SAFE 20

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

„Automatisierter Wechselbrückenhubwagen“

Schlussbericht TII KAMAG

Förderkennzeichen: 19A20011E

Laufzeit: 10/2020 – 03/2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZF GROUP DACHSER Intelligent Logistics Fraunhofer IML Fraunhofer IVI GÖTTING SICK Sensor Intelligence. TII KAMAG SW

Autoren

Name	Organisation
Martin Teuchler	TII KAMAG
Bénédicte Bernier	TII KAMAG
Ebin Zacharias	TII KAMAG
Marc Mozigemba	TII KAMAG

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

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

Inhalt

Inhalt 3

Abbildungsverzeichnis 5

Tabellenverzeichnis 7

Abkürzungsverzeichnis / Glossar 8

1 Kurze Darstellung 9

1.1 Aufgabenstellung 9

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 10

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 11

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn 12

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 17

2 Eingehende Darstellung 19

2.1 Projektmanagement (AP 1) 19

2.2 Anforderungsanalyse (funktionale Sicht) (AP 2) 22

2.2.7 Identifikation und Definition der betrachteten Use-Cases / betroffenen Personenklassen (AP 2.1) 22

2.2.8 Entwurf vorläufige Systemarchitektur (AP 2.4) 25

2.3 Sicherheitskonzept (AP 3) 27

2.3.7 Risikobeurteilung (AP 3.1) 28

2.3.8 Sicherheitsfunktionen (AP 3.2) 29

2.3.9 Entwurf Sicherheitskonzept auf funktionaler Ebene inkl. Abstimmung mit Beteiligten (AP 3.3) 34

2.3.10 Ableitung technischer Anforderungen an Subsysteme (AP 3.6) 35

2.3.11 Nachweis anwendbaren Richtlinien (AP 3.7) 36

2.4 Sichere Fahrzeugtechnologien (AP 4) 36

2.4.7 Sichere Notbremse (AP 4.2) 39

2.4.8 Funktional sichere, hoch performante Rechnerhardware (AP 4.4) 39

2.4.9 Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (Aufnehmen, Absetzen etc.) AP4.7 40

2.4.10 Sicheres automatisches Handling Wechselbrücke (AP 4.8) 41

2.4.11 Hochverfügbare Ortung mittels Fusionssystem (AP 4.10) 43

2.4.12 Schnittstelle autonomes Fahren für Truck Wiesel (AP 4.11) 44

2.4.13 Sichere Umfeld-/Objekterfassung (AP 6) 47

2.5 Schrittweise Systemintegration (AP 7) 49

2.5.7 Aufbau und Inbetriebnahme der Automatisierungszone 49

2.5.8 Systemintegration Fahrzeug (AP 7.2) 50
2.5.9 Test und Validierung der Sicherheitsfunktionen (AP 7.3) 51
2.5.10 Test der Automatisierungsfunktionen (AP 7.4) 51
2.5.10.2 Integration des Gesamtsystems 57
2.5.11 Testen, Lernen und Optimieren im Feld (AP 8) 58
2.5.11.2 Betrieb des Gesamtsystems (AP 8.1) 58
2.5.11.3 Evaluierung des Testbetriebs (AP 8.2) 62
2.6 Zusammenfassung und Fazit der Projektpartner 65

Literaturverzeichnis 67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SAFE20-Schlusspräsentation, Grußwort von Hr. Stefan Heidemann, BMWK _____ 21

Abbildung 2: Fahrdemonstration während der SAFE20-Schlusspräsentation_____ 21

Abbildung 3 Ablaufdiagramm _____ 23

Abbildung 4 Darstellung der Missionsbestandteile_____ 24

Abbildung 5 Prozessketten in der Hoflogistik _____ 25

Abbildung 6 Darstellung eines L1 Diagrammes_____ 26

Abbildung 7 Darstellung eines L2 Diagrammes_____ 27

Abbildung 8 Darstellung eines L3 Diagrammes_____ 29

Abbildung 9 Testaufbau für Messung Bremswege _____ 32

Abbildung 10 Brems-/Anhaltewege nach ZF Berechnung_____ 34

Abbildung 11 Messungen durch TII KAMAG für KAMAG PM (Wiesel) _____ 35

Abbildung 12 Systemarchitektur KAMAG PM _____ 37

Abbildung 13 Systemarchitektur KAMAG PT_____ 38

Abbildung 14 Anbau von Senroik an Rammschutzplatte des KAMAG PT _____ 39

Abbildung 15 Sattelplatte mit nachgerüstetem Knickwinkelsensor _____ 40

Abbildung 16 : Ausrüstung des Wechselbrückenhubwagens für ein sicheres Wechselbrücken-Handling_____ 41

Abbildung 17 Darstellung des Systemkontexts für die Automatisierungsschnittstelle _____ 46

Abbildung 18 Darstellung der Zustandsmaschine für die verschiedenen Betriebsarten _____ 47

Abbildung 19 Mit Lidaren ausgerüstetes Testfahrzeug beim Dachser in Langenau _____ 48

Abbildung 21 Ansicht der Rohdaten mit Blick auf Kalibrierungsbrett_____ 48

Abbildung 20 Annotieren von Messdaten in Supervisely _____ 49

Abbildung 22: Übersicht relevanter Stellplätze für die Automatisierung, in Blau gekennzeichnet _ 52

Abbildung 23: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 1, in Grün kenngezeichnet _____ 53

Abbildung 24: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 2, in Grün kenngezeichnet _____ 53

Abbildung 25: Hauptroute für die Fahrt zwischen den südlichen Rampen und den Abstellbereich C2/C3 _____ 53

Abbildung 26: Auf dem Betriebsgelände angebrachte Hinweisschilder _____ 59

Abbildung 27: Bereiche für die Abstellplätze und Rampe im DACHSER Logistikzentrum Ulm _____ 60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gegenüberstellung Ansätze für ausfallsichere Bremse _____ 31

Tabelle 2 Ermittelte Bremswege _____ 33

Tabelle 3: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: Teilmissionen _____ 54

Tabelle 4: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: komplette Abläufe _____ 55

Tabelle 5: Ergebnisse der Erprobungsphase 1: Umsetztransporte _____ 55

Tabelle 6: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: Teilmissionen _____ 56

Tabelle 7: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: komplette Abläufe _____ 57

Tabelle 8: Automatisierter KAMAG PM: Ergebnisse der Erprobungsphase 2: Umsetztransporte __ 57

Tabelle 9: Testszenarien KAMAG PM _____ 60

Tabelle 10: Negative Testszenarien _____ 61

Tabelle 11: Kumulierte Zahlen zur Testdurchführung KAMAG PM _____ 62

Abkürzungsverzeichnis / Glossar

Abkürzung / Begriff	Bedeutung
ADOPT	Autonomous Driving Open Platform Technology: Schnittstellenprodukt von ZF
AP	Arbeitspaket
ASIL	Automotive Safety Integrity Level: Schema zur Risikobewertung
BG	Berufsgenossenschaft
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CAN / CAN-Bus	Controller Area Network: Bus-System zum seriellen Datenaustausch zwischen Steuergeräten
DBW	Drive-by-Wire Interface, Automatisierungsschnittstelle
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
E/E-Architektur	elektrisch-elektronische Architektur
E/E/PE-Systeme	Elektrische, Elektronische und Programmierbare Elektronische Systeme
EN	Europäische Norm
EPH	Elektro Pneumatische Handbremse
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
GNSS	Global Navigation Satellite Systems: satellitengestützte Navigationssysteme
HRN	Hazard Rating Number: Verfahren zur Bestimmung von Risiken
HW	Hardware
KI	Künstliche Intelligenz
Lkw	Lastkraftwagen
Pkw	Personenkraftwagen
PLr	Performance Level Required
SAE	SAE International, ehemalige Bezeichnung Society of Automotive Engineers
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SW	Software
V2X	Vehicle to everything: Kommunikation Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen, Infrastruktur etc.
WB	Wechselbrücke

1 Kurze Darstellung

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

1.1 Aufgabenstellung

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

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

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

Der angestrebte Automatisierungsgrad des SAFE20-Systems gemäß SAE J3016 [1] Definition war „High Automation“ (Level 4). Dies bedeutet, dass die Fahrmodus-spezifische Ausführung aller Aspekte der dynamischen Fahraufgabe durch ein automatisiertes Fahrsystem erfolgt, ohne die Erwartung, dass ein Fahrer zum Eingreifen reagiert.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

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

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

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

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

Aufgrund der bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen war ein vollständig autonomer Betrieb auf dem Dachser-Betriebsgelände nicht erlaubt. Daher erfolgte der Testbetrieb unter Einsatz eines Sicherheitsfahrers gemäß SAE J3016 “Conditional Automation” (Level 3). Der Sicherheitsfahrer hatte die Aufgabe, das System und die Umgebung ständig zu überwachen und bereit zu sein, die Fahraufgabe jederzeit zu übernehmen.

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

Die am Projekt beteiligten Partner waren:

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

Unterbeauftragt war:

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

Als assoziierte Partner:

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

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

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

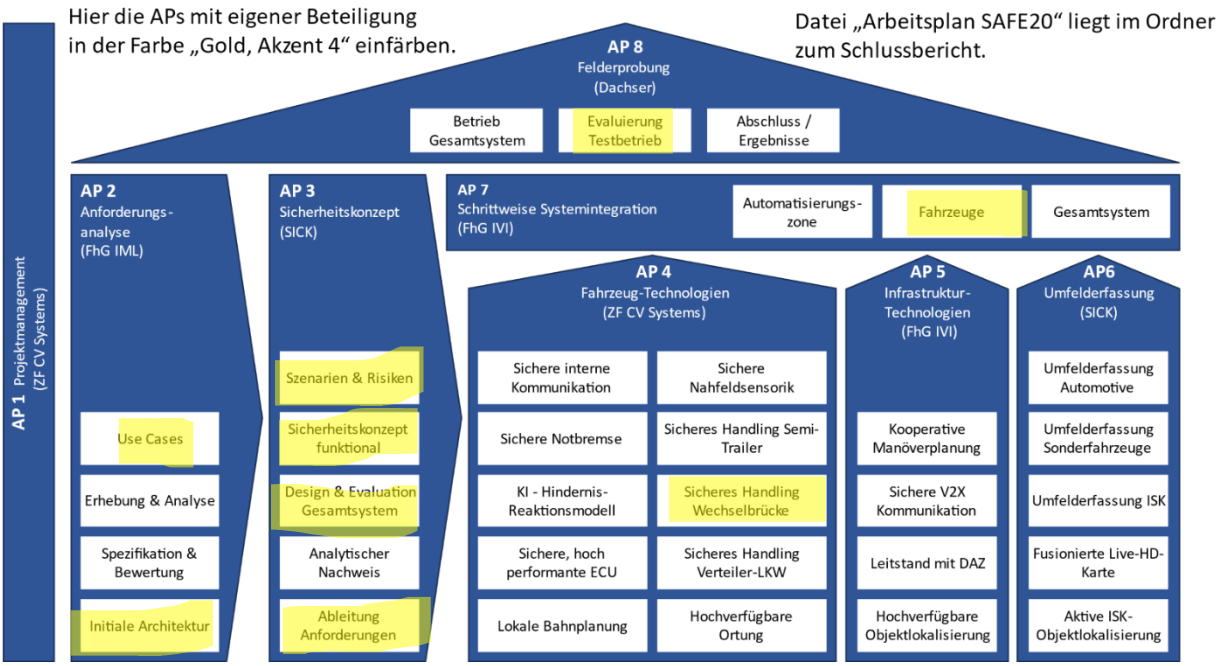


Abbildung 1: Übersicht Arbeitspakete SAFE20

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

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Für den wirtschaftlichen Betrieb automatisierter Fahrzeuge unter realen Einsatzbedingungen ist die Entwicklung und Umsetzung eines umfassenden Sicherheitskonzeptes seit Jahren eine zentrale Frage. Die Erfahrungen aus vorherigen Projekten (u.a. AutoTruck) sowie der Konsortialpartner zeigen, dass die mit der Geschwindigkeit weitgehend proportionale Transportleistung ein entscheidendes Kriterium für einen erfolgreichen wirtschaftlichen Einsatz ist. Die aktuell erlaubten Geschwindigkeiten von 6 km/h bis 10 km/h sind nur in einigen Nischenanwendungen wirtschaftlich attraktiv. Das ändert sich schlagartig, wenn Geschwindigkeiten von ca. 20 km/h erreicht werden, was der typischen Maximalgeschwindigkeit bei den betrachteten Anwendungsfällen entspricht. Dem Konsortium ist bis heute keine Umsetzung bekannt, bei dem diese Geschwindigkeiten in einer kommerziell genutzten Lösung umgesetzt und sicher erreicht wurden.

Für den Stand der Technik bezogen auf den Anwendungsfall sind primär zwei Entwicklungsfelder zu betrachten. Dazu zählen die gegenwärtigen und erwarteten technologischen Entwicklungen im

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

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

- Die FTS-Entwicklung befindet sich am Ende ihrer dritten Epoche. Es hat sich ein stabiler Technologiestandard entwickelt, mit dem kundenspezifische verlässliche Systemlösungen realisiert werden, die primär dem Materialtransport dienen.

- FTS fahren mit ca. 4-5 km/h, orientieren sich in einer bekannten Umgebung mittels Lidar, Leitdraht oder Transponder, ohne vom Disponenten direkt gesteuert zu werden.

- FTS werden im Mischbetrieb eingesetzt und garantieren ihr sicheres Agieren, d. h. sie tragen Sorge für den Personenschutz sowie für den Schutz vor Beschädigungen an der Last und an Umgebungseinrichtungen mittels Laserscanner oder berührempfindlichen Kontaktleisten.

- Fahrerlose Fahrzeuge sind organisatorisch in übergeordnete Leitstände eingebunden und kommunizieren mit diesem drahtlos. Sie empfangen Transportaufträge / Missionen und senden Statusinformationen.

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

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

Der Stand der Technik ist nachfolgend kurz zusammengefasst:

- Fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme sind heute bereits auf dem Markt und bilden die Basis für die schrittweise Automatisierung konventioneller Fahrzeuge. Hier ist jedoch zu beachten, dass diese Assistenzsysteme so ausgelegt sind, dass der Fahrer im Fehlerfall rechtzeitig eingreifen kann. Ohne diese Annahme ergeben sich signifikant höhere Anforderungen an die Sicherheit aller Subsysteme in der funktionalen Kette (z.B. redundante Sensoren, Aktoren, Steuergeräte etc.). Die Entwicklungsaufwände übersteigen die des nicht sicheren Systems i.d.R. um ein Vielfaches.
- Die vorhandene Technologie zum hochautomatisierten Fahren erlaubt es bereits (Stand 2019), die Kontrolle in bestimmten Situationen an das System abzugeben, sodass hochautomatisiertes Fahren ermöglicht wird (z.B. Stauassistenten). Auch hier gilt die zwingende Voraussetzung, dass der Fahrer im Fehlerfall rechtzeitig eingreifen kann.
- Als Techniken zur Absicherung werden Sensoren zur Umfelderfassung (Kameras, Lidar, Radar – meist als Fusionssystem) sowie Car2Car-Kommunikation in Kombination mit Steuer- und Regelsystemen eingesetzt.
- Objekte auf der Fahrbahn werden von der fahrzeugeigenen Umfelderfassung nicht immer eindeutig erkannt und klassifiziert und lösen z. T. Fehlentscheidungen aus – auch mit schwerwiegenden Folgen. Tödliche Unfälle von Tesla- und Uber-Fahrzeugen sind dokumentiert.
- Viele Unternehmen (Google, Uber, Daimler, Continental uvam.) arbeiten an sog. Robo-Taxis, die laut Ankündigung ab 2021 als Alternative/Ergänzung zum ÖPNV eingeführt werden sollen. Diese Fahrzeuge werden mit dem Smartphone gerufen und sollen vollautomatisch zum Ziel fahren. Einige Konzepte lassen Bedienelemente für Fahrer konsequent weg.

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

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

Über die generellen Untersuchungen hinaus galt es Einzellösungen für Systeme oder Komponenten zu erweitern oder neu zu entwickeln. Gerade weil in der Praxis oftmals auf den vorgeschriebenen Einweiser verzichtet wird und beispielsweise Sattelzüge unübersichtlich rückwärts zu rangieren sind,

ist der Einsatz von Sensorik zur Erfassung des Rückraums notwendig. Der Einsatz von z.B. Kameras erfordert dabei Datenraten, die mit den herkömmlichen Fahrzeugdatenbussen nicht realisierbar ist. Hierfür sind neue kabelgebundene Lösung erforderlich, wie z.B. die durch die ZF CV Systems vorentwickelte Technik in Form eines Automotive-Ethernet-basierten Datengateways die notwendige Datenrate bei höchster Verfügbarkeit gewährleistet. Für einen automatisierten Betrieb bei Geschwindigkeiten größer als 10km/h sind zudem Sensoren mit Reichweiten von 20m und mehr erforderlich, um eine sichere Nahfelderkennung von Objekten und Personen zu gewährleisten. Im Projekt sollten daher neue prototypische Radar- und Lidarsysteme der Fa. SICK hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit untersucht werden. Ein ebenfalls wichtiges Element der Hofautomatisierung ist der Einsatz zuverlässiger Notbremssysteme, die über die Funktion der herkömmlichen Betriebsbremsen hinaus wirksam sind. Stand der Technik war hier der im BMWi geförderten "aFAS" Projekt entwickelte Ansatz eines Fail-safe-Bremssystem, um ein autonom fahrendes Fahrzeug bei Eintritt eines Fehlers sicher zum Stillstand zu bringen.

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

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

- autonomous yard maneuvering: Knorr-Bremse hat eine Technologie zum autonomen Fahren auf Werksgeländen demonstriert, ebenfalls auf Basis von Sattelzugmaschinen, die im Fernverkehr eingesetzt werden und auf einem passenden Werksgelände automatisch agieren können.

Eine wesentliche Erkenntnis aus vorangegangenen Projekten ist, dass das erforderliche Sicherheitsniveau für den automatisierten Hofbetrieb mit 20 km/h und mehr mit den derzeit verfügbaren Sensortechnologien nicht erreichbar ist. Sollen Fahrzeuge im Mischbetrieb auf einem Hof automatisiert betrieben werden erscheint es sinnvoll, die fahrzeugseitigen Sicherheitsfunktionen über Dekompositionsstrategien durch hofseitige Sensorik, Routenplanung und Prozesse zu ergänzen. Dies erfordert eine intensive Untersuchung und gegebenenfalls Neudefinition von Arbeitsabläufen und Hofgestaltung anhand der umzusetzenden Nutzungsszenarien.

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

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

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

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

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

Infrastruktursensorik wird in unterschiedlichen Anwendungsfällen eingesetzt. Zur Vermeidung von Verdeckungen kann Infrastruktursensorik deutlich höher angebracht werden als die Sensorik im Fahrzeug. Hierdurch und durch ihre Lage außerhalb der Fahrbahn kann sie verdeckte Objekte, insbesondere Fußgänger und Fahrradfahrer frühzeitig erkennen und diese Information mit anderen Verkehrsteilnehmern teilen. Vernetzte Infrastruktursensorik kann auch dazu genutzt werden, den Verkehrsfluss zu optimieren, z.B. durch Ampelschaltungen oder die Überwachung von Fußgängerzonen.

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

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

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

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

Weitere assoziierte Partner unterstützten die Untersuchungen und Umsetzungen mit ihrem spezifischen Know-How, wie die T-Systems International GmbH bei der Auslegung der

Kommunikationsstrukturen oder die SAF Holland SE mit der Bereitstellung einer automatischen Kupplung für den verwendeten Sattelauflieger.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Projektmanagement (AP 1)

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

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 anberaumt, in denen das engmaschige Monitoring des Fortschritts der Integrationsarbeiten und später des Feldtests sowie die Optimierung der Systemkomponenten im Vordergrund standen.

Kick-Off

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

In diesem Rahmen wurde der Zeitplan präsentiert, ebenso wie die Projektressourcenplanung. Abschließend wurden die Versuchsfahrzeuge (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 Sattelauflieger-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 Nahfelderkennung 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**uto**n**ome **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 1: SAFE20-Schlusspräsentation, Grußwort von 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 2: Fahrdemonstration während der SAFE20-Schlusspräsentation

Die Resonanz aller Teilnehmer auf die Schlusspräsentation war sehr positiv, da sowohl die Konzepte von SAFE20 als auch die praktische Ausführung als besonders und innovativ wahrgenommen wurden. Hier konnte auch der Praxisbezug des Projekts gezeigt werden, der einerseits durch die enge

Einbindung des Partners DACHSER in allen Projektstadien als auch durch den langen und intensiven Feldversuch gewährleistet war.

2.2 Anforderungsanalyse (funktionale Sicht) (AP 2)

TII KAMAG hat intensiv an diesem Arbeitspaket, insbesondere der Ausarbeitung der Use Case Beschreibung und der Systemarchitektur für die Wechselbrücke mitgewirkt, da es von hohem Interesse war, die bei TII KAMAG vorhandenen Erkenntnisse abzugleichen, zu validieren und zu ergänzen.

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

TII KAMAG hat die Ausarbeitung, Bewertung und Analyse des Anwendungsfalls „Hoflogistik“, also Zugmaschine und Wechselbrückenumsetzer unterstützt, da TII KAMAG als Fahrzeughersteller für die Hoflogistik ein entsprechendes Applikationswissen besitzt.

Unter Leitung des Fraunhofer IML wurden der Anwendungsfall der Hoflogistik aufgenommen und in Diagrammen visualisiert. Es wurden zunächst Diagramme erstellt, welche die derzeitigen Prozessabläufe für die Hoflogistik und den Nahverkehr darstellen. Während eines gemeinsamen Arbeitstreffens am für die finale Umsetzung der Projektergebnisse vorgesehenen Standort der Firma Dachser in Langenau konnten die Entwürfe verifiziert werden. Basierend darauf und auf einer Systemdekomposition wurden dann funktionale Ablaufdiagramme, zerlegt nach Komponenten, erstellt.

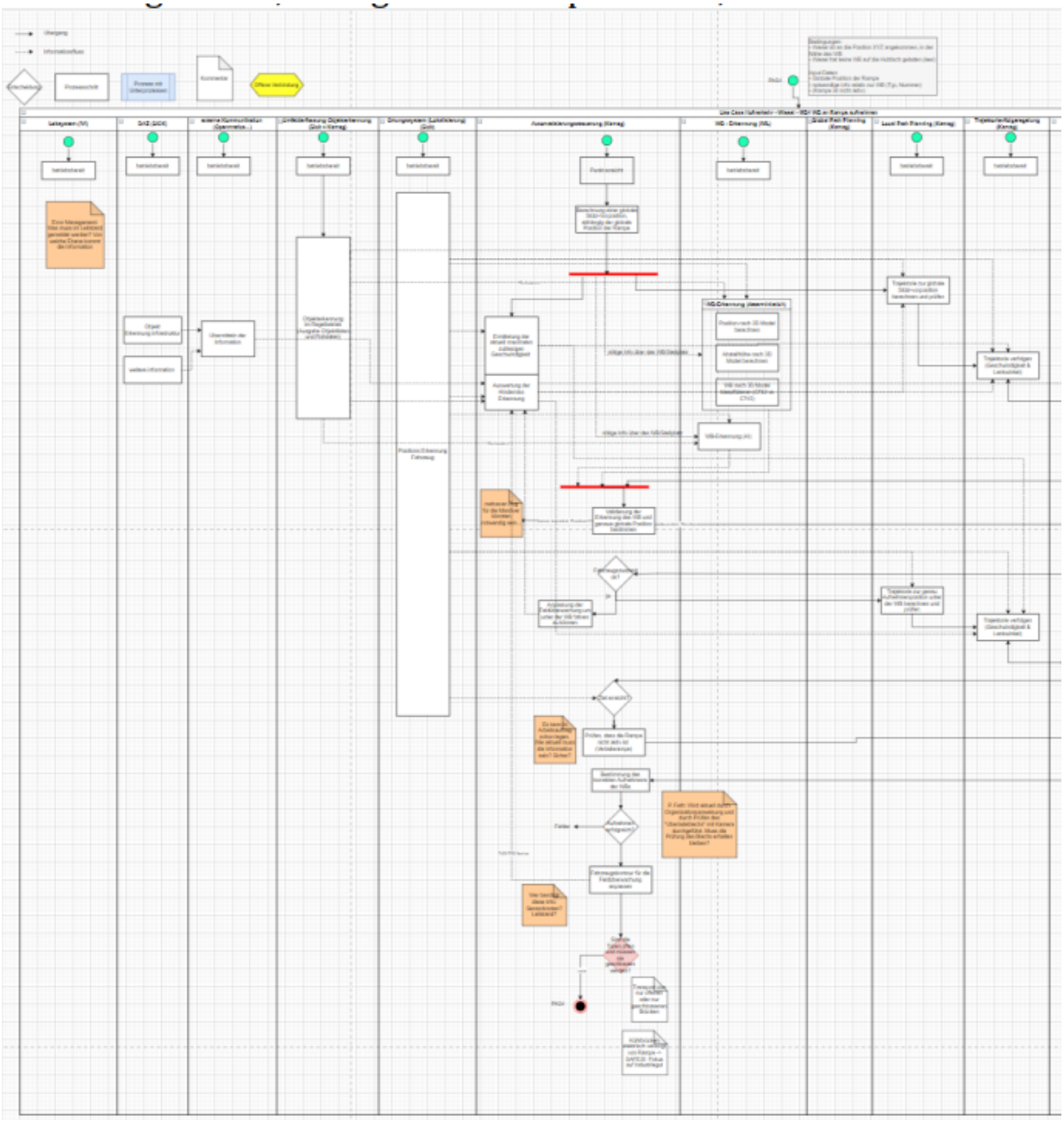


Abbildung 3 Ablaufdiagramm

Diese Erkenntnisse wurden in einem gemeinsamen Workshop am 20./21.07.2021 mit allen Partnern in Hannover abgestimmt. Hier hat TII KAMAG insbesondere bei der Erstellung der Diagramme mit Bezug zum Wechselbrückenumsetzer und der Zugmaschine mitgewirkt und Unterdiagramme erstellt.

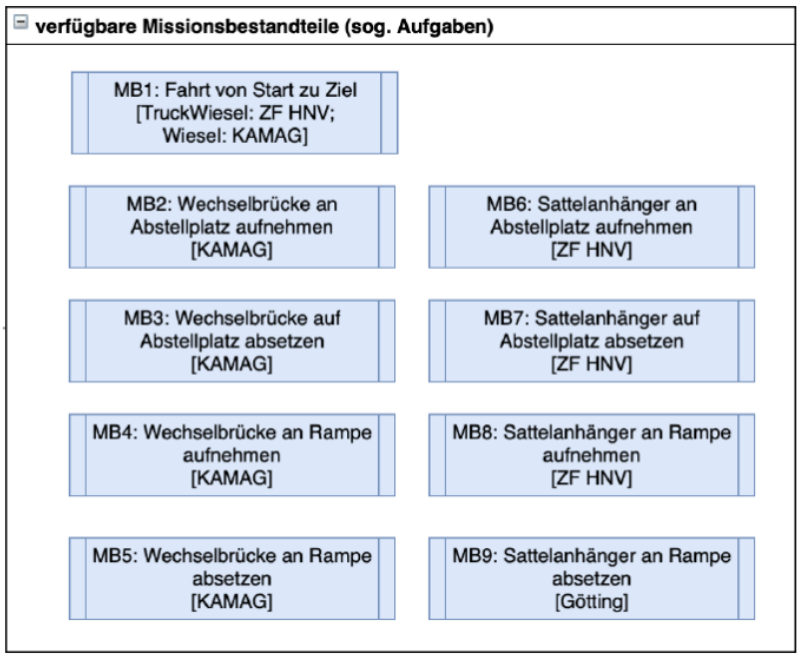


Abbildung 4 Darstellung der Missionsbestandteile

Es wurden desweiteren Nebenprozesse identifiziert, also Tätigkeiten die mit den Use Case Aktivitäten verbunden und notwendig sind und oft durch Rangierfahrer miterledigt werden. Bei der Vollautomatisierung des Anwendungsfall ist es notwendig, dass die Prozesskette des Anwendungsalls durchgehend automatisiert wird und nicht durch händische Schritte unterbrochen wird. Bspw. ist es ausreichend das die Wechselbrückentore händisch geschlossen werden. Vorteilhaft ist jedoch, wenn dies geschieht, bevor der automatisierte Umsetzprozess stattfindet, also z.B. von einem Mitarbeiter in der Halle am Gate und nicht wie es oft bisher geschieht, dass der Rangierfahrer die Brücke vom Gate abzieht, dann anhält, aussteigt und das Wechselbrückentor schließt und weiterfährt.

Die Ausgestaltung des automatisierten Soll-Prozesses inkl. Nebenprozesse wurde in verschiedenen Varianten aufgestellt und bewertet hinsichtlich ökonomischer, betrieblicher und technischer Machbarkeit.

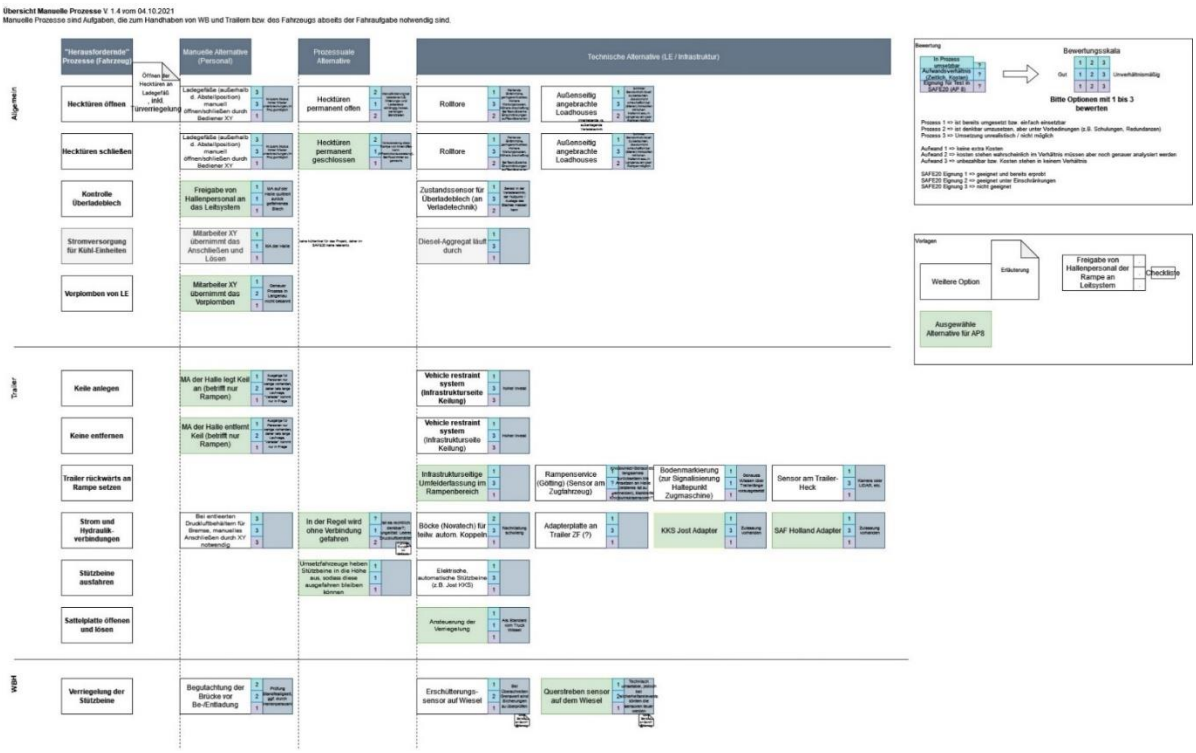


Abbildung 5 Prozessketten in der Hoflogistik

2.2.8 Entwurf vorläufige Systemarchitektur (AP 2.4)

Basierend auf den vorhergehenden Arbeitspaketen wurde die vorläufige Systemarchitektur ausgearbeitet. TII KAMAG hat die funktionale Systemarchitektur und Dekomposition in Subsysteme / Komponenten für den Anwendungsfall Wechselbrücke geleitet und mit Partnern abgestimmt.

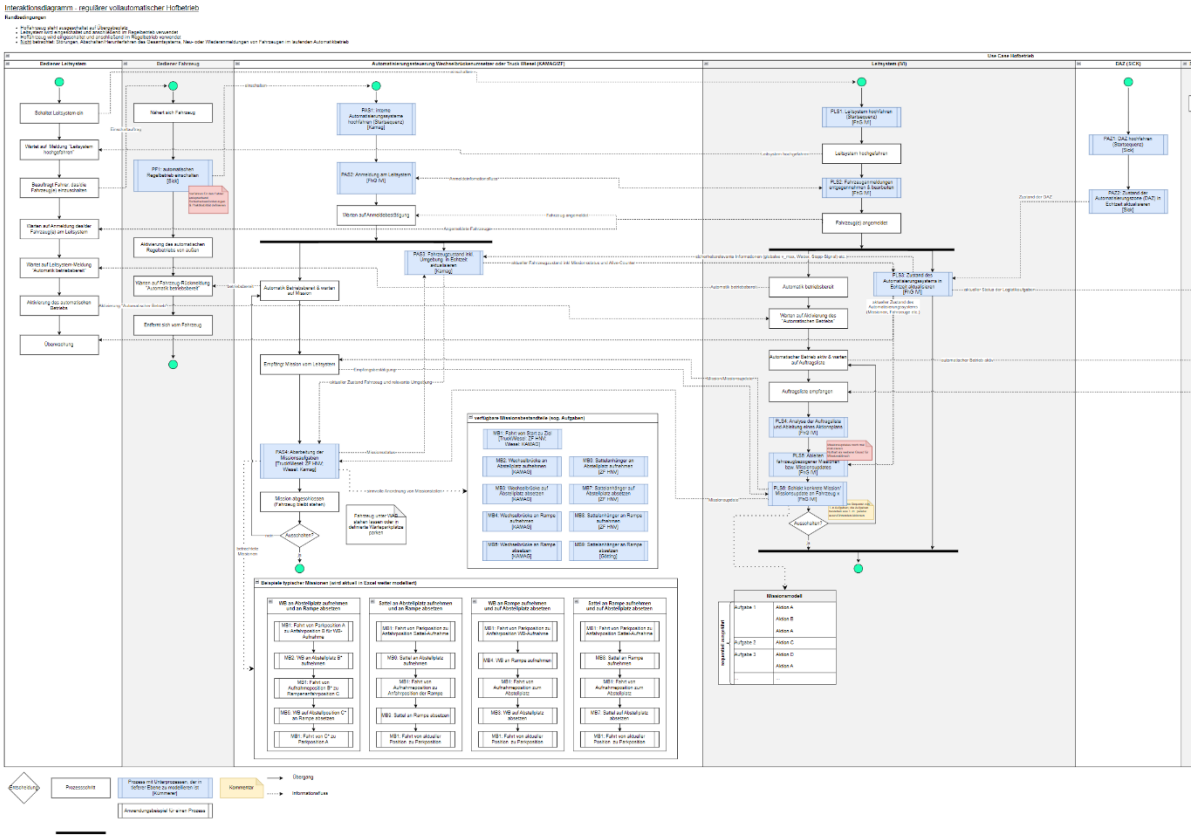


Abbildung 6 Darstellung eines L1 Diagrammes

In der Architektur wird ersichtlich, welche Funktionen notwendig sind und wie diese durch Komponenten der Partner realisiert werden. Auch wurden die Schnittstellen bzw. allgemein Interaktionen zwischen den Komponenten definiert. Für die Funktionen wurden Ablaufdiagramme erarbeitet. Die Erstellung der Diagramme war sehr zeitintensiv und der Abgleich der Diagramme mit den Partnern erfolgte durch viele Online-Meetings.

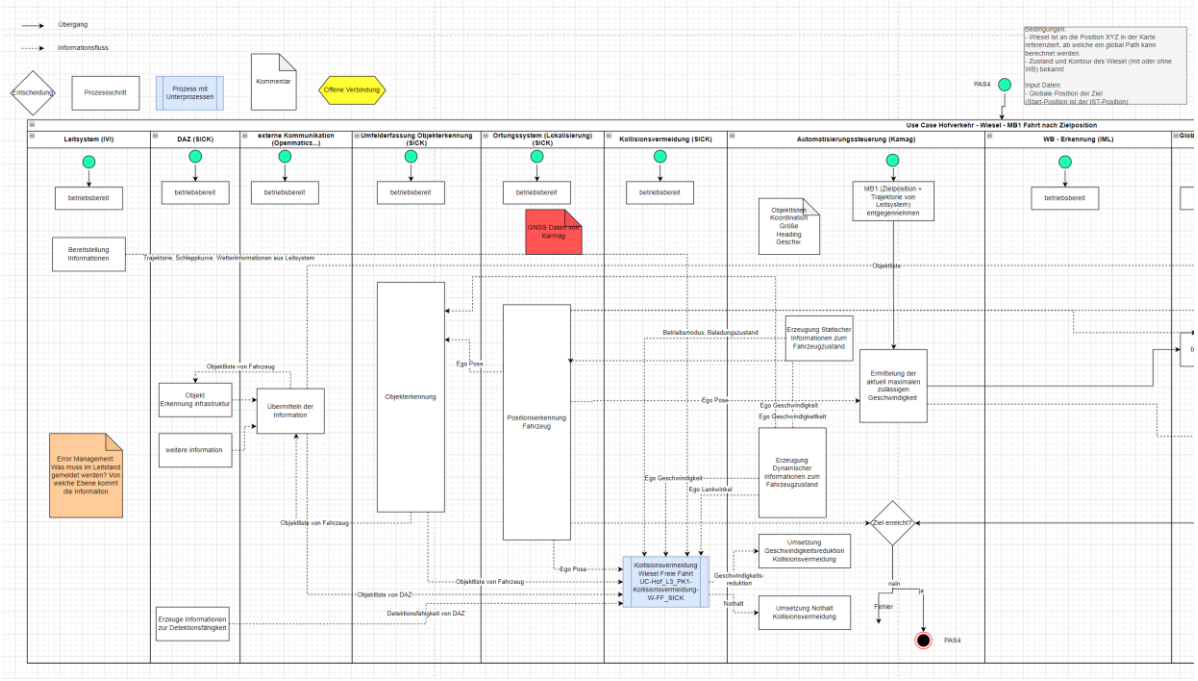


Abbildung 7 Darstellung eines L2 Diagrammes

Die Ausarbeitung und Abstimmung einer Systemarchitektur ist essenziell für ein komplexes technisches System, um deren Anforderungen herunterzubrechen als Entwicklungseingabe der Komponenten. Auch können nur so die Verantwortlichkeiten bei der Vielzahl von Partnern abgestimmt werden. Die Ausarbeitung der Systemarchitektur ist und war auch im SAFE20 erfahrungsgemäß und naturgemäß sehr aufwendig.

Es war festzustellen, dass die Reife / Qualifikation und das Verständnis, was zu tun ist, bei den Partnern sehr unterschiedlich war. Das war hinderlich. Hinzukam, dass das Tool DrawIO zwar prinzipiell dafür genutzt werden kann, aber insbesondere, wenn viele Partner mit unterschiedlichem Kenntnisstand mitarbeiten sollen, dieses Tool sehr viele Freiheitsgrade lässt. Es erscheint daher notwendig, bei einem Folgeprojekt ein professionelles, spezifisch für die Ausarbeitung der Architektur geeignetes Tool zu verwenden, bspw. Enterprise Architect und ggfs. die Ausarbeitung nur durch einen Partner zu veranlassen.

2.3 Sicherheitskonzept (AP 3)

Das von Sick geführte Arbeitspaket war für TII KAMAG von hohem Interesse, da die Realisierung von Sicherheitsfunktionen bei gleichzeitiger hoher Verfügbarkeit des Systems ein Schlüsselpunkt für Automatisierung im Außenbereich ist. TII KAMAG hat entsprechend intensiv mitgewirkt.

2.3.7 Risikobeurteilung (AP 3.1)

TII KAMAG hat bei der Ausarbeitung der Risikobeurteilung für die beiden Hoffahrzeuge wesentlich mitgewirkt, insbesondere da bereits Dokumente im Entwurf dazu bei TII KAMAG vorlagen.

Interessant war daher der Abgleich mit dem Vorgehen von SICK. Während TII KAMAG bisher nach einen vereinfachten Ansatz gemäß 13849 verfahren ist, hat SICK einen angepassten Ansatz nach HRN genutzt. Hierdurch ist eine granulare und feinere Bewertung der Risiken möglich, was in der Bewertung teilweise mit in niedrigeren PLr mündet und daher technologisch einfacher umsetzbar ist. Das Tool wurde in einem Workshop am 11.05.2021 vorgestellt.

Grundlage für die Ausarbeitung der Risikobeurteilung war die im AP2 ausgearbeiteten Use Case Beschreibungen und eine Hofbesichtigung am 27.04.2021 am Standort Langenau. Das von SICK erstellte und gepflegte Dokument zur Risikobeurteilung wurde durch TII KAMAG im Projektverlauf mehrfach gesichtet und geprüft, auch wurde die technische Machbarkeit der Vorschläge zur Risikominderung durch TII KAMAG bewertet.

Festzuhalten bleibt auch, dass das von SICK entwickelte und eingesetzte Tool zur Ermittlung der HRN für die Risikobeurteilung gut geeignet war, jedoch war es sehr aufwändig die Risikobeurteilung basierend auf den ausgegebenen PDF's zu prüfen, da Änderungen nicht im Detail hervorgehoben wurden und das Dokument über 600 Seiten fasst. Dies hätte vereinfacht werden können in dem das Tool auch den am Review beteiligten Partnern zur Verfügung gestellt wurden wäre.

Im November 2021 wurde durch Kamag ein Hoffahrzeug in Langenau von Dachser mit einer Telematik ausgerüstet, um die gefahrenen Strecken und deren Häufigkeit zu analysieren. Die Daten wurden in Q1/22 aufbereitet, ausgewertet und an SICK übermittelt, um in die Risikobeurteilung einzufließen.

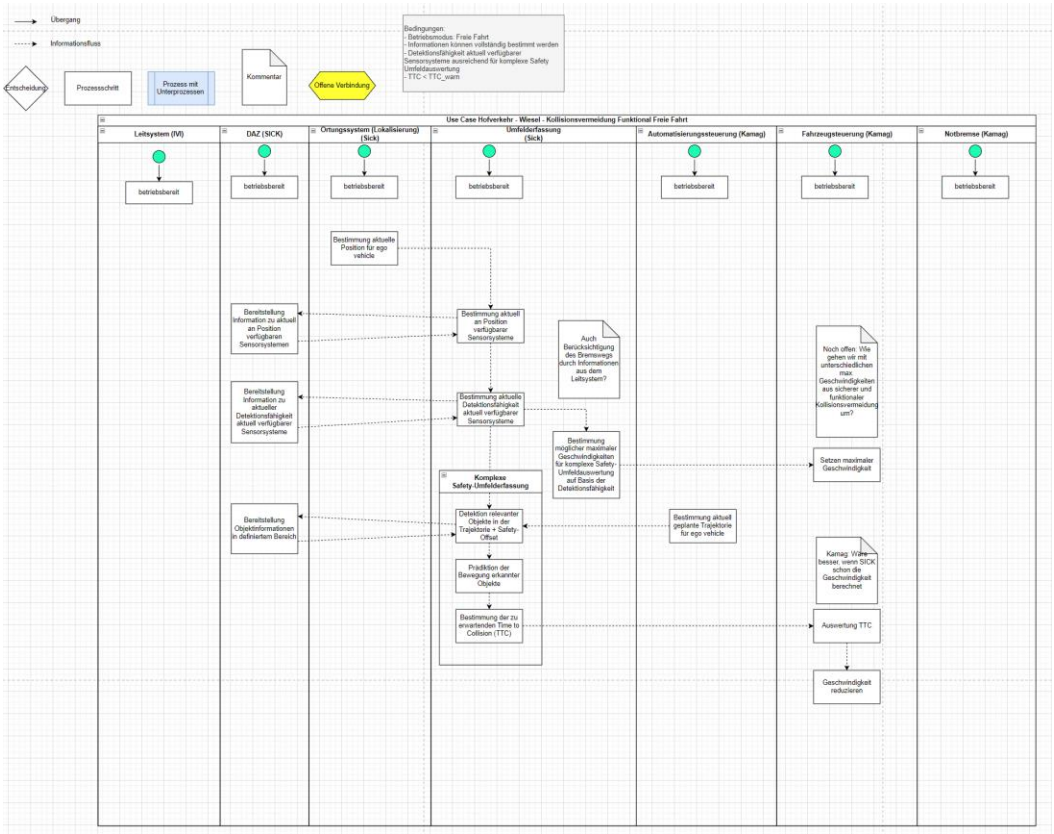


Abbildung 8 Darstellung eines L3 Diagrammes

Kamag hat eine Lückenanalyse durchgeführt, d.h. analysiert wo offene Fragenstellungen zur Risikobeurteilung vorliegen, die im Konsortium intern nicht bewertet werden konnten. Das sind Fragen zur Akzeptanz von Restrisiken und Definition geeigneter Mitigationen. Mit der Berufsgenossenschaft / DGUV, Herr Haase und Herr Borowski, fand bereits am 19.01.2021 statt basierend auf den durch TII KAMAG internen Ausarbeitung und wurde am 13.10.2021 basierend auf der ersten Ausarbeitung von SICK fortgeführt.

Des Weiteren hat TII KAMAG bei einem Workshop der BGHM, organisiert durch Hr Träger, zum Entwurf des Fachblattes „Automatisiertes Fahren in betrieblichen Bereichen“ (mittlerweile veröffentlicht als FBHM-119 [2]) teilgenommen.

Einen weiteren Austausch zur Risikobeurteilung mit der BG Verkehr, Hr Haase, fand am 07.10.2022 im Projektkonsortium SAFE20 statt.

2.3.8 Sicherheitsfunktionen (AP 3.2)

Einige in der Risikobeurteilung definierte risikomindernde Maßnahmen sind Sicherheitsfunktionen. Hier hat TII KAMAG bei der Definition geeigneter Sicherheitsfunktionen mitgewirkt, mit Schwerpunkt auf den Ladungsträgerwechsel sowie mögliche Architekturen erarbeitet, wobei hier auf bestehende Erkenntnisse aus Vorprojekten und die Expertise von SICK zurückgegriffen werden konnte. TII KAMAG hat geprüft, ob die sich aus den entworfenen Sicherheitsfunktionen ableitenden Anforderungen an

die Aktorik und Sensorik in den Hoffahrzeugen erfüllbar sind. Das heißt insbesondere, ob die Anforderungen gegebenenfalls bereits abgedeckt sind, und falls nicht, ob geeignete, mit ausreichenden Sicherheitswerten versehene, Komponenten beschaffbar und in die Fahrzeuge integrierbar (elektrisch, elektronisch, mechanisch) sind. Im Folgenden wurden also Sensoren und Aktoren recherchiert, mit den Partnern auf Eignung hin diskutiert und Integrationsstudien durchgeführt.

Eine Herausforderung bestand bei der Bremsanlage in der Diskussion zu den anwendbaren Richtlinien (Maschinenrichtlinie vs. ISO 26262). Die ZF entwickelt deren elektronisches Bremssystem nach ISO 26262. Die Werte für die funktionale Sicherheit lassen sich aber nicht auf die für die nach Maschinenrichtlinie (ASIL gemäß ISO 26262 und PLr gemäß EN 13849) geforderte Berechnung nutzen. Hier stand TII KAMAG im telefonischen Austausch mit der Berufsgenossenschaft (Hr Hermann Haase) und dem IFA (Hr Torsten Borowski) am 17.02.2022.

Die Forderungen von IFA zur Arbeitssicherheit auf Betriebsgeländen sowie den Anforderungen des KBA/TÜV für Straßenzulassungen sind nicht unmittelbar vereinbar. Während mit Sicht auf das Hoffahrzeug als Maschine statt Fahrzeug als sicherer Zustand im Fehlerfall eine Notbremsung, welche ausfallsicher ausgeführt werden muss, angesehen wird, ist das für Fahrzeuge auf der öffentlichen Straße nicht wünschenswert. Durch eine (ungewollte, fehlausgelöste) Notbremsung können andere Verkehrsteilnehmer gefährdet werden, aber auch die Fahrstabilität des Fahrzeuges kann gefährdet werden, insbesondere bei Fahrten mit Anhängern.

Prinzipieller Ansatz für die ausfallsichere Notbremse ist die Verwendung und Erweiterung einer bestehenden Feststellbremse. Auch hier hatten TII KAMAG und ZF unterschiedliche Ansätze, welche in Workshop diskutiert und bewertet wurden.

Tabelle 1 Gegenüberstellung Ansätze für ausfallsichere Bremse

Vergleich Lösung TII KAMAG zu ZF

	Vorteil	Nachteil
Lösung ZF (Handbremshebel in Stellung Bremse einlegen für auto. Betrieb)	Fahrzeug ist zu Beginn und am Ende des Automatikbetriebs gebremst.	Die Bremshebelstellung muss sicher überwacht werden. Ein auto. Betrieb in Hebelstellung Bremse gelöst darf nicht möglich sein
	Bei Defekt bzgl. der E-Ventile für die Notbremsfunktion kann Assistenzfahrer eingreifen und Bremse lösen.	Es wird ein Wechselventil benötigt, welches nicht redundant verwendet werden kann und deshalb als fehlersicher eingestuft werden muss
		Defekt im Bremshebelventil setzt Notbremse außer Funktion.
	Im manuellen Betrieb ist eine ungewollte Vollbremsung nicht möglich.	Es kommt in die Sicherheitskette ein Bauteil für die Bermshebelüberwachung hinzu. (Verschlechterung des PFHd-Wertes)
Lösung TII KAMAG (Einlegen der Feststellbremse hat Vorrang)	Der Bremshebel muss nicht überwacht werden. Im Fehlerfall kann das Fahrzeug nicht fahren	Bei Defekt bzgl. der E-Ventile für die Notbremsfunktion kann die Bremse plötzlich und unerwartet auch im manuellen Betrieb einfallen. Problematisch bei Sattelbetrieb (Klappmessereffekt)
	Die Sicherheitsbauteilkette bleibt kurz, da kein zus. Überwachung nötig.	Das sichere Einlegen der Feststellbremse beim Start und Beenden des auto. Betriebs muss über die Steuerung gewährleistet werden.
	Ein Wechselventil mit Fehlerausschluss wird nicht benötigt.	

Seitens TII KAMAG wurden weitere Ansätze zur Lösung erarbeitet basierend auf unseren internen Ansatz, da der Fehlerfall kompatibel mit der Maschinenrichtlinie ist. Dies sieht eine Verbau von Bremsen mit Federnspeichern an allen Rädern sowie der Austausch des Überdruckschutzrelais (Abstimmung mit BG Verkehr am 02.02.2023) gegen ein Ventil, welches Fehlerfälle und eine Sicherheitsbewertung nach Maschinenrichtlinie erfüllt. Hierzu gab es mit der BG / DGUV einen Haustermin bei TII KAMAG mit einem weiteren Workshop, wo verschiedene Detailkonzepte (Architektur und Überwachung der ausfallsicheren Notbremse) diskutiert und bewertet wurden. Es entstand ein vielversprechender Ansatz, welcher im Nachgang durch weitere Modifikation auch rechnerisch erfolgreich nachgewiesen werden konnte.

Das ausgearbeitete Konzept für die ausfallsichere Notbremse wurde im Fahrzeug KAMAG PM integriert und im September bei der TII KAMAG getestet. Basierend auf den Tests fanden weitere Modifikationen des Designs und Tests statt. Die Tests zur Ermittlung des Bremsweges fanden bei der TII KAMAG statt. Die Tests wurden auf trockenem Asphalt mit und ohne Beladung durchgeführt. Ein Referenzobjekt wurde neben der Fahrbahn aufgebaut. Ein angebrachter Sicherheitslaserscanner löste durch Erkennung des Referenzobjekts die Bremsung aus.

Abbildung 9 Testaufbau für Messung Bremswege

Über eine im Fahrzeug verbaute hochgenaue Lokalisierung wurde die zurückgelegte Fahrstrecke überwacht. Es wurden Fahrzeuggeschwindigkeit, Auslösezeitpunkt, Totzeiten und Drücke in den Bremskreisen aufgezeichnet.

Der vollständige Anhalteweg beträgt für 20km/h mit Beladung etwa 7m und ohne Beladung etwa 6m. Für die Auslegung des Schutzfeldes sind hier noch verringerter Reibwert auf anderen Fahrbahnverhältnissen, Alterung und Sicherheit zu zuschlagen.

Tabelle 2 Ermittelte Bremswege

Test-Nummer	Test Zeit	Beladen	Feedback zur Geschwindigkeit	Zurückgelegte Entfernung bei Erkennung eines Objekts (m) stopping distance [m]
1	10:53:00	No	4,44	4,537
2	11:05:00	No	4,44	4,508
3	11:10:00	No	4,44	4,118
4	11:14:00	No	4,44	4,175
5	11:20:00	No	4,44	4,877
6	11:26:00	No	4,44	4,481
7	11:32:00	No	4,44	4,417
8	11:34:00	No	4,44	4,507
16	13:58:00	Yes	4,44	4,564
17	14:05:00	Yes	4,44	4,493
18	14:08:00	Yes	4,44	4,685
19	14:13:00	Yes	4,44	4,357
20	14:17:00	Yes	4,44	4,573
9	11:46:00	No	5,533	6,031
10	11:59:00	No	5,833	5,885
11	12:41:00	No	5,833	6,123
12	12:44:00	No	5,833	5,602
13	12:49:00	No	5,833	5,918
14	12:53:00	No	5,833	6,133
15	12:56:00	No	5,833	5,955
21	14:20:00	Yes	5,833	6,717
22	14:25:00	Yes	5,833	6,921
23	14:31:00	Yes	5,833	6,501
24	14:37:00	Yes	5,833	6,829
25	14:44:00	Yes	5,833	6,648
26	14:50:00	Yes	5,833	6,427
34	15:52:00	No	4,44	4,256
35	15:57:00	No	4,44	3,945
27	15:10:00	Yes	4,44	4,401
28	15:27:00	Yes	4,44	4,187
29	15:32:00	Yes	4,44	4,224
36	16:01:00	No	5,833	5,468
37	16:05:00	No	5,833	5,498
30	15:20:00	Yes	5,833	6,409
31	15:35:00	Yes	5,833	6,196
32	15:40:00	Yes	5,833	6,136
33	15:44:00	Yes	5,833	6,151
38	19:14:43	No	4,44	4,421
39	19:14:47	No	4,44	4,541
40	19:14:52	No	4,44	4,299

Die in den Tests ermittelten gewährbaren Bremswege stimmen positiv hinsichtlich einer erwartbaren Reichweite der sicheren Personenerkennung.

Eine Patentanmeldung “ARBEITSMASCHINE, DIAGNOSEVERFAHREN UND VERWENDUNG DER ARBEITSMASCHINE” wurde eingereicht und bereits unter EP 4 303 085 A1 [3] veröffentlicht. Eine weitere Patentanmeldung „Transportfahrzeug und Verfahren zum Durchführen eines Bremsmanövers“ wurde beim DPMA eingereicht, aber noch nicht veröffentlicht.

2.3.9 Entwurf Sicherheitskonzept auf funktionaler Ebene inkl. Abstimmung mit Beteiligten (AP 3.3)

In AP 3.3 wurde die Sicherheitsfunktionen aus AP 3.2 in Teilfunktionen dekomponiert und verfeinert, basierend auf den ausgearbeiteten L1 bis L3 Diagrammen.

Kollisionsvermeidung

Ein Fokus lang in der Ausarbeitung eines Konzepts zur Kollisionsvermeidung. Dazu wurden Anhaltewege theoretisch und praktisch ermittelt bzw. gemessen und Rahmenbedingungen / Grenzen definiert unter denen definierte Anhaltewege eingehalten werden können. Das schließt insbesondere die Kondition der Fahrbahnoberfläche ein und damit einhergehend verminderte Reibwerte. Hieraus leitet sich die Anforderung an die Detektionsreichweite der Personenerkennung ab.

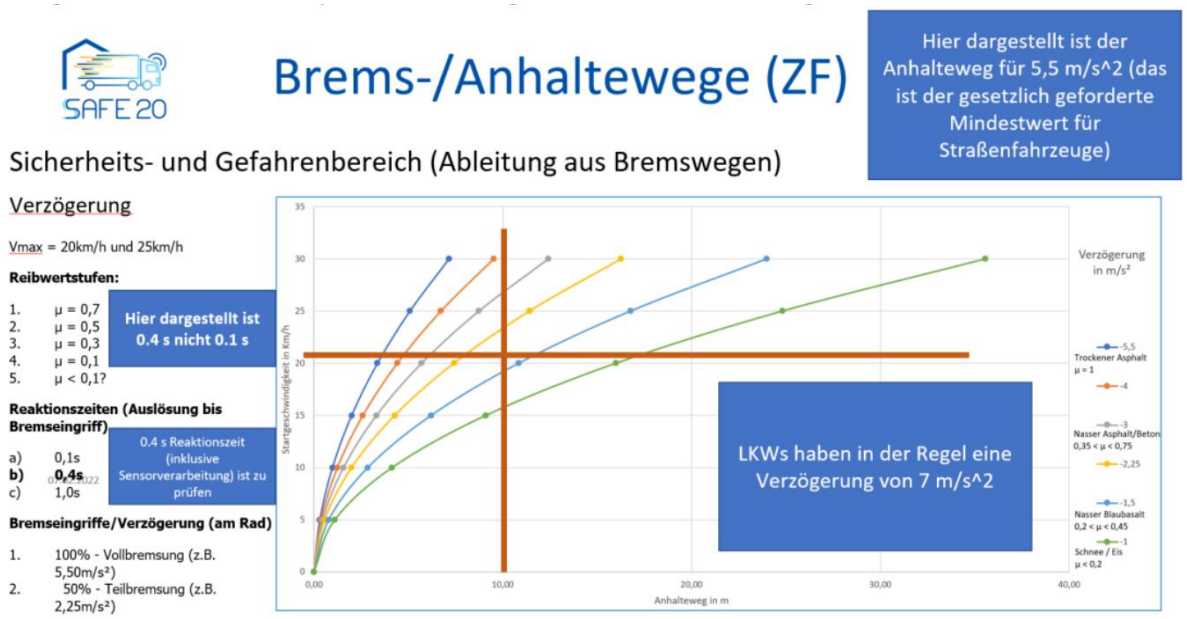


Abbildung 10 Brems-/Anhaltewege nach ZF Berechnung

ANHALTEWEGE
(FÜR WIESEL)

Werte für Berechnung
Global delay = 0,5s
Delay sensor detection = 0,155s
Deceleration = 0,45g

Funktion:

- Fahrzeug verzögert mit Soll-Verzögerung von 4,5g, der Wert wird nach Anschwellzeit der Bremsen erreicht
- Eine SF überwacht die IST-Verzögerung, bei Abweichung wird ein Sicherheitsstop aktiviert (alle Ventile im Bremskreislauf werden geöffnet)

		empty		full	
		distance [m]		distance [m]	
[m/s]	[km/h]	calculated	measured	calculated	measured
0,2	0,72	0,10		0,11	
0,5	1,80	0,28	0,14	0,28	0,16
1,1	3,96	0,68	0,37	0,70	0,50
1,6	5,76	1,08	0,64	1,11	0,82
2,2	7,92	1,64	1,04	1,69	1,17
2,7	9,72	2,16	1,37	2,24	1,70
3,3	11,88	2,86	2,00	2,98	2,26
4,4	15,84	4,35	3,21	4,46	3,51
5				5,55	4,21
5,5	19,80	6,11	4,47		

gemessen auf trockenem Beton

Abbildung 11 Messungen durch TII KAMAG für KAMAG PM (Wiesel)

Hinderniserkennung beim Unterfahren der Wechselbrücke

Kamag und STW haben an der Sicherheitsfunktion „Hinderniserkennung beim Unterfahren der Wechselbrücke“ gearbeitet. Bei dieser Sicherheitsfunktion muss sichergestellt werden, dass auch beim Unterfahren der Wechselbrücke die Sicherheit für Personen unter der Wechselbrücke gegeben ist. Da hierzu das Schutzfeld umgeschaltet werden muss (verkleinert, um zwischen den Stützen der Brücke einzufahren), wird ein sicherheitsgerichtetes Signal benötigt, um diese Umschaltung auszulösen. Des Weiteren kam die Fragestellung auf, welche Teile der Funktion seitens Software sicherheitsgerichtet umgesetzt werden müssen. Dies ist als Eingabe für die Verwendungsprüfung / Auslegung der STW HPX hilfreich zu klären. In Gesprächen mit der BG und Partner Sick konnte dies konzeptionell geprüft werden.

Die Sicherheitsfunktion ”Hinderniserkennung beim Unterfahren der Wechselbrücke” wurde nicht umgesetzt, es wurde bei der konzeptionellen Betrachtung belassen.

2.3.10 Ableitung technischer Anforderungen an Subsysteme (AP 3.6)

Basierend auf den Architekturen aus AP2 wurden die Anforderungen aus AP3.2 und AP3.3 auf die Subsysteme / Komponenten abgeleitet. TII KAMAG hat hier insbesondere für den KAMAG PM mitgewirkt und Konsistenz sichergestellt.

2.3.11 Nachweis anwendbaren Richtlinien (AP 3.7)

TII KAMAG hat an den von Partner SICK organisierten Meetings zur Diskussion und Bewertung der verschiedenen anwendbaren Richtlinien teilgenommen. Die diskutierten Richtlinien umfassen die ISO 12100 als Ausgangsnorm nach Maschinenrichtlinie, die EN 13849 als spezifische Norm für sicherheitskritische Systeme, die ISO 26262 als Alternative aus dem Automobilbereich, sowie die neue Maschinenverordnung.

TII KAMAG konnte insbesondere durch vorhandene Erfahrung im Bereich der Maschinenrichtlinie und der Zulassung von Fahrzeugen unterstützen.

2.4 Sichere Fahrzeugtechnologien (AP 4)

Ein Schwerpunkt von TII KAMAG in SAFE20 liegt in der Verantwortung für den Aufbau der beiden Fahrzeuge KAMAG PM (Wechselbrückenumsetzer) und KAMAG PT (Zugmaschine) und der Integration der von den Partnern entwickelten Komponenten bzw. Subsysteme, wobei die Koordination dazu bei ZF für die Zugmaschine und bei TII KAMAG für den Wechselbrückenumsetzer liegt. Die Tätigkeiten basieren auf den Ergebnissen aus AP2 und AP3.

Aufbau KAMAG PM Wechselbrückenumsetzer

Für den Wechselbrückenumsetzer koordinierte TII KAMAG die Entwicklung und Integration der Komponenten bzw. Subsysteme der Partner. Die Abstimmung erfolgte in Regelterminen mit den Partnern. Der von TII KAMAG in das Projekt eingebrachte KAMAG PM wurde bereits aufgebaut und musste nur noch um ein sogenanntes AD-KIT der Firma EasyMile erweitert werden.

Mit den Partnern wurden Schnittstellen und Systemarchitektur gemäß der vorhergehenden AP’s abgestimmt.

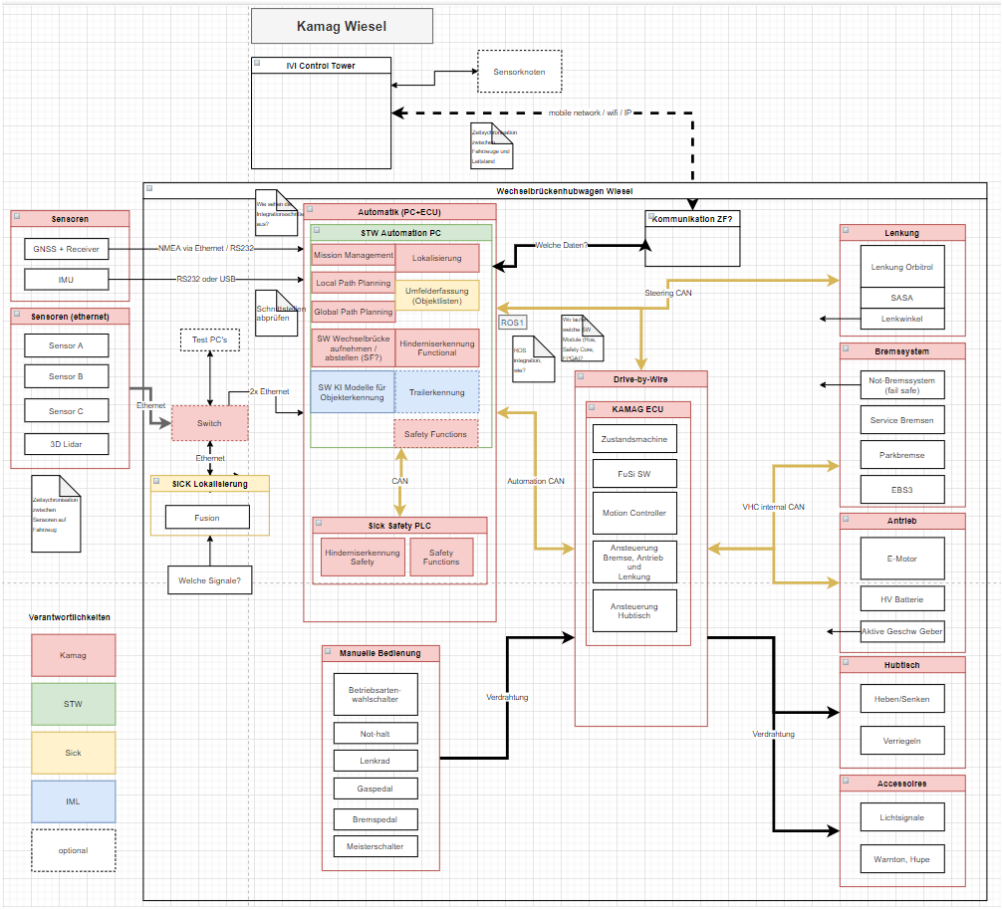


Abbildung 12 Systemarchitektur KAMAG PM

Der KAMAG PM wurde für die AP's 4.8 (11/2022 bis 03/2023) und bei den AP's 7 und 8 (09/2023 bis 03/2024) verwendet.

Aufbau KAMAG PT Zugmaschine

TII KAMAG hat einen KAMAG PT für SAFE20 produziert und zur ausschließlichen Nutzung an das Projektteam im März 2022 übergeben. ZF hatte die Gesamtverantwortung bei der Aufbauplanung des Fahrzeuges für SAFE20, wobei TII KAMAG als Hersteller natürlich mit unterstützen musste. Im Konsortium wurde eine Architektur basierend auf den Ergebnissen aus AP2 und AP3 ausgearbeitet und abgestimmt.

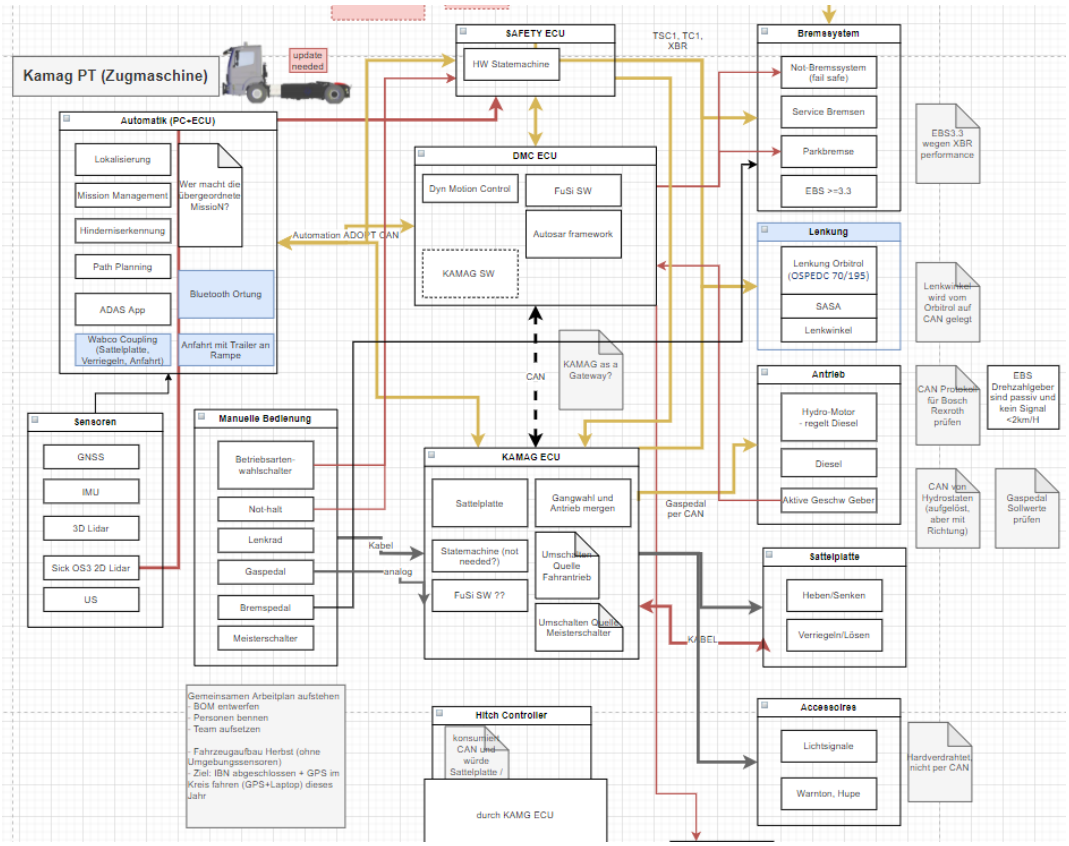


Abbildung 13 Systemarchitektur KAMAG PT

Das Verbauen der Komponenten am Fahrzeug wurden größtenteils durch TII KAMAG und zum Teil durch ZF auf deren Testgelände in Jeversen ausgeführt. Eine enge Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern und insbesondere der ZF Group war notwendig für eine erfolgreiche Integration der komplexen Subsysteme von ZF.

Ein wichtiger Schwerpunkt für TII KAMAG lag auf der Implementierung einer sicheren Schnittstelle für das autonome Fahren der Zugmaschine (AP4.11). Hierzu wurde ein weiteres Steuergerät mit Software, LED-Leuchten für Betriebsartenanzeige, Not-halt, ein elektronisches Orbitrol mit Lenkwinkelsensor, ausfallsichere Notbremse, eine Sattelplatte mit automatisiertem Stecker und weitere kleinere elektronische Komponenten durch den Prototypenbau der TII KAMAG verbaut.

Anschließend wurde das Subsystem der ZF (ADOPT) ebenfalls durch TII KAMAG verbaut. Ein gemeinsamer Integrationstest von ZF und TII KAMAG fand in Ulm bei TII KAMAG im Mai 2022 statt, wo die grundlegende Ansteuerbarkeit durch ZF und Funktion der Sattelplattensteuerung nachgewiesen wurde (AP 4.7). Nach weiteren Tests in Ulm wurde das Fahrzeug zum September 2022 an ZF für Tests auf deren Teststrecke übergeben. Es fanden Integrationstests durch ZF und Götting für die AP's 4.5 und 4.10 statt.

Das Fahrzeug kam im Januar 2023 zurück zur TII KAMAG nach Ulm. Es wurden die Komponenten von SICK integriert und die automatisierte Ansteuerung der Sattelplatte durch TII KAMAG korrigiert.

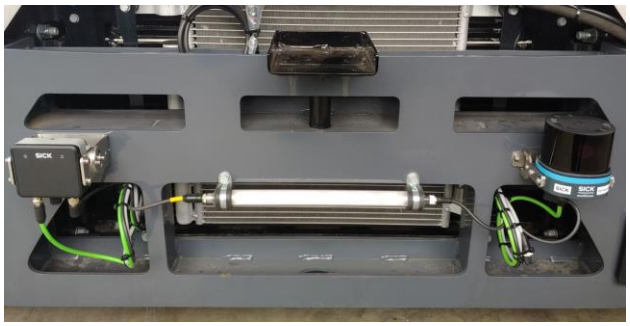


Abbildung 14 Anbau von Sensorik an Rammschutzplatte des KAMAG PT

Im März 2023 wurde das Fahrzeug zurück an ZF in Jeversen übergeben für weitere Integrations- und Systemtests, bspw. Integration der EPH (AP4.2) und Integration der Nahfeldsensorik (AP4.6).

Im November 2023 wurde das Fahrzeug von Jeversen zurück nach Ulm geholt. Es fand durch TII KAMAG eine Wartung statt. Anschließend wurde das Fahrzeug zum Dachser Standort Langenau gebracht, wo es bis zum Projektende verblieb.

2.4.7 Sichere Notbremse (AP 4.2)

ZF entwickelte im AP 4.2 eine sichere Notbremse (EPH – elektropneumatische Handbremse) und TII KAMAG unterstützte mit Feedback zu Integrationsstudien am KAMAG PT.

Hier liegt der Schwerpunkt in der Einbauprüfung und bei der Definition der vorbereitenden Maßnahmen an der Zugmaschine, um ZF einen einfachen Einbau und Inbetriebnahme der sicheren Notbremse zu ermöglichen, da der Einbau der sicheren Notbremse durch ZF selbst in Jeversen erfolgte.

2.4.8 Funktional sichere, hoch performante Rechnerhardware (AP 4.4)

STW entwickelte in AP4.4 ein hoch performantes Steuergerät. TII KAMAG und STW hatten mehrere Workshops zu Anforderungen durch die Automatisierung und durch den Anwendungsfall an das Steuergerät.

Der von STW zur Verfügung gestellte Prototyp wurde auf dem Schreibtisch evaluiert. Sicherheitstechnik wurde bisher seitens STW nicht berücksichtigt. Evaluiert wurde daher nur die Performance mit einem Lidar.

Ein Beispiel-Anwendungsfall, welcher durch die Steuerung umgesetzt werden kann, ist, das Umschalten von Schutzfeldern. Dazu haben TII KAMAG und STW Konzeptionsarbeit an der Sicherheitsfunktion „Hinderniserkennung beim Unterfahren der Wechselbrücke“ geleistet. Bei dieser Sicherheitsfunktion muss sichergestellt werden, dass auch beim Unterfahren der Wechselbrücke die Sicherheit für Personen unter der Wechselbrücke gegeben ist. Da hierzu das Schutzfeld umgeschaltet

werden muss (verkleinert, um zwischen den Stützen der Brücke einzufahren), wird ein sicherheitsgerichtetes Signal benötigt, um diese Umschaltung auszulösen. Des Weiteren kam die Fragestellung auf, welche Teile der Funktion seitens Software sicherheitsgerichtet umgesetzt werden müssen. Dies ist als Eingabe für die Verwendungsprüfung / Auslegung der STW HPX hilfreich zu klären. In Gesprächen mit der BG und Partner Sick konnte dies konzeptionell geprüft werden.

Die Sicherheitsfunktion ”Hinderniserkennung beim Unterfahren der Wechselbrücke” wurde nicht umgesetzt, es blieb bei der konzeptionellen Betrachtung.

2.4.9 Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (Aufnehmen, Absetzen etc.) AP4.7

Die Integration der automatischen Sattelkupplung von SAF Holland (mechanisch, pneumatisch und elektrisch) erfolgte durch TII KAMAG. Eine Herausforderung bestand hinsichtlich Bauraums und physischen Schnittstellen. Das führte zu der Einschränkung, dass das automatisierte Trailerhandling auf normale Sattelauflieger beschränkt würde und sogenannte Megatrailer mit sehr niedriger Aufsattelhöhe unberücksichtigt bleiben müssen. Anforderungen aus AP3.2 hinsichtlich funktionaler Sicherheit werden berücksichtigt und sind zum Teil bereits durch die automatischen Sattelkupplung von SAF Holland erfüllt. Anforderungen mit Götting bezüglich Knickwinkel-Sensor wurde geklärt, ZF hat einen passenden Knickwinkel-Sensor vorgeschlagen. Es gab einen Workshop mit ZF an der Teststrecke, um von deren Erfahrungen aus vorangehenden Versuchen zur automatischen Kupplung bestmöglich zu profitieren.

TII KAMAG hat Sattelplatte und Stecker von SAF Holland sowie Knickwinkel-Sensor und dazugehörigen entworfenen Halter verbaut und angeschlossen im KAMAG PT. Softwareseitig wurde durch TII KAMAG eine Ansteuerung durch ZF implementiert.

Abbildung 15 Sattelplatte mit nachgerüstetem Knickwinkelsensor

2.4.10 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 16 : 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 Aufnahmevorgang 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 Gefahrbereich ebenfalls unter der Wechselbrücke.

Für das Projekt SAFE20 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 einen 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.

2.4.11 Hochverfügbare Ortung mittels Fusionssystem (AP 4.10)

TII KAMAG hat mit SICK und Götting die mechanische Sensorintegration diskutiert und geklärt. Der Verbau der Halterungen und Sensoren geschah durch TII KAMAG. Es sind keine besonderen Herausforderungen aufgetreten oder Erkenntnisse gewonnen wurden.

2.4.12 Schnittstelle autonomes Fahren für Truck Wiesel (AP 4.11)

In diesem Arbeitspaket wurde die Zugmaschine KAMAG PT um eine Schnittstelle für autonomes Fahren erweitert. Diese Schnittstelle, realisiert durch eine Software auf einem Steuergerät, ermöglicht es, das Fahrzeug durch eine übergeordnete Steuerung zu kontrollieren, d.h. Fahrbefehle und andere Aktuatorbefehle zu erteilen.

Diese Schnittstelle muss Performance- wie Sicherheitsanforderungen erfüllen. Die Sicherheitsanforderungen ergeben sich aus AP3. Die Performanceanforderungen kamen im Projekt von ZF, welche den virtuellen Fahrer gestellt haben, und welche in Workshops erarbeitet wurden.

Die Integrationsanforderungen hinsichtlich E/E/PE und Mechanik wurden zwischen ZF & TII KAMAG geklärt. Die Integration der Automatisierungsschnittstelle, ADOPT und der automatisierten Sattelplatte von SAF Holland erfolgten durch TII KAMAG in Ulm.

Grundlegen Sicherheitsfunktionen wie die Erkennung des Eingriffs durch den Sicherheitsfahrer an Lenkung und Bremse mit Abschaltung der Automatisierung, eine ausfallsichere Notbremse und Schlüsselschalter zum Umschalten der Betriebsmodi wurden implementiert sowie alle notwendigen Funktionen der Automatisierungsschnittstelle umgesetzt, um ADOPT auch softwareseitig zu integrieren.

Die Integration wurde in Ulm mit ZF erfolgreich getestet.

Bei den in Jeversen durch ZF durchgeführten Systemtests (mit virtuellem Fahrer) traten Probleme bei der Antriebsregelung auf. Sporadisch war ein Schlagen des Motors zu hören. Auch wurden Totbereiche in der Geschwindigkeitsregelung identifiziert. ZF und Kamag haben intensiv an der Analyse und Behebung gemeinsam mit dem Lieferanten des Antriebs gearbeitet. Die Probleme wurden durch eine prototypische Softwareanpassung gelöst.

Konzeption der Automatisierungsschnittstelle (DBW Interface)

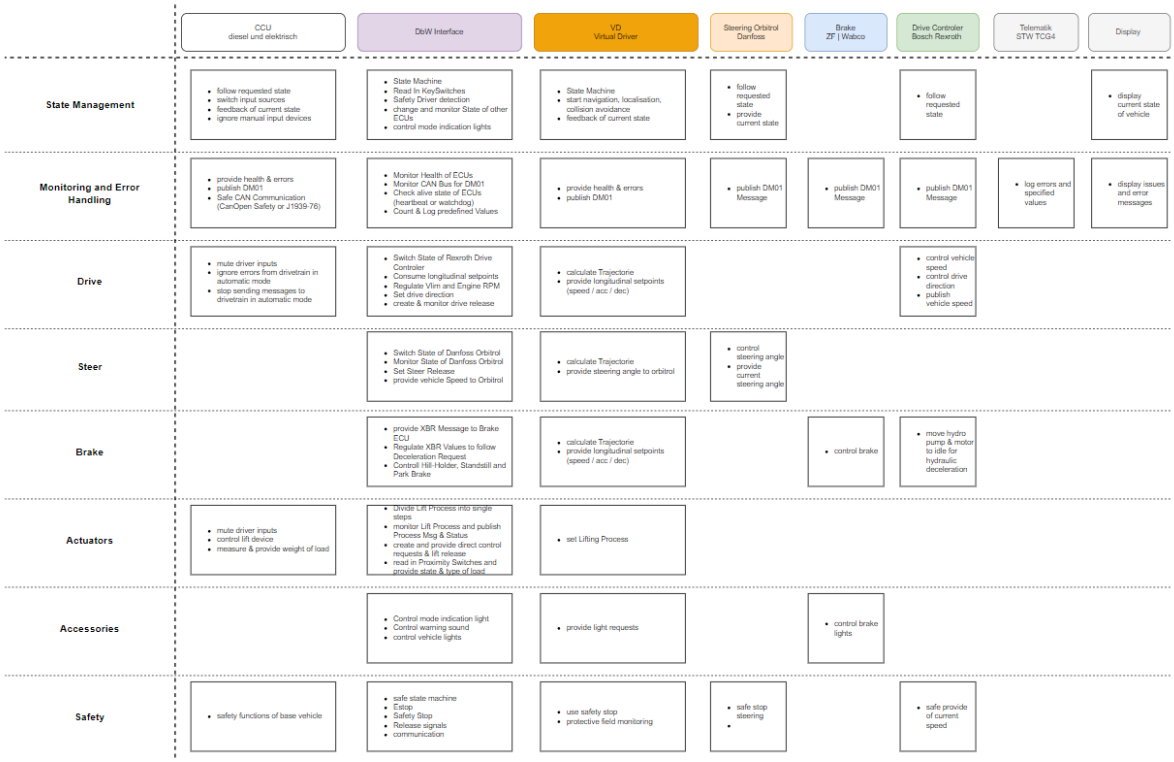
TII KAMAG hat eine Automatisierungsschnittstelle konzipiert, welches es ermöglicht, die Fahrzeuge KAMAG PM und PT durch einen virtuellen Fahrer zu steuern. Die Konzeption sah vor, dass die Automatisierungsschnittstelle mit und ohne ADOPT funktioniert, d.h. insbesondere, dass auch die im ADOPT realisierten, für diese Anwendung relevanten, Funktionen in der Automatisierungsschnittstelle abgebildet wurden. Dazu musste nicht alle ADOPT Funktionalitäten vorgesehenen werden, da der Funktionsumfang von ADOPT weit über das, was für die Applikation auf dem Logistikhof notwendig ist, hinausgeht.

Alle notwendigen Funktionen der Automatisierungsschnittstelle, um das ADOPT erfolgreich in den KAMAG PT zu integrieren, wurde realisiert und getestet.

Funktionsübersicht der Automatisierungsschnittstelle

Zunächst müssen die notwendigen Funktionen der Automatisierungsschnittstelle identifiziert und den Subsystemen zugeordnet werden. Die notwendigen Funktionen leiten sich aus der Anwendung und identifizierten Use Cases mit abgeleiteten Anforderungen ab.

Die Kernfunktionen sind untenstehender Matrix entnehmbar, ebenso die relevanten Komponenten, welche eine Wechselwirkung mit der Automatisierungsschnittstelle haben.



Hardwarearchitektur und Kontext für die Automatisierungsschnittstelle

Die Automatisierungsschnittstelle (auch DBW=drive-by-wire genannt) besteht aus einer ECU mit entsprechender Software, zusätzlichen verbauten Komponenten zum Steuern des Fahrzeuges, bspw. dem Verbau eines zusätzlichen elektronischen Orbitrols, Not-halt Taster, HMI Elemente wie Schlüsselschalter, Freigabetaster, und weiteres, sowie insbesondere aus Schnittstellen zu bereits vorhanden Komponenten, hauptsächlich Antrieb und Bremse.

Dies muss in die bestehende Fahrzeugarchitektur integriert werden und bestehende Komponenten bestmöglich wiederverwenden.

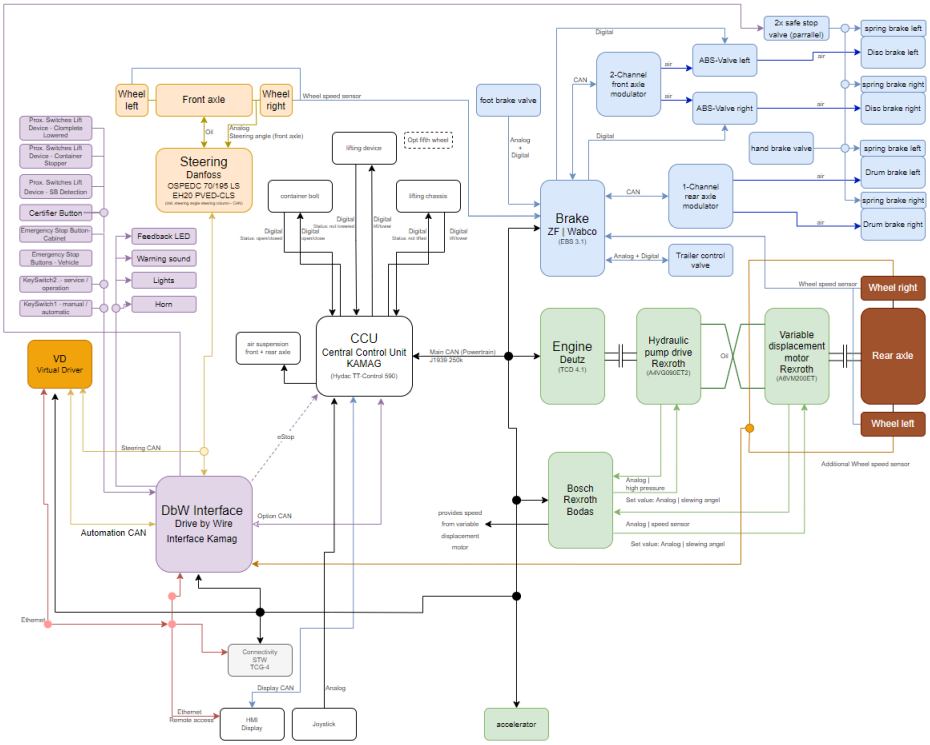


Abbildung 17 Darstellung des Systemkontexts für die Automatisierungsschnittstelle

Zustandsmaschine für Betriebsarten

Der KAMAG PT kann manuell wie automatisiert betrieben werden. Mit einem Schlüsselschalter kann zwischen den beiden Betriebsarten umgeschaltet werden. Hier nicht realisiert, aber für ein Produkt notwendig, ist zusätzlich eine Umschaltung zwischen automatisierten Betrieb mit Sicherheitsfahrer (Servicebetrieb) und automatisierten Betrieb ohne Sicherheitsfahrer (Produktionsbetrieb). Der Testbetrieb bei SAFE20 mit dem KAMAG PT ist ausschließlich mit Sicherheitsfahrer vorgesehen. Ist der Schlüsselschalter auf Stellung „Automatisierung“ kann der Sicherheitsfahrer durch Quittierung dem Automatisierungssystem die Freigabe erteilen. Die Automatisierungsschnittstelle akzeptiert dann Fahr- und Steuerbefehle vom virtuellen Fahrer.

Während des automatisierten Betriebs kann der Sicherheitsfahrer jederzeit eingreifen und die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen. Desweiteren wurden Fehlerzustände erfasst, welche dem virtuellen Fahrer die Freigabe nehmen und das Fahrzeug in einen Zustand minimalen Risikos überführt (Stillstand).

Für alle Zustände wurden entsprechende Voraussetzungen für die Transition zu anderen Zuständen definiert.

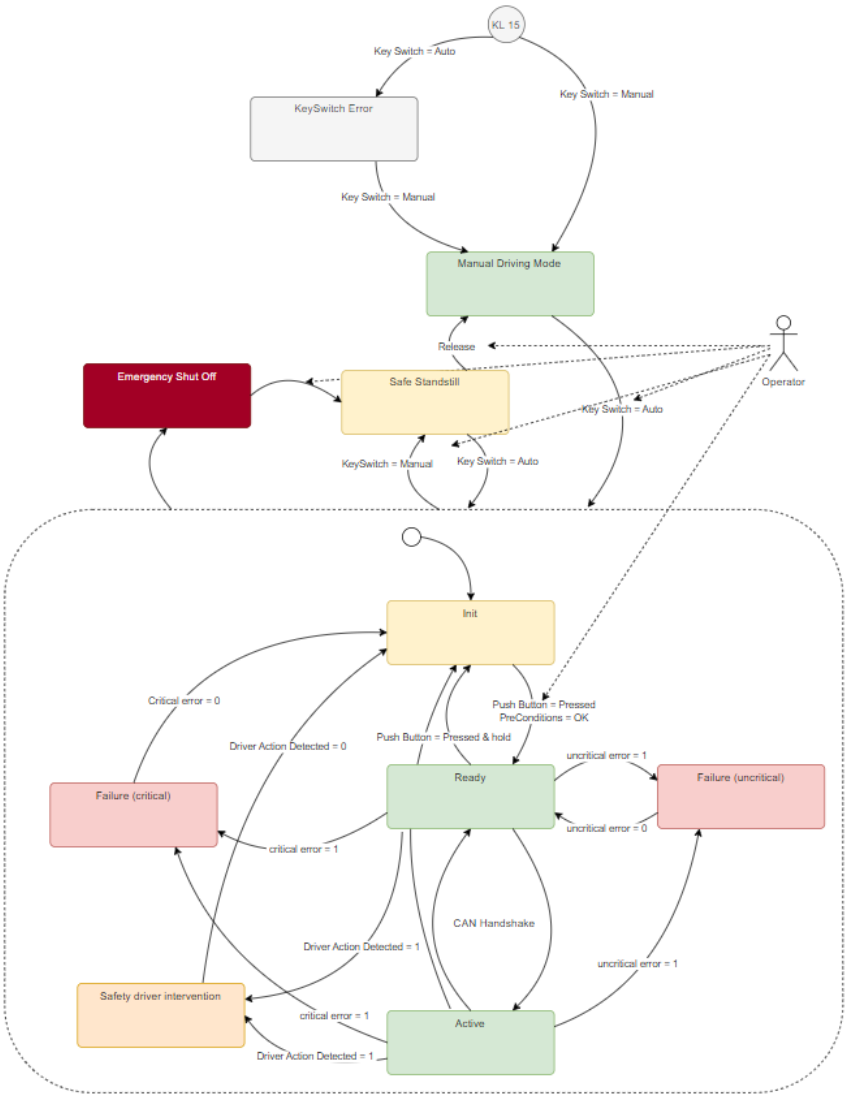


Abbildung 18 Darstellung der Zustandsmaschine für die verschiedenen Betriebsarten

2.4.13 Sichere Umfeld-/Objekterfassung (AP 6)

Arbeit mit Partner Sick

Entwicklungsunterstützend wurde ein Testfahrzeug ohne Automatisierungskomponenten bereitgestellt und ausgerüstet mit Geschwindigkeitsgeber und Lenkwinkelsensor sowie Bereitstellung der Signale per CAN für die Tests und Erprobung durch Sick.

Es wurden diverse Sensoren von Sick temporär am Fahrzeug ausgerüstet und integriert. Vorabtests fanden bei der TII KAMAG statt. Das Fahrzeuge wurde anschließend zum Dachser Langenau gefahren, wo die eigentlichen Tests durchgeführt wurden.

Ziel der Tests war die Aufnahme von Messdaten von Lidar und Radar, um diese anschließend zu begutachten hinsichtlich Erkennung von sicherheitsrelevanten Objekten, notwendiger Detektionsreichweite, unerwünschte Bodenerkennungen sowie der Anpassung der Kollisionsüberwachungsbereiche in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Lenkwinkel.

Es fanden zwei mehrtägige Messkampagnen statt.

Abbildung 19 Mit Lidaren ausgerüstetes Testfahrzeug beim Dachser in Langenau

Arbeit mit Partner Fraunhofer IML

Zusammen mit Fraunhofer IML wurde an einem KI basierten Algorithmus zur Erkennung von logistischen Objekten basierend auf den Messpunktewolken von Lidaren und Kamerabildern entwickelt. Logistische Objekte sind im Kontext der Hoflogistik bei Dachser die Wechselbrücken, Trailer, Verladetore, Fußgänger und Fahrzeuge.

TII KAMAG und IML haben in mehreren Messkampagnen Daten auf dem Hof Langenau von Dachser gewonnen. Dazu wurde ein mobiler Roboter mit Lidaren und Kameras ausgestattet.

Eine intrinsische und extrinsische Kalibrierung der Kameras und Lidare war notwendig. Dies erfolgte in der Kollaboration mit Fraunhofer IML. Die Kalibrierungstools wurden von TII KAMAG gefertigt.

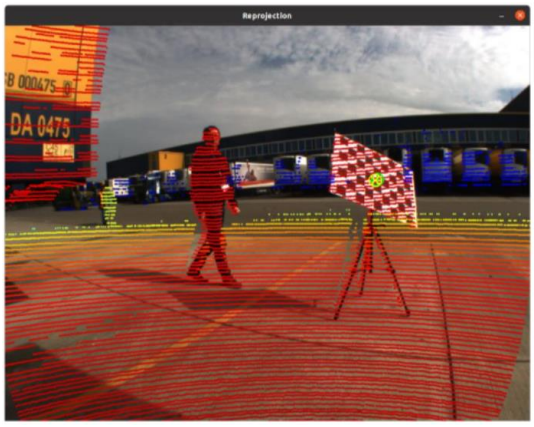


Abbildung 20 Ansicht der Rohdaten mit Blick auf Kalibrierungsbrett

Die Daten wurden anschließend annotiert in Vorbereitung zum Trainieren von Deep Learning Modellen. In gemeinsamer Diskussion wurden die Objektklassen definiert und der Umgang mit Sonderfällen wie „Okklusion“, also teilweise verdeckten Objekten, besprochen. Für das Annotieren wurden mehrere verschiedene Softwarelösungen evaluiert. Letztlich wurde gemeinsam mit Fraunhofer IML entschieden die Software Supervisely zu verwenden. Das Annotieren fand durch beide Partner zu gleichen Maßen statt und war sehr aufwendig.

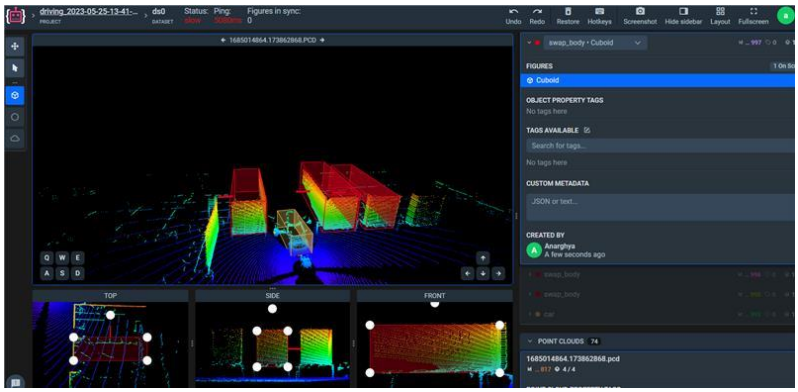


Abbildung 21 Annotieren von Messdaten in Supervisely

TII KAMAG hat unterschiedliche Deep Learning Modelle für Punktewolken analysiert und evaluiert. Es wurde ein individuell angepasstes Model basierend auf dem Point Pillar Model trainiert. Das finale Model wurde für drei Objektklassen trainiert: Wechselbrücke, Fahrzeuge, Fußgänger. Die Wechselbrücke konnten als Objektklasse alleinig mit Hilfe der Daten aus der Messkampagne trainiert werden. Die Fußgänger und Autos wurden trainiert basierend auf den Daten aus der Messkampagne und Daten aus der frei verfügbaren Database Kitti.

Die Arbeiten der TII KAMAG wurden parallel in einer Masterarbeit mit dem Titel “Development and implementation of Deep learning model to determine freely available parking areas in the logistic yard” [4], abgeschlossen und eingereicht am 14.03.2024, betrachtet. Die Betreuung fand durch TII KAMAG und Fraunhofer IML gleichermaßen statt.

2.5 Schrittweise Systemintegration (AP 7)

2.5.7 Aufbau und Inbetriebnahme der Automatisierungszone

TII KAMAG erwarb zwei Lizenzen zum Empfang von GNSS-Korrekturdaten durch SAPOS für die Fahrzeuge KAMAG PT und KAMAG PM. Dadurch konnte auf den Kauf und Aufbau einer stationären GNSS-Basisstation verzichtet werden.

2.5.8 Systemintegration Fahrzeug (AP 7.2)

Systemintegration des automatisierten Kamag PTs

TII KAMAG war bei Test und Validierung des KAMAG PT auf der ZF Teststrecke in Jeversen involviert, aber nicht bei der Systemintegration am Standort Dachser Langenau.

Systemintegration des automatisierten Kamag PMs

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 abbrechen: 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.

2.5.9 Test und Validierung der Sicherheitsfunktionen (AP 7.3)

TII KAMAG hat Ausfalltests für den KAMAG PT durchgeführt. Die Abweichungen wurden dokumentiert und die spezifischen Maßnahmen im Freigabepapier für ZF detailliert.

Insbesondere wurden getestet:

- Not-halt
- Umschalten der Betriebsarten durch Schlüsselschalter
- Eingriff in Lenkung und Bremse durch Sicherheitsfahrer
- Ausfallsichere Notbremse
-

Der KAMAG PM wurde die Not-halt Funktion getestet und validiert sowie alle Sicherheitsfunktionen in Verbindung mit der Übernahme der Fahrzeugkontrolle durch einen Sicherheitsfahrer.

2.5.10 Test der Automatisierungsfunktionen (AP 7.4)

Test der Automatisierungsfunktionen der 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.

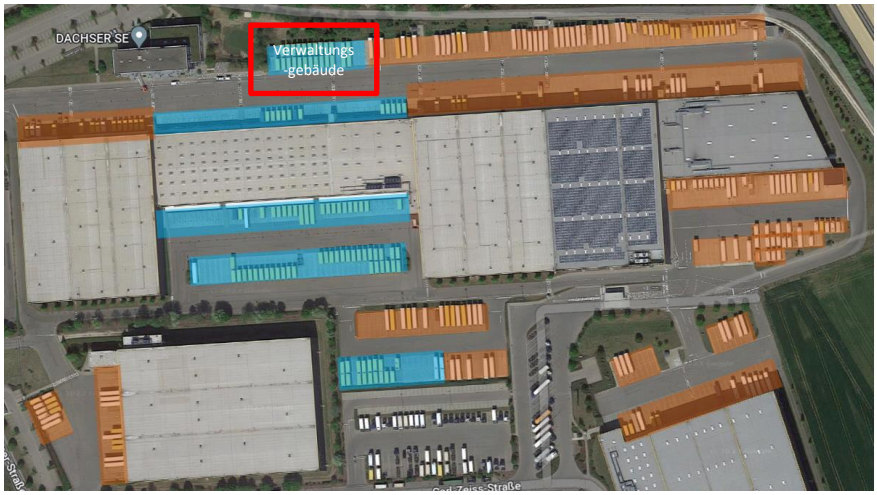


Abbildung 22: Übersicht relevanter Stellplätze für die Automatisierung, in Blau gekennzeichnet

Abbildung 23: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 1, in Grün kenngezeichnet

Abbildung 24: Relevante Stellflächen für die Erprobungsphase 2, in Grün kenngezeichnet

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 25 sind beispielhaft die Hauptroute von den südlichen Rampen bis zum Abstellbereich C2 und C3 definiert.

Abbildung 25: 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 Umsetzvorgang 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 3: 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 4: 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 5: 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 Sattelauflieger 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 6: 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 7: 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 8: 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.

2.5.10.2 Integration des Gesamtsystems

Keine Arbeiten seitens TII KAMAG.

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

2.5.11.2 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 26). 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.

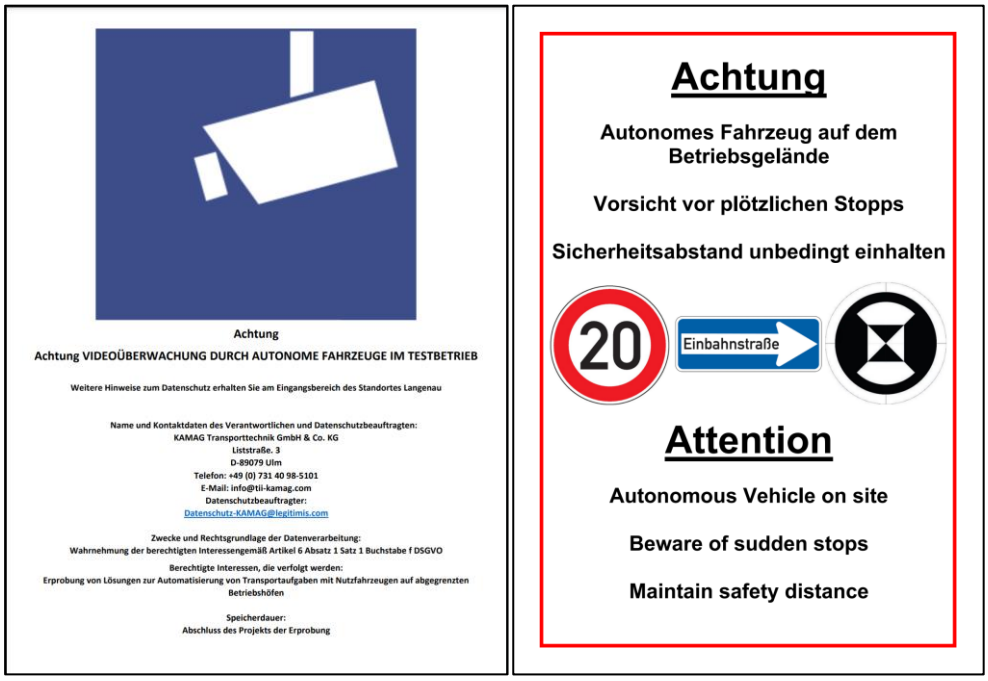


Abbildung 26: Auf dem Betriebsgelände angebrachte Hinweisschilder

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 27 verdeutlicht die genauen Positionen der Testbereiche.

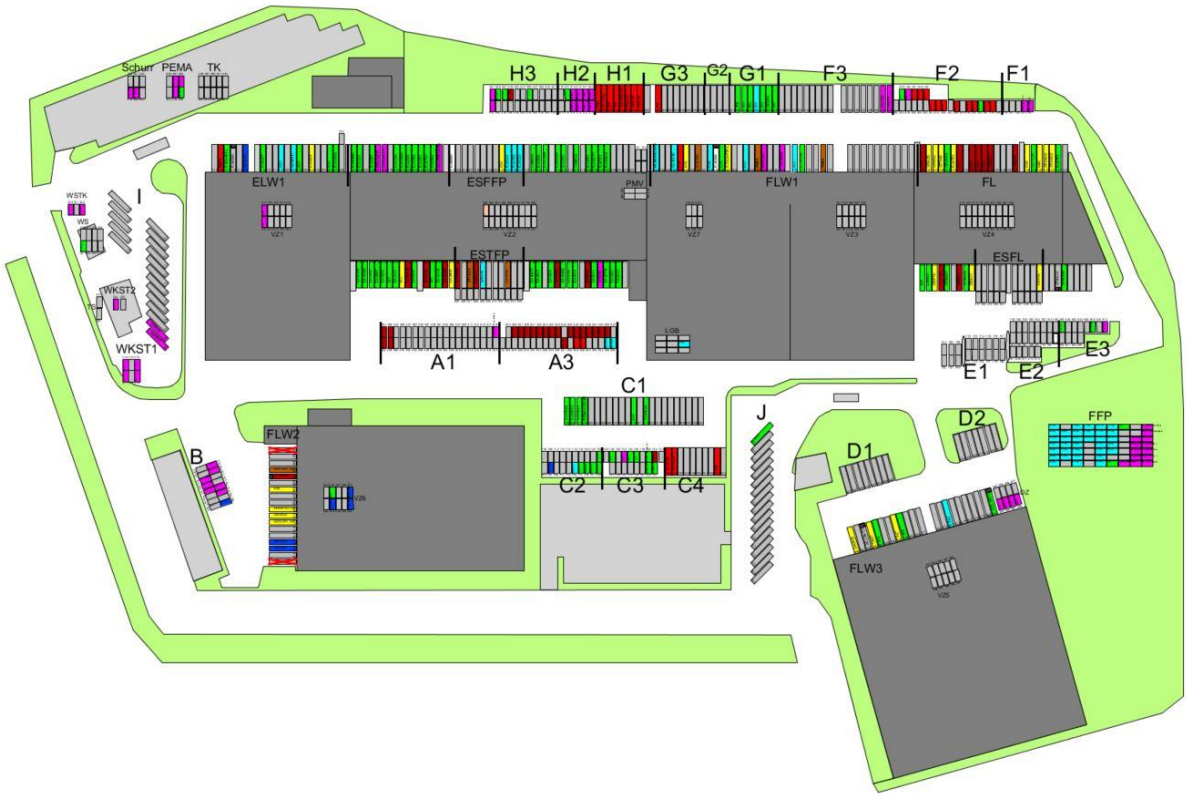


Abbildung 27: Bereiche für die Abstellplätze und Rampe im DACHSER Logistikzentrum Ulm

Testszenarien KAMAG PM

Die in Tabelle 9 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 9: 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 10: Negative Testszenarien

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Unterkapitel „**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**“). 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 11 fassen diese Testphase für den KAMAG PM zusammen:

Tabelle 11: 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 **gefahrene 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.

2.5.11.3 Evaluierung des Testbetriebs (AP 8.2)

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.

Um falschausgelöste Bodenerkennungen zu vermeiden, wurde ein Verfahren entwickelt, um das Fahrwerk des KAMAG PM adaptiv basierend an den Echtzeit-Messdaten aus dem Lidar oder anhand der Lokalisierung und auf einer Karte hinterlegten Neigungen anzupassen. Diese wurde im Projekt aus zeitlichen Gründen nicht bis zu Tests umgesetzt, jedoch ist zu erwarten, dass dies zu einer deutlichen Verringerung von falschpositiven Bodenerkennungen durch eine Hinderniserkennung führen sollte. Eine Patentanmeldung wurde unter „Verfahren zur Vermeidung von Erkennungen einer Fahrbahn durch eine Personenschutzeinrichtung sowie fahrerloses Transportfahrzeug" beim DPMA eingereicht.

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 langzeitig 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.

2.6 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. hatte. 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 Notbremssystem 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 Berufsgenossenschaften 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

[1] SAE International, *Automated Driving System (ADS) Marker Lamp (SAE J 3134),* 2019.

[2] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, „www.dguv.de," [Online]. Available: https://publikationen.dguv.de/regelwerk/publikationen-nach-fachbereich/holz-und-metall/fahrzeugbau-antriebssysteme-instandhaltung/4505/fbhm-119-automatisiert-fahrende-fahrzeuge-in-betrieblichen-bereichen.

[3] G. Riedel, „Arbeitsmaschine, Diagnoseverfahren und Verwendung der Arbeitsmaschine". Patent EP4303085A1, 2022.

[4] A. S. Raghava, *"Development and implementation of Deep learning model to determine freely available parking areas in the logistic yard",* Dortmund, 2024.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) **Partnerspezifischer Schlussbericht**

3. Titel
SAFE20 - Sicheres autonomes Fahren und Erprobung in Automatisierungszonen mit mindestens 20 km/h – Automatisierter Wechselbrückenhubwagen

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2024
Martin Teuchler Bénédicte Bernier Ebin Zacharias Marc Mozigemba	6. Veröffentlichungsdatum 17.10.2024
	7. Form der Publikation Digital
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Kamag Transporttechnik GmbH & Co.KG Liststraße 3 89079 Ulm	9. Ber. Nr. Durchführende Institution ---
	10. Förderkennzeichen 19A20011E
	11. Seitenzahl 67
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben ---
	14. Tabellen ---
	15. Abbildungen ---

16. Zusätzliche Angaben
---

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

TÜV Rheinland Consulting GmbH, Am Grauen Stein 51, 51105 Köln, 17.10.2024

18. Kurzfassung

Der Bericht beschreibt die durchgeführten Arbeiten der TII KAMAG am SAFE20 Projekt.

Das Projekt SAFE20, das sich mit der Entwicklung eines umfassenden Sicherheitskonzepts für den Betrieb von vollautomatischen Fahrzeugen auf Betriebshöfen beschäftigt. Das Hauptziel des Projekts SAFE20 war die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für den Regelbetrieb von autonomen Fahrzeugen auf Betriebshöfen mit Geschwindigkeiten von mindestens 20 km/h. Es wurden rechtlich belastbare und sicherheitsorientierte Anforderungen an ein Gesamtsystem erarbeitet, das aus Fahrzeugen und einer hofseitigen Automatisierungszone besteht. Das Projekt wurde in acht Arbeitspaketen (APs) und 36 Unter-Arbeitspaketen durchgeführt. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Unternehmen, F&E-Instituten und Berufsgenossenschaften war essenziell für die Umsetzung des Projekts. Es wurden diverse technologische Lösungen entwickelt, darunter ein sicheres Notbremssystem, hoch performante Rechnerhardware und sichere Fahrzeugtechnologien. Ein wesentlicher Aspekt war die Verifizierung des Konzepts in einem mehrmonatigen Testbetrieb unter Realbedingungen. Das Projekt SAFE20 konnte wesentliche Fortschritte in der Entwicklung eines umfassenden Sicherheitskonzepts erzielen. Die erarbeiteten Lösungen wurden in einem mehrmonatigen Testbetrieb unter verschiedenen Verkehrs-, Wetter- und Lichtbedingungen verifiziert. Der Bericht enthält detaillierte Informationen zu den einzelnen Arbeitspaketen, den technischen Entwicklungen und den Ergebnissen der Testphasen. Insgesamt zeigt das Projekt SAFE20, wie durch interdisziplinäre Zusammenarbeit und innovative technologische Lösungen der Betrieb von autonomen Fahrzeugen auf Betriebshöfen sicher und effizient gestaltet werden kann.

19. Schlagwörter
Automatisierung, Logistik, Künstliche Intelligenz

20. Verlag	21. Preis
---	---

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final partner report
3. title SAFE20 - Safe autonomous driving and testing in automation zones with at least 20 km/h – Automated Swap Body Mover	
4. author(s) (family name, first name(s)) Martin Teuchler Bénédicte Bernier Ebin Zacharias Marc Mozigemba	5. end of project 31.03.2024
	6. publication date 17.10.2024
	7. form of publication Digital
8. performing organization(s) (name, address) Kamag Transporttechnik GmbH & Co.KG Liststraße 3 89079 Ulm	9. originator's report no. ---
	10. reference no. 19A20011E
	11. no. of pages 67
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references ---
	14. no. of tables ---
	15. no. of figures ---
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) TÜV Rheinland Consulting GmbH, Am Grauen Stein 51, 51105 Köln, 17.10.2024	

18. abstract

The report describes the work carried out by TII KAMAG on the SAFE20 project.

The SAFE20 project focuses on developing a comprehensive safety concept for the operation of fully automated vehicles in depots. The main goal of the SAFE20 project was to develop a safety concept for the regular operation of autonomous vehicles in depots at speeds of at least 20 km/h. Legally robust and safety-oriented requirements for a complete system consisting of vehicles and a depot-side automation zone were developed. The project was carried out in eight work packages (WPs) and 36 sub-work packages. The interdisciplinary collaboration of companies, research and development institutes, and professional associations was essential for the implementation of the project. Various technological solutions were developed, including a safe emergency braking system, high-performance computer hardware, and safe vehicle technologies. A key aspect was the verification of the concept in a multi-month test operation under real conditions. The SAFE20 project achieved significant progress in developing a comprehensive safety concept. The developed solutions were verified in a multi-month test operation under various traffic, weather, and lighting conditions. The report contains detailed information on the individual work packages, the technical developments, and the results of the test phases. Overall, the SAFE20 project demonstrates how the operation of autonomous vehicles in depots can be made safe and efficient through interdisciplinary collaboration and innovative technological solutions.

19. keywords Automation, Logistics, Artifical Intelligence	
20. publisher ---	21. price ---