten.

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 (siehe Kapitel 7.1 „Aufbau und Inbetriebnahme Automatisierungszone (AP 7.1)“) 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 151): 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.

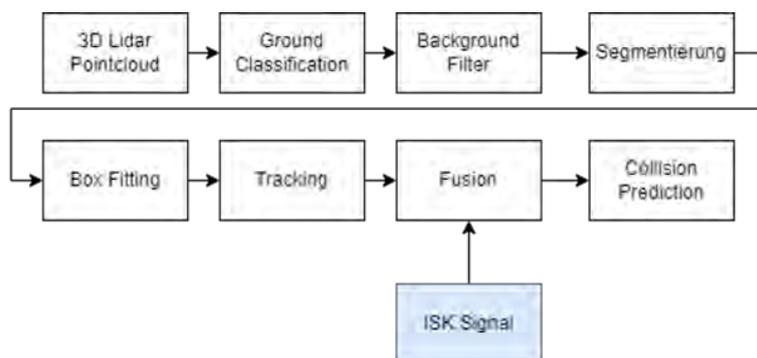


Abbildung 151: Aktualisierte Prozesskette Kollisionsvorhersage.

Weiterhin werden die Signale der ISK genutzt, um die maximal zulässige Geschwindigkeit des Fahrzeugs, die auf Missionen gefahren werden darf, zu bestimmen (vgl. Abbildung 152). 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.

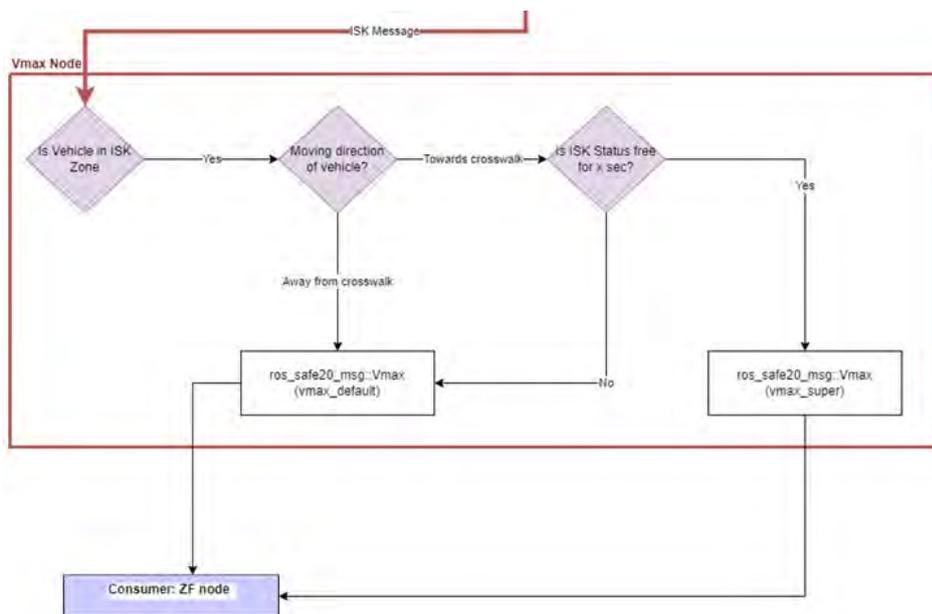


Abbildung 152: Ablauf zur Bestimmung der maximalen Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs.

6.4. Zusammenfassung AP 6

In diesem Arbeitspaket wurden 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.

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 (Bremsen, 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.

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. Diese wurde prototypisch in den KAMAG PT sowie in je einen Infrastrukturknoten (ISK) auf der Nord- und Südseite des Betriebshofs integriert. Des Weiteren wurden die drei ISKs auf der Nordseite mit WLAN-Modulen ausgestattet, um untereinander den aktuellen ISK-Status auszutauschen (vgl. Abbildung 153) und anschließend an das Fahrzeug weiterzuleiten.

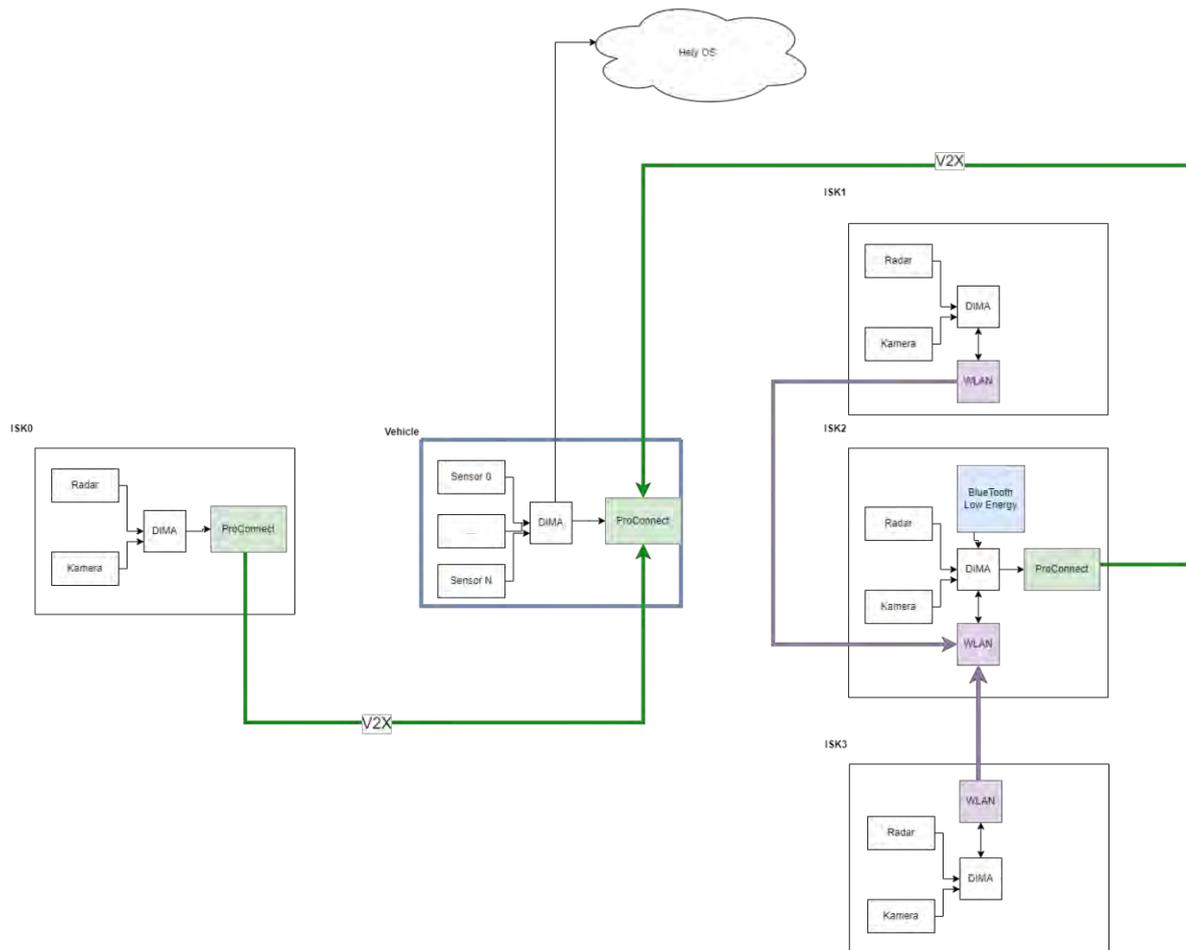


Abbildung 153: Übersicht Kommunikation zwischen Automatisierungszonen und autonomem Fahrzeug

Die von ZF bereitgestellte Kommunikationseinheit ProConnect hatte die Aufgabe, den Status der Infrastruktursysteme via V2X-Kommunikation an das Fahrzeug zu senden und diesem mitzuteilen, wann auf Gefahren zu achten ist und welche Höchstgeschwindigkeit in den überwachten Zebrastreifenzonen gefahren werden kann.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde mehrmalig die Stabilität der Verbindung zwischen Fahrzeug und ISKs unter verschiedenen Bedingungen getestet, ausgewertet und anschließend optimiert (vgl. Abbildung 154 und Abbildung 155). An den im Norden des Betriebshofs aufgezeichneten Daten ist beispielhaft zu erkennen, dass der Empfang zwischen -50 m und +60 m ausgehend von der ProConnect (ISK 2) am zuverlässigsten ist. Außerhalb dieses Bereichs reduziert sich der Empfang drastisch (siehe Abbildung 155). Aus diesen Messungen lassen sich Anforderungen an die Ausstattung vergleichbarer Betriebshöfe ableiten.

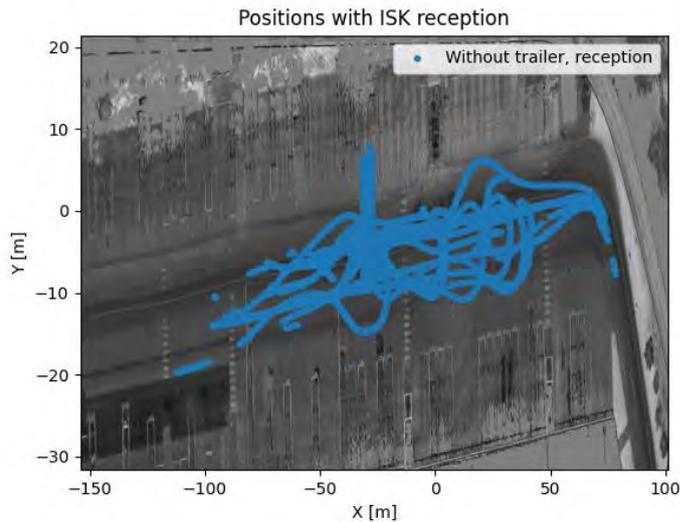


Abbildung 154: Darstellung aller empfangenen ISK-Nachrichten via ProConnect auf einem autonomen Fahrzeug auf der Nordseite des Betriebshofs.

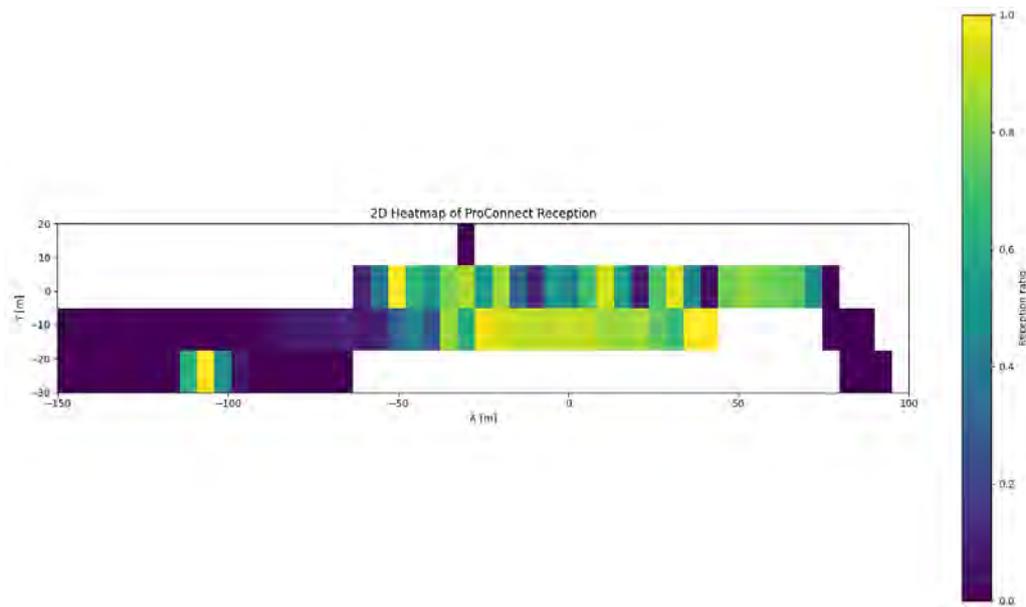


Abbildung 155: Heatmap bezüglich ProConnect-Empfangs auf dem Fahrzeug

Erklärung zu Abbildung 155:

Die Heatmap zeigt das Verhältnis aus Anzahl der Zeiten, in denen ProConnect-Nachrichten verfügbar waren, geteilt durch die Gesamtzahl der Besuche einer Position durch das Fahrzeug. Ein Wert von 1 bedeutet, dass immer Empfang bestand, während ein Wert von 0,5 bedeutet, dass nur in der Hälfte der Zeit ein Empfang möglich war. Weiße Zellen bedeuten, dass diese nie durch ein Fahrzeug belegt wurden.

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. Die von KAMAG geplante GNSS-Basisstation war nicht notwendig, eine kostengünstigere Alternative unter Nutzung der SAPOS-Korrekturdaten brachte vergleichbare Ergebnisse.

7.2. Systemintegration Fahrzeuge (AP 7.2)

In diesem Arbeitspaket wurden die Technologien für die Automatisierung erstmals auf den Fahrzeugen erprobt. Dabei wird im Folgenden auf alle drei Fahrzeuge einzeln eingegangen, aufgrund der hohen Komplexität wird die Umfelderkennung gesondert betrachtet.

Hochperformante Rechnerhardware

Der Projektpartner STW unterstützte aktiv die Integration der Hard- und Softwarekomponenten in die Fahrzeuge.

Für die Integration der von STW in AP 4.4 bereitgestellten und weiterentwickelten hochperformanten Rechnerhardware in die Fahrzeuge wäre die Portierung der Software der Konsortialpartner, die auf den jeweils seit Projektbeginn verfügbaren Industrie PCs entwickelt wurde, auf die STW-Rechnerhardware notwendig gewesen. Für die Konsortialpartner hätte dies einen erheblichen Aufwand dargestellt, der für das funktionale Testen des Gesamtsystems nicht zwingend erforderlich war. Die Partner haben deshalb auf die Portierung verzichtet.

Im Konsortium wurde daher entschieden, auf vorhandene Systeme für die Leitstandaktivitäten aufzusetzen, wie in AP 5.3 geschildert. Es wurde keine weitere Unterstützung von STW-Seite benötigt. STW plant im Anschluss an das Projekt die Integration auf einem Versuchsträger.

Umfeldererkennung

Die Integration der SICK-Umgebungswahrnehmung erfolgte in mehreren Schritten, angefangen mit einem Testaufbau zur Sensorevaluation, über mehrere Messkampagnen und Teilintegrationen, hin zur finalen Inbetriebnahme auf dem DACHSER-Betriebsgelände.

Testaufbau bei SICK Hamburg

Im ersten Schritt wurde von SICK ein Sensortestaufbau erstellt, um potenzielle Sensoren und Sensorsetups hinsichtlich ihres Einsatzes für die Umgebungswahrnehmung zu evaluieren. Der mobile Testaufbau hatte ähnliche Abmessungen und Sensoranbaupositionen wie die Zielplattform, was es

ermöglichte, erste Messdaten für die Algorithmen-Entwicklung auszuwerten (siehe Kap. 6.1 / Kollisionsvorhersage: Sensorauswahl).

Messkampagnen in Langenau

Im Rahmen des Projekts wurden von SICK mehrere Messkampagnen im März 2022, Mai 2022 und März 2023 auf dem DACHSER-Betriebsgelände in Langenau durchgeführt. Ziel war dabei das Aufzeichnen von Messdaten aller am Fahrzeug installierten Sensoren, während eine umfangreiche Liste von Szenarien (siehe Tabelle 14 / Kap. 6.1 – Feldtests) gemäß des zuvor erarbeiteten Sicherheitskonzepts nachgestellt wurde, insbesondere Fußgänger in der Nähe des Fahrzeugs, Annäherung an Zebrastreifen, Fußgänger in kritischen Bereichen mit teilweiser Verdeckung etc.

Die hier gesammelten Daten dienen als Grundlage für die Entwicklung der Umfelderkennung und wurden auch zur Evaluation der Algorithmik verwendet (siehe Kap. 6.2). Zudem konnte hier ein Einblick in den Betriebsablauf und die umgebungsspezifischen Eigenheiten erlangt werden.

Integration in Jevern

Am 28./29.06.2023 wurden auf dem ZF Erich Reinecke Testtrack in Jevern das finale Sensorsetup sowie die Recheneinheit für die Umfelderkennung in den KAMAG PrecisionTractor (PT) integriert. Dazu wurden die Sensoren am Fahrzeug montiert und kalibriert, die Recheneinheit von SICK in das System von ZF eingebunden und alle Interfaces zwischen ZF und SICK grundlegend getestet. Ein Testprotokoll wurde erarbeitet, um bei der Integration sicherzustellen, dass alle Funktionen und Interfaces ordnungsgemäß gestartet sind und Daten liefern.

Des Weiteren wurden je eine ProConnect-Kommunikationseinheit von ZF prototypisch sowohl ins Fahrzeug als auch in den Infrastrukturknoten integriert. In Jevern wurde zunächst getestet, ob eine Verbindung unter optimalen Bedingungen zum Fahrzeug aufgebaut werden kann und Nachrichten korrekt verschickt werden.

Im Zeitraum vom 24.-25. Oktober 2023 wurden weitere Integrationstests in Jevern durchgeführt. Dieses Mal lag der Fokus auf die funktionalen Tests der Umfelderkennung, insbesondere der Schutzfeldsysteme (sog. Adaptive Protective Fields). Eine genauere Beschreibung der durchgeführten Tests ist in Kap. 6.1 – Feldtests zu finden.



Abbildung 156: Test der Schutzfeldfunktion mit Hilfe einer Schaumstoffmatte beim Ankuppelungsmanöver

Finale Integration in Langenau

Vom 13.-17.11.2023 hat SICK auf dem DACHSER-Betriebshof in Langenau zusammen mit den Projektpartnern die Umfelderfassung final in Betrieb genommen und getestet.

Hier wurden zum einen die Schutzfelder wieder in Betrieb genommen und unter realen Bedingungen getestet. Ein erneutes Testen der Schutzfelder vor Ort ist wichtig, um sicherzustellen, dass es in der Umgebung nicht zu falschen Auslösungen kommt (z. B. durch Engstellen oder Bodenwellen).

Zudem wurde die Kollisionsvorhersage zusammen mit dem System zur Pfadplanung und Fahrzeugsteuerung von ZF und der Lokalisierung von Götting in Betrieb genommen und getestet. So konnte erstmalig das Zusammenspiel von Objekttracking und Lokalisierung getestet werden. Die Lokalisierung ist wichtig für das Objekttracking, da hier die Eigenbewegungskompensation der detektierten Objekte erfolgt und dies einen direkten Einfluss auf die Qualität der Geschwindigkeitsschätzung des Tracking hat. Ebenso war es wichtig zu testen, wie die Fahrzeugsteuerung auf die vorhergesagten Kollisionen der Umfelderfassung reagiert. Hier musste eine Feinabstimmung der Sensitivität der Kollisionsvorhersage durchgeführt werden, damit die Pfadplanung das Fahrzeug im realen Betrieb einerseits nicht durch falsche Detektionen zu sehr einbremst, andererseits komfortabel und sicher vor tatsächlichen Hindernissen anhält.

Auch das Zusammenspiel und die Fusion von Infrastruktur und Fahrzeugumfelderfassung konnte hier zum ersten Mal unter realen Bedingungen getestet werden.

Systemintegration des automatisierten KAMAG PT

Die Systemintegration war eine besonders anspruchsvolle Aufgabe, da der KAMAG PT für das Projekt komplett neu aufgebaut wurde und Prototypenfunktionen von verschiedenen beteiligten Partnern integriert werden mussten. Die Integration und der Test der Funktionen lassen sich dabei grob in fünf Phasen unterteilen (siehe Abbildung 157):

1. Integration von zusätzlich benötigter Hardware / Software für die Automatisierung,
2. Integration und Test von Grundfunktionen (z. B. Längs-/Querregelung, Kupplungsaktuator/Sensoren),

3. Test kompletter Missionen auf einem abgeschirmten Testgelände,
4. Integration des Fahrzeugs in die endgültige Umgebung mit der Hofinfrastruktur im Mischverkehr,
5. Finaler Feldtest.

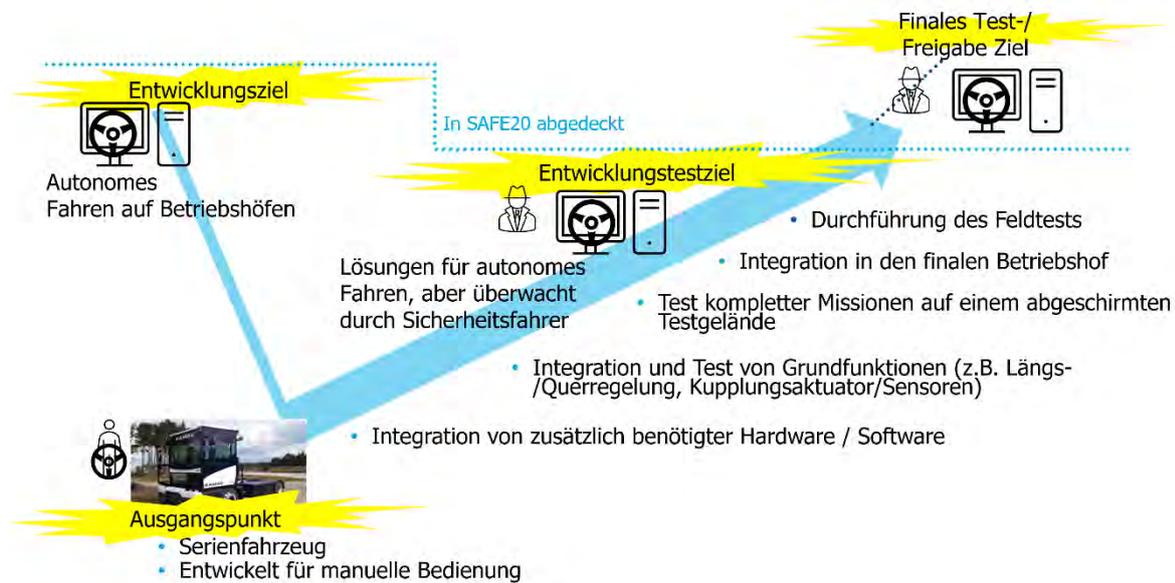


Abbildung 157: Der Entwicklungsprozess des KAMAG PT mit Fokus auf die Integration

Integrationsphase 1: Integration von zusätzlich benötigter Hardware / Software

Mit diesem Schritt wurde das Konzept für die Kommunikation der unterschiedlichen zur Automatisierung notwendigen Fahrzeugkomponenten umgesetzt. Ausgangspunkt war dabei der KAMAG PT, ein für die manuelle Bedienung entwickelter Hofschlepper, in dem zusätzliche Hardware und Softwarekomponenten eingebaut werden mussten. So erfolgte unter anderem bei KAMAG die Integration ihrer Ansteuerung des Liftarms und der Sattelkupplung und bei ZF die Integration der Schnittstelle autonomes Fahren (s. a. Kap. 4.7 „Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)“ und Kap. 4.11 „Schnittstelle autonomes Fahren (AP 4.11)“). Für die Automatisierung wurde eine netzwerkbasierte Architektur basierend auf ROS eingesetzt. Ein Schaubild, wie die erwähnten Komponenten miteinander verbunden sind, findet sich in Abbildung 88: Aufbau des virtuellen Fahrers mit der Automatisierung im Projekt (S. 131), das so im KAMAG PT umgesetzt wurde (siehe auch Abschnitt „Virtueller Fahrer“). Die erfolgreiche Integration dieser Phase wurde dabei durch das fehlerfreie Aufstarten der Komponenten und einfachen Interfacetests sichergestellt. Dabei wurden gezielt zwischen den Interfaces der Komponenten Testsignale eingespielt, wodurch sich eine erwartete Reaktion der Aktorik und Sensorik überprüfen ließ. Dies kann z. B. die Anforderung zum Öffnen der Verriegelung der Sattelkupplung sein, die für das Abkuppeln des Aufliegers benötigt wird.

Integrationsphase 2: Integration und Test von Grundfunktionen

In der nächsten Phase wurde die Systemintegration der folgenden Grundfunktionen des KAMAG PT auf der ZF-Testbahn durchgeführt:

- Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (Aufnehmen, Absetzen etc.),
- Sichere Notbremse,
- Schnittstelle autonomes Fahren für KAMAG PT (ZF ADOPT).

Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (Aufnehmen, Absetzen etc.)

Für das Aufnehmen und Absetzen des Aufliegers sind mehrere, im Rahmen von Arbeitspaket 4 entwickelte Komponenten notwendig:

- Algorithmus zur Lokalisierung des Aufliegers + Sensorik,
- ausgerüsteter Sattelaufleger (SAF-Stecker (zum automatischen Kuppeln der Druckluft und elektrischen Leitungen), Immobilizer (elektronische Feststellbremse)),
- Steuergerät zur vereinfachten Ansteuerung des Liftarms und der Sattelkupplung, inklusive Aktorik und Sensorik,
- ADOPT als Fahrzeugschnittstelle für Lenk- und Geschwindigkeitsbefehle und Erfüllung der Sicherheitsanforderungen,
- Automatisierungssteuerung inklusive Service „Auf- und Absatteln“ sowie Fahrt von A zu B.

Ziel im AP 7 war es, durch das richtige Zusammenspiel aller Einzelkomponenten das automatische Aufnehmen und Absetzen des Sattelauflegers im KAMAG PT zu ermöglichen.

Am Schluss konnte der komplette Vorgang des automatischen Auf- und Abnehmens des Sattelauflegers in mehreren Durchgängen erfolgreich erprobt werden.

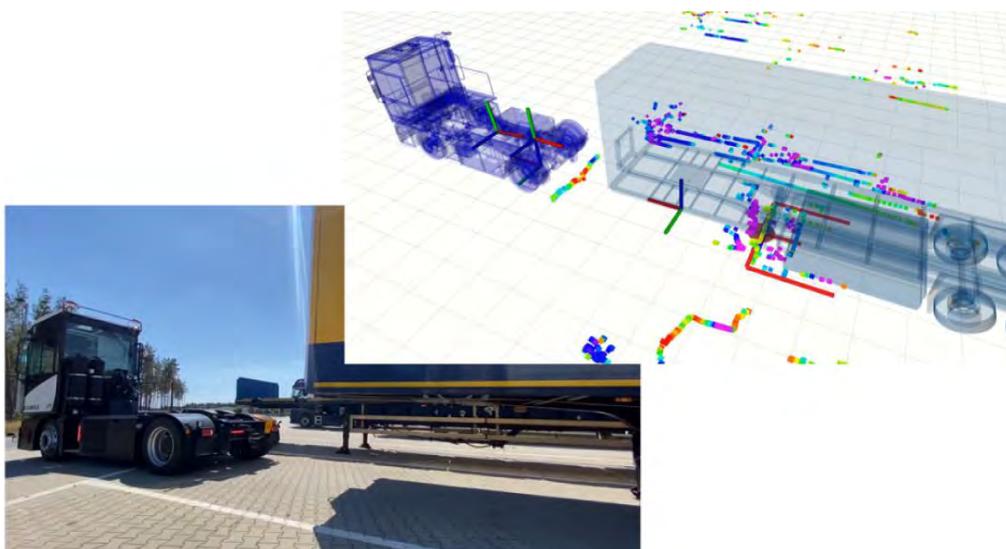


Abbildung 158: Automatisierte Anfahrt an den Auflieger und Visualisierung mit Lidar-Reflexionen zur Ortung des Sattelauflegers

Zusätzlich zu der funktionalen Integration wurden die Sicherheitsbetrachtungen aus AP 3 für den Vorgang des automatischen Kuppelns des Sattelauflegers fortgesetzt und mit den praktischen Ergebnissen aus den Versuchen abgeglichen. Die Ergebnisse wurden in einem separaten Bericht dokumentiert.

Schnittstelle autonomes Fahren für KAMAG PT und autonome Notbremsung

Hauptziel war es, die sicherheitskritischen Aufgaben von ADOPT (ZF-Komponente für die Schnittstelle des autonomen Fahrens) mit einer hohen Verlässlichkeit darzustellen:

- Sicheres Erkennen eines Fahrereingriffes,
- Überführung des Fahrzeugs im Fehlerfall in einen sicheren Zustand,
- Überwachung und Trennung der prototypischen Funktionen vom ursprünglichen Fahrzeug,
- Erfüllung zusätzlicher in SAFE20 erarbeiteter Sicherheitsanforderungen.

Daher wurde für das ADOPT Safety Gateway (Steuergerät innerhalb von ADOPT, welches die Sicherheitsaufgaben übernimmt) eine umfangreiche Freigabe nach ZF-internen Prozessen durchgeführt. Die final erteilte Freigabe wurde als Teil der Gesamtfreigabe des Fahrzeugs für die Verwendung im Feldtest nach AP 8 mit den Partnern geteilt.

Zur Validierung der Regelungsfunktionen wurden verschiedene Testvektoren, wie z. B. Stufenfunktionen, Sprungantworten, spezifiziert und ausgewertet. Ziel war es, die ersten Trajektorien autonom zu fahren und die grundlegenden Sicherheitsfunktionen zu testen. Diese Tests wurden auf der ZF-eigenen Teststrecke durchgeführt.

Hinsichtlich der Erkenntnisse aus den Integrationstest der Automatisierungsfunktionen erfolgten weitere Optimierungen in der Längs- und Querregelung im ADOPT. Dies ermöglichte es, die minimale ausgeregelte Fahrzeuggeschwindigkeit auf unter 1 km/h zu reduzieren, was insbesondere in den Rangiervorgängen erhebliche Vorteile brachte.

Die ausfallsichere Feststellbremse wurde in das Fahrzeug integriert und in Bremstests erprobt. Da das Konzept eine redundante Bremsung aus Feststellbremse und Betriebsbremse vorsieht, waren neben Bremswegbetrachtungen auch Stabilitätsuntersuchungen, insbesondere hinsichtlich des Gespanns aus Zugmaschine und Sattelaufleger, notwendig.

In gemeinsamen Workshops wurden jeweils die Funktionalitäten „Lokalisierung“ des Götting-IPC und „Umfeldwahrnehmung“ des SICK-IPC in dem KAMAG PT integriert. Dabei wurde über Prüfkörper auch die Signalkette „Schutzfeldverletzung zu eingeleiteter sicherer Notbremsung“ erfolgreich getestet. Ein erster Infrasturkturknoten wurde aufgebaut und die Kommunikation zum KAMAG PT erfolgreich getestet. Zusätzlich wurde die Kommunikation zum Leitstand helyOS über erste Fahrzeugstatus und Fahrmissionen getestet.

helyOS-Anbindung

Der KAMAG PT setzte auf eine VDA 5050-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 VDA 5050-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 VDA 5050-Format nicht alle benötigten Informationen bereitstellte, damit helyOS seine Orchestrierung durchführen konnte.
- ZF brachte einen Vorschlag in das VDA 5050-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.

Integrationsphase 3: Test kompletter Missionen auf einem abgeschirmten Testgelände

Siehe Kapitel 7.4, Abschnitt „Test der Automatisierungsfunktionen des KAMAG PT“.

Integrationsphase 4: Integration des Fahrzeugs in die endgültige Umgebung mit der Hofinfrastruktur im Mischverkehr

Siehe Kapitel 7.5 „Integration des Gesamtsystems (AP 7.5)“.

Integrationsphase 5.: Finaler Feldtest

Siehe Kap. 8 „Testen, Lernen und Optimieren im Feld (AP 8)“.

Systemintegration des automatisierten KAMAG PM

Die im AP 4 entwickelten Komponenten wie Kollisionsvermeidung, Lokalisierung, V2X-Kommunikation etc. bilden die Basis für eine erfolgreiche Automatisierung. Erste Versuche erfolgten in einem zur Verfügung gestellten KAMAG PM im Serienzustand, um die Arbeiten am parallel dazu verwendeten automatisierten KAMAG PM nicht zu blockieren (siehe AP 4). Anschließend wurden die Komponenten in den KAMAG PM integriert. Der automatisierte KAMAG PM wurde um die sichere Bremse aus AP 4 erweitert und in das Leitsystem helyOS eingebunden, welches alle automatisierten Fahrzeuge des Betriebshof verwaltet.

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. Dieser Konnektor verarbeitet die empfangenen Informationen zu folgenden Funktionen der Simulation:

- Wechselbrücke aufnehmen: IDs des Fahrzeugs, des Stellplatzes oder Rampe sowie der auszuführenden Mission, Koordinaten der Wechselbrücke inkl. Typ.
- Wechselbrücke abstellen: IDs des Fahrzeugs, des Stellplatzes oder Rampe sowie der auszuführenden Mission, Koordinaten der Abstellposition.
- Parken: ID des Fahrzeugs und des Parkplatzes sowie der auszuführenden Mission.
- Mission abrechnen: ID der aktuell ausgeführten Mission.

Gleichzeitig kann der Konnektor auch Informationen bereitstellen, um folgende Funktionen abzubilden:

- Zustand eines Fahrzeugs: Längengrad, Breitengrad und die Orientierung des aktiv automatisierten Fahrzeugs, um die Position des Fahrzeugs im Leitstand darzustellen. Des Weiteren Informationen über den Betriebsmodus (automatisiert oder manuell) und über den Ladezustand (mit einer Wechselbrücke beladen oder nicht).
- Zustand einer Mission: Periodisch oder nach Bedarf wird der Zustand der aktuellen Mission (Busy, Successfull, Cancelled) bereitgestellt.
- Ereignisse oder Fehlerzustände: Fehlerzustände und Abbruchgrund der Mission.

Der Leitstand kommunizierte über den Konnektor mit dem simulierten Fahrzeug und überwachte die gemeldeten Zustände. Mit den gespeicherten Informationen konnte der Leitstand angefragte Missionen dem richtigen Fahrzeug zuordnen. Dabei wurde auf die korrekte Abarbeitung der Missionskette geachtet.

Ein Beispiel: Der Leitstand verarbeitet die Anfrage, eine bestimmte Wechselbrücke aufzunehmen und an einer vordefinierten Stelle wieder abzusetzen. Der Leitstand weist die Mission „Wechselbrücke aufnehmen“ einem Fahrzeug zu, welches automatisiert und unbeladen ist. Die Mission „Wechselbrücke abstellen“ kann nur zugewiesen werden, wenn die Mission „Wechselbrücke aufnehmen“ erfolgreich war. Das eigentliche Aufnehmen und Absetzen ist eine lokale Aufgabe des Fahrzeugs, aber Teil der Anweisungen einer Mission.

Der in der Simulation entwickelte Agent konnte ohne große Schwierigkeiten auf den automatisierten KAMAG PM übertragen werden und erleichterte die Integration ins helyOS.

AutoTruck

Der zu Beginn des Projekts geplante 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.

7.3. Test und Validierung der Sicherheitsfunktionen (AP 7.3)

Im Rahmen dieses Arbeitspakets hat SICK in enger Zusammenarbeit mit den Partnern Tests und Validierungen der in Betrieb genommenen Fahrzeug- und Infrastruktursysteme durchgeführt. Alle Funktionalitäten, die von SICK umgesetzt worden sind, wurden durch das in AP 3 definierte Sicherheitskonzept motiviert, ermöglichen aber auch die Automatisierungsfunktionalität.

Fahrzeugumfelderfassung

In Bezug auf die Fahrzeugumfelderfassung hat SICK mehrere Maßnahmen ergriffen, um die Funktion zu testen und zu validieren. Für die Adaptive Kollisionsvorhersage wurde das Objekttracking mit einem eigens gelabelten Referenzdatensatz evaluiert. Für die detaillierte Trackingevaluation siehe Kapitel 6.1 „Sichere Umfeld-/Objekterfassung für Lkw (AP 6.1) / Sichere Umfeld-/Objekterfassung für Sonderfahrzeuge (AP 6.2)“

Zusätzlich wurden die gesammelten Daten des Testbetriebs ausgewertet, um die Wirksamkeit der Adaptiven Kollisionsvorhersage zu zeigen. Die Auswertung (s. Tabelle 15) zeigt, inwieweit das System in den realen Situationen in der Lage ist, Kollisionen frühzeitig zu erkennen und eine Komfortbremsung durchzuführen, ohne dass eine Notbremsung notwendig ist. Es zeigt sich auch, dass nicht bei jeder vorhergesagten Kollision tatsächlich gestoppt werden musste (nur in 73,3% der Fälle). Häufig lösen sich kritische Situationen auch von selbst auf, z. B. wenn ein querendes Hindernis den Fahrweg wieder verlässt, sodass lediglich die Geschwindigkeit reduziert werden muss. Somit erhöht die Kollisionsvorhersage nicht nur die Sicherheit, sondern auch die Effizienz, indem Notbremsungen durch vorausschauendes Fahren vermindert werden.

Tabelle 15: Auswertung der Adaptiven Kollisionsvorhersage im Testbetrieb

Durchschnittliche Objektdistanz bei erster Kollisionsdetektion	17.4m
Durchschnittliche TTC bei erster Kollisionsdetektion	7.1s
Prozentsatz an Situationen, in denen das Fahrzeug autonom angehalten hat, wenn eine Kollision vorhergesagt wurde	73.3%
Durchschnittliche Objektdistanz bei erster Kollisionsdetektion (nur Fälle, in denen das Fahrzeug gestoppt hat)	17.6m
Durchschnittliche Zeit zwischen erster Kollisionsdetektion und Fahrzeugstopp	7.9s
Durchschnittliche gefahrene Distanz zwischen erster Kollisionsdetektion und Fahrzeugstopp	16.6m

Die Komponente „Adaptive Protective Field“, die basierend auf einer Schutzfeldauslösung einen Nothalt des Fahrzeugs einleitet, wurde mittels verschiedener Integrationstests und in umfangreichen Szenarien geprüft und während der Testphase im Mischbetrieb erprobt. Zur detaillierten Auswertung siehe Kap. 6.2 „Sichere Umfeld-/Objekterfassung mit Infrastruktur-Sensorknoten für sicherheitsgerichtete Funktionen (AP 6.3)“.

Infrastrukturbasierte Umfelderfassung

In Bezug auf die Infrastruktursysteme hat SICK ein Testsetup erstellt und die Performance anhand dieses Setups gemessen. Eine detailliertere Beschreibung ist in Kapitel 6.2 vorzufinden. Die Auswertung zeigt, dass eine Kombination aus Kamera und Radar im Rahmen dieses Forschungsprojekts zuverlässige Ergebnisse sowohl bei Tag als auch bei Nacht liefert. Eine zu späte Warnung vor Fußgängern ist vor allem dann aufgetreten, wenn Zebrastreifen nicht ordnungsgemäß genutzt werden (z. B. durch Abkürzungen quer über die Straße, siehe Abbildung 159).



Abbildung 159: Personen nutzen Abkürzungen quer über die Straße, um zu ihrem Ziel zu gelangen. Dies stellt ein Sicherheitsrisiko im Zusammenhang mit dem autonomen Fahrzeug dar

Bauliche Maßnahmen wie zum Beispiel Zäune könnten das Abkürzen verhindern und somit gefährliche Situationen minimieren. Fehlauflösungen wurden meistens durch Personen verursacht, die in der Umgebung des Zebrastreifens ihre Arbeit verrichten, diesen jedoch nicht überquert haben (vgl. Abbildung 160).



Abbildung 160: Person kreuzt zwar den Beginn eines Zebrastreifens, überquert diesen jedoch nicht. Dieses Verhalten führt zu einem fälschlichen Triggering der Infrastruktursensorik

Um diese Situationen zuverlässig von „echten“ Straßenüberquerungen zu unterscheiden, bräuchte es beispielsweise eine sog. Event Recognition, die jedoch im Rahmen dieses Projekts nicht umgesetzt werden konnte.

Basierend auf dem in AP 3 erarbeiteten Sicherheitskonzept ist das autonome Fahrzeug für sich selbst betrachtet nur in der Lage, maximal 10 km/h innerhalb der Automatisierungszone zu fahren, ohne ein Sicherheitsrisiko darzustellen.

Da dies jedoch keinen effizienten Ablauf auf dem Betriebshof ermöglicht, wurde die Überwachung von potenziell gefährdeten Bereichen durch Infrastruktursensorknoten als zusätzliche risikomindernde Maßnahme hinzugefügt. Das Fahrzeug ist dadurch in der Lage, generell mit höheren Geschwindigkeiten zu fahren, solange die Infrastruktursensorik sowie die vorausschauende Kollisionsvermeidung auf dem Fahrzeug selbst keine Gefahr melden. Wird hingegen in überwachten Bereichen eine Gefahr erkannt, passt das Fahrzeug seine Geschwindigkeit vorausschauend an. Eine

detailliertere Beschreibung der Funktionalität erfolgt in Kapitel 6.2 „Sichere Umfeld-/Objekterfassung mit Infrastruktur-Sensorknoten für sicherheitsgerichtete Funktionen (AP 6.3)“.

Im Rahmen von Analysen der Frequentierung von Zebrastreifen durch Personen während des Testbetriebs zeigte sich, dass viele der Übergänge kaum oder nur zu gewissen Stoßzeiten verwendet werden (vgl. Abbildung 161). So wird beispielsweise der Zebrastreifen 2 nur während der Mittagszeit stark genutzt. Die restliche Zeit hingegen ist dieser frei und das Fahrzeug kann somit höhere Geschwindigkeiten erreichen. Dies gilt auch für Zebrastreifen im südlichen Bereich des Betriebshofs. Zebrastreifen 3 hingegen wird häufiger genutzt, da dieser zu einer Pausenfläche führt.



Abbildung 161: Oben: Übersicht der überwachten Gefahrenzonen. Mitte: Beispielansicht der Nutzung des Zebrastreifens 2 über einen beliebigen Tag verteilt. Unten: Gleiche Darstellung für Zebrastreifen 3.

In den Diagrammen der Abbildung 161 ist gut die Nutzung der verschiedenen Überwege zu erkennen. Die x-Achse markiert die zeitliche Dimension und ist in halbstündige Blöcke eingeteilt. Die y-Achse zeigt die prozentuale Auslastung des Zebrastreifens innerhalb dieser halben Stunde, wobei der

Zebrastreifen als frei angenommen wird, wenn für 10,8 Sekunden keine Aktivität stattfindet. Der orangefarbene Balken zeigt die Auslastung an, blau ist die freie Zeit. Generell wurde der oben analysierte Zebrastreifen 2 vor allem während der Mittagszeit genutzt. Zebrastreifen 3 wurde, wie im unteren Diagramm zu sehen, vergleichsweise häufiger und über den Tag verteilt genutzt, da er den kürzesten Weg zum Raucherhaus darstellt.

Bremsen- und Sattelkupplungsfunktionen

Die sichere Kupplungsfunktion, bestehend aus einer Kupplung von SAF und der Ansteuerung, beruht auf den in AP 4.7 und AP 4.11 erbrachten Ergebnissen und konnte in diesen AP validiert werden. Gleiches gilt für die in AP 4.2 erfolgte Umsetzung der sicheren Bremsfunktion. Die Validierung ergibt sich aus den erfolgreichen Fahrversuchen.

Portierung der Sicherheitsfunktionen auf hochperformante Hardware

Die ursprüngliche Konzeptarbeit wurde unter theoretischen Gesichtspunkten mit den entsprechenden Projektpartnern validiert.

Zur Analyse und Verifikation des Designs der Rechnerhardware wurde eine Design-FMEA und für exemplarische Sicherheitsfunktionen eine FMEDA durchgeführt. Nachdem für den verwendeten Safety-Controller selbst bereits technische Berichte zur Beurteilung der funktionalen Sicherheit existieren und dieser im Sinne eines „System Element out of Context“ betrachtet werden kann, wurde der Fokus auf neue Sicherheitsfunktionen wie z. B. die sichere Kommunikation über Ethernet mit EGSP oder den sicheren Sensorsignalempfang gelegt. Bei dem Empfang von Sensorsignalen wurde insbesondere der sichere Empfang von Videosignalen über eine GMSL2-Schnittstelle betrachtet. Ziel der Verifikation ist der Nachweis der Erreichbarkeit des durch die Risiko- und Gefahrenanalyse ermittelten Sicherheitsintegritäts-Levels ASIL B gemäß IOS26262.

Die Ergebnisse in Abbildung 162 weisen das Erreichen des Sicherheitsintegritäts-Levels ASIL B nach.

ISO 13849:2023 / IEC 61508:2010 / ISO 26262:2018 / ISO 25119:2018					
Parameter	Abbreviation	Required Value	Achieved Value	Pass / Fail	Remark
Safety function + reaction + level:	SF	Safe Communication via Ethernet using the protocol EGSP (ID 205353)			
Diagnostic coverage:	DC	≥ 90%	99,0%	Pass	Excl. Soft-errors
		≥ 60%	99,0%	Pass	Excl. Soft-errors
Mean time to dangerous failure:	MTTF _{o/DC}	≥ 30 y	157,7 y	Pass	Excl. Soft-errors
Average frequency of dangerous failure:	PFH	≤ 150 EXP-9 1/h	40,5 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Safe failure fraction:	SFF	≥ 90%	99,9%	Pass	Incl. Soft-errors
Probabilistic Metric for random Hardware Failures:	PMHF	≤ 100 EXP-9 1/h	40,5 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric:	SPFM	≥ 90%	99,0%	Pass	Excl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric for Soft-Errors:	SPFM_SE	≥ 90%	99,9%	Pass	Only Soft-errors
Latent Fault Metric:	LFM	≥ 60%	100,0%	Pass	Excl. Soft-errors
ISO 13849:2023 / IEC 61508:2010 / ISO 26262:2018 / ISO 25119:2018					
Parameter	Abbreviation	Required Value	Achieved Value	Pass / Fail	Remark
AURIX(Application Core)	SF	Safe video signal reception and control data routing using GMSL2 deserializer (ID 205341)			
Diagnostic coverage:	DC	≥ 90%	95,3%	Pass	Excl. Soft-errors
		≥ 60%	95,3%	Pass	Excl. Soft-errors
Mean time to dangerous failure:	MTTF _{o/DC}	≥ 30 y	518,0 y	Pass	Excl. Soft-errors
Average frequency of dangerous failure:	PFH	≤ 150 EXP-9 1/h	43,6 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Safe failure fraction:	SFF	≥ 90%	99,9%	Pass	Incl. Soft-errors
Probabilistic Metric for random Hardware Failures:	PMHF	≤ 100 EXP-9 1/h	43,6 EXP-9 1/h	Pass	Incl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric:	SPFM	≥ 90%	95,6%	Pass	Excl. Soft-errors
Single-Point Fault Metric for Soft-Errors:	SPFM_SE	≥ 90%	99,9%	Pass	Only Soft-errors
Latent Fault Metric:	LFM	≥ 60%	100,0%	Pass	Excl. Soft-errors

Abbildung 162: FMEDA für exemplarische Sicherheitsfunktionen

Wird z. B. ASIL B für eine Umgebungüberwachung eines Fahrzeugs mit Assistenzfunktionen angestrebt, so kann dies über eine SOTIF-Argumentation erfolgen, indem unterschiedliche Sensoren zur Umfeldüberwachung eingesetzt und somit die Schwächen jedes Sensors durch diversitäre Redundanzen kompensiert werden. Hierzu sind für die Sicherheitsfunktion isolierte Kanäle für die unterschiedlichen Sensoren mit jeweils mindestens ASIL A erforderlich.

Werden Kameras zur Umfelderkennung eingesetzt, so erfordert dies eine hohe Rechenperformance. In diesem Fall sind die isolierten Kanäle entweder über einen Isolated Design Flow in der Programmierlogik des FPGA abzubilden oder auf einzelnen isolierten Cores des Applikationsprozessors. Alternativ kann auch ein Kanal über den Applikationsprozessor und der zweite Kanal über die Programmierlogik abgebildet werden.

Generell lassen sich mit der gewählten Rechnerarchitektur Sicherheitsintegritätslevel bis zu ASIL D erreichen, indem neben dem Safety-Controller auch die Programmierlogik des FPGA und/oder der Applikationsprozessor im MPSoC sicher implementiert werden. ASIL D kann z. B. für Lenkbewegungen bei hohen Geschwindigkeiten in einer autonom fahrenden Maschine erforderlich sein. Zur Realisierung benötigt man eine diversitäre Redundanz, indem unterschiedliche Sensoren und Logikeinheiten zur Überwachung verwendet werden. ASIL D kann dann über die Dekomposition ASIL B(D) über zwei für die Sicherheitsfunktion isolierte Kanäle abgebildet werden.

7.4. Test der Automatisierungsfunktionen (AP 7.4)

In diesem Arbeitspaket wurden die Automatisierungsfunktionen aller Versuchsträger ausführlich einzeln und im Zusammenspiel mit den anderen Komponenten vor dem Versuchsbetrieb getestet.

Fahrzeuglokalisierung

Hinsichtlich der Fahrzeuglokalisierung wurden verteilt über mehrere Treffen dedizierte Versuche auf dem Testgelände von ZF in Jeveresen mit dem KAMAG PT vorbereitet und durchgeführt. Das Fusionsystem zur Lokalisierung wurde in der aktuellen Version als Docker-Image integriert und gemeinschaftlich getestet. Dabei wurde der Einfluss von GNSS und Odometrie bewertet und optimiert. Aufgrund der freien Fläche auf dem Testgelände konnte keine sinnvolle SLAM-Karte bei gegebener Sensorreichweite des verbauten Lidars erzeugt werden. Deshalb wurde die Analyse des Einflusses der Lidar-Lokalisierung im AP 7.5 in Langenau durchgeführt.

Test der Automatisierungsfunktionen des AutoTruck

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.

Test der Automatisierungsfunktionen des KAMAG PT

Um die Automatisierungsfunktionen ausreichend zu validieren, wurden komplette Fahrmissionen getestet. Dazu wurde ein Teil der Karte des DACHSER Logistikhof auf einen frei befahrbaren Bereich auf die Testbahn in Jeveresen gespiegelt.

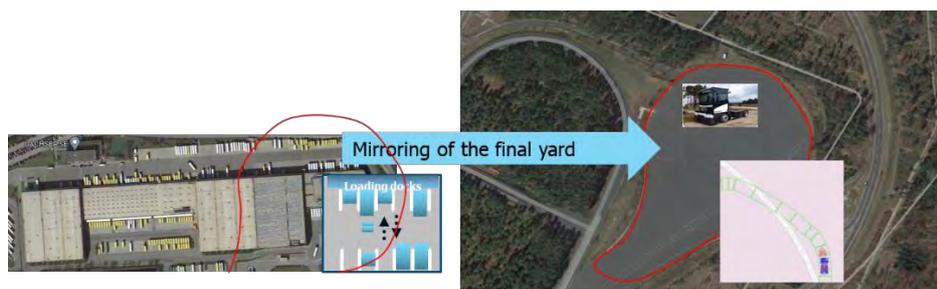


Abbildung 163: Karte des DACHSER Hofes in Langenau mit Markierung des in Jeveresen getesteten Bereiches

Mit erstellten Testmissionen im standardisierten VDA 5050-Format (Standard genutzt für die Missionsübertragung vom Leitstand zum Fahrzeug) wurden die Fahraufgaben des KAMAG PT und das automatische An- und Abkuppeln des Aufliegers getestet. Die Tests wurden abgeleitet aus den Missionsbeschreibungen von AP2 und den für den Feldtest in AP8 definierten Testszenarien. Dabei lassen sich diese auf eine generische Mission reduzieren:

„KAMAG PT holt Auflieger vom Abstellplatz oder einer Rampe ab und setzt den Auflieger an einem anderen Abstellplatz oder einer anderen Rampe ab“

In Tabelle 16 ist diese generische Mission auf die notwendigen Missionsbestandteile der Missionsbeschreibungen aus AP 2 heruntergebrochen. Jeder dieser Missionsbestandteile wird über ein oder zwei Fahrdienste ausgeführt (siehe auch AP 4.7).

Für die Fahraufgaben unterscheidet sich dabei der Vorgang zwischen einem Abstellplatz und einer Rampe größtenteils nicht. Nur der Punkt „Auflieger rückwärts an die Rampe/den Abstellplatz fahren“ unterscheidet sich in der notwendigen Positioniergenauigkeit, da der Auflieger zum Be- und Entladen sehr exakt an der Rampe positioniert werden muss und die erlaubten Toleranzen deutlich kleiner sind.

Tabelle 16: Übersicht der Mission und ihrer Bestandteile für den KAMAG PT

Mission	Missions-Bestandteile	Fahrdienste	Unterschied Fahraufgabe Rampe / Stellplatz	
KAMAG PT holt Auflieger vom Abstellplatz oder einer Rampe ab und setzt den Auflieger an einem anderen Abstellplatz oder einer anderen Rampe ab.	MB1: Fahrt	Vorwärtsfahren / Rückwärtsfahren (ohne Auflieger)	Keine	
	MB9: Auflieger an Abstellplatz aufnehmen / MB6: Auflieger an Rampe aufnehmen	Aufnehmen des Aufliegers	Da der Bezug die Vorderseite des abgestellten Aufliegers ist, macht es keinen Unterschied, ob es sich um eine Rampe oder einen Stellplatz handelt.	
	MB1: Fahrt	Vorwärtsfahren (mit Auflieger)	Beim Vorwärts herausfahren macht es keinen Unterschied, ob es sich um eine Rampe oder einen Stellplatz handelt.	
	MB7: Auflieger an Rampe absetzen / MB8: Auflieger an Abstellplatz absetzen	Auflieger rückwärts an die Rampe / Abstellplatz fahren		Unterschiede in den notwendigen Positioniergenauigkeiten. Eventuell zusätzliche Sensorik an der Rampe.
		Absetzen des Aufliegers		Da der Bezug die Vorderseite des Aufliegers ist, macht es keinen Unterschied, ob es sich um eine Rampe oder einen Stellplatz handelt.
	MB1: Fahrt	Vorwärtsfahren / Rückwärtsfahren (ohne Auflieger)		Beim Vorwärts herausfahren macht es keinen Unterschied, ob es sich um eine Rampe oder einen Stellplatz handelt.

Zusammenfassend lassen sich somit die Fahraufgaben komplett auf dem abgeschirmten Testbereich überprüfen. Nachdem die Missionsbestandteile einzeln erfolgreich abgetestet waren, gab es eine abschließende Mission, um die Fahrfunktionen zusammenhängend zu testen, welche in Abbildung 164 dargestellt ist.



Abbildung 164: Erfolgreiche Durchführung einer autonomen Mission in Jeversen

Um die Positioniergenauigkeiten der Fahraufgaben zu überprüfen, wurden diese gegen aufgestellte Pylone referenziert, wobei hier der Fahrdienst „Auflieger rückwärts an die Rampe/den Abstellplatz fahren“ nicht immer die gewünschten Ergebnisse lieferte. So stellte sich insbesondere die erste Phase, wo der Auflieger rückwärts mit einem hohen Knickwinkel in die rechtwinklig zur Fahrriichtung angeordneten Rampen und Stellplätze geschoben werden muss, als problematisch heraus. Der Auflieger „driftete“ dabei immer wieder von der theoretisch berechneten optimalen Bahn weg, welches vereinzelt zu einem Abbruch durch den virtuellen Fahrer führte, da eine Verletzung der Nachbarrampe oder des Nachbarstellplatzes drohte. Auch stehen in dieser Phase die eventuell zusätzlich montierten Sensoren (siehe AP 4.10) an der Rampe noch nicht zur Verfügung, da das Aufliegerheck noch nicht zur Rampe ausgerichtet ist. Wurde die Endposition erreicht, genügte diese nicht immer den geforderten engen Toleranzen, z. B. darf das Heck des Aufliegers nur maximal +/- 10cm versetzt zur Rampe platziert werden, um ein Beladen zu ermöglichen.

Die Fahrdienste „Vorwärtsfahren/Rückwärtsfahren (ohne Auflieger)“ und „Vorwärtsfahren (mit Auflieger)“ stellten sich dabei als unproblematischer heraus. Auf gerader Strecke wurde dabei eine Geschwindigkeit von 20 km/h erreicht, beim Rangieren und in Kurven wurde die Geschwindigkeit entsprechend der Spezifikation reduziert. Auch die Fahrdienste „Auflieger aufnehmen“ und „Absetzen des Aufliegers“ (beschrieben in AP 4.7), ließen sich am Schluss mehrfach (> 20 Mal) fehlerfrei ausführen. Ergebnisse zu den spezifischen Lösungen finden sich auch in den entsprechenden Kapiteln.

Die Ergebnisse wurden in dem AP 7 Integrationsplan für den KAMAG PT dokumentiert.

Test der Automatisierungsfunktionen des KAMAG PM

Der automatisierte KAMAG PM verfügte bereits am Anfang des Projekts über eine Automatisierungslösung, um Missionen durchzuführen. Aus diesem Grund war das Fahrzeug schon ab Q3/2022 bereit, um die Automatisierung im realen Betrieb im DACHSER Logistikzentrum Ulm zu

erproben. Die Erprobung erfolgte zwischen Oktober 2022 und März 2023 in enger Absprache und Zusammenarbeit mit DACHSER.

Während der Erprobungszeit wurden die Lokalisierung, die Navigation, die Fahrfunktionen, die Wechselbrückenerkennung und die -aufnahme sowie das Abstellen erfolgreich unter realen Bedingungen getestet. Der vollständige Umsetzprozess umfasst folgende Schritte: Fahren vom Ausgangsort zum Stellplatz oder der Rampe A, rückwärts anfahren und Wechselbrücke aufnehmen, zum Stellplatz oder Rampe B fahren, rückwärts anfahren und Wechselbrücke abstellen. Besonderes Augenmerk lag auf der Interaktion mit dem Mischverkehr.

Die Erprobung erfolgte in vier Teilschritten:

1. Die Inbetriebnahme des automatisierten KAMAG PM bei DACHSER, Kartierung des Geländes, relevanter Stellplätze und der Rampe, die angefahren werden muss.
2. Durchführung der Erprobungsphase 1.
3. Verbesserung und Optimierung der Automatisierungsfunktionen des KAMAG PM und Validierung der Ergebnisse.
4. Durchführung der Erprobungsphase 2 mit Verbesserung und Optimierung aus Teilschritt 3 unter Nutzung mehrerer Stellplätze und Rampen.

Inbetriebnahme des KAMAG PM bei DACHSER Langenau und Kartierung

Die relevanten Abstellplätze und Rampen für den automatisierten KAMAG PM wurden gemeinsam mit TII KAMAG und DACHSER identifiziert. Diese haben auf dem Betriebshof das größte Umschlagsvolumen und werden mit Wechselbrücken verwendet. Ziel war es, reelle Transporte möglichst häufig durchzuführen. Die Orte wurden aufgeteilt für die Erprobungsphase 1 und 2.



Abbildung 165: Übersicht relevanter Stellplätze für die Automatisierung, in Blau gekennzeichnet



Abbildung 166: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 1, in Grün gekennzeichnet



Abbildung 167: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 2, in Grün gekennzeichnet

Die Kartierung war aufwendiger als geplant, wodurch nicht alle Abstellplätze und Rampen in der vorhergesehenen Zeit kartiert werden konnten. Gründe hierfür waren unter anderem die geänderten Verkehrssituationen, je nach Tageszeit, wodurch die Routen angepasst werden mussten. Rangierbereiche wurden mehrfach getestet, um sicherzustellen, dass ein Rangieren möglich ist. Nach einer zweiten Kartierungsphase waren 171 Abstellplätze und Rampen kartiert, dies entspricht 73 % der relevanten Abstellplätze und Rampen für das Fahrzeug. Die Kartierungsabdeckung war ausreichend, um jedes Szenario zu testen und repräsentiert die Vielfältigkeit des Betriebshofs von DACHSER in Langenau.

Während der Inbetriebnahme und der Kartierung wurden die Fahrtstrecken für die Hauptroute festgelegt. Auf Abbildung 168 sind beispielhaft die Hauptroute von den südlichen Rampen bis zum Abstellbereich C2 und C3 definiert.

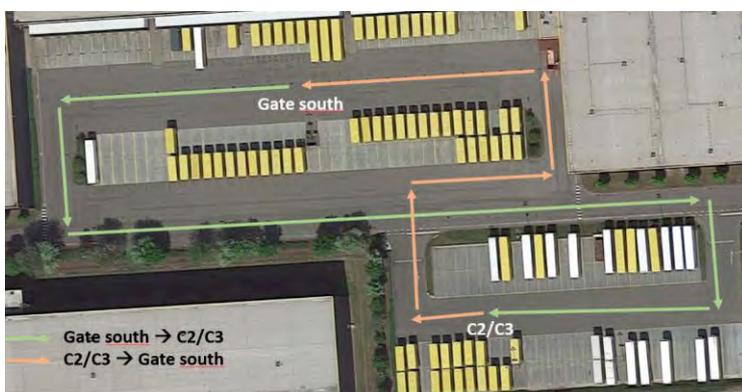


Abbildung 168: Hauptroute für die Fahrt zwischen den südlichen Rampen und den Abstellbereich C2/C3

Die Herausforderung bestand darin, geeignete Strecken zu definieren, die den Mischverkehr und den Logistikbetrieb nicht negativ beeinflussen und die Automatisierung stören. Zum Beispiel wird der

Bereich um das Verwaltungsgebäude zur Stoßzeit ab 15 Uhr durch mehrreihige parkende Lkw zur Engstelle. Die Strecken müssen so gelegt werden, dass die parkenden Lkw umfahren werden, ohne die manövrierenden Lkw an den Rampen und Stellplätzen zu stören.

Ergebnisse Erprobungsphase 1

Für die Erprobungsphase wurde eine Wechselbrücke für den automatisierten KAMAG PM bereitgestellt sowie diverse Abstellplätze und Rampen reserviert. Auf diese Weise konnten täglich Testfahrten durchgeführt werden, ohne auf Ressourcen warten zu müssen. So konnte die Automatisierungsfunktion im realen Betrieb erprobt werden, ohne den logistischen Betrieb zu beeinflussen. Die Missionen für den Umsetzungsvorgang wurden direkt vom Sicherheitsfahrer an das Fahrzeug gesendet.

In der Erprobungsphase 1 wurde der Ablauf jeder einzelnen Mission betrachtet, um den Anteil an erfolgreichen Missionen zu ermitteln. Der Anteil an erfolgreich abgeschlossen Missionen zeigt, wo es Optimierungsbedarf gibt.

Tabelle 17: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: Teilmissionen

Teilmissionen	Erfolgsanteil
Abfahren aus einer Wechselbrücke oder einem Abstellplatz bzw. Rampe	96 %
Fahren ohne Wechselbrücke	98 %
Rangieren für das Aufnehmen einer Wechselbrücke (*)	72 %
Unterfahren und Aufnehmen einer Wechselbrücke (*)	79 %
Fahren mit einer Wechselbrücke	92 %
Rangieren für das Abstellen einer Wechselbrücke	88 %
Abstellen einer Wechselbrücke	99 %

Der Fokus der Optimierung liegt für die nächste Erprobungsphase in den Teilmissionen, die mit (*) gekennzeichnet sind: „Rangieren für das Aufnehmen einer Wechselbrücke“ und „Unterfahren und Aufnehmen einer Wechselbrücke“.

Wenn die Teilmissionen zu einer kompletten Mission aneinandergereiht werden, ergeben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 18: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: komplette Abläufe

Mission	Erfolgsanteil
Fahren + Rangieren + Wechselbrücke aufnehmen	49 %
Fahren + Rangieren + Wechselbrücke abstellen	82 %

Wenn der gesamte Umsetztransport betrachtet wird, ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

Tabelle 19: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: Umsetztransporte

Gesamter Umsetztransport	Erfolgsanteil
Fahren + Wechselbrücke aufnehmen + Fahren + Wechselbrücke abstellen	42 %
Transport inkl. einer Remote Recovery im Fall eines Abbruchs einer Teilmission.	53 %

Die zweite Zeile dieser Tabelle zeigt den Anteil von Transporten, in welchen eine Teilmission aufgrund eines Ereignisses abgebrochen werden musste. Gründe für den Abbruch waren unter anderem ein verengter Fahrbereich aufgrund von anderen Fahrzeugen, Wechselbrücken oder Anhängern. Der Hauptgrund war aber die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Position bei der Unterfahrt einer Wechselbrücke. Diese Teilmission konnte über einen externen Zugriff, wie bspw. Durch ein Leitsystem, erneut gestartet werden, was zu einem erfolgreichen Transport führte. Dabei war kein Eingriff des Sicherheitsfahrers notwendig.

Optimierungsphase

Während der Optimierungsphase wurde der Fokus auf das Rangieren und das Unterfahren einer Wechselbrücke gesetzt. Dabei wurde ein spezieller Regler und ein Verfahren entwickelt, damit der KAMAG PM an der richtigen Position unter der Wechselbrücke zum Stehen kommt. Dies sollte auch der Problematik mit kleinen Unebenheiten im Boden entgegenwirken. Die kleinen Absätze zwischen dem Fahrbahnasphalt und den betonierten Abstellplätzen sorgten häufig für Fehler, sodass das Fahrzeug zu früh unter der Wechselbrücke zum Stillstand kam.

Zusätzlich wurde der Algorithmus für die Robustheit gegenüber Hindernissen optimiert. Der ursprüngliche Algorithmus hat nur eine Trajektorie berechnet; wenn ein Hindernis auf der Trajektorie lag, war das Fahrzeug blockiert und der Transport musste abgebrochen werden. Die Optimierung lag

darin, dass eine neue Trajektorie berechnet wurde, wenn das Fahrzeug durch ein Hindernis blockiert war. Damit verursachten Objekte, wie einzelne Sattelaufleger oder Lkw im Manöverbereich, keine Blockaden mehr. Voraussetzung dafür war, dass das Fahrzeug trotzdem genügend Platz hatte, um das Hindernis zu umfahren.

Ergebnisse Erprobungsphase 2

Diese neuen Funktionen wurden konzipiert, implementiert und in den KAMAG PM integriert. In der zweiten Erprobungsphase auf dem Betriebshof von DACHSER in Langenau fand dann die Validierung statt.

Bei der Erprobungsphase 2 wurde der Ablauf jeder einzelnen Mission betrachtet, um den Anteil an erfolgreichen Missionen zu ermitteln. Der Anteil an erfolgreich abgeschlossen Missionen zeigt, wo es Optimierungsbedarf gibt:

Tabelle 20: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: Teilmissionen

Teilmissionen	Erfolgsanteil	Delta zu Erprobungsphase 1
Abfahren aus einer Wechselbrücke oder einem Abstellplatz bzw. Rampe	95 %	(-1 %)
Fahren ohne Wechselbrücke	Keine Optimierung, ähnliche Ergebnisse	
Rangieren für das Aufnehmen einer Wechselbrücke	70 %	(-2 %)
Unterfahren und Aufnehmen einer Wechselbrücke	92 %	(+13 %)
Fahren mit einer Wechselbrücke	Keine Optimierung, ähnliche Ergebnisse	
Rangieren für das Abstellen einer Wechselbrücke	85 %	(-3 %)
Abstellen einer Wechselbrücke	Keine Optimierung, ähnliche Ergebnisse	

In der zweiten Erprobungsphase konnte durch Optimierungen die Aufnahme von Wechselbrücken deutlich verbessert werden. Die Ergebnisse für die sonstigen Teilmissionen haben sich leicht verschlechtert. Die Ursache dafür liegt in der geänderten Umgebung, in der die Versuche durchgeführt wurden (siehe Inbetriebnahme und Kartierung des KAMAG PM). Die Herausforderungen für die Automatisierungsfunktionen waren in der Erprobungsphase 2 höher als bei Erprobungsphase 1, Grund dafür war das erhöhte Verkehrsaufkommen in dem neuen Bereich.

Wenn ganze Mission betrachtet werden, ergeben sich die folgenden Resultate:

Tabelle 21: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: komplette Abläufe

Missionen	Erfolgsanteil	Delta zu Erprobungsphase 1
Fahren + Rangieren + Wechselbrücke aufnehmen	63 %	(+ 14 %)
Fahren + Rangieren + Wechselbrücke abstellen	76 %	(- 6%)

Wenn man den gesamten Umsetztransport betrachtet, ergeben sich die folgenden Resultate:

Tabelle 22: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: Umsetztransporte

Gesamter Umsetztransport	Erfolgsanteil	Delta zu Erprobungsphase 1
Fahren + Wechselbrücke aufnehmen + Fahren + Wechselbrücke abstellen	36 %	(- 6%)
Transport inkl. einer Remote Recovery im Fall eines Abbruchs einer Teil-Mission.	64 %	(+ 11%)

Die zweite Zeile dieser Tabelle zeigt den Anteil von Transporten, in welchen eine Teilmission aufgrund der in Erprobungsphase 1 beschriebenen Gründe abgebrochen werden musste. Diese Teilmission konnte über einen externen Zugriff, wie bspw. ein Leitsystem, erneut gestartet werden, was zu einem erfolgreichen Transport führte. Dabei war kein Eingriff des Sicherheitsfahrers notwendig.

Der Anteil von erfolgreichen Transporten (ohne Wiederholung) ist trotz der Optimierungen gesunken. Die Ursache dafür liegt in der geänderten Umgebung, in der die Versuche durchgeführt wurden (siehe Inbetriebnahme und Kartierung des KAMAG PM). Die Herausforderungen für die Automatisierungsfunktionen waren in der Erprobungsphase 2 aufgrund des vergrößerten Testfeldes höher als bei Erprobungsphase 1. Nichtsdestotrotz hat der Anteil von erfolgreichen Transporten inklusive Wiederholung aus der Ferne sich um 11 % verbessert.

7.5. Integration des Gesamtsystems (AP 7.5)

Zum Abschluss des AP 7 wurde das Fahrzeug schließlich auf dem Logistikhof des DACHSER Logistikzentrums Ulm in Betrieb genommen. Als erstes stand dafür der Transport des KAMAG PT und des DACHSER-Aufliegers von der ZF-Testbahn nach Langenau an. Dazu musste die komplette Sensorik demontiert und das Fahrzeug auf einen Tieflader verladen werden.



Abbildung 169: Verpackte Sensorik und verladener KAMAG PT auf der Testbahn in Jevern

Für die Wiederinbetriebnahme des KAMAG PT wurde in Langenau mit den Partnern ein zweiwöchiger Integrationsworkshop angesetzt. Ziel des Workshops war auch die Einweisung der von DACHSER gestellten Sicherheitsfahrer, die während des Feldversuchs im Rahmen von AP 8 die autonomen Fahrten des KAMAG PT überwachten. Für den Betrieb waren vorab Versicherungs- und Haftungsfragen zu klären, die aufgrund der Einzigartigkeit des Fahrzeugs und der hohen Anzahl an prototypischen Funktionen schwierig waren, jedoch rechtzeitig zum Start der Integrationswoche geklärt werden konnten.

Die Wiederinbetriebnahme in Langenau erfolgte schrittweise anhand eines erstellten Integrationsplan mit den SAFE20-Partnern.

Zuerst wurden die demontierten Sensoren wieder verbaut und ADOPT in Betrieb genommen. ADOPT ist dabei die Schnittstelle zwischen dem ursprünglichen Fahrzeug im Serienzustand und den zusätzlich eingebauten Automatisierungsfunktionen. Gleichzeitig stellt es über ein Sicherheitskonzept sicher, dass die Automatisierung im Fehlerfall abgeschaltet und das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt wird.



Abbildung 170: KAMAG PT auf dem DACHSER-Hof nach Anbau der Sensorik auf seinem zugewiesenen Stellplatz

Die Götting KG nahm danach die Ortung und SICK die Umfeldüberwachung in Betrieb.

Im November 2023 begann eine intensive Integrationsphase für den KAMAG PT in Langenau. Nach den notwendigen Vorarbeiten wurde das GNSS für die lokalen Bedingungen konfiguriert und erfolgreich in Betrieb genommen. Anschließend wurde die SLAM-Karte zur Lidar-Lokalisierung integriert. Dabei wurde eine Diskrepanz zwischen der UTM-Pose des Satellitensystems und der Lidar-Pose auf der Karte festgestellt. Durch einen Faktor zum Verschieben und Drehen sowie einen Algorithmus, der die Messwerte des Lidar-Sensors relativ zur aktuellen GNSS-Pose in die vorhandene Karte einträgt, konnte für lokal begrenzte Bereiche eine Deckungsgleichheit erreicht werden, sodass das Fusionssystem mit allen Komponenten getestet und dessen Funktionsweise bestätigt werden konnte.

Insbesondere wurde der Einfluss des Online-Mappings untersucht. Dabei werden automatisch in einen zweiten Layer der SLAM-Karte neue, unbekannte Objekte eingezeichnet. Somit werden auch neue Objekte und ursprünglich unkartierte Bereiche in die Lokalisierung einbezogen. Dieses Verfahren hat insbesondere in dynamischen Umgebungen Vorteile. In den folgenden beiden Bildern wird ein Vergleich im Osten des DACHSER-Geländes mit und ohne online-Mapping dargestellt. Dabei repräsentieren die schwarzen Linien die Offline-Karte und die roten Linien den aktuellen Scan. In der unten dargestellten Szene kommt es durch die repetitiven Muster in Längsrichtung zu einem deutlich sichtbaren Offset.

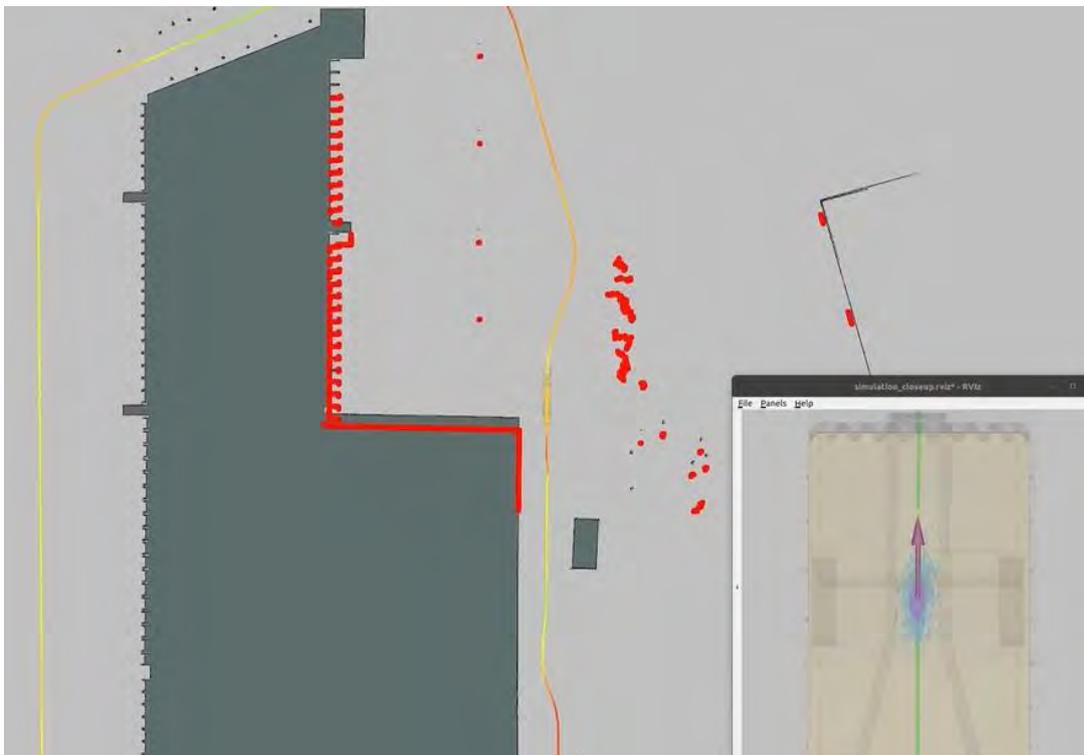


Abbildung 171: Versatz der Lidar-Pose auf der Offline-Karte

Bei Nutzung des Online-Mapping entsteht hingegen in der gleichen Szene kein Versatz, da die unregelmäßigen Strukturen (hier Bäume) kurzfristig für die Stabilisierung der Pose miteinbezogen werden können.



Abbildung 172: Nutzung des Online-Mappings

Anschließend wurde die Kommunikation mit dem Leitstand sowie die Geschwindigkeitsanpassungen aufgrund der Infrastrukturinformationen getestet und optimiert.

Bei den ersten autonomen Fahrten mit dem KAMAG PT stellte sich heraus, dass die erstellten Karten nicht überall die erforderliche Genauigkeit aufwiesen und besonders im Süden des Betriebshofs das Fahrzeug die Fahrbahn verlässt. Daraufhin wurde als neue Referenz ein vom KAMAG PM schon bei einem vorangegangenen Test aufgezeichneter fahrbarer Pfad als Grundlage genommen. Nachdem der befahrbare Bereich in der Karte auf diesen Pfad angepasst wurde, war das automatische Umfahren des Geländes auch mit dem KAMAG PT im Solobetrieb ohne Trailer möglich.



Abbildung 173: Rot markiert der verwendete Referenzpfad des KAMAG PM

Leichte Modifikationen waren in den Kurven notwendig, da der KAMAG PT mit angekoppeltem Sattelaufleger eine deutlich größere Schleppkurve als der KAMAG PM aufweist, was auch in AP 4.7 näher erläutert wird. Am Schluss konnte der Betriebshof aber auch mit Auflieger unter Beachtung der Verkehrszeichen autonom umfahren werden.



Abbildung 174: KAMAG PT umrundet den DACHSER-Hof in Langenau, live Online-Visualisierung mit erkannten Objekten

Daraufhin erfolgte die Einweisung der Sicherheitsfahrer von DACHSER. In einer ersten Einweisung wurde die erstellte Dokumentation durchgegangen. Insbesondere wurden Schaubilder erstellt, welche in vereinfachter Form den Wechsel der Betriebsmodi des Fahrzeugs darstellten.

Abbruch einer autonomen Fahrt und wieder aufsetzen der Mission

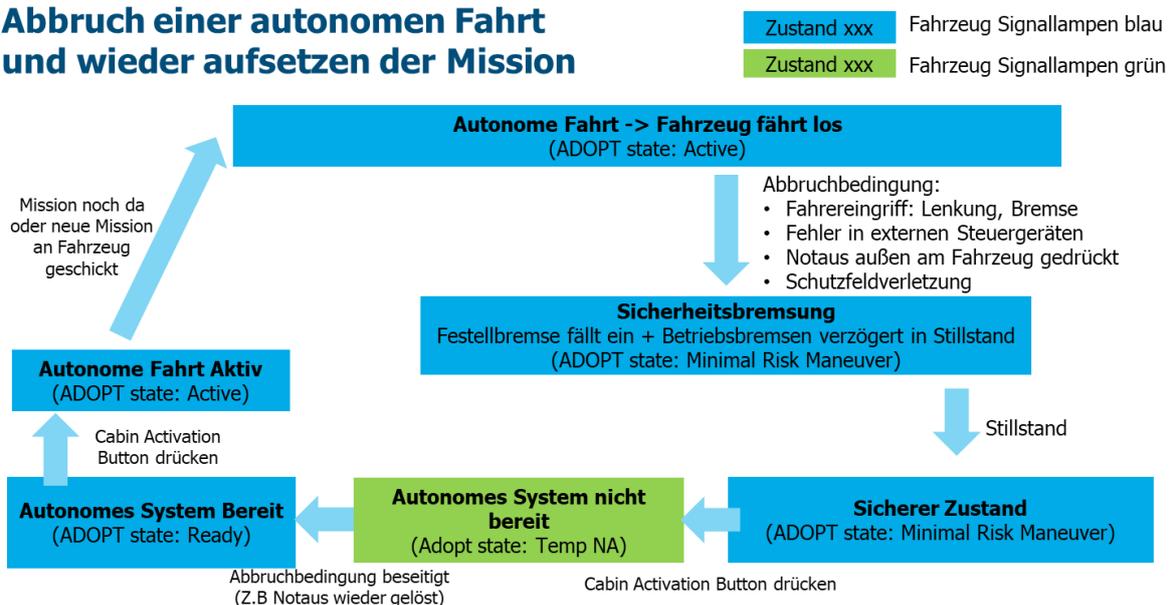


Abbildung 175: Beispiel eines Ablaufdiagramms für den Sicherheitsfahrer

Im Anschluss erfolgte die praktische Einführung der Sicherheitsfahrer in den Umgang mit dem KAMAG PT, sodass in den darauffolgenden Wochen die Sicherheitsfahrer selbständig überwachte autonome Fahrten auf dem DACHSER-Hof ausführen konnten.

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.

7.6. 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 Sicherheitskonzepte wurden getestet und konnten während der Integration überzeugen. 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 Infrastruktorknoten 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.

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.

8.1. Betrieb des Gesamtsystems (AP 8.1)

Auf die schrittweise Systemintegration aus AP 7 folgte in AP 8 das Testen, Lernen und Optimieren. In diesem Arbeitspaket ging es darum, das System umfassend im realen Einsatzumfeld zu testen, daraus zu lernen und kontinuierlich zu optimieren. Nur so konnte sichergestellt werden, dass das Fahrzeug die vielfältigen Anforderungen des Praxiseinsatzes zuverlässig erfüllt. Die Erprobung des Umsetzfahrzeugs unter realen Bedingungen auf dem Betriebshof ist von entscheidender Bedeutung. Hier konnte die Leistungsfähigkeit, Robustheit und Sicherheit des Systems unter Beweis gestellt werden. Neben standardisierten Testszenarien waren vor allem unvorhersehbare Situationen und Umwelteinflüsse von Interesse, um die Grenzen des Systems auszuloten. So konnte das System während des Testbetriebs unter verschiedensten Wetterbedingungen getestet werden.

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Themen behandelt. Zunächst wird die Vorbereitung des Werksgeländes detailliert beschrieben, gefolgt von der Systematik der Testdurchführung. Anschließend wird die Dokumentation der Fahrten thematisiert. Weiterhin wird auf die Implementierung von Updates und die Behebung von Fehlern eingegangen. Abschließend werden die Erkenntnisse aus dem gesamten Testprozess zusammengefasst.

Versicherung und Freigabepapiere

Die Projektpartner haben den für den Testbetrieb spezifischen Versicherungsbedarf geklärt. Für den KAMAG PM wurde dieser durch Abschluss einer geeigneten Versicherung durch TII KAMAG gedeckt.

Es wurde ein Freigabepapier für den KAMAG PT erstellt, damit DACHSER das Fahrzeug betreiben konnte. TII KAMAG hat damit die Ergebnisse von den verantwortlichen Funktionen zu Verfügung gestellt, die Abweichungen erwähnt und die Aufgabe der Tester bezüglich der entsprechenden Funktion und oder Lücke genannt. Außerdem wurde eine Anweisung an DACHSER über das Basisfahrzeug und dessen manuelle Bedienung gegeben.

Das Fahrzeug KAMAG PM wurde nicht für den Betrieb durch DACHSER freigegeben, sondern wurde durch TII KAMAG betrieben. Die Tester von TII KAMAG wurden von DACHSER in die Betriebsregelung und Sicherheitsregeln des Hofes eingewiesen, damit die Tests im realen Betrieb durchgeführt werden konnten. Die Funktionen und das Verhalten des KAMAG PM wurden DACHSER umfänglich präsentiert.

Vorbereitung des Werksgeländes

Zur Vorbereitung des Werksgeländes wurden umfassende Sicherheitsmaßnahmen getroffen. Schilder wurden in den Eingangsbereichen für Mitarbeiter und an den Einfahrtstoren angebracht, die auf die Anwesenheit eines autonomen Fahrzeugs hinweisen. Diese Schilder (180 x 120 cm) informierten in zwei Sprachen darüber, dass Videos angefertigt werden und unvorhergesehene Bremsungen vorgenommen werden könnten (s. Abbildung 176). Für alle einfahrenden Fahrzeuge, sowohl des eigenen Fuhrparks als auch fremder, wurde ein Merkblatt in acht Sprachen erstellt.

Die Belegschaft des DACHSER Logistikzentrums Ulm wurde durch eine Rundmail der Niederlassungsleitung über die Sicherheitsmaßnahmen informiert. Diese Mail enthielt Hinweise zur Bedeutung von Warnleuchten und deren Farben sowie zur Notwendigkeit, Abstand zu halten und sich dem Fahrzeug nicht zu nähern. Zusätzlich fand eine Informationsveranstaltung mit dem Betriebsrat statt, bei der über alle geplanten Tätigkeiten und die eventuelle Anfertigung von Videoaufnahmen für Sicherheitsfeatures informiert wurde.

Ein Informationstag für den Hofdienst und relevante interne Personen vermittelte die Rahmeninformationen zum Projekt und die Verhaltensregeln. Für alle SAFE20-Projektpartner wurden regelmäßige Sicherheitsunterweisungen durchgeführt, da es sich dabei um unternehmensfremde Personen handelte.

Für den Regelbetrieb gesperrte Frachtbehälter (Trailer und Wechselbrücken) und Rampen wurden zur Verfügung gestellt und als Testequipment gekennzeichnet. Intern wurde kommuniziert, dass diese Frachtbehälter an den Testrampen nicht für die Verladung zur Verfügung stehen. Dies wurde teilweise durch das Verschließen der Türen sichergestellt.



Abbildung 176: Auf dem Betriebsgelände angebrachte Hinweisschilder

Systematik der Testdurchführung

Die Systematik der Testdurchführung umfasste die Sammlung verschiedener Testszenarien, die anhand eines vorbereiteten und mit allen Partnern abgestimmten Testplans sukzessive abgearbeitet wurden. Zu den durchgeführten Testszenarien zählten unter anderem die Inbetriebnahme des Fahrzeugs auf dem vorgesehenen Stellplatz und die Verbindung zwischen Leitsystem und Fahrzeug. Des Weiteren wurden das Senden und Empfangen von Positionsdaten zur Fahrzeuglokalisierung und die Überprüfung der Standortgenauigkeit getestet.

Zu den Fahrmanövern gehörten die Geradeausfahrt und Rückwärtsfahrt, sowohl ohne als auch mit Trailer und Wechselbrücken. Darüber hinaus wurde das Sensorverhalten bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen geprüft, einschließlich der Anpassung der Verarbeitung von Störgeräuschen durch starken Niederschlag. Verschiedene Bremswege bei unterschiedlichen Fahrbahnbedingungen (nass/trocken) wurden ebenfalls untersucht.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Erkennung von Hindernissen durch die fahrzeugeigene Nahfeldsensorik und die Infrastruktursensorik sowie die Kommunikation zum Fahrzeug. Die Umrundung des Betriebshofs ohne Trailer, sowohl zur Prüfung der Freigabezonen als auch der Einhaltung von Schleppkurven, war ein weiteres Testszenario.

Zusätzlich wurden das automatische Kuppeln (KAMAG PT), die Überwachung der Systemkomponenten und die anschließende Freigabe des Fahrbefehls getestet. Die Umrundung des Betriebshofs beinhaltete auch sicherheitsrelevante Fahrmanöver wie das Anhalten am Stoppschild und die Zeit bis zur Wiederauffahrt.

Die Tests umfassten zudem die Prüfung der Wiederholgenauigkeit, die präzise Findung von Endkoordinaten und die Abweichung zur vorhergegangenen Testrunde in Bezug auf Längs- und Querversatz. Mit dem KAMAG PT wurden die Aufnahme und das Absetzen des Trailers am Stellplatz, die Rampenanfahrt und die Platzierung des Testtrailers an der Rampe ebenfalls mehrfach wiederholt. Schließlich wurde die Rampenanfahrt in Kombination mit der Mitarbeitererkennung durch BLE-Tags getestet. Alle Tests wurden mit mindestens fünf Wiederholungen durchgeführt.

Dokumentation der Fahrten

Die Dokumentation der Fahrten erfolgte direkt in einer vorher abgestimmten Datenbank, die als Excelübersicht geführt wurde. Darüber hinaus war im Fahrzeug eine Festplatte installiert, die zur Dokumentation von Störereignissen diente. Alle relevanten Projektpartner hatten die Möglichkeit, per Remotezugriff auf die Logdaten zuzugreifen. Diese wurden in regelmäßigen Intervallen sowie bei akuten Störereignissen online abgerufen. Zur Fehlermeldung und Fehlerbehebung wurde ein gemeinsamer Kommunikationskanal genutzt, der den gegenseitigen Austausch ermöglichte.

Implementierung von Updates und Behebung von Fehlern

Die Implementierung von Updates und die Behebung von Fehlern wurden sorgfältig koordiniert. Updates wurden nach Absprache online eingespielt, wobei es hierzu notwendig war, das Fahrzeug

für etwa eine Stunde nicht zu bewegen. Größere Updates und Softwareanpassungen mussten teilweise manuell im Fahrzeug vorgenommen werden, weshalb die Projektpartner sporadisch vor Ort waren.

Testszenarien und Testbedingungen

Die Feldtests erfolgten tagsüber von Montag bis Freitag, jeweils von ca. 9:00 bis 15:00 Uhr. Ziel war die Vermeidung von Peak-Zeiten, um den logistischen Betrieb nicht negativ zu beeinflussen. Die Tests wurden unter realen Bedingungen im Mischverkehr durchgeführt. Dafür wurden die Verkehrsteilnehmer über den Betrieb der automatisierten Fahrzeuge informiert.

Die Transportaufträge wurden durch die Sicherheitsfahrer erstellt. Es handelt sich um fiktive Aufträge, die innerhalb von gebuchten Abstellbereichen und Rampen erzeugt wurden. Zu diesem Zweck wurden von DACHSER Rampen und Stellplätze spezifisch für die automatisierten Fahrzeuge gebucht sowie für den Testbetrieb des KAMAG PM jeden Tag ein bis zwei Wechselbrücken zur Verfügung gestellt.

Die folgende Abbildung 177 verdeutlicht die genauen Positionen der Testbereiche.



Abbildung 177: Bereiche für die Abstellplätze und Rampe im DACHSER Logistikzentrum Ulm

Testszenarien KAMAG PT

Die in Tabelle 23 aufgeführten Szenarien wurden für den KAMAG PT erstellt, dabei handelt sich um einzelne sowie wiederholbare Szenarien. Alle Szenarien wurden für alle Bedingungen mindestens einmal erfolgreich getestet.

Tabelle 23: Testszenarien KAMAG PT

Szenarien	Umfang
Sattelaufleger auf einem Stellplatz aufnehmen	Bereiche F und G
Sattelaufleger auf einem Stellplatz abstellen	Bereiche F und G
Sattelaufleger auf einer Rampe aufnehmen	Bereiche F und G
Sattelaufleger auf eine Rampe abstellen	Bereiche F und G
Fahrt um den Hof (1,5 km)	Ohne Sattelaufleger, mit leerem Sattelaufleger
Verhalten an kartierten Fußgängerüberwegen mit Validierung	An jedem Fußgängerüberweg des Betriebshof
Verhalten an kartierten Fußgängerüberwegen ohne Validierung	An jedem Fußgängerüberweg des Betriebshof
Umsetztransport: Fahrt + WB aufnehmen + Fahrt + WB abstellen	Verschiedene Konstellationen zwischen Rampe und Abstellplätze

Testergebnisse KAMAG PT

Das Fahrzeug wurde über einen Zeitraum von sieben Wochen in 27 Anwendungsfällen getestet. In dieser Zeit wurden rund 100 Missionen durchgeführt, wobei das jeweilige Verhalten des Fahrzeugs dokumentiert wurde. In einigen Anwendungsfällen trat unerwartetes, suspektes Fahrverhalten auf, das zunächst untersucht werden musste, wodurch das Testprogramm teilweise verzögert wurde. Dies führte dazu, dass bestimmte Funktionalitäten nicht vollständig unter realistischen Bedingungen bewertet werden konnten. Weitere Tests wären erforderlich gewesen, um die Performanz des Systems abschließend zu validieren, diese konnten im Projektzeitraum nicht mehr durchgeführt werden. Trotz dieser Einschränkungen lieferte die Testphase wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung des KAMAG PT und bildet eine solide Grundlage für eventuelle weitere Entwicklungsschritte.

Testszenarien KAMAG PM

Die in Tabelle 24 aufgeführten Szenarien wurden für den KAMAG PM erstellt, dabei handelt sich um einzelne sowie wiederholbare Szenarien. Alle Szenarien wurden für alle Bedingungen mindestens einmal erfolgreich getestet.

Tabelle 24: Testszenarien KAMAG PM

Szenarien	Umfang
Wechselbrücke auf einem Stellplatz aufnehmen	Alle Bereiche H2, A1, A2, C2 testen
Wechselbrücke auf einem Stellplatz abstellen	Alle Bereiche H2, A1, A2, C2 testen

Wechselbrücke an einer Rampe aufnehmen	Jede Rampe ESTFP (10-51) und ESFFP (200te) testen
Wechselbrücke an einer Rampe abstellen	Jede Rampe ESTFP (10-51) und ESFFP (200te) testen
Fahrt um den Hof (1,5 km)	Ohne Wechselbrücke, mit leerer WB, mit beladener WB
Verhalten an kartierten Fußgängerüberwegen mit Validierung	An jedem Fußgängerüberweg des Betriebshofs
Verhalten an kartierten Fußgängerüberwegen ohne Validierung	An jedem Fußgängerüberweg des Betriebshofs
Umsetztransport: Fahrt + WB aufnehmen + Fahrt + WB abstellen	Verschiedene Konstellationen von Rampen und Abstellplätzen

Einige Transporte wurden mit voll beladenen Wechselbrücken durchgeführt, dabei bestand die Ladung aus Paletten.

Zusätzlich zu den oberen Szenarien für die Feldtest wurden auch Negativtests durchgeführt.

Tabelle 25: Negative Testszzenarien

Szenarien	Bedingungen	Erwartete Ergebnisse
WB auf einem Stellplatz aufnehmen	Keine Wechselbrücke vorhanden	Das Fahrzeug bricht die Mission ab und meldet den Fehler an den Leitstand
WB auf einem Stellplatz abstellen	Der Stellplatz ist bereits mit einer anderen WB oder Semitrailer besetzt	Das Fahrzeug bricht die Mission ab und meldet den Fehler an den Leitstand
WB auf einem Stellplatz aufnehmen	Ein anderes Objekt (Auto, Semitrailer) ist auf dem Stellplatz, aber keine WB	Das Fahrzeug bricht die Mission ab und meldet den Fehler an den Leitstand

Die Negativtests wurden ebenfalls mehrmals erfolgreich durchgeführt, dabei wurden die Missionen reproduzierbar abgebrochen, sodass die Tests als erfolgreich zu werten waren.

Testergebnisse KAMAG PM

Aufgrund mehrerer Sensorausfälle am KAMAG PM während der letzten Feldtest-Phase von November 2023 bis März 2024 konnten nicht genügend Tests durchgeführt werden, um die Performanz der Funktionen präzise zu evaluieren. Dies führte zu Verzögerungen im Testablauf und erforderte zusätzliche Untersuchungen, um die Ursache der Ausfälle zu identifizieren und zu beheben, wodurch die vollständige Validierung der Systeme innerhalb des geplanten Zeitraums nicht möglich war. Deswegen wird im Folgenden hauptsächlich auf die Ergebnisse der Tests während der Erprobungsphase 1 und 2 referenziert (s. Kapitel 7.4, Unterkapitel „Test der Automatisierungsfunktionen des KAMAG PM“). Der Hauptunterschied zwischen der Feldtest- und der Erprobungsphase für den KAMAG PM bestand darin, dass der Leitstand helyOS die

Auftragssteuerung übernommen hat. Trotz der Herausforderungen in der letzten Phase boten die vorherigen Erprobungen wertvolle und umfassende Einblicke in die Funktionalität des Systems und schufen eine solide Basis für die Integration der Automatisierungslösungen in künftige Tests und Anwendungen.

Die folgenden Zahlen in Tabelle 26 fassen diese Testphase für den KAMAG PM zusammen:

Tabelle 26: Kumulierte Zahlen zur Testdurchführung KAMAG PM

Testperiode	Erprobungsphase: 11/22 bis 03/23 Feldtestphase: 11/23 bis 03/24
Anzahl Testtage bei DACHSER Langenau	~ 70 Tage
Bei DACHSER Langenau gefahrte KM	~ 400 km
Durchgeführte erfolgreiche Missionen bei DACHSER Langenau	> 700 Missionen
Kartierte und getestete Stellplätze und Rampen	~ 170 Abstellplätze und Rampen

Die hohe Intensität der Tests während der Testphasen spiegelt sich in der Vielzahl der durchgeführten Missionen und der umfassenden Abdeckung des Testgeländes wider, was eine zuverlässige und detaillierte Validierung der Funktionen des KAMAG PM ermöglicht hat.

Lessons learned zur Durchführung der Feldtests

Aus den durchgeführten Tests und Projekterfahrungen wurden wichtige Erkenntnisse für zukünftige Integrationstests gewonnen. Es hat sich herausgestellt, dass die Präsenz der Partner vor Ort einer Remote-Beteiligung vorzuziehen ist. Zudem sollte der Testzeitraum aufgrund verschiedener, nicht vorhersehbarer Störfaktoren in ausreichendem Umfang geplant werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verfügbarkeit der Netzwerke (LTE) und die Netzabdeckung, die bereits im Rahmen der Standortauswahl vor Ort geprüft werden sollte.

8.2. 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 178: 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 179: Messung Querversatz KAMAG PT bei DACHSER südlich vom Hauptgebäude



Abbildung 180: 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 181). Die Linie dient normalerweise den menschlichen Fahrern als Orientierungshilfe und kann hier gut für eine Einschätzung des Ergebnisses herangezogen werden.



Abbildung 181: 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 182: Beispiele beim Andocken

Technische Analyse der Feldtests Wechselbrückenhubwagens (KAMAG PM)

Dieses Kapitel befasst sich mit der technischen Analyse der Feldtests des Wechselbrückenhubwagens (KAMAG PM) und dokumentiert detailliert die Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit sowie das Verhalten des Fahrzeugs unter praxisnahen Bedingungen.

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 183). 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 183: 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 unbekannte 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 Forschungsprojekts 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 Ladeinheit 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 Ladeinheit befindet.

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

Abschließend bestätigt der Fahrer den Abschluss des Auftrags. In der folgenden Abbildung 184 wurden die auswertungsrelevanten Prozessschritte dargestellt.

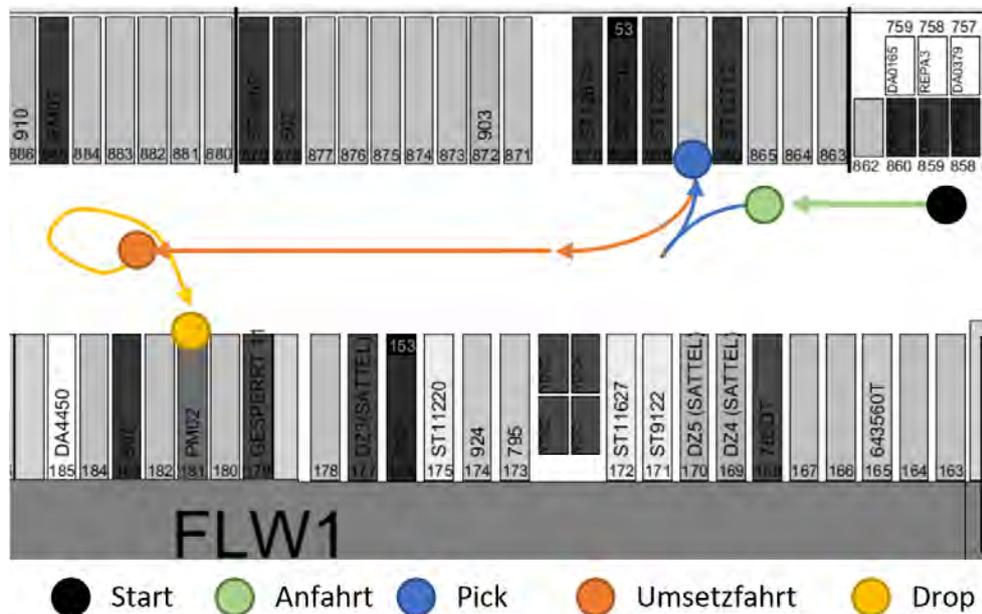


Abbildung 184: Umsetzfahrt

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 Ladeinheiten 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 185 zeigt die Gegenüberstellung der manuellen und automatisierten Prozesszeiten von Umsetzfahrten nach dem in der Abbildung 184 dargestellten Schema.

Modellierte Prozessanteile (Sekunden)

	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

PT



PM



Abbildung 185: 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 aufgenommenen 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.

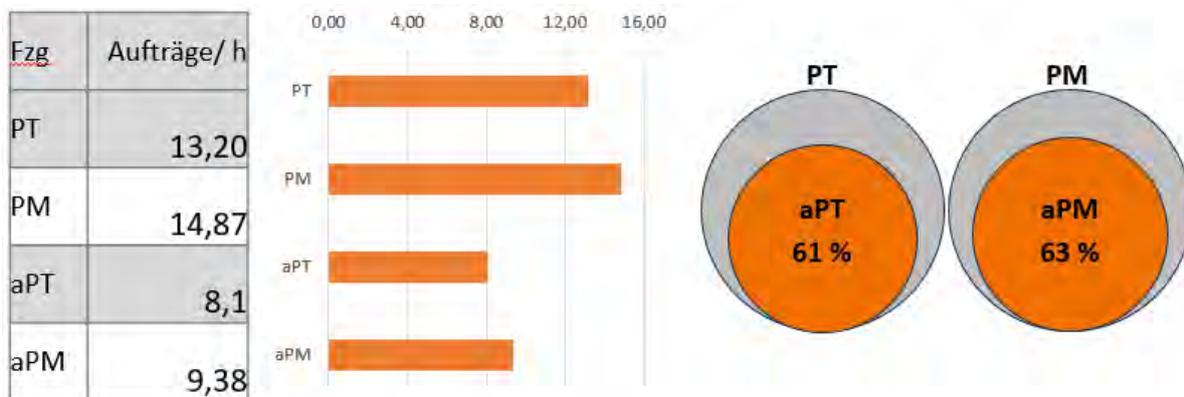


Abbildung 186: Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge

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 187 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.

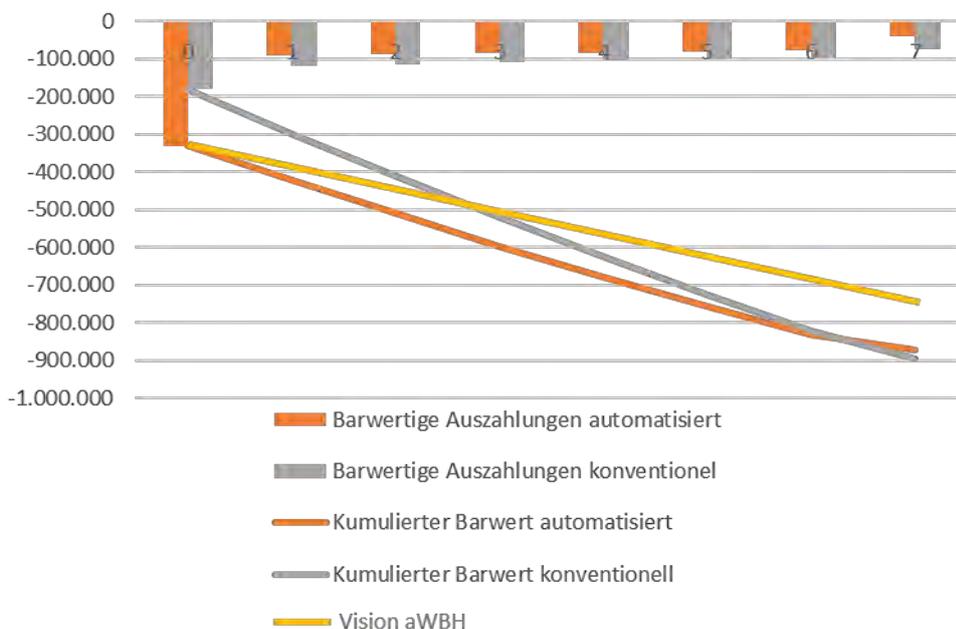


Abbildung 187: Jährliche Auszahlungen und kumulierter Barwertverlauf (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb)

Nachfolgend sind in Abbildung 188 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.

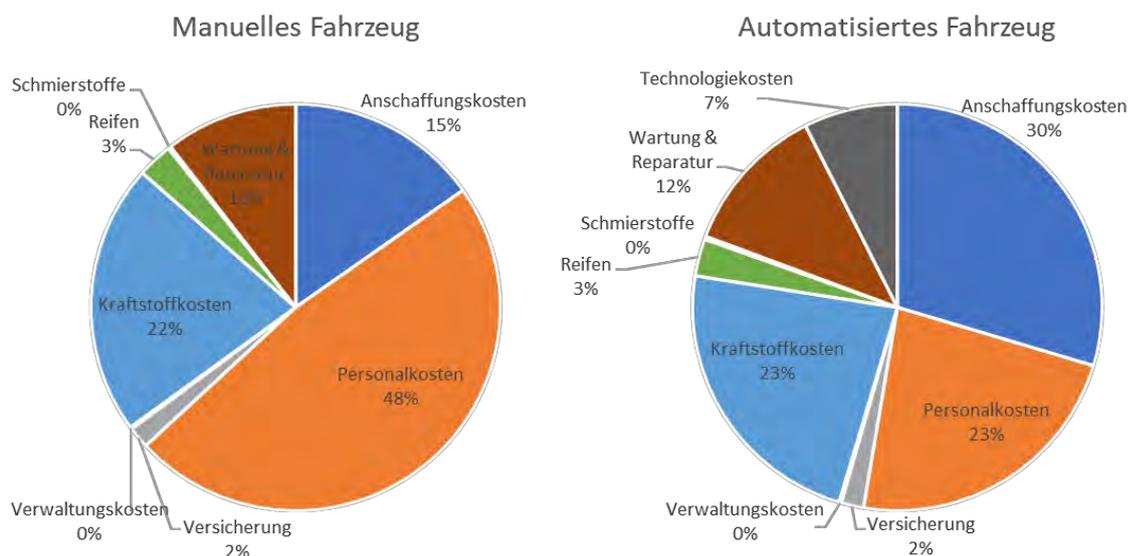


Abbildung 188: Anteile der Kosteneinflussgrößen je Fahrzeug (Wechselbrückenhubwagen mit Dieselantrieb)

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.

8.3. Projektabschluss: Ergebnisse, Identifikation weiterer F&E-Bedarfe, Erweiterungspotenzial (AP 8.3)

Die grundsätzliche Funktionalität automatisierter Fahrzeuglösungen konnte erfolgreich bewiesen werden. Im Rahmen der Untersuchungen in SAFE20 haben die Projektpartner wertvolle Erkenntnisse gesammelt, die sowohl Chancen als auch Herausforderungen offenlegen.

Zu den Chancen gehört, dass der Umbau bestehender Fahrzeugkonzepte möglich ist. Dies eröffnet die Möglichkeit, den gesamten Fahrprozess zu automatisieren. Zudem konnten technische Lösungen für den Umgang mit Wechselbrücken und Sattelauflegern erfolgreich demonstriert werden. Diese Aspekte zeigen das Potenzial unserer Technologie für eine breite Anwendung.

Ebenso wurden Herausforderungen identifiziert. Ein häufiges Auslösen von Fehlern erfordert die Lösung durch einen Operator, was die Effizienz beeinträchtigen kann. Das Zusammenspiel mit manuellen Fahrzeugen stellt ebenfalls eine Herausforderung dar, da menschliche Fahrer Schwierigkeiten haben, die Handlungen automatisierter Fahrzeuge vorherzusehen, was die Mensch-Technik-Interaktion erschwert. Ein weiterer Punkt ist der technische Umbau bzw. die Erweiterung der Sattelaufleger-Flotte, die notwendig sind, um die Automatisierung vollständig umzusetzen. Darüber hinaus ist ein genaues Positionierungssystem erforderlich, um Ladeeinheiten zielgenau abzustellen.

Die Übertragbarkeit der Lösungen auf andere Standorte ist grundsätzlich gegeben. Ähnliche Layouts bei Systemlogistikern und Handelsunternehmen sind vorteilhaft für die Implementierung.

Tabelle 27: Übersicht der Chancen und Herausforderungen bei der Implementierung autonomer Systeme im Logistikbereich.

(+) Chancen	(-) Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Umbau bestehender Fahrzeugkonzepte möglich • Gesamtfahrprozess lässt sich automatisieren • Technische und organisatorische Lösungen für Nebenprozesse bei Wechselbrücken und Sattelaufleger unterstützen Gesamtprozess 	<ul style="list-style-type: none"> • Häufiges Auslösen von Fehlern bedarf Lösung durch Operator • Zusammenspiel mit manuellen Fahrzeugen: Menschliche Fahrer haben Schwierigkeiten, Handlungen der automatisierten Fahrzeuge vorherzusehen (Mensch-Technik-Interaktion) • Technischer Umbau / Erweiterung der Sattelaufleger-Flotte notwendig • Genaues Positionierungssystem notwendig, um Ladeeinheiten zielgenau abzustellen

Übertragbarkeit

Die Übertragung von automatisierten Fahrzeugen auf unterschiedliche Werksgelände-Typen stellt eine komplexe Herausforderung dar, die sorgfältige Planung und Umsetzung erfordert. Essenziell für den Erfolg dieser Übertragung sind spezifische Anforderungen in den Bereichen Werkslogistik, Fahrzeugfunktionalitäten und Infrastruktur.

In der Werkslogistik ist die Implementierung repetitiver Fahraufgaben von großer Bedeutung. Durch die Standardisierung der Transportwege und -aufgaben kann die Effizienz der automatisierten Fahrzeuge maximiert werden. Dies setzt voraus, dass die Fahrzeuge regelmäßig identische Strecken

zurücklegen, was die Programmierung und den Betrieb vereinfacht. Weiterhin ist die Nutzung homogener Ladungsträger notwendig. Einheitliche und standardisierte Ladungen minimieren die Komplexität der Handhabung und ermöglichen eine reibungslose Integration in bestehende Logistiksysteme. Eine weitere kritische Anforderung ist die Minimierung kreuzender Verkehre. Wenige bis keine kreuzenden Verkehrswege reduzieren das Risiko von Kollisionen und Störungen im Betriebsablauf, was die Sicherheit und Effizienz der automatisierten Fahrzeuge erhöht.

Die Fahrzeugfunktionalitäten müssen ebenfalls angepasst werden, um eine erfolgreiche Übertragung zu gewährleisten. Technologien oder Prozessanpassungen zur Bewältigung manueller Tätigkeiten, wie das Öffnen von Hecktüren, sind unerlässlich. Solche Anpassungen ermöglichen es den Fahrzeugen, Aufgaben zu übernehmen, die traditionell manuell durchgeführt wurden, wodurch die Automatisierung weiter vorangetrieben wird. Darüber hinaus sind Schnittstellen zum Yard-Management von entscheidender Bedeutung. Eine nahtlose Kommunikation und Koordination zwischen den automatisierten Fahrzeugen und dem Logistik-Management-System sind notwendig, um eine effiziente und zuverlässige Betriebsführung sicherzustellen.

Die Infrastruktur spielt eine ebenso wichtige Rolle bei der Integration automatisierter Fahrzeuge. Einheitliche Fahrwege und eine klare Verkehrsführung, wie die Implementierung von Einbahnstraßen und separaten Spuren, sind notwendig, um eine sichere und effiziente Bewegung der Fahrzeuge zu gewährleisten. Dies reduziert das Risiko von Unfällen und verbessert den Verkehrsfluss. Schließlich erfordert die Anpassung der Infrastruktur eine hohe Investitionsbereitschaft. Dies umfasst sowohl bauliche Maßnahmen als auch Investitionen in IT-Systeme, um die notwendigen technischen und physischen Voraussetzungen für den Einsatz automatisierter Fahrzeuge zu schaffen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die erfolgreiche Übertragung von automatisierten Fahrzeugen auf andere Werksgelände-Typen eine ganzheitliche Betrachtung und Anpassung der Werkslogistik, der Fahrzeugfunktionalitäten und der Infrastruktur erfordert. Nur durch die Erfüllung dieser spezifischen Anforderungen kann die Integration effizient und nachhaltig gestaltet werden.

Weiterer F&E-Bedarf

Aufbauend auf den umfassenden Projektergebnissen wurde in folgenden Feldern weiterer Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Robustifizierung der technischen Lösungen und zu Annäherung an eine kommerzielle Nutzung identifiziert:

- **Gestaltung prozessualer, organisatorischer oder manueller Alternativen:** Einige Aufgaben, die bislang das Fahrpersonal übernimmt, wurden im Rahmen des Projekts SAFE20 noch nicht automatisiert umgesetzt. Hier ist beispielhaft die Öffnung und Schließung von Wechselbrückentüren anzuführen, die organisatorisch oder mithilfe von alternativen Systemen wie Vorsatzschleusen oder Rolltoren erfolgen könnte. Wenn die automatisierten Fahrzeuge optimal in den logistischen Gesamtprozess integriert werden sollen, müssen die Technologien dementsprechend weiterentwickelt und in den logistischen Prozess integriert werden.

- **Übertragbarkeit der entwickelten Technologien auf andere logistische und industrielle Anwendungen:** Um die Flexibilität und Effizienz weiter zu steigern, sind noch F&E-Arbeiten auf diesem Gebiet notwendig. Durch den gesteigerten Einsatz autonomer Fahrzeuge wird die kooperative Manöverplanung weiterhin ein zentraler Forschungsbereich bleiben, um die Effizienz und Sicherheit automatisierter Transportsysteme zu erhöhen. Des Weiteren weichen die Anforderungen auf anderen logistischen Anwendungen teils von denen in SAFE20 ab, was die Anpassung der Systeme erfordert.
- **Forschung im Bereich Umfeld-/Objekterfassung:** 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. Zudem kann durch ein KI-basiertes Umgebungsmodell die Robustheit der Klassifikation von Personen und anderen Fahrzeugen erhöht und so sichere und effiziente Fahrmanöver geplant werden.
- **Steigerung der Fehlerresistenz / Zuverlässigkeit aller Systeme:** Die Steigerung der Fehlerresistenz und Zuverlässigkeit von autonomen Hoffahrzeugen ist entscheidend, um ihre sichere und effiziente Integration in die logistischen Prozesse zu gewährleisten. Autonome Systeme müssen in der Lage sein, zuverlässig auf unvorhersehbare Umstände wie Wetteränderungen, unerwartete Hindernisse oder Kommunikationsausfälle zu reagieren. In diesem Bereich sind noch Optimierungen notwendig.
- **Einbindung in logistische Prozesse:** Die automatisierten Fahrzeuge müssen in das Yard-Management-System des Logistikunternehmens integriert werden, damit manuelle und automatisierte Fahrzeuge die Transportaufträge über das gleiche System bekommen. Aufgrund des hohen Aufwands zur Schnittstellenentwicklung wurde dieser Schritt im Projekt SAFE20 nicht umgesetzt.

Zusammenfassung und Fazit der Projektpartner

Das Projekt SAFE20 hatte sich inhaltlich eine komplexe Aufgabe gestellt, die noch erheblich dadurch beeinflusst wurde, dass fast über die gesamte Projektlaufzeit mit den nicht unerheblichen Einschränkungen durch die Covid-Pandemie umgegangen werden musste. Trotz dieser zusätzlichen Herausforderungen gelang es, durch die einzigartige interdisziplinäre Zusammenarbeit von Unternehmen, F&E-Instituten und Berufsgenossenschaften entlang der gesamten Wertschöpfungskette die geplanten und erforderlichen Technologiefelder (Sensoren, Rechentechnik, Kommunikation, Automatisierung, Fahrzeugtechnik, Algorithmen) und die Abläufe und Anforderungen aus allen relevanten Perspektiven zu untersuchen und Lösungen zu finden.

Damit konnten wesentliche Fortschritte in Bereichen erzielt werden, die vor Projektbeginn als Hindernisse für den automatisierten Betrieb auf Betriebshöfen fehlten, wie

- 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,
- ein sicheres Notbremsystem für den Hofbetrieb bei Geschwindigkeiten größer 20 km/h,
- Standardisierung eines integrativen Sicherheitskonzepts aus hof- und fahrzeugseitigen Komponenten,
- Anerkennung durch die relevanten Freigabebehörden (z. B. Berufsgenossenschaft).

Als Ergebnis der Erarbeitung des Sicherheitskonzepts entstand eine umfassende Aufstellung und Analyse der notwendigen Prozessschritte, die im automatisierten Betrieb zu berücksichtigen sind. Diese Aufstellung war im Projekt Grundlage für die Betrachtung der funktionalen Sicherheitsanforderungen für jeden Prozessschritt und bildete die Basis dafür, diese Erkenntnisse auch auf andere Betriebshöfe zu übertragen.

Durch den Austausch mit weiteren wichtigen Partnern während des gesamten Projektzeitraums, wie z. B. mit der Berufsgenossenschaft BG Handel und Warenlogistik und BG Verkehr, vor allem als Ansprechpartner für regulatorische Fragen, konnten tragfähige Lösungen für eine spätere rechtliche und kommerzielle Umsetzung des Projekts gesucht werden. Als ein erstes Ergebnis aus dem Projekt sollen grundlegende Vorgaben zum Einsatz automatisierter Fahrzeuge aus den Erkenntnissen des Sicherheitskonzepts in die von der BG Verkehr zu überarbeitende Unfallverhütungsvorschrift Fahrzeuge einfließen.

Ein wichtiger Abschnitt des Projekts, der für alle beteiligten Partner zusätzliches Engagement über das üblicher Forschungsprojekte hinaus darstellte, war das Ziel, die erarbeiteten Lösungen nicht nur einmalig zu demonstrieren, sondern sie in einem mehrmonatigen Testbetrieb unter verschiedenen

Verkehrs-, Wetter- und Lichtbedingungen durch die späteren Nutzer in der Spedition verifizieren zu lassen.

Zusammenfassend sind viele Weiterentwicklungen und neue Lösungen entstanden, die, gepaart mit den Erfahrungen aus dem Feldversuch, in nächsten Schritten die Einführung erster kommerzieller (Teil-)Lösungen erlaubt.

Das Projekt startete am 01.10.2020, 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.

Literaturverzeichnis

- Abdul Rachman, A. S. (2017). 3D-LIDAR Multi Object Tracking for Autonomous Driving: Multi-target Detection and Tracking under Urban Road Uncertainties.
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:f536b829-42ae-41d5-968d-13bbaa4ec736>, Delft, NL.
- Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG). (2019). *Bluetooth Core Specification Version 5.1*. Abgerufen am 3. Jun 2023 von <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-core-specification-v5-1-feature-overview/>
- Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA). (2019). *Vfg. 135/2019: Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung durch Ultrabreitbandgeräte (UWB)*. Abgerufen am 01. 11 2023 von https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/FunkanlagenGeringerReichweite/2019Vfg135_UWB.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- 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
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). (2011). *DIN EN 61508-1 VDE 0803-1: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Allgemeine Anforderungen*. VDE Verlag: Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). (2019). *DIN EN 61000-6-2: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-2: Fachgrundnorm Störfestigkeit für Industriebereiche*. Berlin: Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). (2019). *DIN EN ISO 13854: Safety of machinery – Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body*. Berlin: Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). (2019). *DIN EN ISO 13857: Safety of machinery – Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs*. Berlin: Beuth Verlag.
- DGUV - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. (31. 03 2022). *DGUV-Homepage*. Abgerufen am 1. März 2024 von <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/publikationen-nach-fachbereich/holz-und-metall/fahrzeugbau-antriebssysteme-instandhaltung/4505/fbhm-119-automatisiert-fahrende-fahrzeuge-in-betrieblichen-bereichen>
- Electronic Communications Committee (ECC). (2011). *ECC Recommendation (11)09 – Use of Earth Stations on Mobile Platforms (ESOMPs) operating within the frequency range 17.3-20.2 GHz*

- and 27.5-30.0 GHz. Abgerufen am 09. Aug 2023 von European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT): <https://docdb.cept.org/document/504>
- Electronic Communications Committee (ECC). (18. 11 2022). *ECC Decision (06)04*. Abgerufen am 08. Aug. 2023 von <https://testdocdb.cept.org/download/4215>
- Europäische Union. (22. Mai 2014). *Richtlinie 2014/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über die Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt und zur Aufhebung der Richtlinie 1999/5/EG*. Abgerufen am 2. 11 2023 von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32014L0053>
- Europäische Union. (16. 05 2019). *Durchführungsbeschluss (EU) 2019/785 der Kommission vom 14. Mai 2019 über die Harmonisierung der Funkfrequenzen für Ultrabreitbandgeräte in der Union und zur Aufhebung der Entscheidung 2007/131/EG*. Abgerufen am 15. Jan 2022 von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32019D0785>
- 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>
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (11 2016). *ETSI EN 302 065-1 V2.1.1: Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture*. Abgerufen am 15. Jan 2023 von www.etsi.org:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/30206501/02.01.01_60/en_30206501v020101p.pdf
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (11 2016). *ETSI EN 302 065-2: V2X - Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Part 2: Framework for Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) - Access layer specifications*. Abgerufen am 15. Jan 2023 von www.etsi.org:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/30206502/02.01.01_60/en_30206502v020101p.pdf
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (07 2021). *EN 302 065-3: Short Range Devices (SRD); Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Part 3: Harmonised Standard for access to radio spectrum*. Abgerufen am 15. Jan 2023 von www.etsi.org:
https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/3020650301/03.01.00_20/en_3020650301v030100a.pdf

- 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/>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2010). *Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*. New York: IEEE.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2016). *IEC 61784-3: Industrial communication networks – Profiles – Part 3: Functional safety fieldbuses – General rules and profile definitions*. Genf: International Electrotechnical Commission (IEC).
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC/TS 62998-1: Safety of machinery – Safety-related sensors used for the protection of persons – Part 1: General requirements and testing*. Genf: International Electrotechnical Commission (IEC).
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2021). *IEC 62061: Safety of machinery – Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems*. Genf: International Electrotechnical Commission (IEC).
- International Organization for Standardization (ISO). (2010). *ISO 12100 – Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction*. Genf: ISO 12100 – Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction.
- International Organization for Standardization (ISO). (2015). *ISO 13849-1: Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design*. Genf: International Organization for Standardization (ISO).
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 26262 – Road vehicles – Functional safety*. Genf: International Organization for Standardization (ISO).
- International Organization for Standardization (ISO). (2020). *ISO 3691-4: Industrial trucks – Safety requirements and verification – Part 4: Driverless industrial trucks and their systems*. Genf: International Organization for Standardization (ISO).
- 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>
- Konstantinidis, K. (2023). *Detection and Tracking of Moving Objects (DATMO) using sensor_msgs/Lidar*. Abgerufen am 1. Dez 2023 von github.com: <https://github.com/kostaskonkk/datmo>
- Kramer, M., Keppler, F., & Janschek, K. (Mar. 2022). Verteilte Simulationsumgebung zur Erprobung koordinierter Fahrmanöver automatisierter Fahrzeuge. *VDI Mechatroniktagung 2022*, (S. 6). Darmstadt, Germany.
- Mollbach, E., & Albert, M. (2020). COHeReNT: A HRN-based risk assessment method tailored to human-robot collaboration. <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/esrel2020/pdf/5164.pdf?v=2.1>.
- Park, S., Wang, S., Hunjung, L., & Kang, U. (2019). Curved-Voxel Clustering for Accurate Segmentation of 3D LiDAR Point Clouds with Real-Time Performance. *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (S. 6459-6464). Macau, China. doi:10.1109/IROS40897.2019.8968026
- Pinkster, I., van de Burgt, B., Janssen, D., & van Veenendaal, E. (2004). *Successful Test Management (2. Aufl.)*. Springer Verlag.
- Polack, P., Altché, F., d'Andréa-Novel, B., & de La Fortelle, A. (2017). The kinematic bicycle model: A consistent model for planning feasible trajectories for autonomous vehicles? *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (S. 812-818). Los Angeles, CA, USA: IEEE. doi:10.1109/IVS.2017.7995816
- Rajamani, R. (2012). *Vehicle Dynamics and Control, 2nd ed.* New York: Springer.
- SAE International. (31. Mai 2019). Automated Driving System (ADS) Marker Lamp (SAE J 3134).
- SAFE20 Projektkonsortium. (2022). *SAFE20 YouTube-Präsenz*. Abgerufen am 01. Aug. 2024 von <https://www.youtube.com/@safe20>
- SAFE20 Projektkonsortium. (2022). *SAFE20-LinkedIn-Präsenz*. Abgerufen am 01. Aug. 2024 von <https://www.linkedin.com/company/safe20>
- SAFE20-Konsortium. (27. Okt 2022). SAFE20 in 60 seconds - Part 1 - Project overview. Abgerufen am 27. Okt 2022 von https://www.youtube.com/watch?v=X__Yxxmk1rQ
- SAFE20-Konsortium. (28. Feb 2023). SAFE20 in 60 seconds - Part 2 - Sensor Technology Vehicles. Abgerufen am 28. Feb 2023 von <https://www.youtube.com/watch?v=j3k0seh-trc>
- SAFE20-Konsortium. (13. März 2023). SAFE20 in 60 seconds - Part 3 - Sensor Technology Infrastructure. Abgerufen am 13. März 2023 von <https://www.youtube.com/watch?v=5BDSSfZCcEc>

- SAFE20-Konsortium. (02. Mai 2023). SAFE20 in 60 seconds - Part 4 - Control Center. Abgerufen am 02. Mai 2023 von <https://www.youtube.com/watch?v=jsyPxZaedMY>
- SAFE20-Konsortium. (04. Sep 2023). SAFE20 in 60 seconds - Part 5 - Vehicle Technology. Abgerufen am 04. Sep 2023 von <https://www.youtube.com/watch?v=OK9pKfR25IU>
- SAFE20-Konsortium. (19. Sep 2023). SAFE20 in 60 seconds - Part 6 - modular system. Abgerufen am 19. Sep 2023 von <https://www.youtube.com/watch?v=0dGiiRqMLCk>
- SAFE20-Konsortium. (18. März 2024). SAFE20 - Film zum Projektabschluss. Abgerufen am 18. März 2024 von https://www.youtube.com/watch?v=jx9v8i_jDqc
- Schreier, M. (2016). *Bayesian environment representation, prediction, and criticality assessment for driver assistance system*. Technische Universität Darmstadt. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, as part of the Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 797.
- Society of Automotive Engineers (SAE). (2011). *SAE J1939 – Recommended Practice for a Serial Control and Communications Vehicle Network*. Warrendale, PA: SAE International.
- Telekom Deutschland GmbH. (2022). *Telekom Mobilfunk-Netzausbau*. Abgerufen am 11. Oktober 2022 von <https://www.telekom.de/netz/mobilfunk-netzausbau>
- The Autoware Foundation. (2022). *Autoware AI Perception*. Abgerufen am 2. Dez 2022 von [github.com: https://github.com/autowarefoundation/autoware_ai_perception](https://github.com/autowarefoundation/autoware_ai_perception)
- Verband der Automobilindustrie (VDA). (2023). *VDA 5050*. Abgerufen am 15. Sep 2023 von Verband der Automobilindustrie (VDA): <https://www.vda.de/de/themen/automobilindustrie/vda-5050>
- Wikipedia. (2006). *Kalman-Filter*. Abgerufen am 17. 06 2023 von Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kalman-Filter>
- Wikipedia. (2018). *Verkehrsvernetzung*. Abgerufen am 01. März 2024 von Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsvernetzung>
- Zhang, X., Xu, W., Dong, C., & Dolan, J. M. (June 2017). Efficient L-Shape Fitting for Vehicle Detection Using Laser Scanners. *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. doi:10.1109/IVS.2017.7995698