



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

Schlussbericht Götting KG Teilvorhaben: Hochverfügbare Ortung und online Bahnplanung

Förderkennzeichen: 19A20011D

Laufzeit: 10/2020 – 03/2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Autoren

Name	Organisation
Dr.-Ing. Sebastian Behling	Götting KG

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
Abkürzungsverzeichnis / Glossar	4
1 Kurze Darstellung	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
2 Eingehende Darstellung	14
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	14
2.1.1 Identifikation & Definition der betrachteten Use-Cases (AP 2.1)	14
2.1.2 Szenarien & Risiken (AP 3.1)	15
2.1.3 Nachweis anwendbarer Richtlinien (AP 3.7)	16
2.1.4 Lokale Bahnplanung (AP 4.5)	16
2.1.5 Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)	25
2.1.6 Sicheres Handling Verteiler-Lkw (AP 4.9)	29
2.1.7 Hochverfügbare Ortung mittels Fusionssystem (AP 4.10)	32
2.1.8 Test der Automatisierungsfunktionen (AP 7.4)	39
2.1.9 Integration des Gesamtsystems (AP 7.5)	41
2.1.10 Betrieb des Gesamtsystems (AP 8.1)	44
2.1.11 Projektabschluss (AP 8.3)	48
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	48
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	49
2.4 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit	49
2.5 Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens	50
2.6 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	50

Abkürzungsverzeichnis / Glossar

Abkürzung / Begriff	Bedeutung
AMCL	Adaptive Monte Carlo Localization
AP	Arbeitspaket
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
CAN	Controller Area Network
COHeReNT	COmprehensive Hazard (e) Rating (e) Nummer Tool
F&E	Forschung und Entwicklung
FOV	Field of View
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
GNSS	Global Navigation Satellite System
IPC	Industrie-PC
LKW	Lastkraftwagen
PFL	Partikel Filter Lokalisierung
ROS	Robot Operation System
SAE	SAE International, ehemalige Bezeichnung Society of Automotive Engineers
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
TRL	Technology Readiness Level = Technologie-Reifegrad; Skala von 1-9 zur Bewertung des Entwicklungsstands neuer Technologien

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

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

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

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

Für das Projekt wurden zwei grundlegende Anwendungsfälle definiert: der Hofdienst und der Nahverkehrsbetrieb. Der Hofdienst unterteilt sich je nach den zu bewegend 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 CV Systems GmbH (Konsortialführer) / ZF Friedrichshafen AG
- DACHSER SE
- Fraunhofer IVI
- Fraunhofer IML
- Götting KG
- TII KAMAG
- SICK AG
- Sensor-Technik Wiedemann GmbH

Unterbeauftragte waren:

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

Als assoziierte Partner:

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

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

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

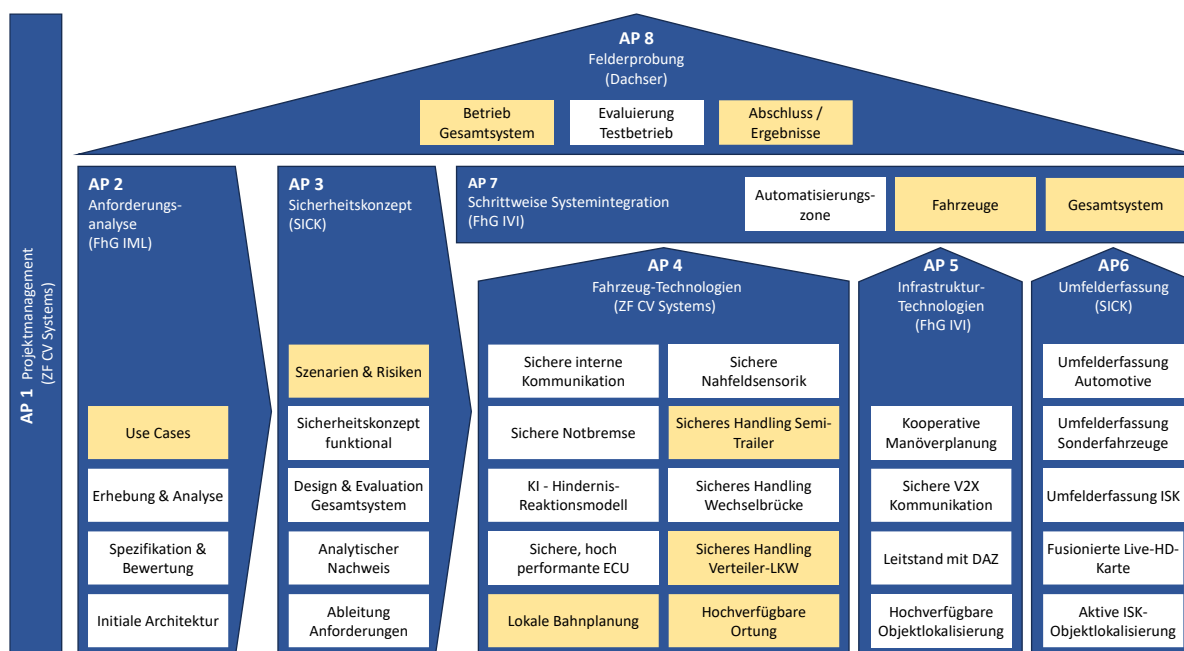


Abbildung 1: Übersicht Arbeitspakete SAFE20

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 weiteren Arbeiten, sowie die Ausarbeitung des Sicherheitskonzepts, das die Grundlagen für die Fahrzeugentwicklung legte. 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.
- FTF 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 berührepfindlichen 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 Umfelderkennung (Kameras, Lidar, Radar – meist als Fusionssystem) sowie Car2Car-Kommunikation in Kombination mit Steuer- und Regelsystemen eingesetzt.
- Objekte auf der Fahrbahn werden von der fahrzeugeigenen Umfelderkennung nicht immer eindeutig erkannt und klassifiziert und lösen z. T. Fehlentscheidungen aus – auch mit schwerwiegenden Folgen. Tödliche Unfälle von Tesla- und Uber-Fahrzeugen sind dokumentiert.
- Viele Unternehmen (Google, Uber, Daimler, Continental uvm.) arbeiten an sog. Robo-Taxis, die laut Ankündigung ab 2021 als Alternative/Ergänzung zum ÖPNV eingeführt werden sollen. Diese Fahrzeuge werden mit dem Smartphone gerufen und sollen vollautomatisch zum Ziel fahren. Einige Konzepte lassen Bedienelemente für Fahrer konsequent weg.

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

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

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

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

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

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

Eine wesentliche Erkenntnis aus vorangegangenen Projekten ist, dass das erforderliche Sicherheitsniveau für den automatisierten Hofbetrieb mit 20 km/h und mehr mit den derzeit verfügbaren Sensortechnologien nicht erreichbar ist. Sollen Fahrzeuge im Mischbetrieb auf einem Hof automatisiert betrieben werden erscheint es sinnvoll, die fahrzeugseitigen Sicherheitsfunktionen

über Dekompositionsstrategien durch hofseitige Sensorik, Routenplanung und Prozesse zu ergänzen. Dies erfordert eine intensive Untersuchung und gegebenenfalls Neudefinition von Arbeitsabläufen und Hofgestaltung anhand der umzusetzenden Nutzungsszenarien.

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

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

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

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

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

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

Verkehrsfluss zu optimieren, z.B. durch Ampelschaltungen oder die Überwachung von Fußgängerzonen.

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

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

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der interdisziplinären Zusammenarbeit der Partner im Projekt-Konsortium wurde von Beginn an der Austausch mit weiteren wichtigen Partnern für eine spätere rechtliche und kommerzielle Umsetzung des Projektes gesucht. Insbesondere die Einbindung der Berufsgenossenschaften BG Handel und Warenlogistik und BG Verkehr vor allem als Ansprechpartner für regulatorische Fragen leistete daher einen essentiellen Beitrag für die weitere Verwendung der Ergebnis. 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 Knowhow, wie die T-Systems International GmbH bei der Auslegung der Kommunikationsstrukturen oder die SAF Holland SE mit der Bereitstellung einer automatischen Kupplung für den verwendeten Sattelaufleger.

2 Eingehende Darstellung

Der Projektablauf wurde in einzelne Arbeitspakete (AP) aufgeteilt. Die nachfolgende Beschreibung entspricht der beantragten Struktur aus der Vorhabenbeschreibung. APs ohne Beteiligung der Götting KG werden nicht aufgeführt.

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Götting KG war in den Arbeitspaketen AP 2 „Anforderungsanalyse“, AP 3 „Sicherheitskonzept“, AP 4 „Sichere Fahrzeugtechnologien“, AP 7 „Systemintegration“ sowie AP 8 „Testen, Lernen und Optimieren im Feld“ beteiligt, wobei der Schwerpunkt im AP 4 lag.

2.1.1 Identifikation & Definition der betrachteten Use-Cases (AP 2.1)

Das übergeordnete Ziel des AP 2 war die Erhebung und Erfassung funktionaler Anforderungen an das Gesamtsystem bestehend aus Fahrzeugumfeldererkennung und hofseitiger Infrastruktur-Sensorknoten. In AP 2.1 sollten die bestehenden Use-Cases auf dem betrachteten Logistikhof analysiert und potenziell erforderliche Änderungen hinsichtlich einer Automatisierung definiert werden.

Die Götting KG hat die partnerübergreifende Identifikation der Use-Cases und der betroffenen Personenklassen in zahlreichen (online-)Treffen unterstützt. Dabei wurden die praktischen Erfahrungen im Anwendungsfeld Intralogistik zur Ermittlung und Zusammenstellung der typischen Fahr-/Betriebsituationen genutzt. Zusätzlich wurden potenziell auftretende Herausforderungen, Gefahren und Fehler identifiziert und bei der Ausarbeitung berücksichtigt. Als Ergebnis liegt ein repräsentativer Katalog der Use-Cases vor. Details sind im öffentlichen, partnerübergreifenden Schlussbericht ersichtlich.



Abbildung 2: Übersicht typischer Ablauf Nahverkehr

2.1.2 Szenarien & Risiken (AP 3.1)

Ziel des Arbeitspaketes 3 war die Erstellung eines Sicherheitskonzeptes und die Erbringung des Nachweises der Hinlänglichkeit dieses Konzeptes für die in diesem Projekt angestrebte Automatisierungszone. In AP 3.1 wurden zunächst kritische Szenarien aus den in AP 2 ermittelten Anwendungsfällen und darüber das initiale Risiko der Anwendung bestimmt.

Die Götting KG hat bei der Identifizierung der kritischen Szenarien sowie der initialen Risikobewertung mitgearbeitet. Unter anderem wurde an zahlreichen (online-)Treffen teilgenommen, die durch die SICK AG koordiniert wurden. Dabei konnten Risiken hinsichtlich der Projekteinhalte der Götting KG (insbesondere Lokalisierungssystem, Andocken an Rampen) identifiziert werden, die in einem partnerübergreifenden Dokument („Risk Assessment“) berücksichtigt wurden. Der Inhalt wurde mit dem Partner Dachser abgesprochen. Für die Use-Cases sind die Gefährdungen gemäß der Ablaufdiagramme erstellt und das Eingangsrisiko bewertet worden. Sonderfälle wurden fortlaufend betrachtet. Darauf aufbauend konnte in den nachfolgenden APs eine Ableitung der notwendigen Maßnahmen und Sicherheitslevel erfolgen.

Hinsichtlich des geplanten Lokalisierungssystems wurde eine Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) erstellt und deren Inhalte mit insgesamt 102 Kennzahlen bewertet. Die konkrete Bestimmung der Zuverlässigkeit des Systems ist durch verschiedene Optionen beeinflussbar.

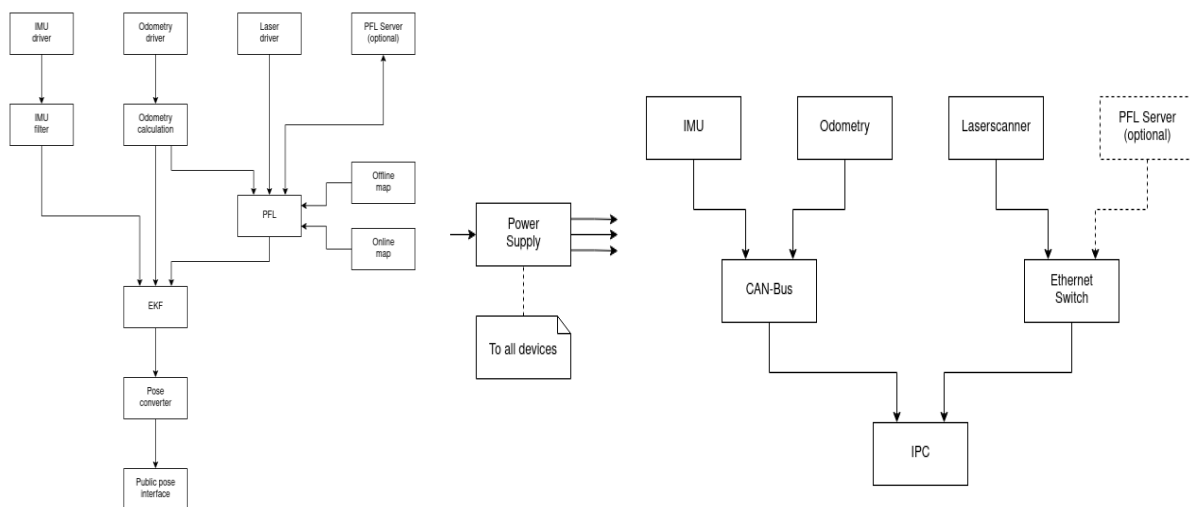


Abbildung 3: Übersicht der betrachteten Module des Lokalisierungssystems für die FMEA

Unter Koordination der SICK AG wurde eine Verständigung der Partner auf die potenziellen Gefährdungen erreicht sowie im nächsten Schritt das assoziierte initiale Risiko für jeden identifizierten Punkt bewertet. Dazu wurde die Risikobewertungsmethode COHeReNT genutzt. Die Risikobewertung wurde seitens Götting einem Review unterzogen und als Grundlage für das weitere Vorgehen akzeptiert.

2.1.3 Nachweis anwendbarer Richtlinien (AP 3.7)

In diesem AP war ein partnerübergreifender Nachweis über die Anwendbarkeit von Verordnungen, Richtlinien und Normen zur Bewertung des aufgestellten Sicherheitskonzeptes beabsichtigt. Unter Federführung der SICK AG hat sich die Götting KG an der Erstellung eines Berichts (35 Seiten) zu diesem Thema beteiligt. Dieser Nachweis beinhaltet die Identifikation und Bewertung der potenziellen Konformität zu notwendigen Richtlinien und ist damit eine Basis für die spätere Kommerzialisierung und Anwendung des Sicherheitskonzeptes für die Automatisierungszone.

Anhand einer Liste können die berücksichtigten Richtlinien (synonym verwendet für Normen, Verordnungen oder auch Gesetze) nachvollzogen werden. Neben der ausführlichen Beschreibung der Zielsetzung wird auf die mögliche Umsetzung auf verschiedenen Ebenen eingegangen. Einerseits wird die Anwendung mit dem Verkehr auf dem Betriebsgelände wie im öffentlichen Straßenverkehr wahrgenommen, andererseits hat auch die Ansicht der Fahrzeuge als innerbetriebliche Maschine im abgesperrten Bereich seine Berechtigung. Entsprechend sollten beide Anforderungen berücksichtigt werden, was allerdings eine wirtschaftliche Realisierung erschwert.

Zusammenfassend hat sich aber gezeigt, dass die zuvor angenommenen Lücken bei den Richtlinien zur Anwendung auf SAFE20 kleiner waren, als erwartet und dass die neue Maschinenverordnung auch als Grundanforderungen für fahrerlose Lkw auf Betriebshöfen herangezogen werden kann. Eine ausführliche Beschreibung sowie ein detailliertes Ablaufdiagramm einer möglichen Umsetzung befinden sich im veröffentlichten partnerübergreifenden Schlussbericht zu AP 3.7.

2.1.4 Lokale Bahnplanung (AP 4.5)

Seitens der Götting KG sollte in diesem AP eine online Bahnplanung entwickelt werden, mit der die Rangiervorgänge zum Andocken an eine Rampe durchgeführt werden können.

Als erster Schritt zur Berechnung einer Bahn war eine Erkennung der zur Verfügung stehenden Freifläche notwendig. Die Freiräume müssen zur Beurteilung von einer Sensorik eingesehen werden können. Dabei wurde die Umgebung in Bereiche vor und hinter den gemessenen Objekten eingeteilt. Folglich konnte eine Karte erstellt werden, die laufend aktualisiert die Freiflächen vorhält. Im folgenden Beispiel (Abbildung 4) sind die Freiflächen grün markiert.

Über die gelben Bereiche kann keine Aussage getroffen werden, weil der Bereich nicht von dem Sensor eingesehen wurde. Die roten und violetten Bereiche zeigen an, dass dort mehrfach Hindernisse erkannt worden sind, auch wenn sie später ggf. nicht mehr vermessen werden konnten. Darüber hinaus kann ein Schutzbereich als Puffer vor der Grenze definiert werden.

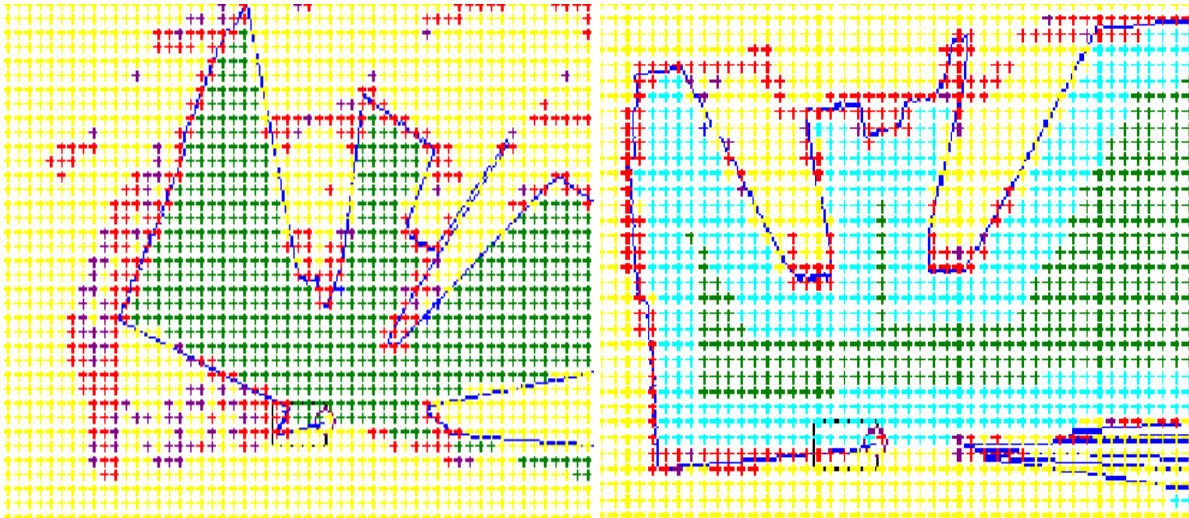


Abbildung 4: Belegungsgitter zur Visualisierung der Freifläche

Weiterhin musste zur Berechnung der Bahn ein Zielvektor bestimmt werden, der in diesem Fall der anzufahrenden Rampe entspricht. Um eine möglichst exakte Positionierung zu gewährleisten, sollte der relative Vektor zwischen Fahrzeug und Rampe ermittelt werden, da die globale Lokalisierung ggf. als nicht ausreichend eingeschätzt wurde. Zur Erkennung sollten entweder die geometrischen Ausprägungen an der Rampe oder angebrachte Reflektoren genutzt werden. Es wurden verschiedene Objekte (Geometrien, Ecken, Rohre, mit/ohne Reflektor) bei unterschiedlichen Bedingungen (Schneefall, Regen, Sonne etc.) getestet. In Abbildung 5 ist ein Testscenario bei Schneefall veranschaulicht.



Abbildung 5: Erkennung von geometrischen Ausprägungen aus Scanpunkten bei Schneefall

Für das Andocken wurde eine notwendige Genauigkeit von 10 cm als Querversatz des Hecks zur Laderampe definiert. Da die Rampen bei Dachser aufgrund der flexiblen Torabdichtungen aus Gummi keine gut geeigneten Merkmale im Sichtbereich der Sensorik aufweisen, wurden für die Praxistests zwei Zylinder als Markenpaar genutzt.

am Ziel wird aus der Pose in `goetting_detection_interface_msgs` generiert. Da es sich um eine feststehende Rampe handelt, wird angenommen, dass der Zielvektor statisch ist.

Eine Tracking-Funktion stützt das Verfahren mittels Odometrie und plausibilisiert die Ergebnisse. Es kommen unterschiedliche Parameter zum Einsatz, die beim Start über einen Parameterserver abgerufen werden können. Weiterhin wurde die Funktionalität geschaffen, zusammengehörige Strukturen mit mehreren getrennten Sensoren erkennen zu können. Somit kann bspw. ein Markenpaar mit zwei Lidar-Sensoren detektiert werden, wobei sich jeweils nur einen Teil der Geometrie im Sichtfeld des Einzelsensors befindet.

Als dritter wesentlicher Bestandteil für die Gesamtfunktion wurde an der online Bahnplanung gearbeitet. Es musste ein Algorithmus entwickelt werden, der unter Berücksichtigung der Freifläche eine fahrbare Verbindung zur Zielpose berechnet. Dabei wurde die aktuelle Position des Fahrzeugs als Startpose genutzt und es mussten die notwendigen Randbedingungen (Fahrzeugkinematik, Kurvenradien, Lenkgeschwindigkeiten, max. Lenkwinkel etc.) berücksichtigt werden. Abhängig vom Start- und Zielpunkt sowie dem Kurvenverlauf ergeben sich unterschiedliche Platzbedarfe und Lenkgeschwindigkeiten.

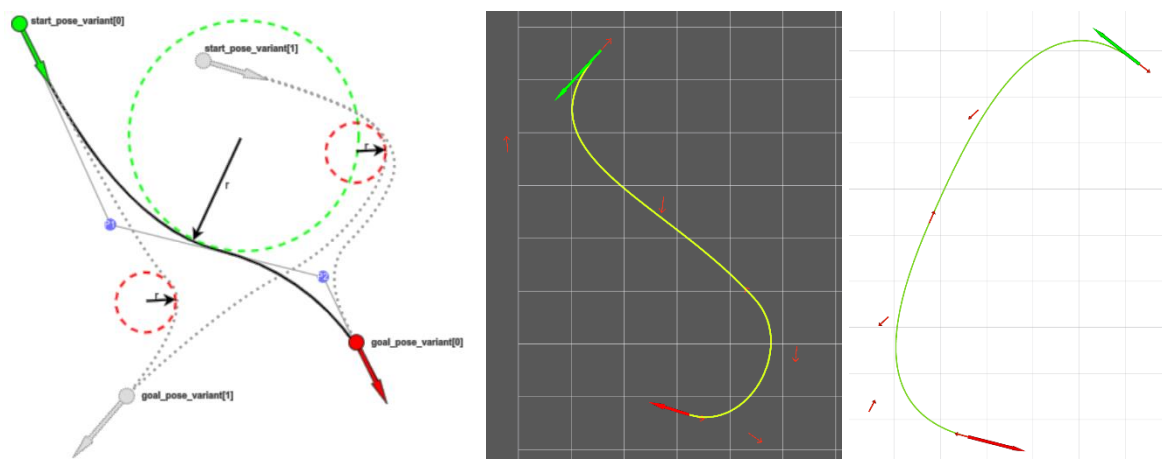


Abbildung 8: Visualisierung verschiedener Ausprägungen der online Bahnplanung

Aufbauend auf den Erkenntnissen wurde die online Bahnplanung weiterentwickelt. Dabei wurden zuerst die Kurven thematisiert, die ohne Fahrtrichtungswechsel eine gültige Bahn zum Ziel ermöglichen. Der minimale Krümmungsradius wird im Wesentlichen von der geplanten Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Mit den berechneten Bahnen wurden verschiedene Fahrversuche durchgeführt. Dabei wurde das Verhalten bei einem statischen und bei einem veränderlichen Zielpunkt berücksichtigt. Letztlich konnten zwei Ansätze für die praktische Umsetzung berücksichtigt werden, um unterschiedlichen Anforderungen genügen zu können.

Erstens wurde ein Programmpaket „Bézier-Planner“ entwickelt. Namensgebend sind die parametrisch modellierbaren Bézierkurven, die sich wegen ihrer mathematisch guten Handhabbarkeit und ihres meist homogenen Kurvenverlaufs gut zur Bahnplanung eignen. Explizit erzeugt dieser Algorithmus eine Bézierkurve vom Polynomgrad 3, d. h. eine Kurve, die von vier

Konstruktionspunkten P0 bis P3 definiert wird. Das Paket besteht aus den drei Komponenten „Bézier-Planner-Library“, „Bézier-Planner-Node“ und „Bézier-Planner-Tool“.

Während die „Bézier-Planner-Library“ die zur Berechnung der Kurve benötigten mathematischen Methoden beinhaltet, übernimmt der „Bézier-Planner-Node“ die Funktion, diese Methoden zu aggregieren und nach außen als Serverkomponente im ROS-Framework zur Verfügung zu stellen. Mit der Separierung der Methoden zur Kurvenberechnung in eine eigene Library wird deren Entwicklung unabhängig von der jeweils eingesetzten Rechnerarchitektur. Die Applikation der Library-Funktionen erfolgt durch eine zentrale Verwaltung mittels eines, auf die Library zugreifenden Servers, der Anfragen von Clients erfasst und bearbeitet. Die dritte Komponente „Bézier-Planner-Tool“ greift als Client auf diesen zuvor beschriebenen Service zu. Außerdem ist er für die Kurvenvisualisierung zuständig. Aus der berechneten Kurve wird eine Liste äquidistanter Punkte erzeugt, die für die externe Schnittstelle benötigt wird.

Zweitens wurde ein Ansatz zur Bahnplanung gewählt, der in der Literatur als Dubins-Pfad bekannt ist. Grundlage ist die kürzeste Kurve, die Start- und Endpose auf einer Ebene unter Berücksichtigung der Krümmung verbindet. Dabei werden Abschnitte von Geraden, Kreisen sowie deren Verbindungen genutzt.

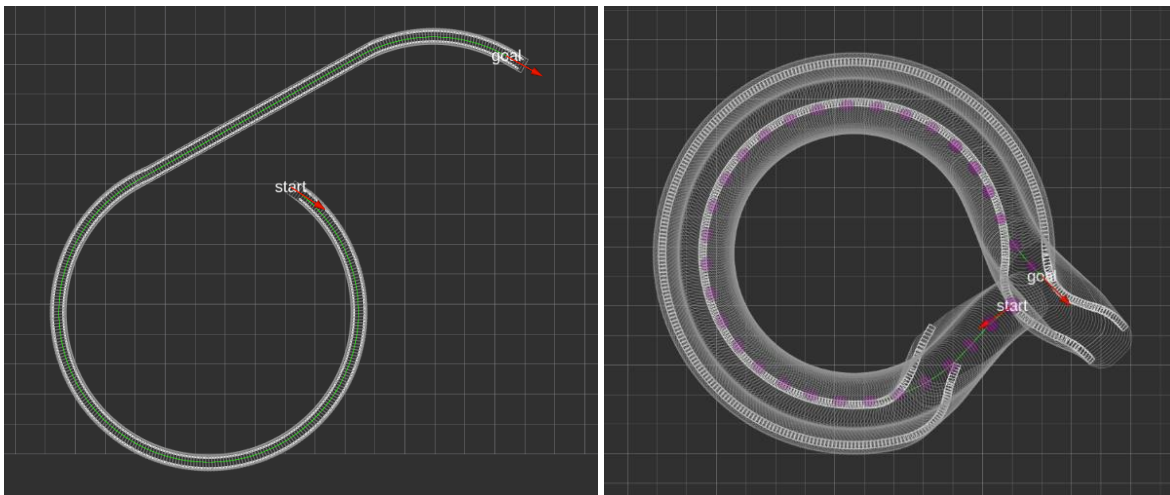


Abbildung 9: Visualisierung einer online Bahnplanung mit dem Ansatz Dubins-Pfad

Neben der primären Aufgabe der Bahnplanung wird auch die Hüllkurve der Bewegung untersucht, so dass die zur Verfügung stehende Fläche mit der Planung abgeglichen werden kann. Weiterhin ist der Krümmungsverlauf der geplanten Bahn entscheidend für die Qualität der Bahn, so dass bspw. bei Übergängen einzelner Segmente keine Sprünge im Soll-Lenkswinkel entstehen. Um die Rückwärtsfahrt mit Anhänger durchführen zu können, wurde neben der Untersuchung der Hüllkurve des Zugfahrzeugs ebenfalls die benötigte Fläche des Anhängers in die Entwicklung einbezogen. Dazu wurde ein kinematisches Modell aufgebaut und visualisiert.

Die Funktionen berücksichtigen u.a. die verfügbare Fahrbahn, Krümmungsverlauf, Kinematik, maximale Lenk- und Knickwinkel sowie eine Geschwindigkeitsvorsteuerung. Es kann zudem ausgewählt werden, ob die benachbarten Parkplätze für die Bahnplanung genutzt werden können

oder ob vollständig innerhalb der zugewiesenen Zone vor der Rampe geplant wird. Zusätzliche Hindernisse können durch Nutzung von Zwischenzielen berücksichtigt werden, wobei insbesondere beim Kamag PT aufgrund der Abmessungen ein sehr geringer Spielraum zur Verfügung steht.

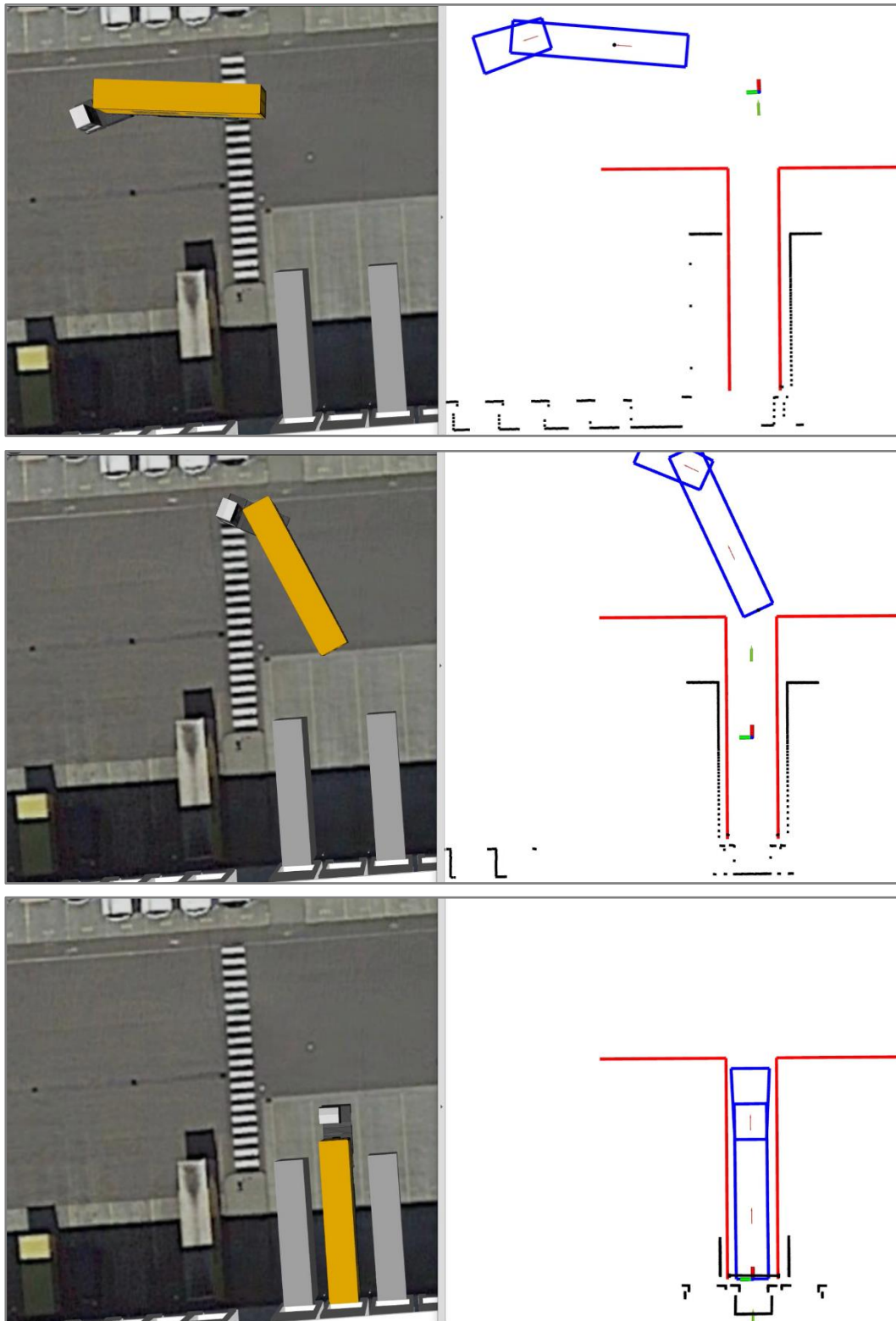


Abbildung 10: Ablauf zum Andocken an eine Rampe mit Anhänger

Die Projektpartner haben sich darauf verständigt, dass das Rangiermanöver in der Regel von links stattfinden soll, da das dem typischen Prozess mit Fahrer entspricht. Bei der Startposition befindet sich das Fahrzeug also auf der entfernten Fahrspur, so dass zwar mehr Platz für die Kurve zur Verfügung steht, aber die Gegenfahrspur gekreuzt werden muss. Für verschiedene Szenarien wurden seitens Götting Vorschläge für Startpositionen gemacht. Sobald eine Prüfung des „Gegenverkehrs“ stattgefunden hat, kann eine Freigabe für die Rückwärtsfahrt erfolgen. Idealerweise findet dann der Vorgang in einem Zug statt, so dass nicht zwischendurch von der Rückwärtsfahrt auf eine Vorwärtsfahrt umgeschaltet werden muss.

Der Startpunkt der lokalen Bahnplanung liegt im Allgemeinen vor der Laderampe, so dass im ersten Schritt eine Strecke geradeaus gefahren werden muss. Ab dem Umkehrpunkt fährt das Fahrzeug rückwärts zur Zielrampe. Bei diesem Abschnitt muss berücksichtigt werden, ob die benachbarten Parkplätze frei sind (und genutzt werden dürfen). Dieser Fall führt zu einer direkteren und schnelleren Lösung. Wenn die Bahnplanung nur im Abschnitt der Zielrampe erlaubt ist, dann kommt es zu einer Neuplanung, bei der der Kurvenradius größer gewählt wird, siehe Abbildung 11 rechts. Neben der in grün dargestellten Soll-Spur für den geregelten Führungspunkt, wird ebenfalls der Fahrtschlauch bestimmt und berücksichtigt. Somit wird auch sichergestellt, dass die äußere Fahrzeugkontur (ggf. zuzüglich Sicherheitsaufschlag) passend verläuft.

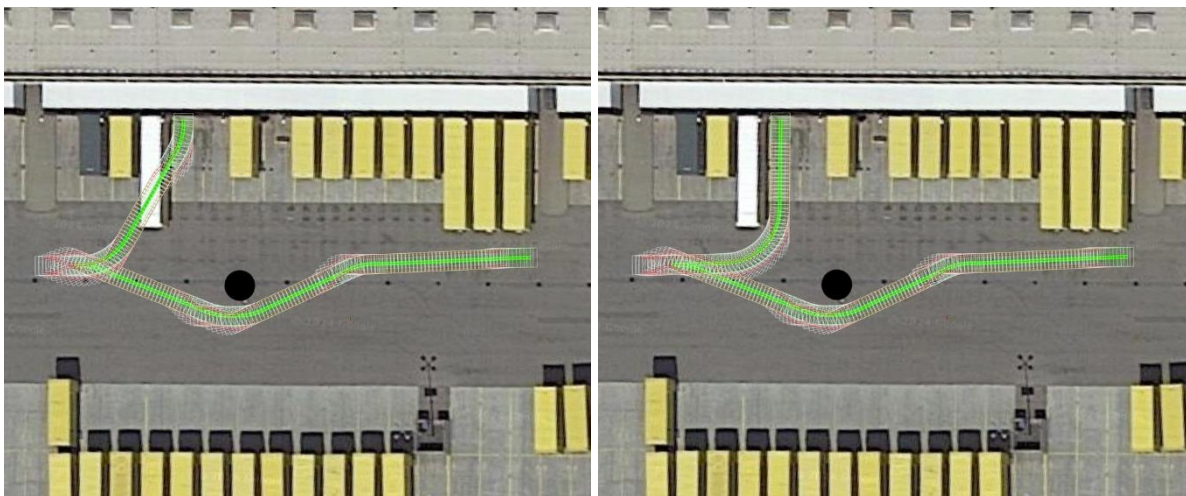


Abbildung 11: Visualisierung der lokalen Bahnplanung zum Anfahren einer Laderampe

Abschließend wurden die einzelnen Funktionen aus diesem AP in einem System integriert und innerhalb der Simulationsumgebung getestet. In Abbildung 12 wird das erkannte Markenpaar mittels einer grünen Verbindungslinie visualisiert. Dabei werden im initialen Suchbereich die Größe der gefundenen Objekte und der Abstand untereinander sowie zur Rampe geprüft. Dadurch können Verwechslungen mit anderen Objekten oder Personen weitgehend ausgeschlossen werden. Im nächsten Berechnungsschritt wird anhand der Fahrzeugodometrie ein neuer Suchbereich festgelegt, so dass Sprünge beim Tracking verhindert werden.

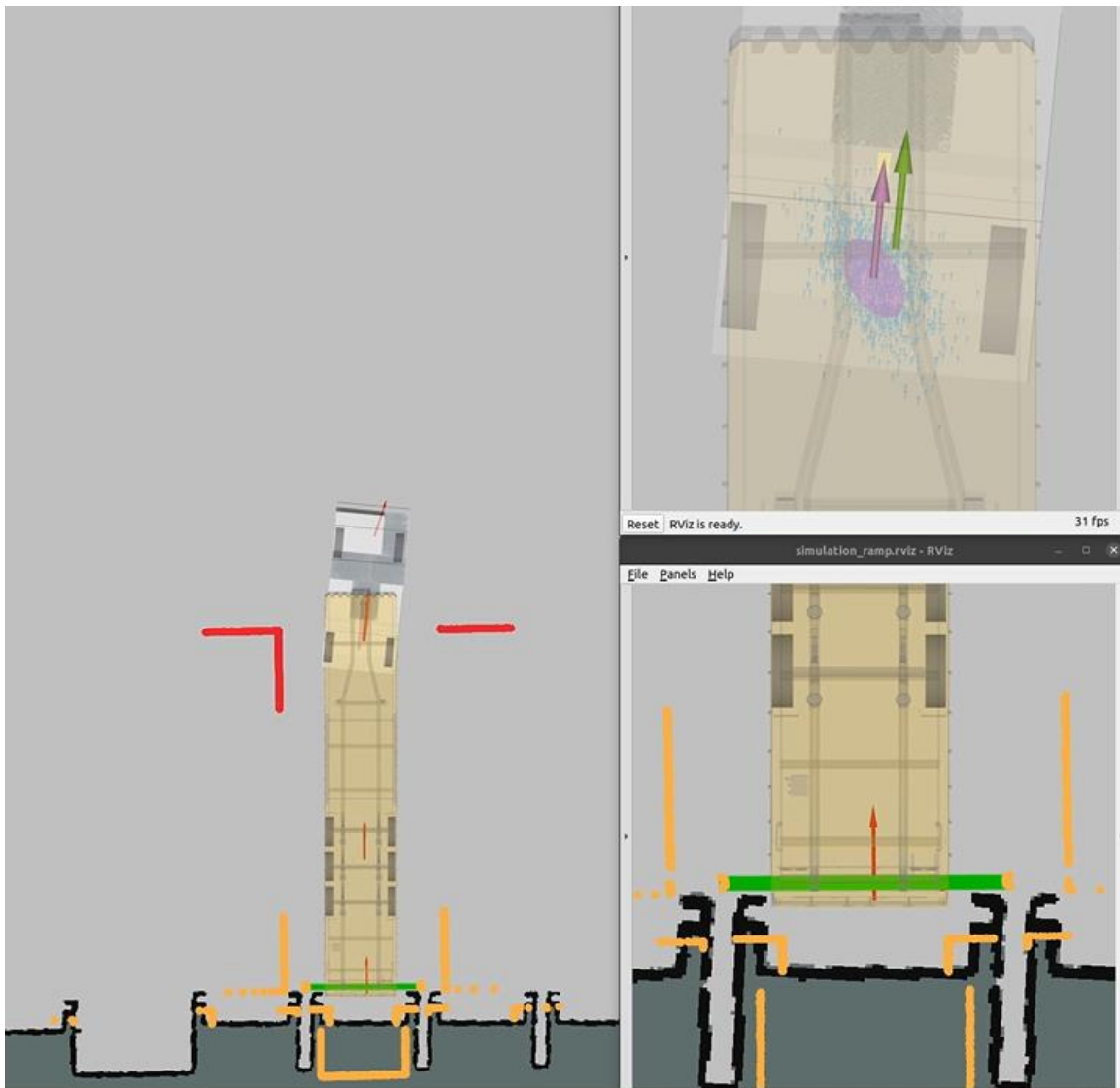


Abbildung 12: Beispielhafter Endzustand mit Markenpaar; Lokalisierung als grüne Verbindungslinie

Aufgrund der eingemessenen Position der Poller können somit die Pose des Lidar-Sensors und anschließend die Fahrzeugpose berechnet werden. Dies beinhaltet ebenfalls eine Aussage über den Winkel, der für die Zielpose sehr relevant ist.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 13 eine beispielhafte Szene, bei der keine Marken an der Rampe eingesetzt werden. In der Endposition gibt es einen deutlichen Querversatz sowie einen ungeeigneten Winkel zur Rampe.

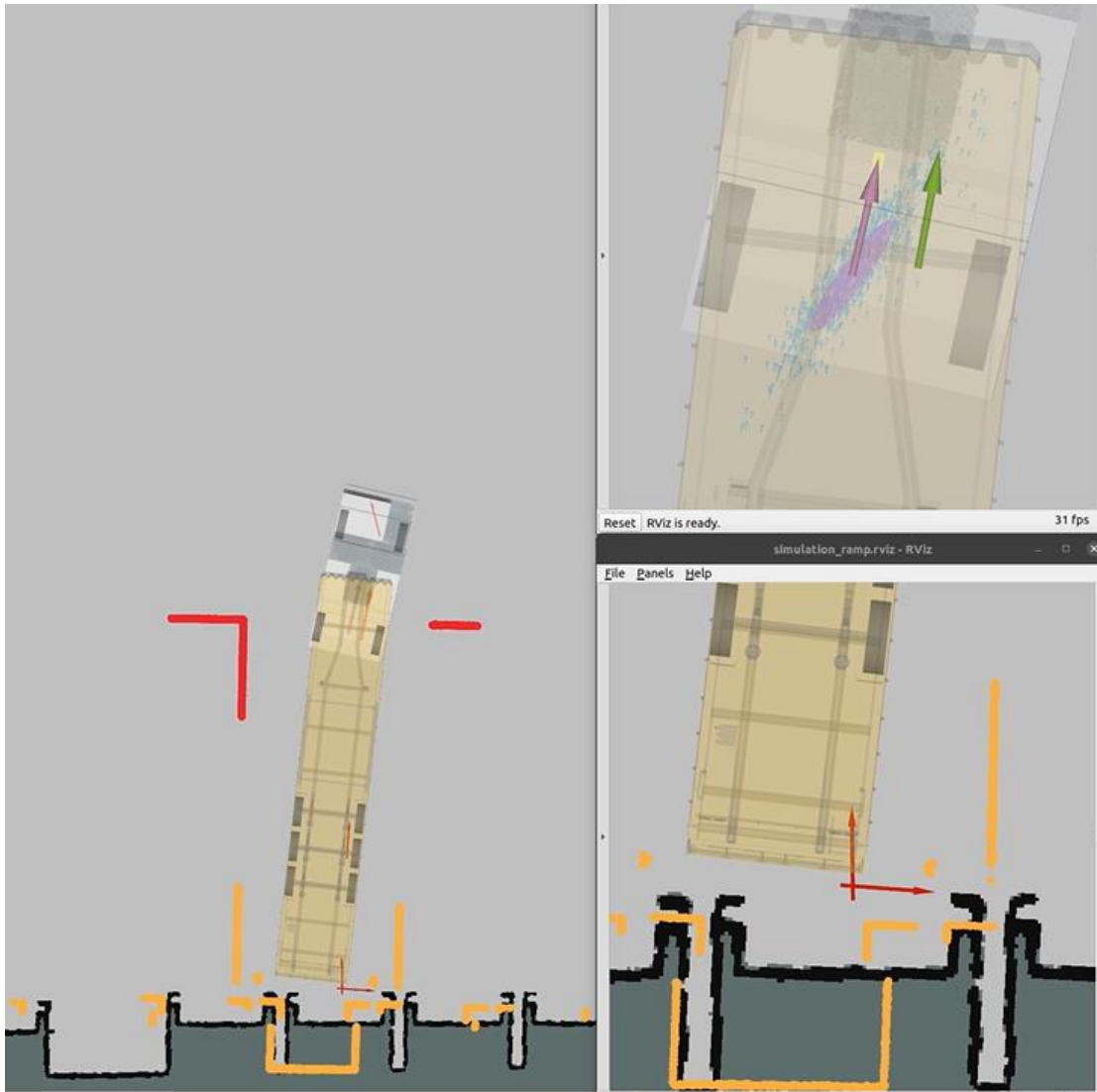


Abbildung 13: Beispielhafter Endzustand ohne Nutzung von Marken

Die Berechnung des Peilungsverfahrens zur relativen Ortung der Rampe wurde nachfolgend mit dem Fusionssystem verarbeitet (siehe AP 4.10). Dazu wurden die übrigen absoluten Lokalisierungsinformationen (Lidar-Lokalisierung/GNSS) zu einem Gesamtergebnis fusioniert. Dabei ist eine Parametertuning entscheidend, welche Informationen bei welchen Bedingungen unterschiedlich stark gewichtet werden. Mit den aktuellen Bedingungen kann die Rampe ab einem Abstand von ca. 8 m erkannt werden. Eine Berechnung erfolgt dabei innerhalb weniger Millisekunden.

Somit wurde erfolgreich eine Möglichkeit geschaffen, die Stärken der unterschiedlichen Verfahren zu einer fusionierten Information zu verarbeiten, die anschließend an die Fahrzeugregelung übergeben werden konnte (siehe AP 4.7 und AP 4.9).

2.1.5 Sicheres automatisches Handling Semi-Trailer (AP 4.7)

Die Götting KG hat in diesem AP das Regeln des Sattelzugs mit dem Kamag PT (ehem. TruckWiesel) an eine Rampe verantwortet. Die automatische Regelung eines rückwärtsfahrenden Anhängers bedingt ein präzises Wissen über einige Messgrößen, insbesondere Pose des Zugfahrzeugs, Knickwinkel zwischen Zugfahrzeug und Sattelaufleger sowie der Vektor zum Ziel. Die notwendige Sensorik zu den einzelnen Messgrößen wurde von den Projektpartnern integriert. Die Auswertung und anschließende zielgerichtete Regelung wurden von der Götting KG durchgeführt.

Um unabhängig vom Kamag PT mit der Entwicklung beginnen zu können, wurde zu Beginn des Projekts seitens der Götting KG ein Testfahrzeug umgerüstet und mit einem Testanhänger versehen. Kinematisch entspricht das Modell der angestrebten Anordnung. Zwischen Fahrzeug und Anhänger wurde ein genauer Knickwinkelsensor angebracht, so dass erste praktische Versuche der aktiven Regelung beim Rückwärtsfahren durchgeführt werden konnten. Es wurden drei Konzepte zur Bestimmung des Zielvektors evaluiert: (1) Sensor am Zugfahrzeug – globale Positionierung, (2) Sensor am Heck des Anhängers und (3) stationärer Sensor am Ziel.

Für jedes Konzept wurden Messreihen durchgeführt, um die jeweiligen Vor- und Nachteile bestimmen zu können. Als wichtigste Kenngröße wurden Messungen der Genauigkeiten im Zielpunkt durchgeführt (bestehend aus Abstandsmessungen der beiden Räder des Anhängers jeweils zu einer senkrecht sowie zu einer parallel zur Rampe befindlichen Bodenlinie). Daraus wurden die verschiedenen Längs- und Querabweichungen am Fahrziel dokumentiert. Als Sensoren wurden LMS1xx mit 0,25° Auflösung genutzt.

Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass die Nutzung des Sensors am Heck (mobile Peilung) die größte seitliche Streuung erzeugt hat. Die höchste Streuung der Längsposition tritt beim Verfahren der globalen Lokalisierung mit dem Sensor am Zugfahrzeug auf.

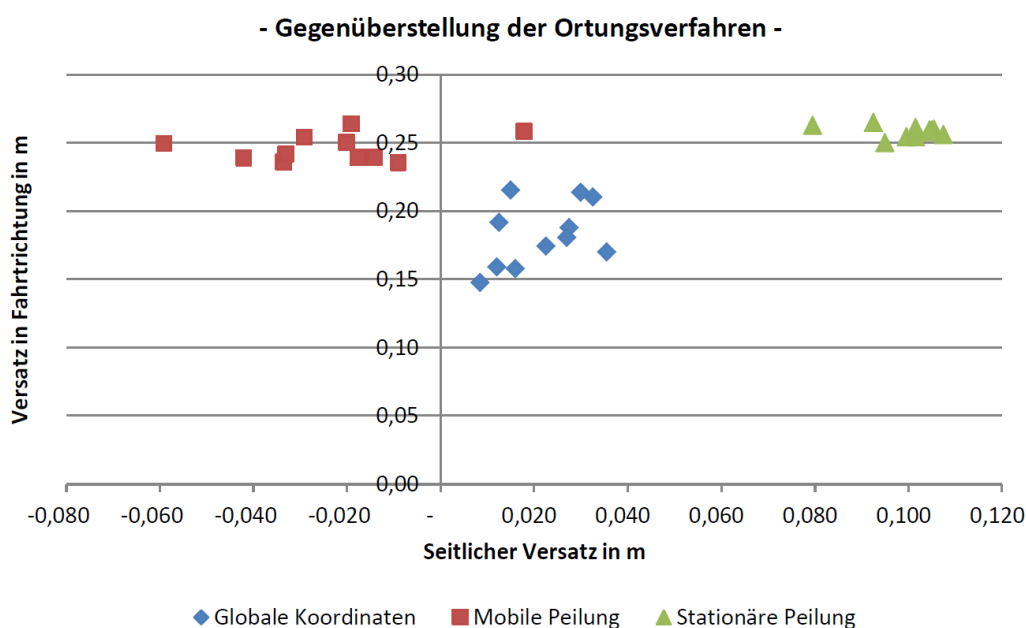


Abbildung 14: Beispielhafte Messreihe zur Untersuchung der Genauigkeit

Die eingezeichneten Endpositionen der Navigationssoftware geben Auskunft darüber, wie gut die Endposition innerhalb des jeweiligen Koordinatensystems zum Zeitpunkt des Stopps erreicht werden konnte. Bei Verwendung der globalen Koordinaten ist der Mittelwert des seitlichen Versatzes um ca. +2 cm verschoben, während bei der mobilen Peilung die seitlichen Abweichungen um ihren Mittelwert von ca. -2,5 cm gruppiert sind. Dieser Effekt lässt sich daraus erklären, dass insbesondere die seitlichen Positionen der Hinterachse des Zugfahrzeugs bei höherem Abstand zum Ziel mit einer relativen Peilung ungenauer bestimmbar sind, als es bei der vorhandenen globalen Ortung der Fall ist.

Der in der vorangegangenen Untersuchung aufgetretene seitliche Versatz des Mittelwerts konnte durch eine Kalibrierung des Knickwinkel-Sensors auf etwa die Hälfte reduziert werden. Die Ergebnisse durch Veränderung der Regelungsparameter unterscheiden sich nur geringfügig.

Ebenfalls wurde die Erreichung des Zielwinkels durch die Navigationssoftware untersucht. Als Zielwinkel ist ein Wert von 90 Grad zur Front der Marke vorgegeben, der am besten von der Navigation nach globalen Koordinaten erreicht wurde.

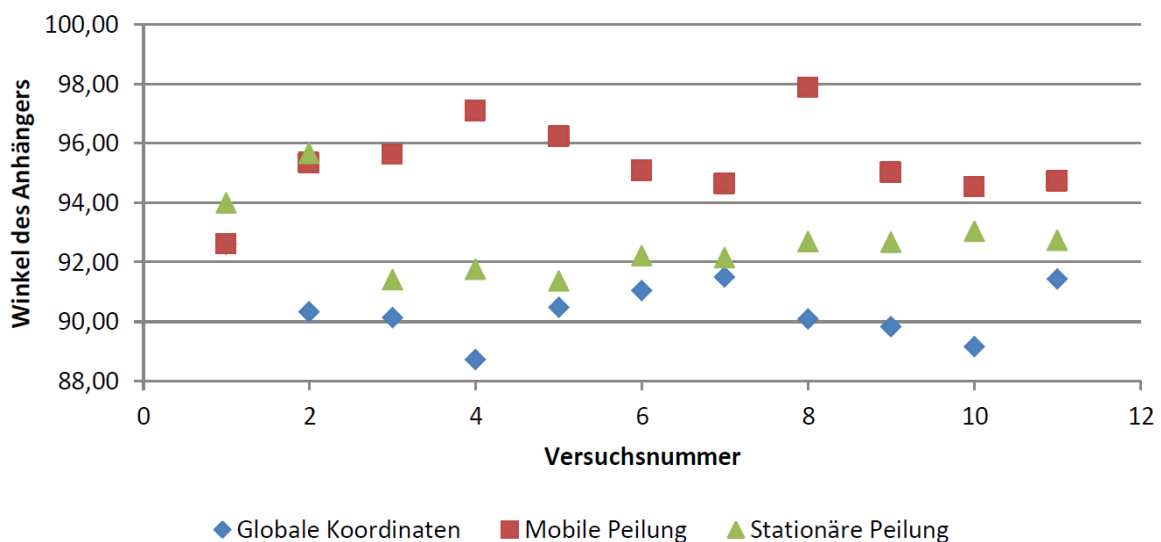


Abbildung 15: Beispielhafte Messreihe zur Untersuchung der Winkelgenauigkeit

Um die Integration der einzelnen Bestandteile der Partner voranzutreiben, wurde gemeinsam mit den Partnern ZF und Kamag an der Architektur des Zielsystems gearbeitet. Unter anderem wurde intensiv die Architektur für Ethernet und ROS sowie die Einbindung und Nutzung verschiedener PCs in zahlreichen Workshops besprochen. Für die SW-Funktionen der Firma Götting wurden mobiltaugliche Industrie-PCs beschafft und vorbereitet.

Anschließend wurde die Schnittstelle auf Seite der Götting KG zur Regelung des Kamag PT entwickelt. Die Schnittstelle ist notwendig, um die online geplanten Bahnen mit dem Fahrzeug umsetzen zu können.

Zum einen wurde eine verallgemeinerte Beschreibung der geplanten Bahn zur Verfügung gestellt, mit der bspw. äquidistante Stützpunkte zur Regelung berechnet werden können. Die Trajektorie wird

in einer Schnittstelle als ein Array übertragen, das aus den einzelnen Posen entlang des Pfades besteht. Dabei hat jede Pose sechs Freiheitsgrade, wodurch sowohl eine zwei- als auch dreidimensionale Beschreibung realisiert werden kann. Die Reihenfolge der einzelnen Posen beginnt am Fahrzeug und wird zum Ziel hochgezählt. Durch diese Eigenschaft der Schnittstelle kann beispielsweise ein Zwischenziel bestimmt werden, bis zu dem gefahren werden kann, während ab dem Zwischenziel eine Neuplanung geprüft wird.

Zum anderen bietet der Kamag PT eine spezielle, seitens ZF implementierte Schnittstelle „Adopt“ an. Zur Bedienung der Schnittstelle transferiert der Algorithmus die Informationen der geplanten Bahn, zyklisch in eine Kette von Posen mit zugeordneten Soll-Zeitpunkten und -geschwindigkeiten und überträgt diese an das Fahrzeug. Folgende Werte wurden für die Adopt Schnittstelle berechnet und übertragen: State, Control Mode, Control Priority, Weight Min / Max, Adopt In Location, Adopt In Destination Point.

Zur Umsetzung gab es mehrere Workshops vor Ort in Jevern auf der Teststrecke von ZF, um die Technologie von Götting zu integrieren und zu testen. Dabei wurde auch der IPC für die Softwarekomponenten der Götting KG eingebaut und in Betrieb genommen.

Als eine der wesentlichen Grundlagen der Lokalisierung wurde das GNSS für das Fusionssystem der Götting KG eingerichtet. Dabei kommen Antennen sowie ein Empfänger der Firma Trimble zum Einsatz.



Abbildung 16: Mess-/Testfahren bei Workshop in Jevern

Bei verschiedenen Mess- und Testfahrten mit und ohne Anhänger wurde das Fahrverhalten untersucht sowie Überarbeitungen an der Software abgeleitet. Die Funktionen zur Lokalisierung im Kamag PT wurden im Projektverlauf durch die Einbindung von zwei Lidar-Sensoren, der Odometrie, und des Knickwinkels zwischen Zugmaschine und Anhänger ergänzt. Somit konnte das angestrebte Fusionssystem zur Bestimmung der Position und Orientierung vollständig integriert werden.

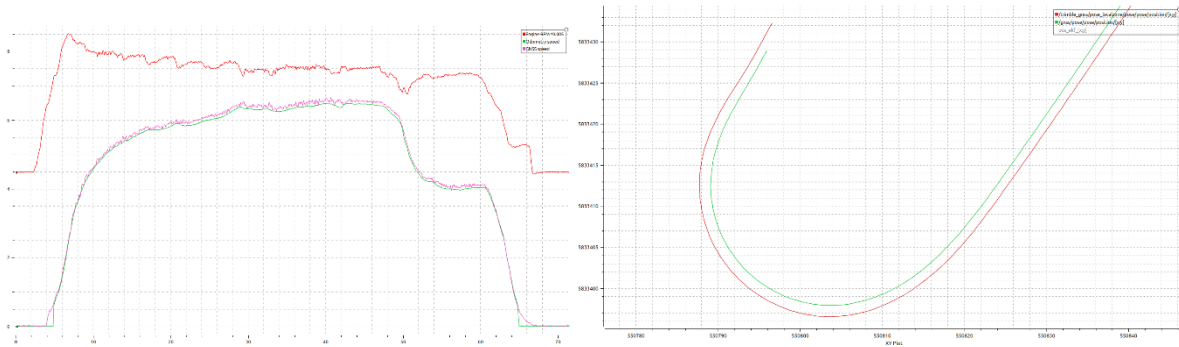


Abbildung 17: Beispielhafte Untersuchungsergebnisse zur Lokalisierung und Odometrie

Ebenfalls konnte die Adopt Schnittstelle zur Steuerung des Fahrzeugs schrittweise integriert werden. Dazu wurden erst Testdaten (rosbags) ausgetauscht und später am Fahrzeug getestet. Bei späteren Treffen im Projektverlauf konnte das Fahrzeug durch die Software der Götting KG zum Ziel gesteuert werden.



Abbildung 18: Visualisierung der Ziel-Posen (grüne Dreiecke) für die Adopt Schnittstelle

Aufgrund der Kaskadierung mehrerer Regler hat sich dabei allerdings ein wenig reaktives Verhalten gezeigt. Um den Integrations- und Testaufwand für die beteiligten Partner niedrig zu halten, wurde für die Tests bei Dachser (AP 8) beschlossen, dass ZF selbst das Fahrzeug während des Rangiervorgangs an die Rampe regeln soll. Somit wurde für diesen Anwendungsfall seitens Götting lediglich die Lokalisierung mittels der erkannten Rampe fusioniert, so dass die Regelung in der Nähe der Rampe präziser wird. Die notwendigen Entwicklungsleistungen in diesem AP konnten somit erfolgreich abgeschlossen werden.

2.1.6 Sicheres Handling Verteiler-Lkw (AP 4.9)

Analog zu AP 4.7 war die Götting KG in diesem AP für das Rangieren des Verteiler-Lkw an die Rampe verantwortlich. Als Ergebnis wurden Soll-Werte für die Quer- und Längsregelung des Fahrzeugs während der Annäherung an die Rampe erwartet.

Die fahrzeugunabhängigen Teilfunktionen der Bahnplanung und der Peilung beim Rückwärtsfahren (AP 4.5) konnten ebenfalls für dieses Arbeitspaket genutzt werden. Für die Entwicklung der fahrzeugspezifischen Software für den AutoTruck seitens Götting wurden mehrere Videokonferenzen mit dem Fraunhofer IVI durchgeführt. Dabei wurde ein Konzept zum Ablauf, zur Steuerung sowie eine Architektur erarbeitet.

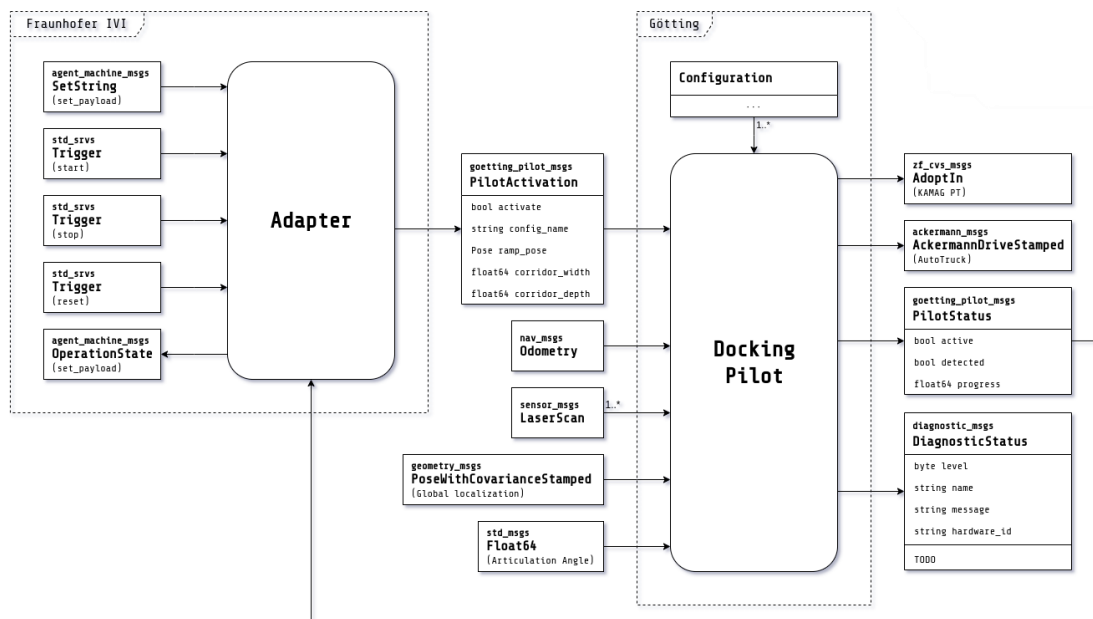


Abbildung 19: Architektur zur Ansteuerung des AutoTruck beim Rangieren an eine Rampe

Im Projektverlauf wurde allerdings nicht mit der praktischen Umsetzung und der Integration am Fahrzeug angefangen, da sich der AutoTruck bis zuletzt im Zustand einer umfangreichen Überarbeitung/Reparatur befunden hat. Deshalb wurde zeitweise an der Schnittstelle für ein Ersatzfahrzeug (Framo Lkw) mit der gleichen Architektur gearbeitet. Da seitens des IVI die Verfügbarkeit nicht zeitgerecht angeboten werden konnte, war es der Götting KG im Projektverlauf nicht mehr möglich praktische Arbeiten am Fahrzeug durchzuführen. Stattdessen wurde ein Simulationsmodell vom Framo Lkw mit den erarbeiteten Schnittstellen geschaffen (Abbildung 20).



Abbildung 20: Simulationsmodell Framo LKW und Umgebung Dachser

Das Modell entspricht hinsichtlich Sensoren, Maßstäben und Kinematik der realen Vorlage, so dass die Regelungstechnik so realistisch wie möglich getestet werden konnte. Lediglich die zeitlichen Bedingungen (Laufzeitverhalten der Nachrichtenpakete, Delay in der Fahrzeugsteuerung etc.) konnten nicht vollständig abgebildet werden.

Darauf aufbauend wurde (wie im vergleichbaren AP 4.7 für den Kamag PT) eine informatorische Kette aufgebaut, die erstens die Lokalisierung ermöglicht, zweitens die Peilung auf die Rampe fusioniert, drittens eine online Bahnplanung ermittelt und viertens fortlaufend die Regelung des Fahrzeugs durchführt.

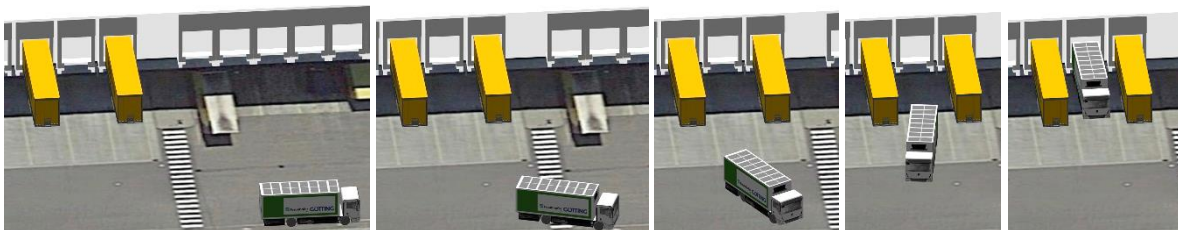


Abbildung 21: Ablauf Rampenanfahrt, von links nach rechts

Beim Start der Rückwärtsfahrt ist der Abstand zwischen Sensor am Heck und Rampe zu groß für eine Erkennung. Zudem könnte es situationsabhängig der Fall sein, dass die Sicht auf die Geometrie der Rampe durch benachbarte Stellplätze versperrt ist. Deshalb beginnt die Rückwärtsfahrt mit der globalen Lokalisierung bis Abstand und Winkel eine Erkennung der Rampe und somit eine Fusion der Information ermöglichen. Abbildung 22 zeigt beispielhaft einen erfolgreichen Endzustand bei der simulierten Rampenanfahrt mit dem Framo LKW.

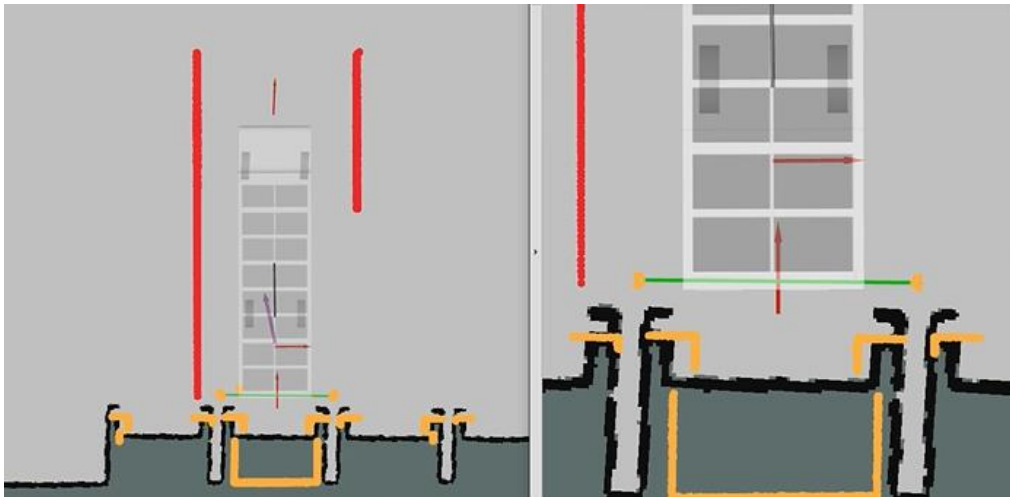


Abbildung 22: Erfolgreicher Endzustand mit erkannten Marken; grüne Verbindungslinie

Abbildung 23 zeigt beispielhaft einen Endzustand bei einer simulierten Störung der globalen Pose und ohne Peilungsverfahren. Das schlechtere Ergebnis ohne zusätzliches Peilungsverfahren ist dabei deutlich zu erkennen.



Abbildung 23: Beispielhafter Endzustand ohne Peilungsverfahren

2.1.7 Hochverfügbare Ortung mittels Fusionssystem (AP 4.10)

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

Zu Projektbeginn wurde ein Testfahrzeug der Götting KG mit einem Satellitennavigationssystem und einem 3D-Lidar ausgerüstet, so dass beide Systeme an einem Fahrzeug zur Verfügung standen. Dazu wurden die notwendigen mechanischen und elektrotechnischen Arbeiten durchgeführt. Zudem wurde auf dem Außengelände der Götting KG mittels eines SLAM-Verfahrens eine 2D-Karte als Grundlage für die Bestimmung der Pose erzeugt. Somit konnten erste Messdaten aufgenommen werden, die zur Entwicklung genutzt wurden.

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



Abbildung 24: Fahrzeugmodell des Kamag PT mit Anhänger

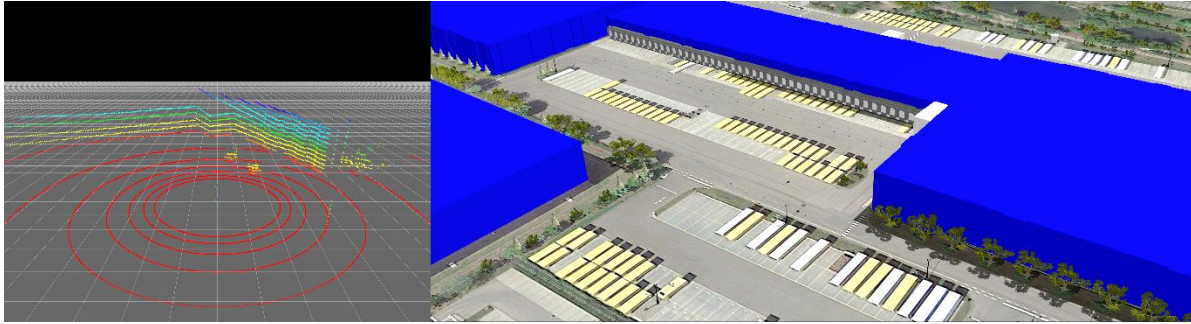


Abbildung 25: Simulationsumgebung vom Betriebshof Dachser in Langenau

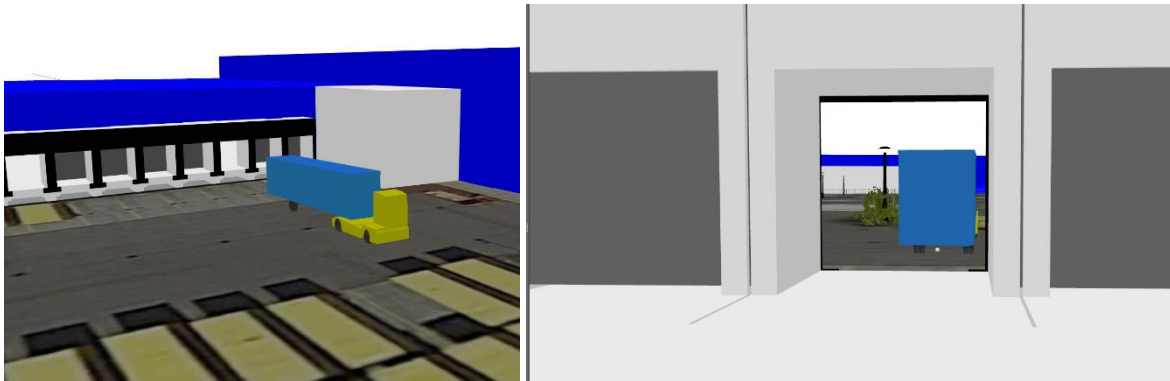


Abbildung 26: Innen- und Außenansicht von Verladetoren bei Dachser in Gazebo

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

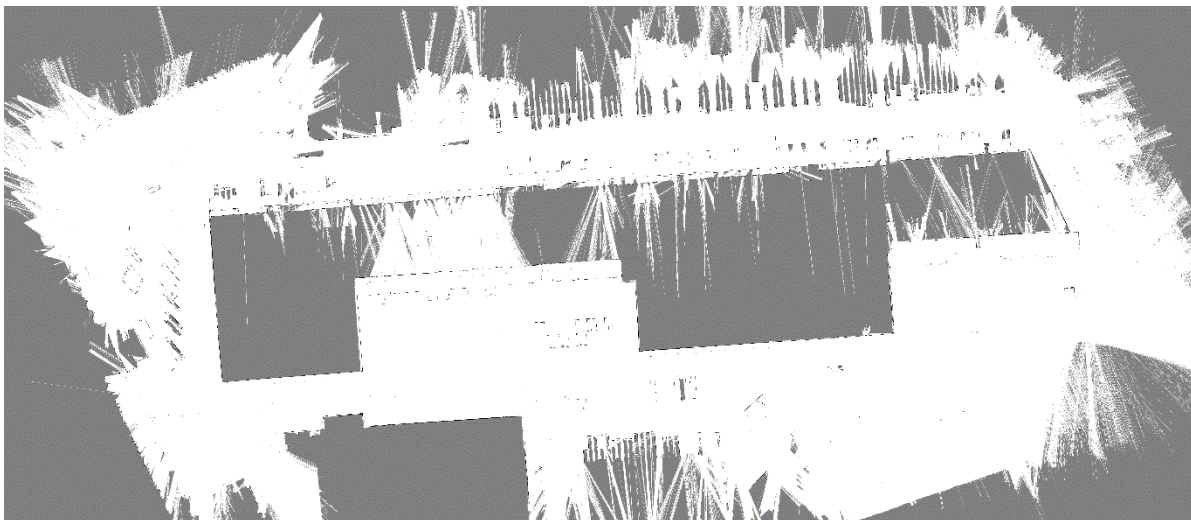


Abbildung 27: Karte des Betriebsgeländes von Dachser in Langenau

Anhand der Modelle konnten Bereiche mit guten oder schlechten Eigenschaften der einzelnen Fusionsbestandteile identifiziert werden. Beispielsweise können Orte mit schwierigen Bedingungen für die Lokalisierung mittels Lidarsensoren (z. B. keine Konturen oder weit entfernt, hohe Dynamik, Verdeckungen) bestimmt werden, so dass dort eine niedrige Gewichtung dieses Bestandteils in die

Fusion eingeht. Folgende Grafik zeigt die Eignung der Flächen ohne Berücksichtigung der Dynamik (verdeckte Sicht durch stehende oder fahrende Wechselbrücken/Trailer, andere Fahrzeuge).

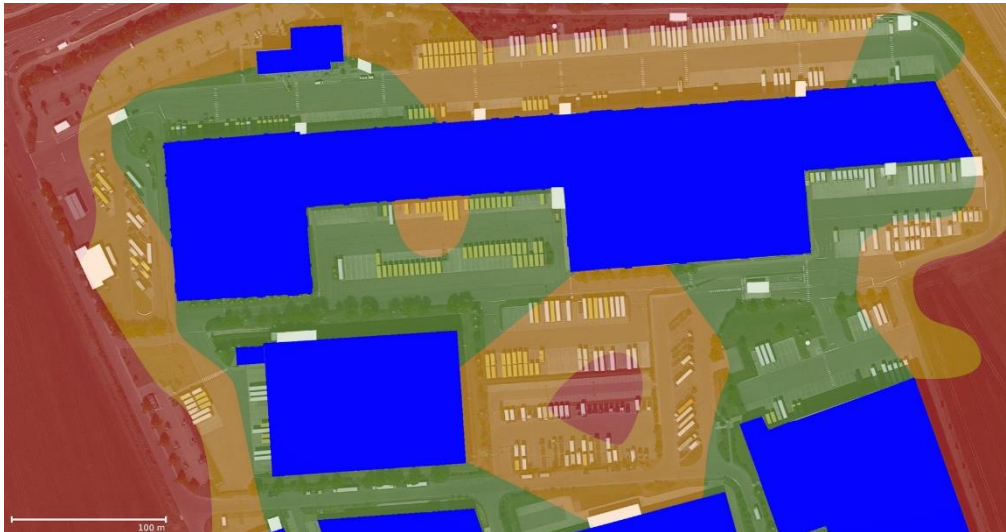


Abbildung 28: Eignung der Laserlokalisierung am Standort von Dachser

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

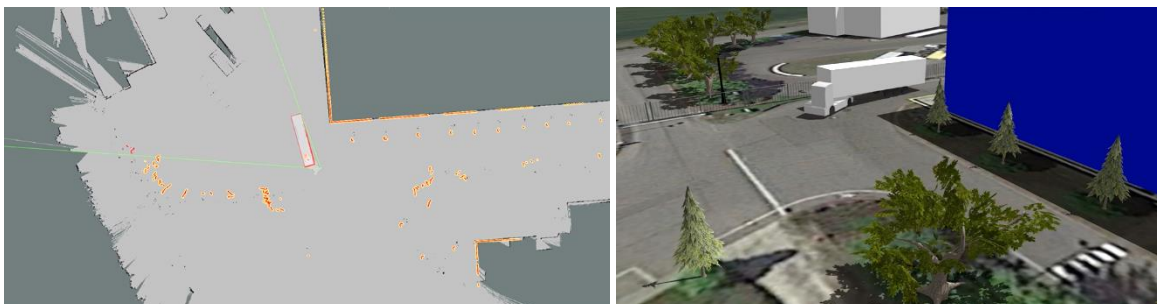


Abbildung 29: Visualisierung der Lidar-Lokalisierung mit PFL

Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit ohne Einschränkungen der Verfügbarkeit wurden verschiedene Maßnahmen analysiert und eingeführt. Für die Lidar-basierte Komponente wurde die

Winkelabhängigkeit des Sichtbereichs (Field of View – FOV) betrachtet. Da es durch die Auswahl der Sensorik oder die Anbringung am Fahrzeug Einschränkungen des Öffnungswinkels geben kann, wurde die Auswirkung auf die Genauigkeit methodisch untersucht. In günstigen Umgebungen kann im Allgemeinen ein Öffnungswinkel zwischen 180° und 360° als ausreichend angesehen werden. Mit 90° FOV sind die Ergebnisse in vielen Umgebungen nicht mehr ausreichend für eine Regelung des Fahrzeugs. Mit den Ergebnissen wurde das Konzept zur Fusion der Pose entsprechend angepasst.

Als weitere Maßnahme zur Stabilisierung der Pose wurde eine Funktion zur Berechnung einer Odometrie aus Lidardaten entwickelt. Diese Lidarodometrie wird als zusätzlicher Bestandteil der Fusion genutzt. Die Anwendung der Lidarsensoren ermöglicht eine fahrzeugunabhängige Berechnung ohne Radencodier und ist insbesondere vorteilhaft bei blockierten oder rutschenden Rädern (z. B. bei einer Notbremsung). Zur Berechnung wird die Distanz und Drehung von Features in aufeinanderfolgenden Scans verfolgt, um so einen Rückschluss auf die Bewegung des Sensors (und somit letztlich des Fahrzeugs) ziehen zu können.



Abbildung 30: Ergebnis der Lidarodometrie (blau) berechnet für die Messdaten einer simulierten Fahrt (rot)

Weiterhin wurde die Software des Lokalisierungssystems mit einem Filter für mitbewegte Anbauteile (z. B. Anhänger) erweitert. Der vorrangige Zweck ist die Entfernung des Trailers aus dem Laserscan, damit die Lokalisierung (insbesondere das online Mapping) nicht verschlechtert wird. Die Funktion nutzt als Input die Kontur, sowie ggf. den Drehpunkt und den Knickwinkel der auszublenkenden Objekte. Die Kombinierbarkeit mit anderen Laserfiltern oder eine Mehrfachnutzung ist gegeben.

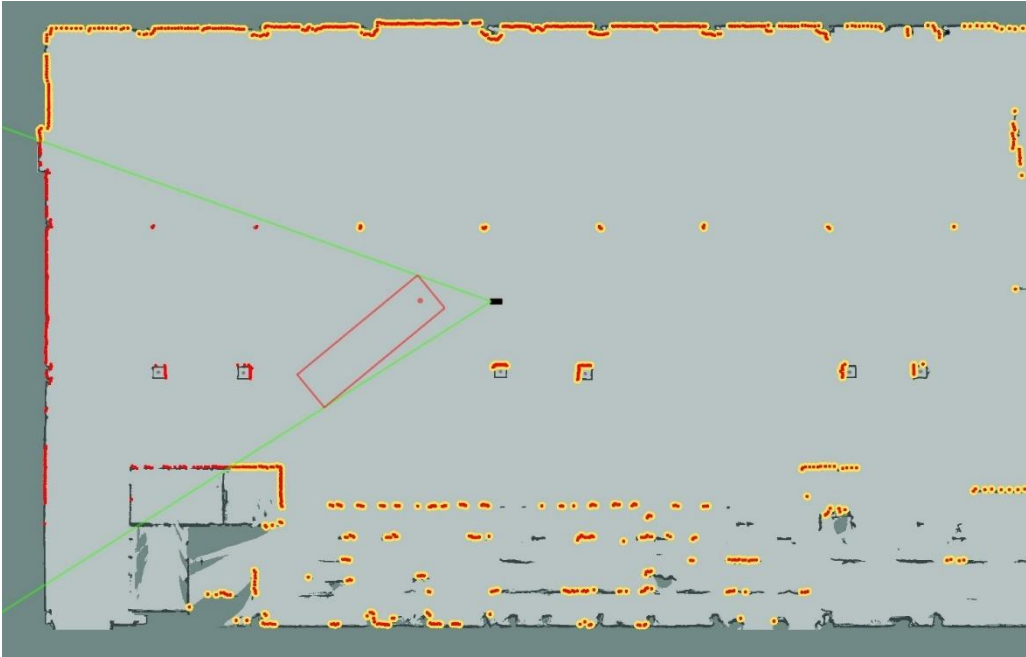


Abbildung 31: Visualisierung eines Filters für Trailer (rote Punkte: input; gelbe Punkte: output)

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

Nach Absprache mit den Projektpartnern wurde im Projektverlauf beschlossen, dass das relative Peilungsverfahren zur Erkennung der Rampe als weitere Eingangsquelle in das Fusionssystem einbezogen werden soll. Da es an diesem Ort auf eine besonders hohe Präzision ankommt, wurde die Pose im Bereich des Andockvorgangs mit der Rampeninformation fusioniert. Bei der Fusion ist eine Parametertuning entscheidend, welche Informationen bei welchen Bedingungen unterschiedlich stark gewichtet werden.

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

Um ortsabhängige Funktionalitäten des Fusionssystems realisieren zu können, wurde ein Zonenmanager entwickelt. Somit können Ereignisse beim Betreten, während des Aufenthalts oder beim Verlassen einer definierten Zone ausgelöst werden. Ebenfalls können unterschiedliche Parametersätze in Abhängigkeit der Position geladen werden. Dies ist bspw. für die Nutzung

verschiedener Gewichtungsfunktionen für die Eingangsquellen des Fusionssystems notwendig. Der Zonenmanager bietet folgende Funktionen:

- Storage Backend für 2D Zonen (Polygone)
- Zonen können beliebige Properties haben
- Periodische Auswertung der Zonen anhand der Fahrzeugposition; vektorbasiert
- Motion Filter
- Events; u. a. das Betreten, Verlassen oder Aktualisieren einer Zone
- Automatische Zustandsaktualisierung
- Visualisierung mit RViz
- Dynamic Reconfigure

Was genau beim Betreten oder Verlassen einer Zone geschehen sollte, wurde in separaten Clients festgelegt. Diese abonnieren die Events und können dementsprechend darauf reagieren. Der Fokus beim Zonenmanager lag auf der Event-Erzeugung, nicht auf geometrischen Operationen mit den Zonen. Die Events ermöglichen eine Konfiguration des ROS-Systems und die Umschaltung von Lokalisierungsquellen während der Laufzeit.

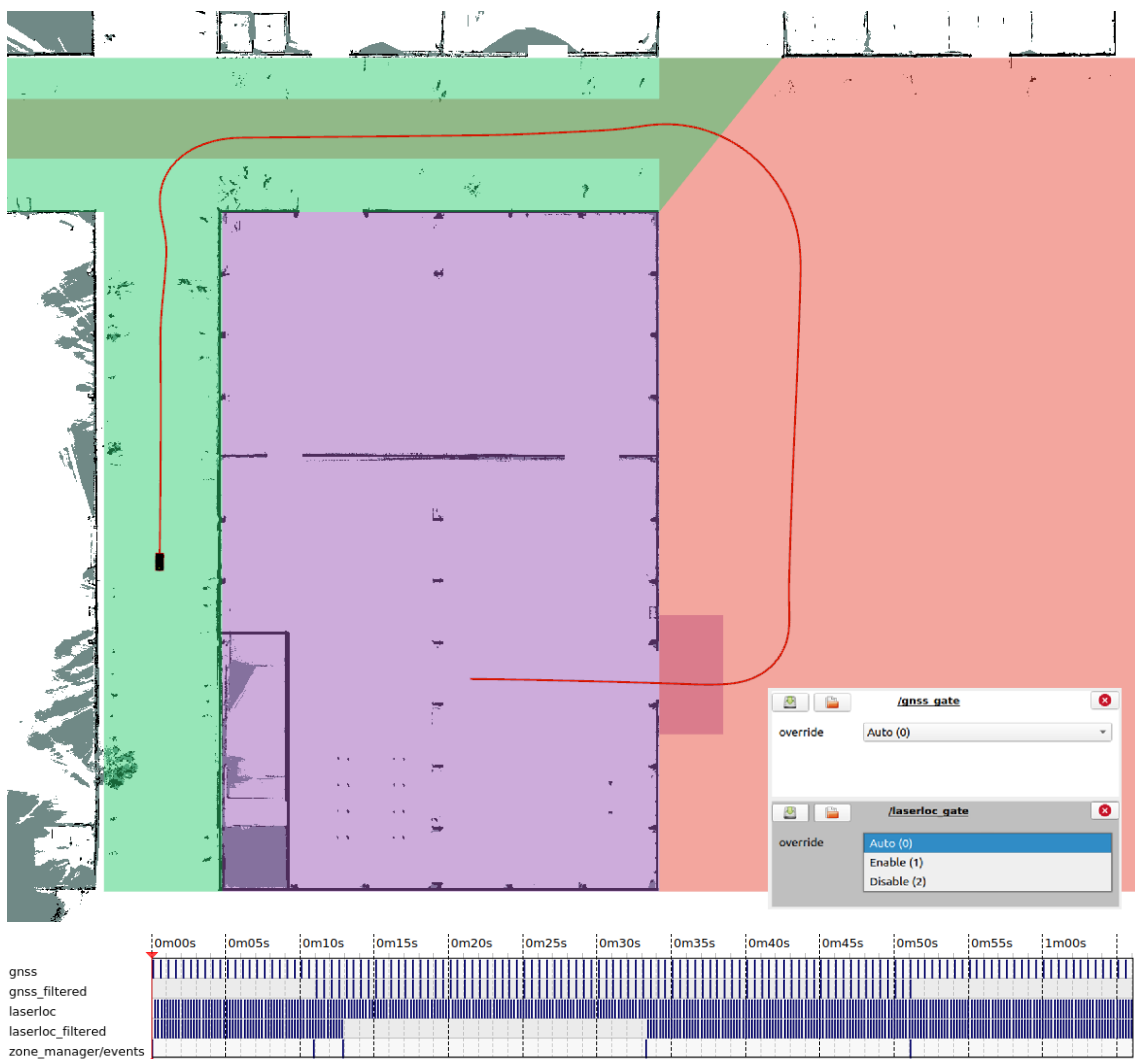


Abbildung 32: Visualisierung des Zonenmanagers

Ergänzend wurde im Projektverlauf an der Bestimmung eines Qualitätsindikators für das Lokalisierungssystem gearbeitet. Das Ziel war es, den Status des Fusionssystems für die verbundenen Steuerungen in einfacher Weise darzustellen, damit eine entsprechende Reaktion erfolgen kann. Bspw. sollte bei einer unzureichenden Genauigkeit der Pose entsprechend die Geschwindigkeit des Fahrzeugs vermindert werden. Dazu werden die einzelnen Informationen des Lokalisierungssystems miteinander verglichen und deren zeitlicher Verlauf plausibilisiert. Als Ergebnis können Aussagen zur Wahrscheinlichkeit und Qualität getroffen werden.

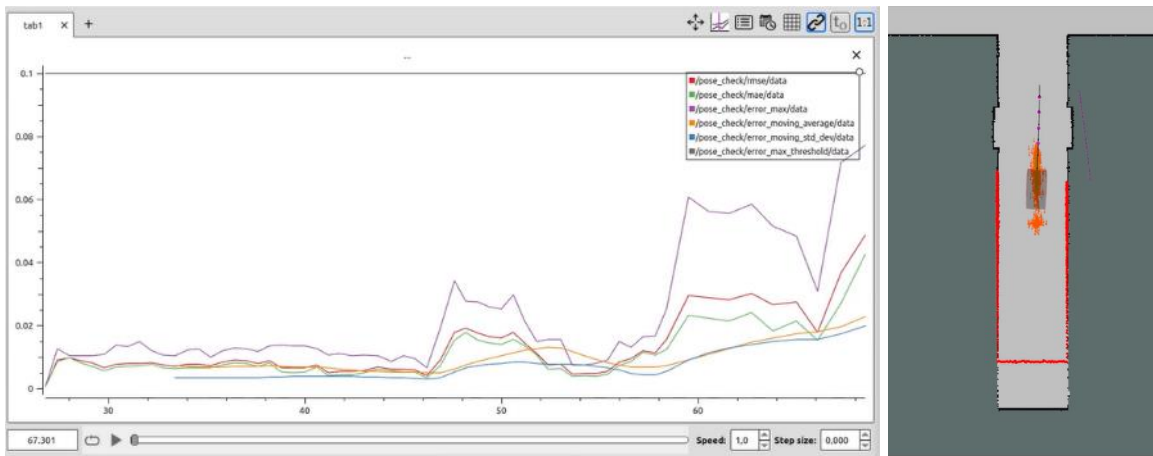


Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der Qualität der Lidar-Lokalisierung mit aktueller Szene (rechts)

Zur Vereinfachung der Komplexität gibt der Laser Quality Indicator (LQI) dann mittels einer ternären (dreiwertigen) Logik ein Lokalisierungsstatus aus.

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

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

2.1.8 Test der Automatisierungsfunktionen (AP 7.4)

Das Ziel des AP war es, dass das entwickelte Lokalisierungssystem der Götting KG als Einzelkomponente in unterschiedlichen Szenarien getestet wird.

Hinsichtlich der Fahrzeuglokalisierung wurden verteilt über mehrere Treffen dedizierte Versuche auf dem Testgelände von ZF in Jeversen mit dem Kamag PT vorbereitet und durchgeführt. Das Fusionssystem zur Lokalisierung wurde in der aktuellen Version als Docker-Image integriert und gemeinschaftlich getestet. Dabei wurde der Einfluss von GNSS und Odometrie bewertet und optimiert.

In diesem AP wurden folgende Punkte im Projektverlauf in gemeinsamen Workshops mit ZF bearbeitet:

- ROS Schnittstellen
- Zeitsynchronisation
- Einmessen GNSS Antennen
- Integration / Feinabstimmung LIDAR / Anpassung Hubarm
- Anpassen Namespaces / Diagnosebotschaften
- Aufnahme von Messdaten in rosbags
- Rückwärtsfahrt Gerade
- Rückwärtsfahrt Kurve
- Knickwinkelprüfung vor der realen Rampe
- Kalibrierungsverfahren für Marken
- Aktivierung der Rampenerkennung
- Analysefunktionen und Diagnosenachrichten
- Integration ZoneManager
- Manuelle und automatische Fahrt auf die Rampe und Messwertanalyse
- Ausarbeitung Testplan für Langenau

Durch die hohe Interaktion der Projektpartner am Fahrzeugsystem hat sich eine komplexe Struktur ergeben, die schrittweise getestet werden musste. Dabei war ROS als sehr modulares Softwareframework durch die Auftrennung in verschiedene Module sehr hilfreich. Es wurden diverse Analysefunktionen genutzt.

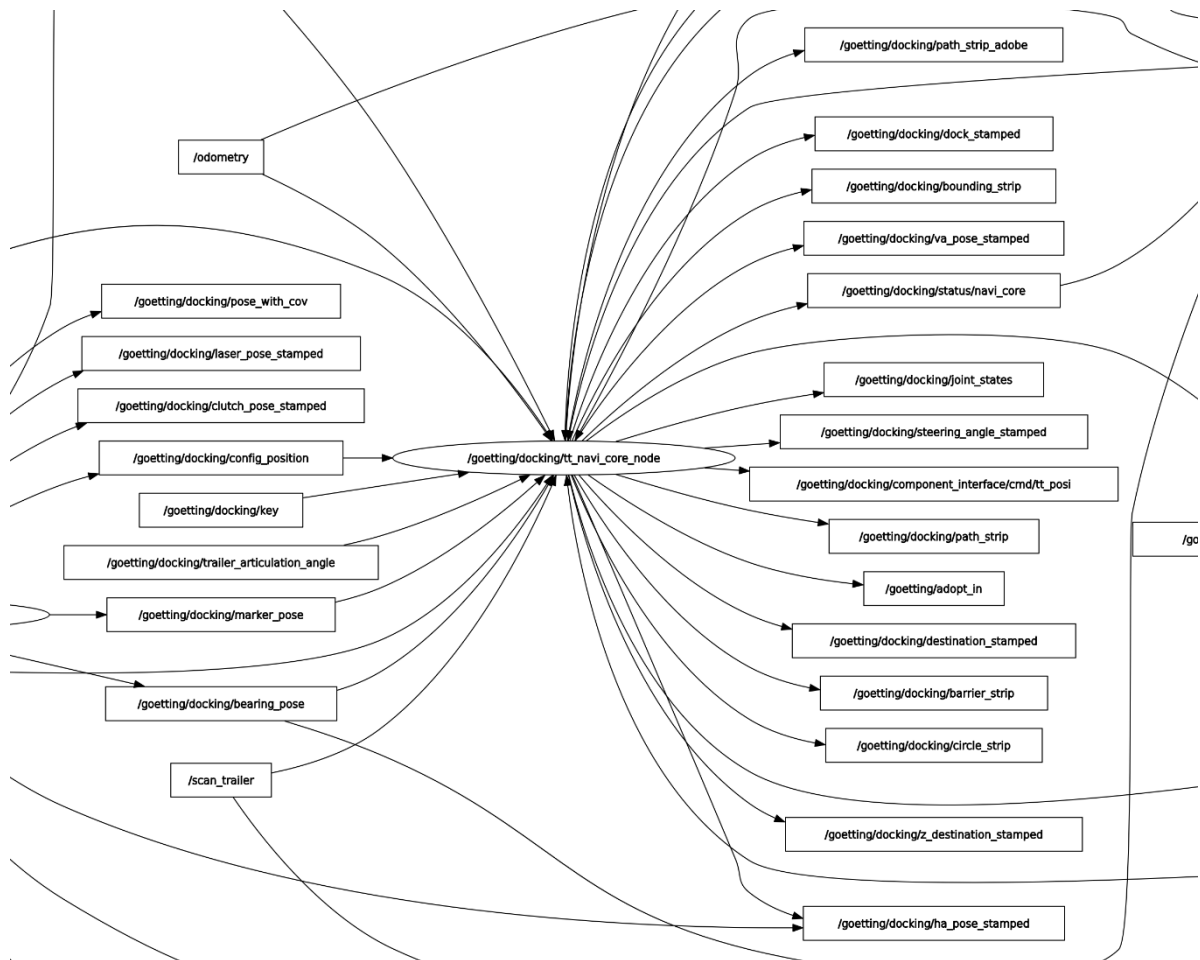


Abbildung 34: Ausschnitt rosgaph zur Rampenerkennung und der Adopt Schnittstelle

Datei stand insbesondere die Bewertung der Lokalisierungsqualität im Fokus der Untersuchungen. Jede Lokalisierungskomponente hat detaillierte, anwendungsbezogene Informationen (z. B. Kovarianzmatrizen, Sensorabstand, vergangene Zeit, Übereinstimmung des Laserscans mit der Karte). Für die einfache Bewertung der Gesamtqualität musste diese Vielzahl von Informationen zusammengefasst werden. Dazu wurde ein Regelwerk geschaffen, welches die einzelnen Informationen verknüpft und in eine Beziehung setzt. Dieses Regelwerk wurde als Graph von logischen Verknüpfungen (wie „AND“, „OR“ oder „NOT“) umgesetzt (siehe Abbildung 35). Am Ende des Graphen wird die aggregierte Lokalisierungsqualität beschrieben („Operational“, „Degraded“ oder „Unusable“).

Um Fehler in einer Lokalisierungsquelle besser zu identifizieren, wurde ein Programm zur Plausibilisierung entwickelt. Dieses Programm vergleicht die kurzzeitige Relativbewegung zweier Quellen (bspw. Odometrie und Lidar-Lokalisierung), berechnet aus den Unterschieden einen Fehlerwert und deckt dadurch widersprüchliche Positionsausgaben auf. Für die Interpretation der Fehlerwerte wurden auf empirische Weise sinnvolle Grenzwerte bestimmt. Im Rahmen von SAFE20 wurde eine Implementierung umgesetzt, die ein Framework zur Darstellung der logischen Verknüpfungen, Verarbeitung von Diagnosedaten und Einlesen von Nachrichten beinhaltet. Der Qualitätsindikator wurde periodisch als Diagnosenachricht ausgegeben. Die möglichen Tests des

Lokalisierungssystem sowie der Schnittstellen zum Fahrzeug konnten somit erfolgreich abgeschlossen werden.

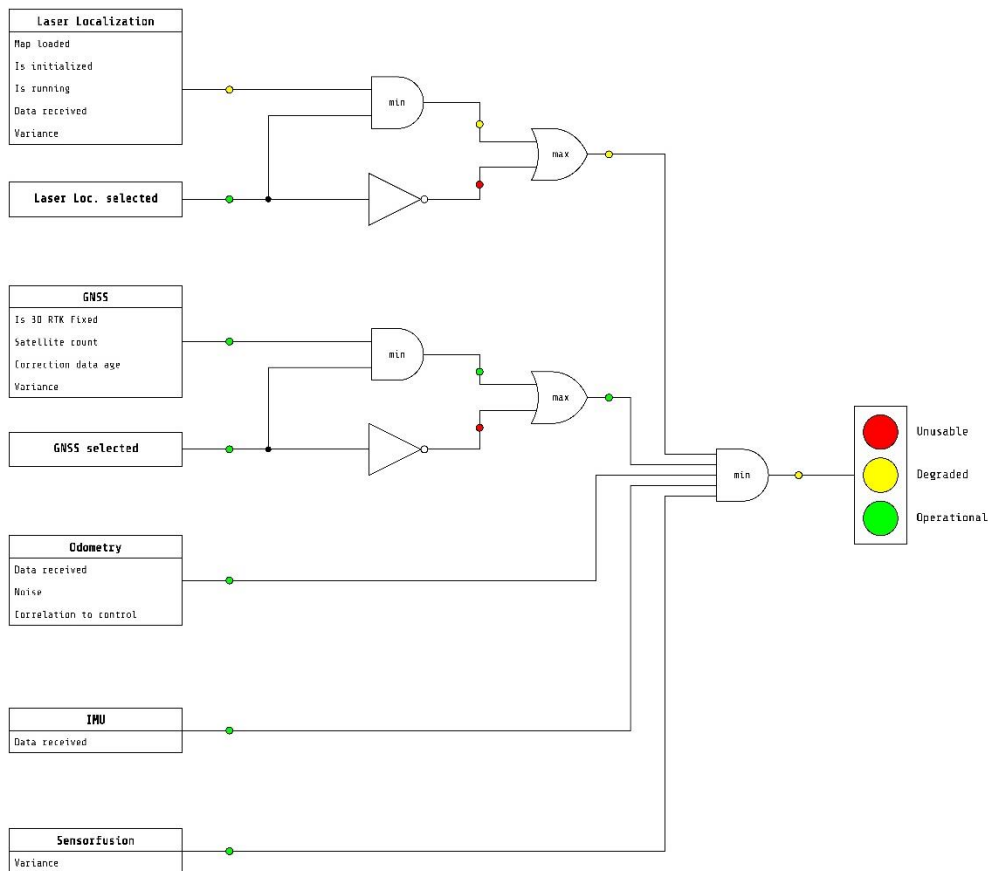


Abbildung 35: Prinzipschaltbild des Qualitätsindikators mit beispielhaften Token

Aufgrund der freien Fläche auf dem Testgelände in Jeversen konnte keine sinnvolle SLAM-Karte bei gegebener Sensorreichweite des verbauten Lidars erzeugt werden. Deshalb wurde die Analyse des Einflusses der Lidar-Lokalisierung im Arbeitspaket 7.5 in Langenau durchgeführt.

2.1.9 Integration des Gesamtsystems (AP 7.5)

In diesem AP sollte die Götting KG ihre entwickelten Bestandteile in das Gesamtsystem vor Ort bei Dachser integrieren und in Betrieb nehmen. Im Vorlauf zum Betrieb des Systems vor Ort wurde eine Freigabeerklärung für die von Götting gelieferte Entwicklungsleistung erstellt. Unter Beachtung des Dokuments war es somit möglich, dass Dachser-Personal die Systeme nutzt, also als Sicherheitsfahrer fungiert. Das Dokument enthält folgende Informationen:

- Beschreibung des Funktionsumfangs
- Bestimmungsgemäße Anwendung
- Anwendung in SAFE20
- Spezifikationen Subsysteme und Fusionssystem
- Testergebnisse

Im November 2023 hatte eine Integrationsphase für den Kamag PT in Langenau begonnen. Nach den notwendigen Vorarbeiten wurde das GNSS für die lokalen Bedingungen konfiguriert und erfolgreich in Betrieb genommen. Mit dieser Minimallösung konnten die Projektpartner bereits eigene Funktionen bearbeiten.



Abbildung 36: Kamag PT in Langenau

Anschließend wurde die vom Projektpartner SICK erzeugte SLAM-Karte zur Lidar-Lokalisierung integriert. Dabei wurde eine Diskrepanz zwischen der UTM-Pose des Satellitensystems und der Lidar-Pose auf der Karte festgestellt. Durch einen Faktor zum Verschieben und Drehen sowie einen Algorithmus, der die Messwerte des Lidar-Sensors relativ zur aktuellen GNSS-Pose in der vorhandenen Karte einträgt, konnte für lokal begrenzte Bereiche eine Deckungsgleichheit erreicht werden.

Insbesondere wurde der Einfluss des online-Mappings untersucht. Dabei werden automatisch in einen zweiten Layer der SLAM-Karte neue, unbekannte Objekte eingezeichnet. Somit werden auch neue Objekte und ursprünglich unkartierte Bereiche in die Lokalisierung einbezogen. Dieses Verfahren ermöglicht insbesondere in dynamischen Umgebungen Vorteile. In den folgenden beiden Bildern wird ein Vergleich im Osten des Dachser-Geländes mit und ohne online-Mapping dargestellt. Dabei repräsentieren die schwarzen Linien die offline-Karte und die roten Linien den aktuellen Scan. In der nachfolgend dargestellten Szene (Abbildung 37) kommt es durch die repetitiven Muster in Längsrichtung zu einem deutlich sichtbaren Offset.



Abbildung 37: Versatz der Lidar-Pose auf der offline Karte

Bei Nutzung des online-Mapping entsteht hingegen in der gleichen Szene kein Versatz, da die unregelmäßigen Strukturen (hier Bäume) kurzfristig für die Stabilisierung der Pose eingezogen werden können (Abbildung 38).



Abbildung 38: Nutzung des online-Mappings

Somit konnte das Fusionssystem erfolgreich mit allen Komponenten getestet und dessen Funktionsweise bestätigt werden.

2.1.10 Betrieb des Gesamtsystems (AP 8.1)

Ziel des AP seitens der Götting KG war die Betreuung des Lokalisierungssystems und des Systems zur Feinpositionierung an Rampen am Demonstrationsstandort für die Testphase. Aufbauend auf der Integrationsphase wurde der Testbetrieb bei Dachser für den Kamag PT vorbereitet. Dazu wurde das GNSS als primäre Quelle für die globale Lokalisierung ausgewählt und eine Qualitätsanalyse auf den ausgewählten Fahrstrecken durchgeführt. Entsprechend wurden die Varianzen auf den Abschnitten parametrisiert.

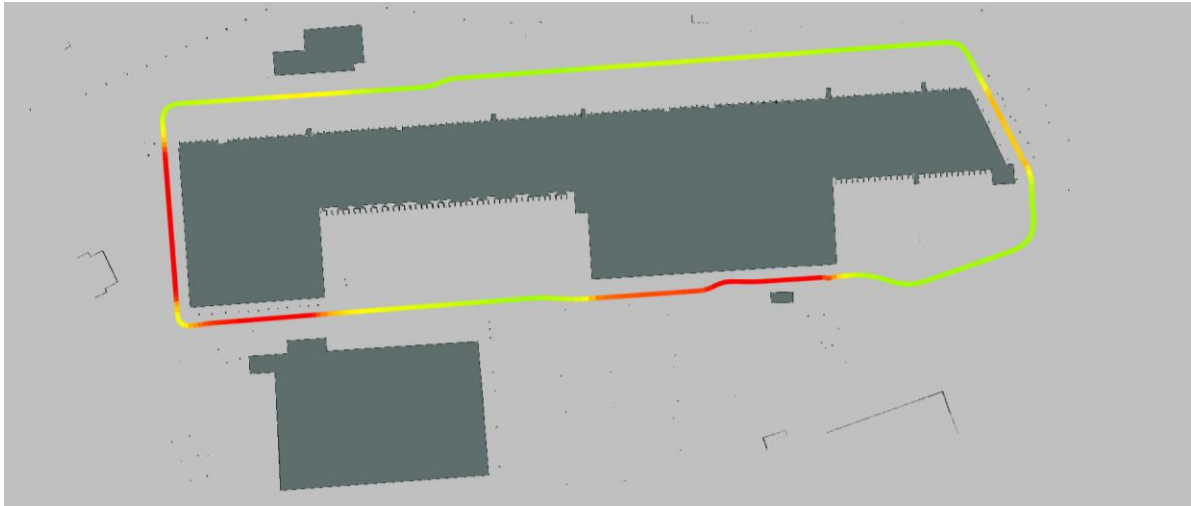


Abbildung 39: GNSS Qualitätsanalyse

Anschließend wurde eine Analyse der festgestellten Diskrepanz zwischen der UTM-Pose des Satellitensystems und der Lidar-Pose auf der erstellten Gesamtkarte (siehe AP 7.5) durchgeführt. Dazu wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Messwerte des Lidar-Sensors relativ zur aktuellen GNSS-Pose in der vorhandenen Karte einträgt. Zusätzlich wurde ein Faktor zum Verschieben und Drehen der Karte berücksichtigt, um eine bessere Übereinstimmung zu erreichen. Um die erforderlichen Messwerte zu erhalten, wurden mehrere Runden auf dem Dachsergelände berücksichtigt.

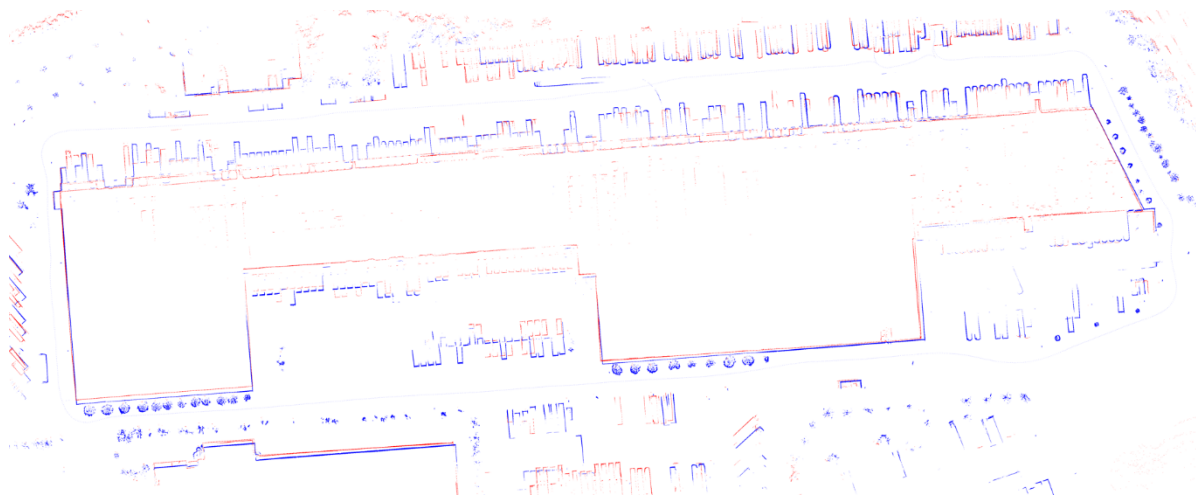


Abbildung 40: Vergleich Lidar-Karte (rot) mit aktuellen Messwerten (blau); Übersicht

In einigen Bereichen konnte ein signifikanter Unterschied festgestellt werden, der letztlich zu einem Versatz der Fahrspur von bis zu 1 m geführt hätte (Abbildung 41). Außerdem würde ein Umschalten zwischen den beiden globalen Lokalisierungsmodi (GNSS und Lidar) zu einem Sprung führen, der mit der Regelung nicht sinnvoll ausgeglichen werden könnte. Um eine Lösung gewährleisten zu können, wurden deshalb mehrere, lokal optimierte Kartenausschnitte eingesetzt.

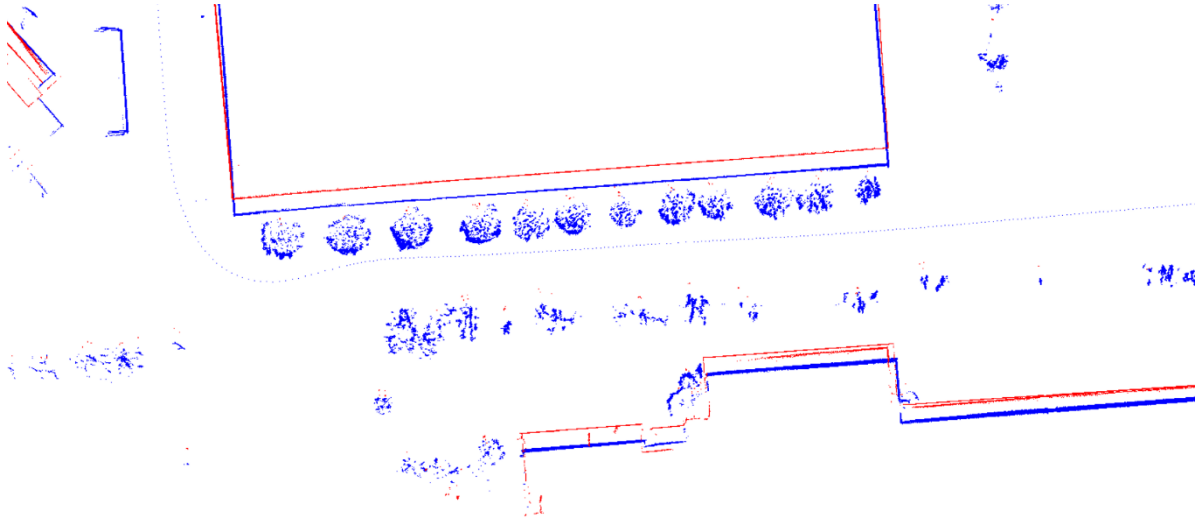


Abbildung 41: Vergleich Lidar-Karte (rot) mit aktuellen Messwerten (blau); Ausschnitt Ecke Süd-West

Zur weiteren Beurteilung der Qualität und Verfügbarkeit wurden unter Anleitung der Götting KG seitens Dachser Messungen zum Querversatz der Positioniergenauigkeit durchgeführt. Dabei wurden im Norden, Süden und Westen des Hauptgebäudes mit unterschiedlichen Abständen zur Wand Ziele automatisch angefahren. Am Endpunkt wurde jeweils die Position eines Reifens markiert, um die Wiederholgenauigkeit feststellen zu können. In Abbildung 42 und Abbildung 43 sieht man beispielhaft das Ergebnis von jeweils fünf Fahrten.



Abbildung 42: Messung Querversatz Kamag PT bei Dachser südlich vom Hauptgebäude



Abbildung 43: automatische Fahrmission im Westen (links); Ergebnisse (rechts)

Die Wiederholgenauigkeit des Querversatzes liegt im Bereich weniger Zentimeter, was als uneingeschränkt ausreichend für die Anwendung angesehen werden kann. In Längsrichtung wurde erwartungsgemäß eine größere Positionsabweichung ermittelt. Da die Lokalisierung aber nicht richtungsabhängig ist, kann gefolgert werden, dass auch die Lokalisierungsgenauigkeit längs zur Fahrtrichtung gleichermaßen gut ist. Allerdings wird die Anhalteposition in Fahrtrichtung wesentlich vom Geschwindigkeitsregler beeinflusst, auf den kein Einfluss seitens der Götting KG genommen wurde.

Im Verlauf der Testphase ist aufgefallen, dass zeitweise die Korrekturdaten für die Satellitenortung ausgefallen sind. Die notwendigen Korrekturdaten werden über eine Internetverbindung abgerufen, die über eine ProConnect betrieben wird. Der Ausfall tritt zum einen relativ häufig für wenige Sekunden auf, was nicht relevant ist, da die ermittelte Pose für diese Dauer stabil bleibt. Zum anderen wurde aber auch mehrfach beobachtet, dass für mehr als eine Minute keine Korrekturdaten empfangen wurden. In dem Fall ist im Allgemeinen davon auszugehen, dass die Pose nicht mehr für eine Regelung geeignet ist, so dass das Fahrzeug über einen diagnostizierten Fehler automatisch gestoppt wird.

Weiterhin wurden zahlreiche Tests zum Rückwärtsfahren an Rampen durchgeführt. Dazu wurden automatische Missionen zu verschiedenen Rampen auf dem Dachsergelände geplant und durchgeführt. Es konnten erfolgreiche Ergebnisse erreicht werden, bei dem der Trailer ausreichend genau mit der Flanke der Reifen auf der gelben Linie ausgerichtet war (Abbildung 44). Die Linie dient normalerweise den manuellen Fahrern als Orientierungshilfe und kann hier gut für eine Einschätzung des Ergebnisses herangezogen werden.



Abbildung 44: Erfolgreicher Endzustand beim Andocken eines Trailers an eine Rampe

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



Abbildung 45: Beispiele beim Andocken

2.1.11 Projektabschluss (AP 8.3)

Zum Projektabschluss wurden die Ergebnisse dokumentiert und bewertet. Die an die Götting KG gerichteten Ziele konnten erreicht werden. Insbesondere das Fusionssystem zur Lokalisierung wurde erfolgreich bearbeitet und mit vielen neuen Funktionalitäten versehen.

Als öffentlicher Projektabschluss wurde am 14.03.2024 eine große SAFE20-Schlusspräsentation im DACHSER Logistikzentrum Ulm unter Beteiligung der Götting KG durchgeführt. Insgesamt 80 Gäste 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. Nachmittags wurde in einer Fahrvorführung auf dem DACHSER-Gelände das Konzept praktisch demonstriert. Die Vorgänge wurden dem Publikum ausführlich erläutert und es gab die Möglichkeit für Mitfahrten in den Fahrzeugen.



Abbildung 46: SAFE20-Schlusspräsentation - Grußwort des Fördergebers Hr. Stefan Heidemann, BMWK

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Seitens der Götting KG wurde eine Förderung für Personalkosten, Reisekosten und sonstige unmittelbare Vorhabenkosten beantragt. Materialkosten oder andere Kostenarten wurden nicht abgerechnet. Die geplante Mittelverwendung wurde weitgehend eingehalten.

Dabei sind ca. 98% als Personalkosten angefallen, die für die Tätigkeiten an den Arbeitspaketen (siehe Abschnitt 2) im vollen Umfang eingesetzt wurden. Kleinere Abweichungen haben sich durch eine nicht vollständig vorhersehbare Projektbearbeitungszeit ergeben. Die Reisekosten sind deutlich

geringer ausgefallen als ursprünglich geplant. Durch die Covid-Pandemie wurde die Mehrzahl der Projekttreffen online durchgeführt. Die sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten wurden für ein externes Projektmanagement beantragt und ebenso eingesetzt. Die detaillierte Übersicht der Projektkosten ist im Verwendungsnachweis dargestellt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die Bearbeitung der förderpolitischen Ziele wurde sichergestellt, dass ein öffentliches Interesse an den durchgeführten Arbeiten besteht. Wegen der wirtschaftlichen und technischen Risiken war eine Förderung zur Finanzierung der Durchführung notwendig.

Die technischen Risiken für die Götting KG bestanden neben der Entwicklung von neuen Verfahren in der Umsetzbarkeit unter erhöhten Anforderungen auf dem Betriebshof. Hier konnte das Förderprojekt einen wesentlichen Beitrag leisten. Die ambitionierten Vorhabenziele gingen deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinaus, so dass in vielen Arbeitspaketen neue Konzepte und Lösungen gefunden werden mussten.

Für die Götting KG hat das Projekt den Einstieg in die Branche der Logistikhöfe und damit die Erschließung neuer Netzwerke und neuer Märkte ermöglicht und somit zur Zukunftssicherung der Arbeitsplätze beigetragen. Spezifische Fragestellungen konnten nur durch das Projektteam gemeinsam angegangen und beantwortet werden. Die für einen Projekterfolg wesentliche Beteiligung der Partner wäre außerhalb einer Förderung nicht umzusetzen gewesen.

Insgesamt waren die für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des Projektzeitraums erledigten Arbeiten erfolgreich. Der Arbeits- und Zeitplan wurde in den erforderlichen Schritten eingehalten. Kleinere Änderungen (z. B. Ausführung der Regelung des PT beim Andocken) wurden dargestellt und begründet, was aber keinen Einfluss auf die Erreichung der Ziele hatte. Mit der Unterstützung dieses interdisziplinären Vorhabens wurden Forschungsergebnisse erzeugt, die für die gesamte Branche von Interesse sind.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit

Als KMU in der Automatisierungsbranche ist die Götting KG daran interessiert, mit Unterstützung der Projektpartner zukünftig einen vollautomatischen Lkw anzubieten zu können. Dabei soll jeder Partner seine Ergebnisse weiterentwickeln und einbringen ohne Konkurrenzsituationen zu schaffen. Es sind Synergien bei der Produkt-Vermarktung der Partner möglich. Die Strategie basiert auf Schlüsselkunden mit hoher Multiplikatorwirkung. Diese Kunden sollen gewonnen werden, indem die wissenschaftlich-technische Lösungen möglichst gut an die Bedürfnisse der großen Endanwender angepasst werden. Dazu werden Pilotanwendungen gesucht, die wiederum marktöffnend für weitere Endanwender wirken. Durch die Ergebnisse können automatisierte Transporte zukünftig bei

weiteren Anwendern eine wirtschaftliche Bedeutung erlangen. Die Lenkzeiten der Fahrer lassen sich effizienter nutzen und die Fahrzeuge besser auslasten.

Das größte Marktpotential wird in der Nutzung der Projektergebnisse für zukünftige Automatisierungsprojekte der Götting KG gesehen. Die Götting KG bietet als Generalunternehmer oder Dienstleister bereits automatisierte Nutzfahrzeuge an. Durch die Möglichkeit der Weiterentwicklung der Lösungen zur Lokalisierung oder online Bahnplanung bis zur Serienreife können weitere Anwendungen wirtschaftlich angeboten und umgesetzt werden. Somit werden eine Umsatzsteigerung der Automatisierungsabteilung der Götting KG sowie eine Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und des Images hinsichtlich autonomer Transportsysteme erwartet.

Das Projekt hat einen richtungsweisenden Schritt für die Automatisierung auf Logistikhöfen ermöglicht. Die Erkenntnisse und der technologische Fortschritt haben zu einem Wissenstransfer zwischen den Partnern aber insbesondere auch in Richtung der Anwender geführt.

Die technischen Verbesserungen beim Fusionssystem zur Lokalisierung werden nach einer zukünftigen Weiterentwicklung des Technologiereifegrads (TRL) zur Umsatzsteigerung im Komponentengeschäft und zur Gewinnung neuer Kunden beitragen. Ebenso werden die entwickelten Softwarefunktionen nach der Überführung in die Marktreife die Zukunftsfähigkeit der Götting KG stärken.

Neben der angestrebten Ergebnisverwertung in Form von Produkten und Dienstleistungen tragen die Projektarbeiten erheblich zum Renommee als innovatives KMU bei und fördern so die Anschlussfähigkeit in Folgeprojekten und die Anbahnung neuer Kooperationen und Vorhaben über das gemeinsame Netzwerk.

2.5 Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens

Die Götting KG betreibt regelmäßige Informationsrecherchen zum Stand der Wissenschaft und Technik sowie zu Schutzrechten. Es sind keine wesentlichen, vorhabenrelevanten F&E-Ergebnisse bezüglich dieses Punktes bekannt geworden.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Es wurde eine öffentliche Homepage (<https://www.linkedin.com/company/safe20>) unter Beteiligung aller Partner für das Projekt eingerichtet. Neben den Informationen über das Projekt kann hier auch der Kontakt zu Firma Götting hergestellt werden.



Abbildung 47: Szene aus dem SAFE20-Projektabschlussfilm

Weiterhin wurden durch das Konsortium insgesamt sieben Filme produziert, die anschaulich und kurzweilig verschiedene Teile des Projekts erklären und darstellen. Diese wurden in einem YouTube-Kanal veröffentlicht (<https://www.youtube.com/@safe20>).

In Jevern wurde bei einer Zwischenpräsentation für die assoziierten Partner und den Projektträger das Lokalisierungssystem der Götting KG eingesetzt und demonstriert. Dabei fuhr der Kamag PT im Automatikmodus auswählbare Zielpunkte an.

Ebenfalls war die Götting KG an der Durchführung der Schlusspräsentation bei Dachser in Langenau beteiligt. Hier konnte der Praxisbezug des Projekts gezeigt werden.

Darüber hinaus ist die Götting KG gerne bereit, interessierten Anwendern die erreichten Ergebnisse auf dem eigenen Firmengelände zu demonstrieren.



Abbildung 48: Fahrdemonstration während der SAFE20-Schlusspräsentation

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht Verbundvorhaben: SAFE20 - Sicheres autonomes Fahren und Erprobung in Automatisierungszonen mit mindestens 20 km/h / Teilvorhaben - Hochverfügbare Ortung und online Bahnplanung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Behling, Sebastian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2024
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Götting KG, Lehrte/Röddensen ZF CV Systems GmbH, Hannover Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden Fraunhofer - Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund KAMAG TRANSPORTTECHNIK GmbH & Co. KG, Ulm DACHSER SE, Kempten Sensor-Technik Wiedemann GmbH, Kaufbeuren SICK AG, Waldkirch	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19A20011D
	11. Seitenzahl 51
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben -
	14. Tabellen -
	15. Abbildungen 48
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Das Gesamtziel – die Entwicklung und erste Umsetzung eines ganzheitlichen Sicherheitskonzepts, welches erstmals den Regelbetrieb von vollautomatischen Fahrzeugen auf Betriebshöfen mit mindesten 20 km/h im Mischbetrieb erlaubt – wurde in der Projektlaufzeit von 42 Monaten zwischen 10/2020 und 03/2024 von den Konsortialpartnern umgesetzt. Es wurden Demonstratoren mit der notwendigen Sensor-, Ortungs- und Kommunikationstechnik aufgebaut. In dem Teilvorhaben der Götting KG konnte die Lokalisierung in dem komplexen Umfeld eines Logistikhofs verbessert und validiert werden.	
19. Schlagwörter Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF), Fahrerloses Transportsystem (FTS), Logistik, Automatischer Lkw, Automatisierung, Lokalisierung, Ortung, Bahnplanung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title Final Report on Project: SAFE20 - Sicheres autonomes Fahren und Erprobung in Automatisierungszonen mit mindestens 20 km/h / Teilvorhaben - Hochverfügbare Ortung und online Bahnplanung [in German]	
4. author(s) (family name, first name(s)) Behling, Sebastian	5. end of project 31.03.2024
	6. publication date planned
	7. form of publication -
8. performing organization(s) (name, address) Götting KG, Lehrte/Röddensen ZF CV Systems GmbH, Hannover Fraunhofer - Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden Fraunhofer - Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund KAMAG TRANSPORTTECHNIK GmbH & Co. KG, Ulm DACHSER SE, Kempten Sensor-Technik Wiedemann GmbH, Kaufbeuren SICK AG, Waldkirch	9. originator's report no.
	10. reference no. 19A20011D
	11. no. of pages 51
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 48
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract The overall objective – the development and initial implementation of a holistic safety concept that, for the first time, allows fully automated vehicles to operate in mixed traffic on logistic yards at a minimum speed of 20 km/h – was achieved by the project partners during the 42-month project period between 10/2020 and 03/2024. Demonstrators equipped with the necessary sensor, positioning, and communication technologies were developed. In the sub-project of Götting KG, localization within the complex environment was improved and validated.	
19. keywords automated guided vehicle system (AGVS), logistics, automation, automated truck, localization, path planning	
20. publisher	21. price