

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Schlussbericht

## Verbundvorhaben



# AutoTruck

**AutoTruck**

**Vollautomatischer Verteiler-Lkw für Automatisierungszonen**

**Zuwendungsempfänger::**

**Götting KG (19A16002A)**

**Autor/en:**

**H.-H. Götting (Götting KG)  
Dr. S. Behling (Götting KG)**

**Laufzeit des Vorhabens:**

**01.09.2016 bis 31.08.2019**

**Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)**

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung / Aufgabenstellung.....	3
1.1.	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
2.1.	Projektpartner.....	4
2.2.	Ziele des Vorhabens .....	4
2.3.	Arbeitspakete .....	5
3.	Stand der Technik zu Projektbeginn .....	7
4.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
5.	Eingehende Darstellung.....	9
5.1.	Technische und wissenschaftliche Ergebnisse.....	9
5.1.1.	Projektmanagement (AP1) .....	9
5.1.2.	Grundlagenermittlung (AP2).....	9
5.1.3.	Sicherheitskonzept (AP3).....	16
5.1.4.	Steer-by-Wire Verteiler-LKW (AP4) .....	21
5.1.5.	Ortung auf dem Betriebsgelände (AP5).....	23
5.1.6.	Fahrzeugsteuerung (AP7) .....	33
5.1.7.	Fahrweg- und Missionsplanung (AP8).....	34
5.1.8.	Demonstration und Erprobung (AP9) .....	37
6.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	41
7.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	41
8.	Nutzen und Verwertung .....	42
9.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	43
10.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....	43

## 1. Einleitung / Aufgabenstellung

Das Projekt AutoTruck hatte die Entwicklung und Demonstration eines Systems für den vollautomatischen Betrieb von Nutzfahrzeugen in Automatisierungszonen (Logistikzentren, Speditionshöfe, definierte Bereiche des öffentlichen Straßenraums) zum Inhalt. Im Fokus standen Schlüsselfunktionen wie

- hochgenaue Ortung und Navigation,
- sichere Kollisionsvermeidung,
- Car-2-Infrastructure-Kommunikation,
- Echtzeit-Manöverplanung sowie
- vollautomatische Nahfeldnavigation.

Aufbauend auf diesen Kernfunktionen sollte ein vollautomatischer Lkw in einem Logistikzentrum demonstriert werden. Dabei wurden eine Straßenzulassung des Fahrzeugs sowie der Einsatz von Komponenten, die voraussichtlich künftig in Serienfahrzeugen verfügbar sind, angestrebt.

### 1.1. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Lkw werden in Logistikzentren derzeit personalintensiv durch Fahrer bzw. sonstiges Personal bewegt. Dabei sind primär zwei Hauptfahraufgaben zu erfüllen:

1. Pendelfahrten: Fahrzeuge pendeln zwischen zwei dicht beieinander liegenden Standorten, um Waren und Güter zwischen Produktions- und/oder Lagerhallen zu transportieren. Dabei können die Standorte sowohl durch private als auch durch öffentliche Wege verbunden sein.
2. Rangierfahrten: Fahrzeuge rangieren im Logistikzentrum, um Waren anzuliefern oder abzuholen. Meist muss der Fahrer schnell und exakt an Verloaderampen andocken.

Innerbetriebliche Rangierfahrten und Pendelverkehre gelten als Lenk- bzw. Arbeitszeiten im Sinne der EG-Verordnung 561/2006 und der Fahrpersonalverordnung (FPersV). Werden diese Fahraufgaben vollständig automatisiert, ergeben sich deutliche Vorteile hinsichtlich Effizienz von zunächst innerbetrieblichen Güter- und Warentransportvorgängen. So kann das Fahrpersonal wirtschaftlicher eingesetzt sowie Pausen- und Lenkzeiten flexibler eingeteilt werden. Darüber hinaus lassen sich die Transportprozesse signifikant beschleunigen und sicherer gestalten.

In vielen Produktions- und Logistikstandorten werden Fahrer für Rangier- und Pendelfahrten eingesetzt. Allein in den 34 Standorten der deutschen Güterverkehrszentren (Deutsche GVZ-Gesellschaft (DGG) und GVZ-E Dresden) mit über 1.400 ansässigen Unternehmen und 52.000 Beschäftigten werden täglich ca. 60.000 Fahrten mit Lkw durchgeführt. Dabei lassen sich die Wege in den Logistikzentren prinzipiell vollständig automatisieren, da im Fahrzeug selbst keine Entscheidungsprozesse ablaufen, die einen Fahrer zwingend erfordern. Überdeutlich wird das bei großen Hafenanlagen, in denen Güter über große Strecken von vollautomatischen Transportsystemen bewegt werden. Dennoch endet auch hier die Automatisierung aktuell mit der Beladung des für den Straßenverkehr zugelassenen Lkw, der

die Güter über das öffentliche Straßennetz verteilt. Können Fahrten auf Speditionshöfen und Pendelverkehre vollautomatisch durchgeführt werden, ergeben sich deutliche Vorteile in Hinblick auf den effizienten Fahrpersonaleinsatz sowie eine erhöhte Flexibilität bei der Verteilung von Lenk- und Pausenzeiten. Entsprechend steigt die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen.

## 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

### 2.1. Projektpartner

Es waren folgende Projektpartner direkt an dem Projekt beteiligt:

- Götting KG (Konsortialführer)
- Orten Betriebs GmbH & Co. KG
- Wabco Development GmbH
- Fraunhofer IVI
- Emons Spedition GmbH

Zusätzlich waren folgende assoziierte Firmen beteiligt:

- Deutsche GVZ Gesellschaft
- Güterverkehrszentrum Dresden mbH
- ZF Friedrichshafen AG
- P&G Service Company NV

**Götting KG**, Celler Str. 5, 31275 Lehrte, [www.goetting.de](http://www.goetting.de)

Die Götting KG entwickelt und produziert seit 1965 Funk- und Sensortechnik. Von den 85 Mitarbeitern sind über 30 Ingenieure überwiegend in der Entwicklung tätig. Das Unternehmen hat weltweit das umfangreichste Programm an verschiedenen Komponenten zur Spurführung von sogenannten Fahrerlosen Transportfahrzeugen ([www.goetting.de](http://www.goetting.de)).

Zur Götting KG gehört die Abteilung FOX. FOX liefert Transportsysteme mit fahrerlosen Seriennutzfahrzeugen, insbesondere für den Außenbereich (LKW, Radlader, Industrieschlepper, Gabelstapler u.ä.). Für die Automatisierung der weltweit ersten fahrerlosen Lkw hat FOX mehrere Erste Preise erhalten ([www.foxit.de](http://www.foxit.de)).

### 2.2. Ziele des Vorhabens

Inhalt des Vorhabens war die Entwicklung eines Systems, mit dessen Hilfe sich Verteiler-Lkw in Logistikzentren sowie definierten, räumlich begrenzten Bereichen (nachfolgend als Automatisierungszone bezeichnet) vollautomatisiert – also ohne Fahrer sicher betreiben lassen. Der vollautomatische Betrieb soll an der Zufahrt zur Automatisierungszone beginnen und mit dem Verlassen enden. Folgende Ziele wurden für das Automatisierungssystem definiert:

- Übernahme des Fahrzeugs vom Fahrer bei Einfahrt in die Automatisierungszone,

- Abarbeitung von Transportmissionen,
  - automatisches Abfahren von Trajektorien mit Zwischenzielen wie Parkpositionen,
  - automatisches Andocken an Laderampen oder Nachladestationen,
- dynamische Anpassung der Trajektorien an die aktuelle Hindernissituation in der Automatisierungszone,
- Kooperation mit anderen Fahrzeugen,
- Übergabe des Fahrzeugs an den Fahrer bei Verlassen der Automatisierungszone.

In diesem Kontext war die Kerninnovation des Verbundvorhabens die Entwicklung und praktische Demonstration eines seriennahen, zulassungsfähigen Verteiler-Lkw, der in definierten Automatisierungszonen vollautomatisch von einem Leitreechner vorgegebene Missionen ausführt (Stufe 5 der VDA Klassifizierung zum automatisierten Fahren). Für diese Kerninnovation war es das Ziel den Technologie-Reifegrad von vorher TRL 4 auf TRL 6 bis 7 (Technology Readiness Level nach Definition des BMWi) anzuheben, indem ein System aufgebaut und demonstriert wird, das aus einem mit der notwendigen Sensor-, Ortungs- und Kommunikationstechnik ausgerüsteten Verteiler-Lkw (15 - 18 t) sowie einer übergeordneten Fahrzeugleitzentrale besteht, über die sich Missionen live vorgeben lassen.

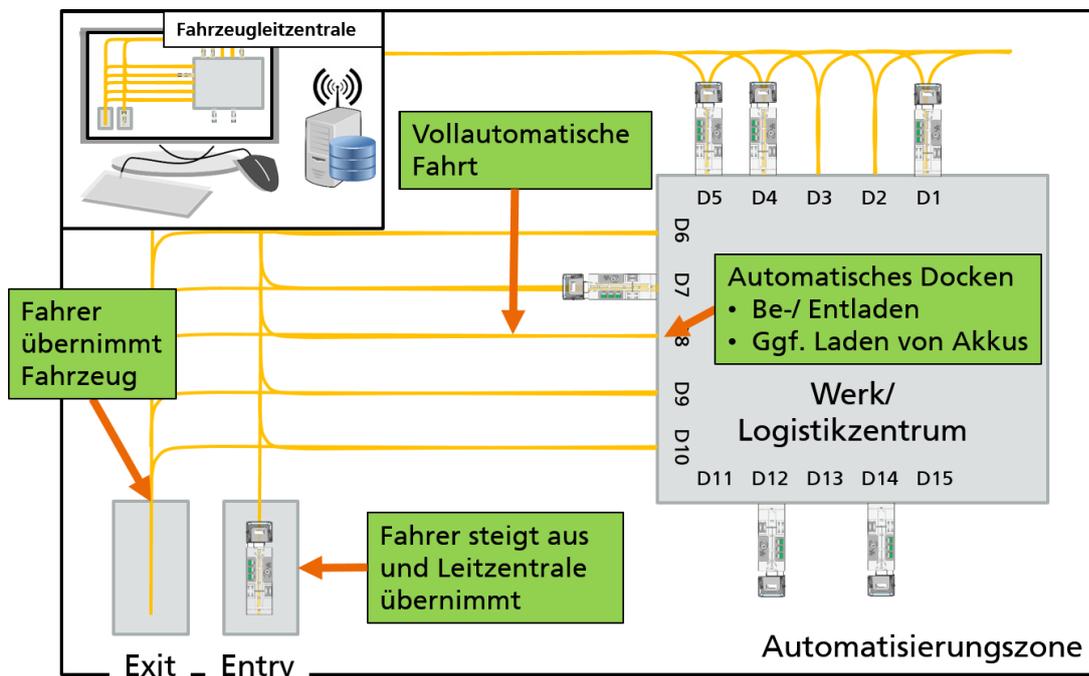


Bild 1: Zielvorstellung des vollautomatischen Verteiler-Lkw im Logistik-Zentrum

Im Speziellen waren die Aufgaben der Götting KG zum einen die Sicherheitstechnik zur Nahfeldererkennung sowie zum anderen die Algorithmen zur Ortung in der Automatisierungszone.

### 2.3. Arbeitspakete

#### AP 1: Projektmanagement

- AP1.1: Organisation

- AP1.2: Durchführung
- AP1.3: Öffentlichkeitsarbeit
- AP1.4: Qualitätsmanagement

## **AP2: Grundlagenermittlung**

- AP2.1: Anforderungen an das Gesamtsystem
- AP2.2: Anforderungen an Sensoren, Kommunikation und Ortung
- AP2.3: Nutzung Sensoren und Kommunikation im öffentl. Raum

## **AP3: Sicherheitskonzept**

- AP3.1: Risikoanalyse
- AP3.2: Erarbeitung funktionale Sicherheit
- AP3.3: Einbeziehung ZPO / BG
- AP3.4: Evaluierung Sicherheitskonzept

## **AP4: Steer-by-Wire Verteiler-LKW**

- AP4.1: Aufbau des Grund-LKW
- AP4.2: Integration Steer-by-Wire-Lenkung
- AP4.3: Integration der Fahrzeugsteuerung
- AP4.4: Integration Ortungstechnologie
- AP4.5: Integration der Kommunikationstechnologie

## **AP 5: Ortung auf dem Betriebsgelände**

- AP5.1: Technologieauswahl
- AP5.2: Entwicklung der Komponenten
- AP5.3: Entwicklung der Ortungsalgorithmen
- AP5.4: Integration der Technologie auf dem Testgelände

## **AP 6: Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**

- AP6.1: Technologieauswahl
- AP6.2: Entwicklung der Komponenten
- AP6.3: Integration der Technologie auf dem Testgelände

## **AP7: Fahrzeugsteuerung**

- AP7.1: Definition notwendiger Fahrzeugfunktionen
- AP7.2: Entwicklung Ansteuerung Lenkung
- AP7.3: Entwicklung Algorithmen zur Kopplung Ortung/ Kommunikation/Steuerung

## **AP8: Fahrweg- und Missionsplanung**

- AP8.1: Entwicklung Leitrechner
- AP8.2: Entwicklung von Algorithmen zur Fahrwegplanung
- AP8.3: Applikation der Kommunikationsschnittstelle in Leitzentrale

## **AP9: Demonstration und Erprobung**

- AP9.1: Festlegung des Testszenarios
- AP9.2: Durchführung vollautomatischer Missionen
- AP9.3: Bewertung der Demonstration
- AP9.4: Ableitung von Vorschlägen zur Erweiterung des Ansatzes

### 3. Stand der Technik zu Projektbeginn

Durch den globalen Wettbewerb herrscht insbesondere in Hochlohnländern ein starker Automatisierungsdruck. Zu den bekannten und weit verbreiteten Automatisierungslösungen in der Intralogistik zählen Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und die dazugehörigen Fahrzeuge (FTF). FTS werden eingesetzt, um Warenströme und Materialflüsse mit geringen Durchlaufzeiten, geringen Lagerkapazitäten sowie hoher Flexibilität und Verfügbarkeit effizient bewältigen zu können. Eine große Bedeutung, insbesondere in der Automobilindustrie, haben die Fahrerlosen Transportfahrzeuge seit den 80er Jahren. Es werden ca. 2.500 Einheiten pro Jahr hergestellt und eingesetzt. Da die Einsatzzeit ca. 10 Jahre beträgt, liegt der Gesamtbestand aktuell bei über 20.000 Fahrzeugen. Diese Fahrzeuge sind meist kleiner als klassische Lkw, werden innerhalb von Gebäuden eingesetzt und batterieelektrisch angetrieben. Fahrzeuge mit einem Eigengewicht von mehr als 10t sind vergleichsweise selten – insbesondere solche, die im Außenbereich eingesetzt werden. Hier dominiert der klassische, vom Fahrer gesteuerte Lkw.

Die überwiegende Mehrheit der FTF sind Sonderkonstruktionen, wie sie beispielsweise von EK Automation, DS Automation, Egemin Automation etc. kommerziell angeboten werden. In den letzten Jahren wurden vermehrt Serienfahrzeuge verwendet. Aktuell basieren ca. 20% aller FTF auf Serienfahrzeugen. Davon sind 50% Niederhub- oder Hochhubwagen (auch Deichselhubwagen bzw. Deichselstapler genannt). Deichselstapler sind an sich für die Bedienung durch eine Person vorgesehen. Im Rahmen von FTS-Anwendungen werden diese Fahrzeuge mit zusätzlichen Aktoren und Sensoren ausgestattet, sodass der Mitgänger/Bediener entfallen kann. 30% der automatisierten Serienfahrzeuge sind Schubmaststapler oder Schmalgangstapler. Diese Fahrzeuge verfügen i.d.R. über einen funktionstüchtigen Fahrerarbeitsplatz. Das Fahrzeug fährt vorwiegend automatisch, kann aber vom Fahrer übernommen werden (Semiautomatischer Betrieb). Klassische Gegengewichtsgabelstapler (gemeinhin als Gabelstapler bezeichnet) werden vergleichsweise selten vollautomatisch betrieben.

Weiterhin von Bedeutung sind die automatisierten Containertransportfahrzeuge, die in Rotterdam und in Hamburg verwendet werden. In den letzten 20 Jahren sind etwa 800 Einheiten geliefert worden. Die industriellen fahrerlosen Fahrzeuge erfüllen nach der Definition des Automatisierungsgrades die Stufe 5. Sie sind allerdings zurzeit noch fast immer auf künstliche Landmarken wie Transponder, Laserreflektoren, Leitlinien oder Leitdrähten zur Navigation angewiesen. Sie agieren in einem bekannten Umfeld, in dem sich kein Personal aufhält.

Für die Ortung von FTF haben sich im Wesentlichen zwei Technologien durchgesetzt. Erstens die sogenannten Leitlinien (Striche auf der Fahrbahn, Leitdrähte und in seltenen Fällen magnetische Bänder). Zweitens wird die leitlinienlose Führung genutzt, die deutlich flexibler in der Anwendung ist, da sich Solltrajektorien prinzipiell über Softwareanpassungen umplanen lassen. Inzwischen verwenden über 70% der Anlagen diese Technologie. Davon hat die sogenannte Lasertriangulation mit Retroreflektoren aktuell die größte Verbreitung, da sie vergleichsweise günstig und flexibel konfigurierbar sind. Die FTF müssen jedoch ein genaues Umgebungsmodell mitführen, in denen die Reflektoren exakt verortet sind. Zu den leitlinienlosen FTF gehören auch Magnete oder Transponder in/auf der Fahrbahn, die derzeit in allen automatisierten Häfen der Welt verwendet werden. Es gibt auch wenige Anlagen, in

denen zumindest teilweise eine laser-basierte Konturabtastung z. B. an Wänden erfolgt. Während alle anderen bekannten Verfahren sogenannte künstliche Landmarken benutzen, ist die Konturabtastung die erste Technologie, die natürliche Landmarken verwendet.

GPS- Systeme spielen bislang im Zusammenhang mit FTS eine untergeordnete Rolle. Dennoch ist die Satellitennavigation im Outdoor-Bereich eine wichtige Basistechnologie, die stützende Daten für Sensorfusionssysteme liefert. So werden GPS-Systeme in weiträumigen offenen Arealen eingesetzt, da hier die sonst üblichen Signalabschattungen kontrollierbar sind. Für die grobe Lokalisierung werden GPS-Systeme u.a. bei Containerkränen, bei Tagebaufahrzeugen, in der Landwirtschaft und beim autonomen Fahren eingesetzt.

Bei den typischen industriellen Anwendungen mit klassischen FTF benutzen Personen mehrmals täglich den Fahrweg der FTF. Daher kommt der Sicherheitstechnik eine besondere Bedeutung zu. Teilweise ist es so, dass die Aufwendungen für die Sicherheitstechnik zur Gefahrenabwehr in der Regel größer sind als die Aufwendungen für Ortung, Navigation und Bahnregelung. Bei den klassischen, innerbetrieblichen fahrerlosen Transportfahrzeugen ist wegen der Kollisionsgefahr die Geschwindigkeit in der Regel auf max. 6 km/h beschränkt. Diese und weitere Randbedingungen ergeben sich aus dem Standardwerk für die Absicherung von FTF – der Richtlinie EN 1525.



Bild 2: Outdoor-FTF nach dem Stand der Technik zu Projektbeginn (Quelle: Götting KG)

Während zur Hinderniserkennung früher häufig taktile Sensoren (z. B. Bumper) eingesetzt wurden, kamen bereits zu Projektbeginn im Innenbereich überwiegend Laserscanner zum Einsatz. Als gängige Sicherheitsklasse wird SIL 2 gefordert. Für den Außenbereich hatte die Götting KG im September 2015 einen sicheren Laserscanner für diese Sicherheitsklassen erstmalig zugelassen. Es war zum Zeitpunkt weltweit der einzige Sensor für diese Anwendungen.

#### 4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Firma Lub Consulting wurde mit der Unterstützung der Projektleitung seitens Emons beauftragt.

Zur Erarbeitung des Sicherheitskonzepts war die TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH beteiligt.

Die Abnahme einer Sondergenehmigung zur Nutzung öffentlicher Straßen erfolgte durch die DEKRA.

## 5. Eingehende Darstellung

### 5.1. Technische und wissenschaftliche Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse des Projekts mit Beteiligung der Götting KG über die gesamte Projektlaufzeit dargestellt.

#### 5.1.1. Projektmanagement (AP1)

##### Organisation

Die Götting KG hat über die Projektlaufzeit die Organisation des Gesamtprojekts unterstützt. Dabei wurden die Zusammenarbeit der am Projekt beteiligten Partner gefördert und organisatorische Regeln getroffen. Ebenfalls wurde die Projektdokumentation erstellt.

##### Durchführung

Hinsichtlich des Projektmanagements wurden seitens der Götting KG Abstimmungsarbeiten mit den Partnern durchgeführt. Ebenfalls wurde die Kontrolle des Projektfortschritts und der Einhaltung der Ziele erfüllt. Es wurden zahlreiche Projekttreffen organisiert und durchgeführt.

##### Qualitätsmanagement

Seitens der Götting KG wurden im Rahmen des partnerübergreifenden Qualitätsmanagements ein Lastenheft erzeugt sowie Soll-Ist-Vergleiche (insbesondere hinsichtlich der technischen Zielkriterien) durchgeführt.

#### 5.1.2. Grundlagenermittlung (AP2)

##### Anforderungen an das Gesamtsystem

Die Hauptaufgabe der Götting KG in diesem AP war die Zuarbeit des Fraunhofer IVI als Arbeitspaketleiter insbesondere hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen an das Gesamtsystem. Im Folgenden sind die Zuarbeiten zusammengefasst.

Es wurde eine Tabelle mit relevanten Regelwerken erstellt:

Vorschrift/Richtlinie	Beschreibung
ProdSG	Produktsicherheitsgesetz (Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt)
9. ProdSV	Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz

DGUV Vorschrift 68	Unfallverhütungsvorschrift „Flurförderzeuge“ (bisher BGV D 27)
BGHW SP 01	Einsatz von Flurförderzeugen - Batterieladeanlagen für Flurförderzeuge
BGHW SP 04	Einsatz von Flurförderzeugen - Personenschutz durch Erkennungssysteme
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
ASR A1.8	Technische Regeln für Arbeitsstätten - Verkehrswege
DIN EN 1175-1	Sicherheit von Flurförderzeugen - Elektrische Anforderungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen für Flurförderzeuge mit batterieelektrischem Antrieb
DIN EN 1525	Sicherheit von Flurförderzeugen - Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme
DIN EN 50272-3	Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen Teil 3: Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge
DIN EN 61496-1	Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen
DIN ISO/TR 14121-2	Sicherheit von Maschinen - Risikobeurteilung Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele
DIN EN ISO 3691-4	Flurförderzeuge - Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme
DIN EN ISO 12100	Sicherheit von Maschinen, Allg. Gestaltungsleitsätze Risikobeurteilung und Risikominderung
DIN EN ISO 13849	Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen
DIN EN ISO 13855	Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen
DIN EN ISO 4413	Fluidtechnik - Allgemeine Regeln und sicherheitstechnische Anforderungen an Hydraulikanlagen und deren Bauteile
DIN EN ISO 4414	Fluidtechnik - Allgemeine Regeln und sicherheitstechnische Anforderungen an Pneumatikanlagen und deren Bauteile
2006/42/EG	Maschinenrichtlinie
2004/108/EG	EMV-Richtlinie/ EMV Gesetz
VDI 2510	Fahrerlose Transportsysteme
VDI 2710	Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen
VDI 4451	Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen
VDI 2710 Blatt 5	Abnahmeregeln für Fahrerlose Transportsysteme

Das Sicherungssystem muss das Gefährdungspotential für definierte Risikosituationen, die nicht durch andere Maßnahmen (z. B. konstruktiv) ausgeschlossen werden können, auf ein akzeptables Maß abmildern. Welche Risiken durch technische Einrichtungen überwacht werden, muss auf Grundlage einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse durch das Projektteam festgelegt.

Nach der Inbetriebnahme soll das Sicherungssystem situationsabhängig in der Lage sein, das Fahrzeug automatisch (oder auf manuelle Anforderung) in einen sicheren Zustand zu überführen. Beispielsweise wird automatisch eine Notbremsung durchgeführt, wenn ein Schutzfeld eines Laserscanners verletzt wird.

Um die Sicherheit jederzeit zu gewährleisten wird eine Strategie gefordert, die das System situationsabhängig in einen sicheren Zustand überführen kann. Dabei werden zwei Fälle unterschieden:

- Nothalt: das Fahrzeug wird sofort zum Stillstand gebracht
- Notaus: das Fahrzeug ist im Nothalt und zusätzlich spannungsfrei

Zur Umsetzung der Notabschaltstrategie muss das Fahrzeug mit einem sicheren Bremssystem ausgerüstet sein (gemäß DIN EN 1525: „mechanisches, selbthaltendes Bremssystem, das das Fahrzeug innerhalb des Wirkungsbereichs des Hinderniserkennungssystems zum Stehen bringt“), das im automatischen Modus aktiv ist, wenn keine Freigabe von der Sicherheitsteuerung erfolgt.

In Abhängigkeit der maximalen Schutzfeldreichweite und des Bremswegs wird eine maximale Fahrgeschwindigkeit festgelegt und von der Sicherheitssteuerung überwacht. Wenn die maximale Fahrgeschwindigkeit überschritten wird, dann wird automatisch das Not-Halt-Signal gesetzt.

Folgende Warnsysteme sollen am Fahrzeug vorhanden und im automatischen Betrieb aktiv sein:

- Blink- / Blitzleuchten
- Fahrtrichtungsanzeiger
- akustischer Melder

Im Automatikmodus erfüllt die Sicherheitssteuerung folgende Funktion:

Bei definierten Ereignissen (z. B. Schutzfeld verletzt) gibt die Sicherheitssteuerung ein Not-Halt-Signal an den zweikanaligen Sicherheitseingang des Fahrzeugs, damit ein sicherer Bremsvorgang ausgelöst wird. Das Not-Halt-Signal genügt den Ansprüchen an SIL2. Vor der Rücknahme des Not-Halt-Signals ist ggf. eine manuelle Quittierung notwendig. Es werden folgende Ereignisse berücksichtigt:

- Schutzfelder, d. h. Hindernisse in der Umgebungsüberwachung
- Not-Aus-Schalter
- Nothaltschalter, die um das Fahrzeug verteilt sind
- Nothaltschalter, die in Fahrerkabine und Laderaum angebracht sind
- Überschreitung der Maximalgeschwindigkeit
- ggf. Schaltleisten
- ggf. Absturzsicherung
- ggf. Belegtmelder für Fahrersitz
- ggf. Sensor Türstellung (Laderaum), Ladebordwand
- Kommunikationsausfall/-unregelmäßigkeiten mit sicherheitsrelevanten Komponenten
- Komponentenausfall von sicherheitsrelevanten Komponenten

Die Not-Aus-Schalter/Not-Halt-Schalter müssen an die Sicherheitssteuerung angeschlossen werden. Bei Aktivierung eines Schalters wird das Not-Halt-Signal gesetzt. Eine Freigabe muss manuell am ausgelösten Schalter erfolgen. Bei Bedarf werden Schaltleisten eingebunden. Der Bedarf hängt auch von der Anzahl und Platzierung der Laserscanner ab. Zur Erkennung von Personen wird mindestens die volle Breite des Fahrzeugs inkl. der Last überwacht. Folgende Prüfkörper müssen erkannt werden:

1. Prüfkörper mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Länge von 600 mm an beliebiger Stelle des Fahrweges senkrecht zum Fahrweg des Flurförderzeuges liegend.
2. Prüfkörper mit einem Durchmesser von 70 mm und einer Höhe von 400 mm senkrecht und vollständig an beliebiger Stelle im Fahrweg des Flurförderzeuges stehend.

Ein Mindestsicherheitsabstand von typischerweise 0,5 m Breite wird eingehalten. Das Sicherungssystem soll das Fahrzeug wieder freigeben, wenn:

- die Kommunikation wieder stabil und sicher funktioniert
- das Fahrzeug per Hand wieder freigegeben wurde
- die definierten Randbedingungen geprüft worden

## **Anforderungen an Sensoren, Kommunikation und Ortung**

Die Hauptaufgabe der Götting KG in diesem AP war die Zuarbeit des Fraunhofer IVI als Arbeitspaketeiter insbesondere hinsichtlich der Sensoren zur Erfüllung der Sicherheit und Ortung. Im Folgenden sind die Zuarbeiten zusammengefasst.

Die Pose (Position und Orientierung) des Fahrzeugs muss in regelmäßigen Abständen und in einer ausreichenden Qualität übermittelt werden. Dazu wird eine Odometrie berechnet und durch eine absolute Ortsbestimmung in regelmäßigen Abständen gestützt. Nach der Inbetriebnahme soll das Verfahren in der Lage sein, die globale Pose bezüglich einer definierten Karte zu bestimmen. Primär sollen GPS sowie Umgebungsmerkmale verwendet werden, die bereits in der Zielumgebung vorhanden sind. Während der Inbetriebnahme wird eine Karte der Umgebung in geeigneter Weise aufgenommen und abgespeichert.

Verkehrswege von FTF werden üblicher Weise durch Markierungen kenntlich gemacht (z. B. durch farbige Bodenmarkierungen). Diese markierten Bereiche sollten vom Fahrzeug im automatischen Modus nicht verlassen werden. Das Ortungssystem sollte daher ausreichend genau und zuverlässig sein, damit keine unzulässige Gefahr durch eine Fehllokalisierung entstehen kann (z. B. Absturz bei Treppen/Rampen oder Nutzung von Flächen, auf denen sich nicht eingewiesene Personen aufhalten können).

Im Fahrzeug muss die Ortung zur Verfügung stehen, sobald es in die Automatisierungszone einfährt und vom Leitreechner übernommen wird. Es muss verhindert werden, dass die Ortung unerkant eine falsche Pose (außerhalb der akzeptablen Genauigkeiten) oder für längere Zeit keine Pose liefert. Die Ortsbestimmung muss hinreichend zuverlässig sein, so dass eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit einer Fehlfunktion möglich ist.

Das Ortungssystem soll unter Verwendung verschiedener Systeme die Position bestimmen. Dabei soll die Ortung so genau sein, dass das geregelte Fahrzeug bei ca. 15 km/h folgende Grenzwerte einhalten kann:

- Ortsbestimmung mindestens 10-mal in der Sekunde
- während der Fahrt Querabweichungen im Bereich +/- 20 cm
- bei einem Andockmanöver an die Laderampe +/- 5 cm in Längsrichtung und +/- 10 cm in Querrichtung

Die Lokalisationsgenauigkeit soll durch die jeweilige Funktion vorgegeben werden. Beispielsweise muss die Genauigkeit beim Andocken genauer sein, als bei der Fahrt auf einer freien Fläche. Die jeweils maximal zulässigen Posenfehler für die globale Pose sollen ermittelt und festgesetzt werden. Der zulässige Fehler hängt maßgeblich von der erreichbaren Regelgüte ab. Beide Einflussgrößen müssen daher zusammenhängend betrachtet werden.

Auf dem Betriebsgelände ist insbesondere in Bereichen von Gebäuden und Verloaderampen mit GPS-Abschattungen zu rechnen. Die Algorithmen zur Ortung sollen robust bezüglich Veränderungen in der Zielumgebung sein. Insbesondere können sich die Positionen von Hindernissen wie Containerbrücken oder mobilen Objekten auf dem Betriebshof fortlaufend ändern. Es wird jedoch angenommen, dass strukturelle Gebäudeteile unveränderlich sind.

Das Sicherheitssystem benötigt vom Ortungssystem/Odometriesystem die Fahrgeschwindigkeit und die Fahrtrichtung. Dabei muss das Signal sicher sein. Das bedeutet, dass entweder redundante Sensoren oder unterschiedliche, zuverlässige Datenquellen benötigt werden.

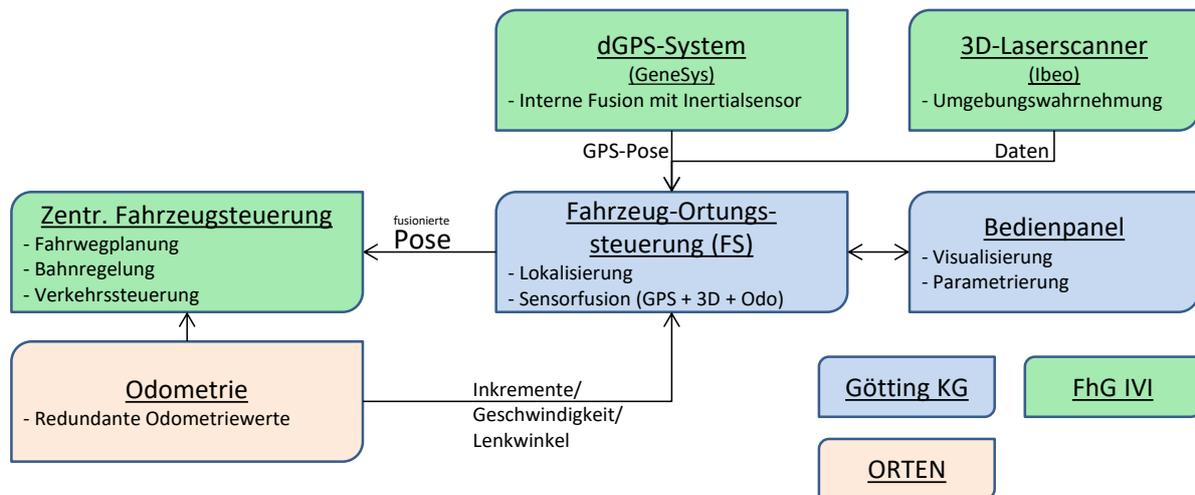


Bild 3: Architektur des Ortungssystems

Es wurde diskutiert, dass die Systeme unter folgenden Bedingungen einsatzfähig sein sollen:

- Trockener, nasser und schneebedeckter Fahrbahn
- Temperaturen zwischen -40°C und +50°C
- leichter bis dichter Nebel
- leichter bis starker Regen
- leichtes Schneetreiben
- Pflützen und stehendes Wasser

Folgende Umweltbedingungen müssen nicht berücksichtigt werden:

- Eisglätte, vereiste Fahrbahn
- dichtes Schneetreiben

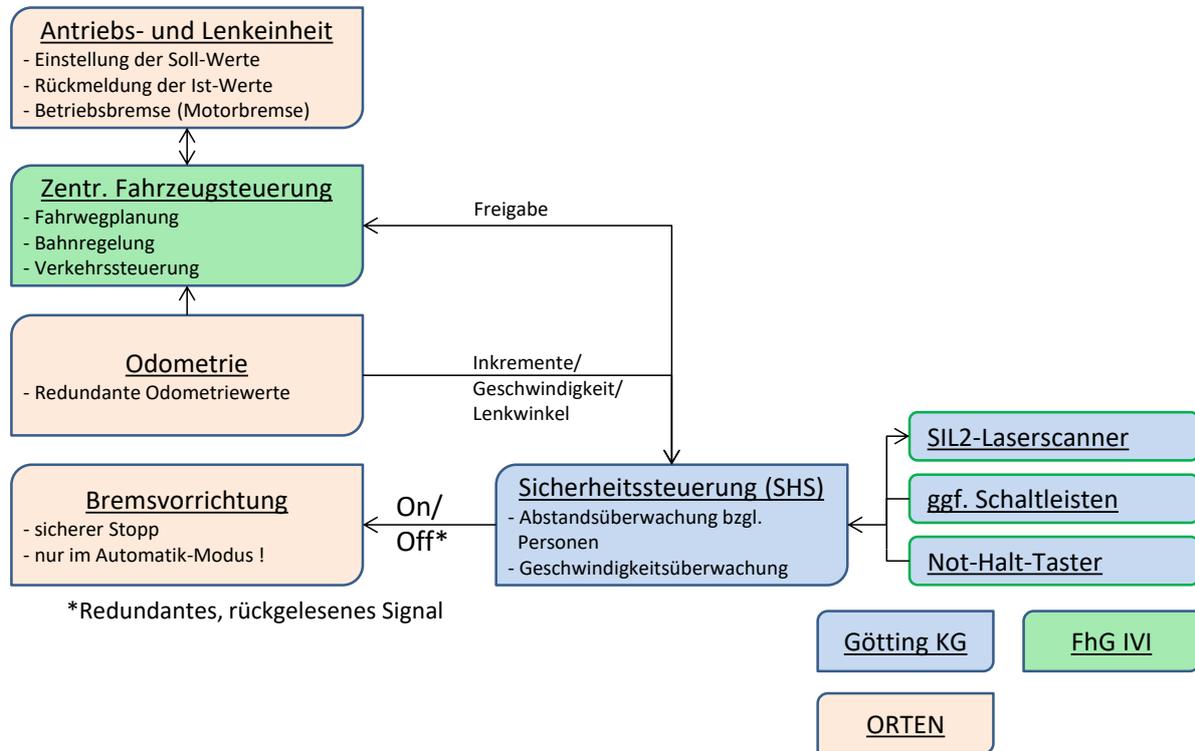


Bild 4: Architektur des Sicherheitssystems

### Nutzung Sensoren und Kommunikation im öffentl. Raum

Die Hauptaufgabe der Götting KG in diesem AP war die Zuarbeit des Fraunhofer IVI als Arbeitspaketleiter insbesondere hinsichtlich des Einsatzes im öffentlichen Raum. Im Folgenden sind die Zuarbeiten zusammengefasst.

Da es nicht unüblich ist, dass fahrerlose Transportsysteme auf Basis von Seriennutzfahrzeugen realisiert werden, muss das Verhalten der Automatikfunktionen auf die vorhandenen manuellen Bedienmöglichkeiten auch in bisher bereits existierenden Anlagen geregelt werden. Soweit zutreffend können diese Regelungen als Richtlinien für das Projekt hinzugezogen werden.

Ein entscheidendes Thema ist die Regelung bezüglich der Möglichkeit zum Mitfahren einer Person auf dem automatischen Fahrzeug.

1. Entweder ist das Mitfahren im automatischen Modus untersagt, dann muss das System die Anwesenheit überwachen (z. B. Sitzschalter). Falls eine Person „erkannt“ wird, muss sich der Automatikmodus beenden und darf nicht ohne Quittierung wieder anlaufen. Eine Regelung wird in DIN EN 1525 getroffen.
2. Oder das Mitfahren ist im Automatikmodus unter bestimmten Umständen erlaubt, dann muss die Sicherheit der Person berücksichtigt werden (z. B. Gurt / Überwachung des Greifbereichs).

Im Projekt wird die Anwendung des ersten Falls beabsichtigt. Da die Person im manuellen Modus das Fahrzeug bedienen kann, ist es aus Sicherheitsgründen in diesem Fall wichtig,

dass die Automatikfunktionen im manuellen Modus deaktiviert sind. Diese Deaktivierung muss einem Sicherheitslevel genügen, damit keine ungewünschten Aktionen während der manuellen Bedienung eintreten, die ihrerseits eine erhebliche Gefahr bedeuten könnten. Der Sicherheitslevel für den Einsatz im öffentlichen Raum muss noch bestimmt werden. Entsprechend muss bspw. die automatische Notbremsung verhindert werden, wenn sich ein Fahrer im Fahrzeug befindet.

Die Sensoren zur Hinderniserkennung sind demnach im öffentlichen Raum deaktiviert, da sich das Fahrzeug im manuellen Modus befindet. Bei der Anbringung und Integration der Sensoren muss einerseits die Funktionalität im automatischen Modus berücksichtigt werden, zum anderen die Zulassungsfähigkeit im öffentlichen Raum. Für die Zulassungsfähigkeit sind die Abmessungen sowie die mechanische Stabilität entscheidend. Eventuell müssen Teile eingezogen/weggeklappt und fixiert werden. Ähnliche Prozesse sind im Zusammenhang mit Mitnahmestaplern oder Wechselbrücken bekannt. Weiterhin muss beachtet werden, dass die Sensoren nicht dem Datenschutz im öffentlichen Raum widersprechen (insbesondere bei Kameras).

Die wichtigsten Punkte für das Zulassungsverfahren mit Bezug zur Götting KG sind zusammengefasst:

1. Das Automatisierungssystem darf im öffentlichen Raum nicht wirksam sein. Es muss vom Fahrer mit den zulässigen Kräften übersteuert werden können.
2. Die Einbauten müssen rückwirkungsfrei abgeschaltet werden können.
3. Eine unbeabsichtigte De-/Aktivierung muss ausgeschlossen werden.
4. Die Umschaltung darf nur von ausgewiesenen Personen ausgeführt werden.
5. Die Einbauten müssen den EMV-Regeln genügen.
6. Die passive Sicherheit (Innenraumgestaltung) muss berücksichtigt werden.
7. Die Sicht des Fahrers darf nicht unzulässig eingeschränkt werden (Sichtfeld, Reflektionen, Blendung etc.).
8. Es darf sich keine unzulässige Gefahr für Außenstehende ergeben (Abmessungen, mechanische Stabilität, scharfe Kanten von Anbauten).
9. Die Einbauten müssen dokumentiert sein.
10. Es ist eine Betriebsanweisung zu erstellen.

Es werden zwei Betriebszustände unterschieden: Der automatische Betrieb auf einem abgeschlossenen Betriebsgelände und der manuelle Betrieb im öffentlichen Raum. Die für den automatischen Betrieb notwendigen Einbauten müssen rückwirkungsfrei abgeschaltet werden können. Daher konzentriert sich das Konzept auf das physikalische oder elektrische Abschalten. Für die Genehmigung sind dann die hinter dem Abschalter verbauten Komponenten nicht wesentlich.

Seitens der Götting KG wurde daher darauf hingewirkt, dass der Abschalter dazu führt, dass die seitens Götting eingebauten Komponenten im manuellen Betrieb spannungsfrei geschaltet werden und elektrisch sowie mechanisch rückwirkungsfrei sind. Es wurde eine Liste mit den einzuhaltenden Regeln erstellt.

### 5.1.3. Sicherheitskonzept (AP3)

#### Risikoanalyse

Im Berichtszeitraum wurde durch die Götting KG gemäß ISO 12100 eine Risikoanalyse bezüglich des automatischen Betriebs auf dem Betriebshof durchgeführt. Dazu wurden aufeinander aufbauend die Grenzwerte der Anlage festgelegt, eine Gefahrenerkennung sowie eine Risikoeinschätzung vorgenommen. Die Inhalte sind (zusammen mit den Ergebnissen aus AP 3.2) im Dokument „Risikobeurteilung für den innerbetrieblichen Einsatz“ dokumentiert (aktuell 47 Seiten). Im Folgenden sind (zur Übersichtlichkeit nur) diejenigen Gefahren gelistet, für die eine Risikominderung durchgeführt wird:

- Es befinden sich Personen im Fahrweg des Fahrzeugs. Eine Person beachtet / bemerkt das Fahrzeug nicht. Sie wird angefahren und verletzt.
- Das Fahrzeug bewegt sich rückwärts und es befinden sich Personen im Fahrweg. Eine Person beachtet / bemerkt das Fahrzeug nicht. Sie wird angefahren und verletzt.
- Ein Fahrzeug verlässt den Fahrkurs. Eine Person wird zwischen einem heranfahrenden Fahrzeug und einem Container / einem Hindernis eingeklemmt.
- Das Fahrzeug bleibt unerwartet stehen. Eine im Fahrzeug befindliche Person wird durch die plötzliche starke Verzögerung nach vorne geschleudert und verletzt sich.
- Das Fahrzeug fährt unerwartet los (Stillstand, Lastübergabe etc). Auch eingewiesene Personen könnten überrascht und verletzt werden.
- Das Fahrzeug wechselt während der automatischen Fahrt in den manuellen Betrieb. Die Automatikkomponenten schalten sich ab. Das Fahrzeug bekommt keine Steuerbefehle mehr und rollt unkontrolliert aus. Dabei könnte es von der Fahrbahn abkommen und Personen gefährden.
- Die Fahrkursinformationen kommen verfälscht beim Fahrzeug an. Das Fahrzeug könnte zu schnell fahren oder falsch abbiegen. Durch unerwartete oder unzulässige Fahrzeugaktionen könnten Gefährdungen für Personen in der Nähe entstehen.
- Das Navigationssystem bekommt falsche Positionsinformationen und kommt vom Weg ab (z.B. in Kurven keine Lenkung). Das Fahrzeug könnte zu nah an den Fahrbahnrand geraten oder in Kurven geradeaus weiter fahren und dabei Personen erfassen.
- Das Spurführungssystem glaubt es sei an einer anderen Position und befolgt Streckeninformationen für einen falschen Streckenabschnitt. Das Fahrzeug könnte zu schnell fahren oder beim nächsten Abzweig falsch abbiegen. Durch unzulässiges Verhalten des Fahrzeugs könnten Personen gefährdet werden.
- Auf Grund eines Fehlers fährt das Fahrzeug mit überhöhter Geschwindigkeit. Es könnte zu Schwingungen in der Bahnregelung, Spurabweichungen, verfehlten Stoppositionen etc. kommen. Personen könnten gefährdet werden.
- Auf Grund eines Fehlers fährt das Fahrzeug zu schnell durch Kurven. Das Fahrzeug könnte aus der Bahn geraten oder umkippen und dabei Personen verletzen.
- Das Fahrzeug detektiert einen Fehler oder ein Hindernis, aber die durch den Notaus ausgelöste Bremse zeigt keine Wirkung. Es kann je nach Fehlerfall zur Verletzung von Personen kommen.

- Der Antrieb beschleunigt fehlerhafterweise. Der Anwender im Fahrzeug könnte von der unerwarteten Reaktion der Maschine überrascht werden und zu Schaden kommen.
- Nach einem Ausfall der Energieversorgung wird diese wieder hergestellt. Das System ist noch im automatisierten Betrieb und führt direkt die nächsten Befehle aus. Der Anwender könnte von der unerwarteten Reaktion der Maschine überrascht werden und zu Schaden kommen.
- Das Fahrzeug fährt mit Last zu schnell in die Kurve und kippt um. Es kann zu erheblichem Schaden in einem größeren Gebiet kommen. Personen im Einflussbereich könnten zu Schaden kommen.
- Unbefugte Personen erlangen Zugriff auf die Steuerung des Fahrzeugs. Durch ungeplante und unautorisierte Steuerung können Personen gefährdet werden.
- Das Fahrzeug gibt keine Warnsignale bei Anfahrt oder Fahrtrichtungswechsel. Personen könnten überrascht und verletzt werden.
- Der Bediener fährt das Fahrzeug manuell. Trotz aktivierter Automatikkomponenten sind die manuellen Steuerelemente aktiv. Es könnten unerwartete Steuermanöver des Fahrzeugs (lenken, bremsen) durch die aktiven Automatisierungskomponenten entstehen. Die Person im Fahrzeug verliert die Kontrolle. Die Person im Fahrzeug sowie Personen außerhalb des Fahrzeugs könnten zu Schaden kommen.
- Der Bediener startet den Automatikbetrieb und verlässt anschließend das Fahrzeug. Das Fahrzeug fährt ohne Überwachung. Es könnten Personen verletzt werden.
- Eine Person gerät unter die sich öffnende Ladebordwand. Die Person wird von der LBW getroffen und verletzt.
- Eine Person gerät zwischen Fahrzeug und Verladerampe. Die Person wird zwischen Fahrzeug und Verladerampe eingequetscht.
- Das Fahrzeug fährt unerwartet los (nach Andocken). Gerade mit der Verladung beschäftigte Personen könnten von der Verladerampe fallen.
- Fahrzeug schließt LBW während sich noch Person auf dem Ladebereich befindet. Die Person könnte zwischen Fahrzeug und LBW eingequetscht werden.
- Das Fahrzeug fährt unerwartet los (nach Andocken). Gerade mit der Verladung beschäftigte Personen könnten von der Verladerampe fallen.
- Das Fahrzeug wechselt in den automatisierten Betrieb, während sich das Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr befindet. Es könnten unerwartete Steuermanöver des Fahrzeugs (lenken, bremsen) entstehen. Die Person im Fahrzeug verliert die Kontrolle. Die Person im Fahrzeug sowie Personen außerhalb des Fahrzeugs könnten zu Schaden kommen.
- Durch die Schnittstelle zu den Automatisierungskomponenten wird die Bremse beeinflusst. Sie löst fehlerhaft aus. Die Person im Fahrzeug verliert die Kontrolle. Die Person im Fahrzeug sowie Personen außerhalb des Fahrzeugs könnten zu Schaden kommen.
- Die manuellen Kontrollen für die Gangauswahl laufen über die Steuerung der Automatisierungskomponenten. Durch einen Fehler in der Steuerung werden die Gänge hochgeschaltet. Die Person im Fahrzeug verliert die Kontrolle. Die Person im Fahrzeug sowie Personen außerhalb des Fahrzeugs könnten zu Schaden kommen.
- Die Automatisierungskomponenten sind im manuellen Betrieb noch aktiv. Durch fehlerhafte Stellwerte aus der Steuerung könnten Funktionen wie Lenkung oder

Beschleunigung beeinflusst werden. Die Person im Fahrzeug verliert die Kontrolle. Die Person im Fahrzeug sowie Personen außerhalb des Fahrzeugs könnten zu Schaden kommen.

- Der Bediener schaltet das Fahrzeug in den automatisierten Betrieb, während sich das Fahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr befindet. Es könnten unerwartete Steuermanöver des Fahrzeugs (lenken, bremsen) entstehen. Die Person im Fahrzeug verliert die Kontrolle. Die Person im Fahrzeug sowie Personen außerhalb des Fahrzeugs könnten zu Schaden kommen.

### **Erarbeitung funktionale Sicherheit**

Aufbauend auf der Risikoanalyse wurden von der Götting KG in einer Risikobewertung die notwendigen Schutzmaßnahmen festgelegt. Dabei werden zwei Zustände unterschieden: Der automatische Betrieb auf dem privaten Betriebsgelände und der manuelle Betrieb im öffentlichen Straßenverkehr.

Für den Einsatz auf dem Betriebsgelände ist die Maschinenrichtlinie maßgeblich. Die erforderlichen Maßnahmen ergeben sich aus der Risikoanalyse (siehe AP 3.1). Da es für den Demobetrieb vorgesehen ist, dass im automatischen Modus stets ein Sicherheitsfahrer auf dem Fahrzeug die Überwachung durchführt und dass diese Person kurzfristig das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführen kann, ist es nicht notwendig alle übrigen Schutzmaßnahmen auszuführen bzw. mit einem bestimmten Sicherheitslevel auszulegen. Der Fahrer in Kombination mit der mechanischen Fußbremse kann in diesem Fall die Risiken auf ein akzeptiertes Maß reduzieren. Die Verlagerung der Verantwortung von den Automatisierungskomponenten auf eine Person ist in der Industrie bspw. für ferngesteuerte Fahrzeuge oder mit Videoüberwachung ausgelegte Anlagen ein akzeptiertes Vorgehen. Im Forschungsprojekt ergab sich dadurch der Vorteil, dass wirtschaftlicher und pragmatischer gearbeitet werden konnte, da der Fokus nicht auf der Inbetriebnahme der Sicherheitstechnik nach dem Stand der Technik liegt.

Bei Rückwärtsfahrten oder bei der Bedienung der Ladebordwand ist der Beobachter im Fahrerhaus auf einen zweiten Beobachter außerhalb des Fahrerhauses angewiesen. Dieser überwacht den Bereich hinter dem Fahrzeug und kann den ersten Beobachter auf Zuruf zum Stoppen des Fahrzeugs auffordern.

Für alle während des Testbetriebs anwesenden Personen ist eine Unterweisung über die verbleibenden Gefahren, die vom Fahrzeug ausgehen, notwendig. Alle Personen sollten angewiesen werden, sich während des Testbetriebs in sicherem Abstand des Fahrzeugs aufzuhalten, wobei Fahrgeschwindigkeit, mögliche Lenkbewegungen und ein evtl. Fehlverhalten zu beachten sind. Dies gilt speziell für Kurven und beim Transport schwerer Lasten.

Weiterhin soll dafür gesorgt werden, dass in Situationen, in denen der ausreichende Sicherheitsabstand nicht eingehalten werden kann, beispielsweise wenn am Fahrzeug gearbeitet werden muss, das Fahrzeug aus dem automatisierten Betrieb gebracht wird oder mit erhöhter Vorsicht gearbeitet wird.

Die funktionale Sicherheit in diesem Arbeitspaket bezieht sich auf die sicheren technischen Schutzmaßnahmen. Zur Umsetzung der funktionalen Sicherheit wurde seitens der Götting KG eine Sicherheitsteuerung mit PLd vorgesehen (InterControl "digsy fusion S"). Folgende sichere technische Maßnahmen wurden identifiziert:

- Ein Wechsel in die Automatikmodi erfolgt durch einen zweistufigen Wahlschalter. Der Zustand des Systems (Ein / Aus) muss dem Fahrer angezeigt werden. Die Anzeige muss deutlich und verstehbar sein (Leuchte, Farbe, Piktogramm, Schalterstellung o.ä.). Der Umschaltvorgang darf nur im Stillstand funktionieren.
- Die zusätzlich verbauten Komponenten dürfen den Fahrer und die Fahreinrichtungen nicht behindern.
- Das Trennen der Versorgungsspannung im manuellen Modus ist für die Komponenten der Götting KG eine bevorzugte Lösung für das sichere Abschalten der Automatikfunktionen.
- Das Fahrzeug benötigt kein automatisches auslösbares Notbremssystem, wenn ein Fahrer während der autonomen Fahrten am Steuer sitzt. Der Fahrer stellt dann in Verbindung mit der „mechanischen Fußbremse“ das Notbremssystem dar.
- Die Fahrer werden für das Genehmigungsverfahren benannt.
- Es werden zeitgleich mit Auslösung der Bremse auch die Geschwindigkeitsvorgaben deaktiviert.
- Wenn der Wahlschalter auf Automatik steht, wechselt das Fahrzeug nach einem Fehler oder beim Neustart in den Betriebsmodus Automatik Bereit. Der automatisierte Betrieb muss bewusst aktiviert werden.
- Im Modus Automatik Bereit werden durchgehend Bremsbefehle und keine Fahr- oder Lenkbefehle ausgegeben. Wird im Modus Automatik eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Werten oder ein sonstiger Fehler festgestellt, wechselt das Fahrzeug in den Modus Automatik Bereit.
- Die Anwesenheit des Beobachters im Fahrerhaus wird mittels eines Tasters überwacht, den dieser im Automatikmodus betätigen muss. Fehlt die Betätigung des Tasters, wechselt das Fahrzeug in den Modus Automatik Bereit.
- Ein Wechsel der Betriebsmodi erfolgt nur, wenn über Wahlschalter oder Aktivierungstaster vorgegeben.
- Im Modus Manuell werden keine Bremswerte ausgegeben.

Die beiden vorgesehenen SIL2-Laserscanner wurden an das Fahrzeug gebaut und in Betrieb genommen. Mit der mechanischen Vorrichtung können Winkel und Reichweite des überwachten Bereichs beeinflusst werden. Das System wurde in Zusammenarbeit der Götting KG und dem IVI auf Funktionalität getestet.



Bild 5: Bodenscanner vorne (links) und hinten (rechts) mit kleiner Wetterschutzhaube

Für den manuellen Betrieb im öffentlichen Straßenverkehr wurde eine Ausnahmegenehmigung angestrebt. Dazu muss das Automatisierungssystem im manuellen Modus sicher und rückwirkungsfrei abgeschaltet werden. Um die funktionale Sicherheit zu erreichen, wurden dann die Komponenten zur Abschaltung betrachtet und nicht die Automatisierungskomponenten dahinter.

### Einbeziehung ZPO / BG

Unter Beteiligung der Götting KG wurden mehrere Gespräche und Treffen mit dem TÜV (TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH) durchgeführt. Im Nachgang wurden die Ergebnisse dokumentiert und umgesetzt. Des Weiteren bestand ein regelmäßiger Austausch mit der Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik, die häufig für Anlagen mit fahrerlosen Transportsystemen im innerbetrieblichen Einsatz zuständig ist.

### Evaluierung Sicherheitskonzept

Inhalt dieses APs war die Evaluierung des in AP 3.2 ausgearbeiteten Sicherheitskonzeptes in verschiedenen Szenarien. Unter Beteiligung der Götting KG wurden einzelne Funktionen überprüft:

- Bodenscanner Götting: Hinsichtlich des Personenschutzes konnte die Funktionalität mittels der definierten Prüfkörper (stehender / liegender Zylinder gemäß Richtlinie) bestätigt werden. Bei Bedarf kann der Überwachungsbereich an die Fahrsituation angepasst werden. Bei einer notwendigen Annäherung an feststehende Hindernisse (z. B. Rampe) muss der Scanner deaktiviert werden. In diesen Bereichen gelten zusätzliche Richtlinien (z. B. Kennzeichnung von Gefahrenbereichen).
- Bremssteuerung Wabco: Die im Versuchsfahrzeug verbaute MB-CBU Bremsanlage von WABCO ermöglicht die Ansteuerung der Bremse über eine proprietäre Botschaft auf dem internen Fahrzeugbus. Diese Möglichkeit wurde im Versuchsfahrzeug im August 2018 positiv getestet. Ein vollständiger Stillstand ist mit dieser Botschaft jedoch leider nicht möglich, da sich das Fahrzeug mittels der Notbrems CAN Nachricht nur bis 2 km/h mit der gewünschten Verzögerung abbremsen lässt. Eine vollständige Abbremsung soll mit dem elektrischen Antrieb erfolgen.
- Schnittstelle Fahrzeugsteuerung <> Sicherheitssteuerung: Unabhängig von der Fahrzeugsteuerung kann die Sicherheitssteuerung (SHS) ein sicheres Signal für

einen Nothalt erzeugen. Die Auswirkung der Bremskraft muss im Fehlerfall auch ohne Zutun der Fahrzeugsteuerung (z. B. entgegen der Motorregelung) ausreichen, um das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu versetzen. Darüber hinaus sorgt die Datenschnittstelle dafür, dass die Fahrzeugsteuerung die Soll-Geschwindigkeit des Antriebs stoppt und weitere Aktionen (z. B. Senken Ladebordwand) unterbindet.

- Umschalten zwischen manuellem und automatischen Modus: Das Umschalten kann mittels eines Schlüsselschalters erfolgen. Eine versehentliche Umschaltung gilt als ausgeschlossen.



Bild 6: Auswerteeinheiten für die Bodenscanner im Fahrzeug

#### 5.1.4. Steer-by-Wire Verteiler-LKW (AP4)

##### Integration Ortungstechnologie

Das Ziel dieses AP seitens der Götting KG war die Integration der in AP 5 entwickelten Ortungstechnologie zur Fusion der lidarbasierten Lokalisierung anhand der Umgebung (AMCL) mit der Satellitennavigation (GNSS) im Fahrzeug. Dazu wurde das entwickelte Fusionssystem basierend auf einem Kalmanfilter (EKF) installiert und parametrierung. In der ersten Testphase wurden Fahrten auf dem Gelände der Götting KG durchgeführt.



Bild 7: Testfahrt auf dem Gelände der Götting KG

Die funktionsgerechte Integration konnte dabei bewiesen werden. Weiterhin wurden Tests bezüglich des Wegfalls einzelner Quellen durchgeführt sowie die Parametrierung optimiert.



Bild 8: Tests zum Wegfall GNSS (links) und AMCL (rechts)

Im Anschluss wurde das Fahrzeug an den Partner IVI übergeben.

Bei einem weiteren Treffen in Dresden wurde die Ortungstechnologie ebenfalls auf dem Gelände des IVI getestet.



Bild 9: Testgelände IVI: Übersicht (links), Hügel (Mitte) und Zaun (rechts)

Dabei haben sich die schrägen Flächen der innen- und außenliegenden Begrenzungen sowie ein (für Lidar) halbdurchlässiger Zaun als besondere Anforderungen herausgestellt.

Die Funktion des Ortungssystems konnte trotzdem erfolgreich nachgewiesen werden. Auch die Umschaltung zwischen Gebieten mit ausschließlich GNSS und Gebieten mit fusioniertem GNSS mit AMCL konnte demonstriert werden.



Bild 10: Visualisierung des Ortungssystems auf dem Gelände des IVI

### 5.1.5. Ortung auf dem Betriebsgelände (AP5)

#### Technologieauswahl

Das Ziel dieses Arbeitspakets seitens der Götting KG war die Auswahl geeigneter Technologien zur Sensorfusion der Lokalisierung sowie die Erstellung einer Strategie zur Umsetzung. Nachfolgende Komponenten wurden ausgewählt.

- 1.) GNSS-System von GeneSys (System ADMA)
- 2.) 3D-Sensor-System von Ibeo (ibeo LUX)
- 3.) Odometrie des MB Axor
- 4.) Industrie-PC „Automation PC 2100“ von B&R Industrie-Elektronik GmbH mit Linux-Umgebung (Debian 8) und ROS (Robot Operating System) [nur während der Testphase bei Götting]

Die Anschaffung und die grundlegende Integration der ADMA und des LUX wurden vom IVI übernommen. Eine Datenschnittstelle zur Fahrzeug-Ortungssteuerung der Götting KG wurde in Absprache mit dem IVI umgesetzt.

Das Lokalisierungssystem erhält als Eingangswerte eine GNSS-Pose, Laserscannerdaten sowie Daten zur Berechnung der Odometrie des Fahrzeugs. Zur Beurteilung der empfangenen GNSS-Pose wird eine Datenbank mit der zu erwartenden Qualität des Signals in Abhängigkeit der Position aufgebaut. Die Datenbank wird bei der Fusion mit anderen Daten berücksichtigt. Vom 3D-Laserscanner werden Daten (z. B. Punktwolke) empfangen und mit einer zuvor aufgebauten Karte verglichen. Anhand von charakteristischen Umgebungsmerkmalen (Features) kann die Pose des Fahrzeugs ermittelt werden. Die Qualität der Pose ist stark von der Umgebung abhängig. Als Ausgangswert wird eine fusionierte Pose geliefert, die sich auf die Odometrie stützt. Die Odometrie wird regelmäßig

durch die GNSS-Pose und die Laserscannerdaten korrigiert, so dass eine Langzeitstabilität möglich ist. Als wesentliche Informationen enthält die fusionierte Pose X/Y-Position und Ausrichtung bezüglich einer definierten Karte sowie einen Confidence-Wert. Der Confidence-Wert trifft eine Aussage darüber, welche Qualität für das Ausgangssignal wahrscheinlich ist. Um die Funktionsfähigkeit des Systems herzustellen, ist eine Inbetriebnahmephase notwendig. Dabei wird mittels SLAM eine Karte der Umgebung aufgebaut. Während der Entwicklungsphase und zur Inbetriebnahme kann eine externe Einheit mit einem Display verbunden werden, um eine Visualisierung und Parametrierung durchzuführen.

### Entwicklung der Komponenten

Die Ziele dieses Arbeitspakets seitens der Götting KG waren zum einen die Entwicklung eines Ortungssystems sowie zum anderen die Schnittstelle zur zentralen Fahrzeugsteuerung des IVI.

Zur Fusion der verschiedenen Informationen des Ortungssystems wurde ein Extended-Kalman-Filter (EKF) entwickelt. Das Kalman-Filter ist unter anderem gut dazu geeignet, mehrere Sensoren mit Varianzen zu gewichten und zu einer Information zu fusionieren, so dass das Verhalten zum einen dynamisch und zum anderen trotzdem fehlertolerant ist. Im nachfolgenden Bild wird die Fusion mittels EKF von zwei absoluten Positionsinformationen (hier zwei AMCL auf unterschiedlichen Höhen) dargestellt. Die Qualität der Eingangssignale beeinflusst die Annäherung der EKF-Pose in Richtung der genaueren Querinformation. Wenn die Varianz der Querinformation annähernd gleich ist, findet eine Mittelung der Eingangsposen statt.

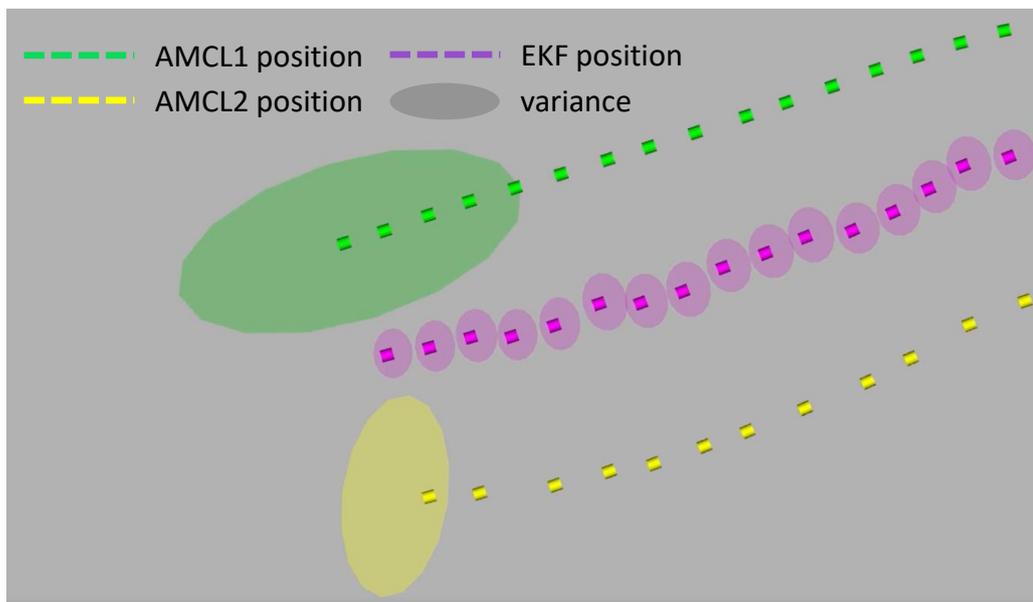


Bild 11: Verhalten des EKF mit zwei absoluten Positionsinformationen ähnlicher Qualität

Wenn AMCL1 eine kleinere Varianz aufweist, dann nähert sich die EKF-Pose stark an diese Seite an und umgekehrt (siehe zwei nachfolgende Bilder).

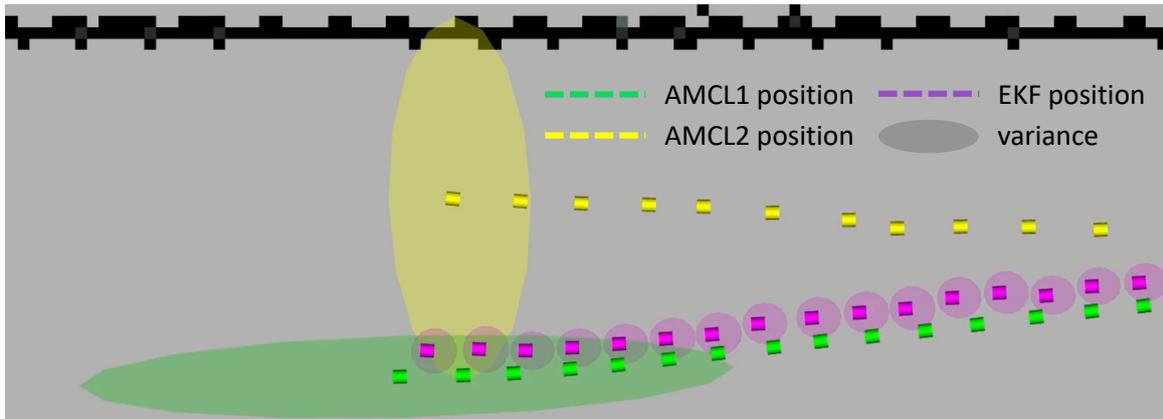


Bild 12: Verhalten des EKF mit kleiner Varianz für AMCL1

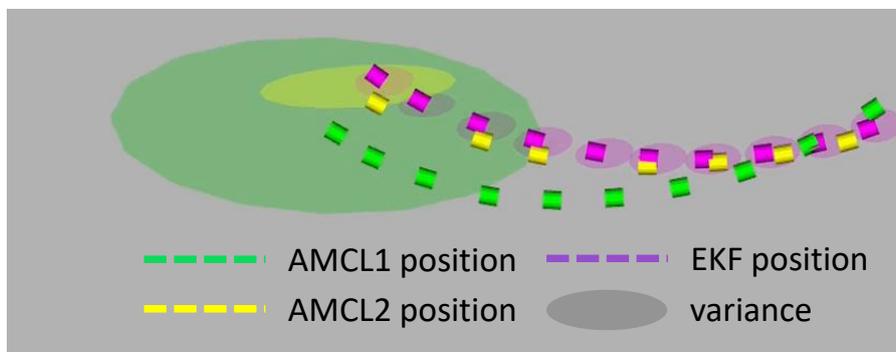


Bild 13: Verhalten des EKF mit kleiner Varianz für AMCL2

Weiterhin wurde die Möglichkeit geschaffen, eine inertielle Messeinheit in Form eines Drehratensensors um die Hochachse zu integrieren, um die Fahrzeugausrichtung besser regeln zu können. In den zur Verfügung stehenden Testumgebungen konnte eine stabile Lokalisierung erreicht werden.

Des Weiteren wurden Funktionen umgesetzt, mit denen die verschiedenen Lokalisierungsmöglichkeiten auf dem Betriebsgelände unterschiedlich gewichtet werden können. Einerseits kann dazu die Varianz der Eingangsdaten des EKF direkt beeinflusst werden, so dass bspw. das GNSS-Signal in stör anfälligen Zonen (z. B. im GNSS-Schatten von Gebäuden) nur zu einem geringen Teil in die Berechnung der Pose eingeht. Andererseits können die Eingangssignale der absolut messenden Sensoren ganz abgeschaltet werden, so dass das Fahrzeug in einem Bereich bspw. ausschließlich mit Odometrie weiterfährt. Das macht bspw. dann Sinn, wenn AMCL in einem Bereich aufgrund einer hoch dynamischen Umgebung häufig zu einer Fehllokalisierung führen würde. Um diese Zonen definieren zu können, werden in der Karte Flächen markiert, denen dann Attribute zugeordnet werden können.

Im nachfolgenden Bild ist ein zyklischer Testablauf dargestellt, bei dem AMCL (hier Umgebungslokalisierung mittels Laserscanner) pro Umlauf einmal deaktiviert und wieder aktiviert wird. Das Fahrzeug bewegt sich im Uhrzeigersinn, wobei die Deaktivierung in der dunkelgrauen Fläche erfolgt, d. h. in dieser Fläche fährt das Fahrzeug ausschließlich mit Odometrie. Beim Übergang in den hellgrauen Bereich (Szene 1) wird AMCL wieder reinitialisiert, so dass eine theoretische Fehllokalisierung mittels der Laserscanner in diesem

Bereich keinen Einfluss hat. Bei der Reinitialisierung wird die Partikelwolke künstlich vergrößert, damit der Fangbereich nach der Fahrt mit Odometrie ausreichend groß ist (Szene 2). Nach einigen Zyklen hat sich die Partikelwolke dann zusammengezogen und AMCL wird wieder in die Berechnung der Pose einbezogen (Szene 3), wobei anfänglich die Varianz sehr groß eingestellt wird (um Sprünge zu verhindern). Anschließend verringert sich die Varianz und die Pose nähert sich wieder stärker dem AMCL an (Szene 4).

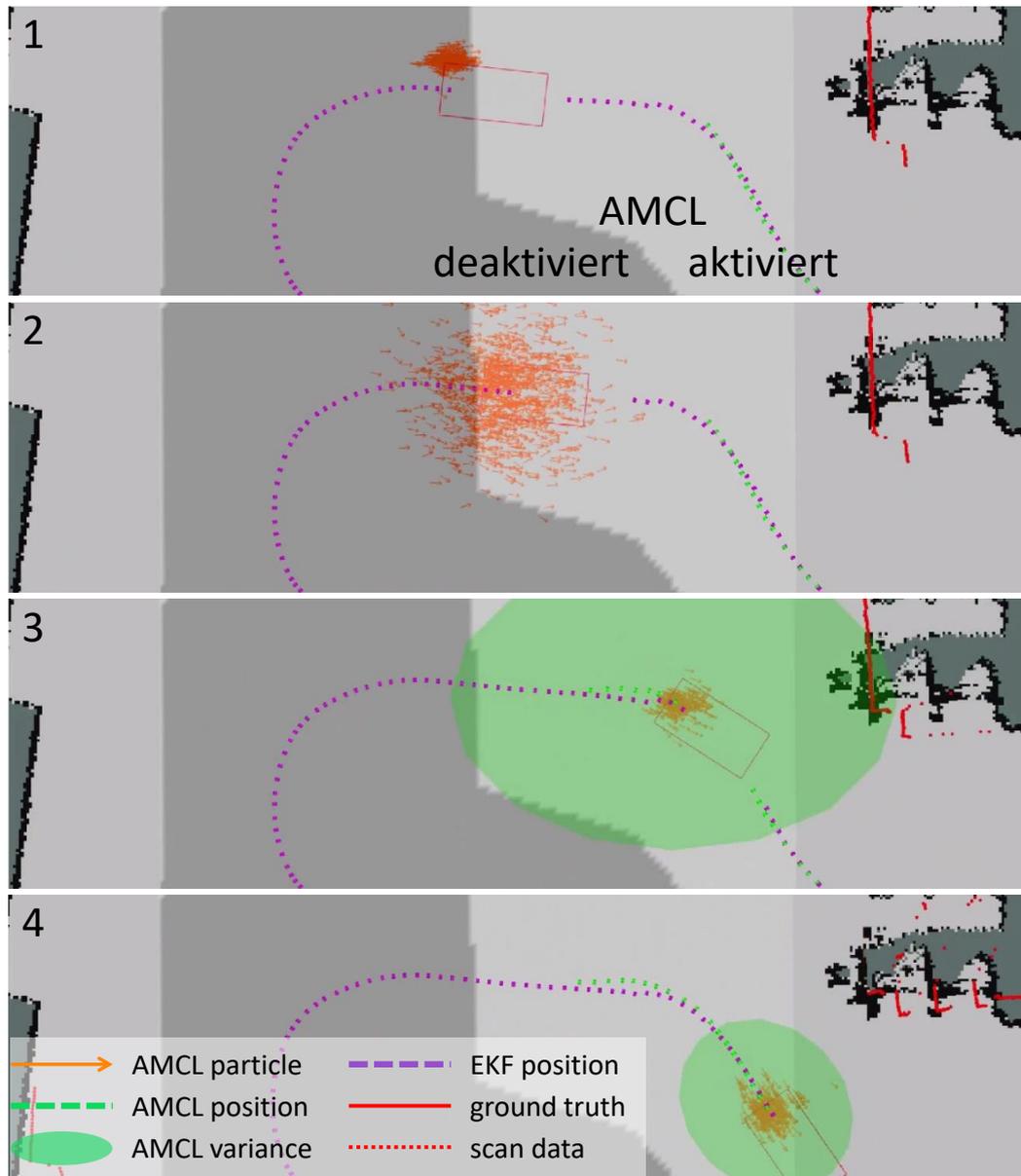


Bild 14: Deaktivierung und Reinitialisierung des AMCL mittels EKF

Weiterhin kann die Attributwahl innerhalb definierter Flächen dazu genutzt werden, dass Laserdaten partiell ausgeblendet werden. Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, dass AMCL aufgrund von verfahrensbedingten Verwechslungsmöglichkeiten anfällig dafür ist, dynamische Objekte zur Berechnung der Lokalisierung zu nutzen, wenn sich diese Objekte in der Nähe von statischen Objekten befinden. Als Folge kann es dazu führen, dass ein Fahrzeug in Bereichen mit unstrukturiert abgestellten Objekten unbeabsichtigte Kurven fährt

(siehe nachfolgendes Bild oben). Wenn diese Flächen für die Berechnung ausgeblendet werden (siehe nachfolgendes Bild unten), dann verwirft AMCL die Scanpunkte die (vermutlich) in diesen Bereich treffen, so dass potentiell nur statische Objekte genutzt werden (hier Säulen vom Gebäude). Entsprechend folgt das Fahrzeug wesentlich besser der beabsichtigten Trajektorie.

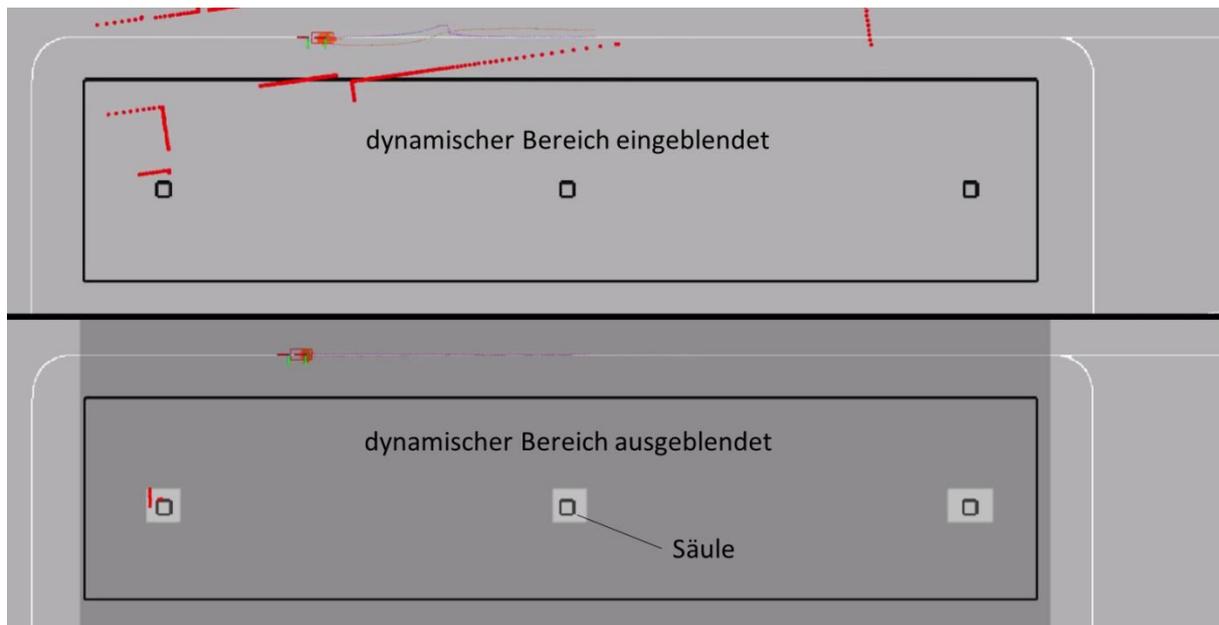


Bild 15: Ausblenden dynamischer Bereiche

Grundsätzlich sind AMCL und auch die Kartenaufnahme von der Odometrie des Fahrzeugs abhängig. Um den Einfluss zu verringern oder sogar ganz auf die Radodometrie verzichten zu können, wurde eine Bewegungsschätzung mittels der Laserdaten ausprobiert. Dabei wird berechnet, wie sich das Scanbild relativ zum vorhergehenden Zyklus verschoben und verdreht hat, um Rückschlüsse auf die Fahrzeugbewegung zu ermöglichen. Im nachfolgenden Bild sieht man ein Testfahrzeug, das ohne Odometrie manuell verschoben wurde (die hinteren Räder sind nur passive Rollen ohne Sensorik). Mittels der Laserdaten (rote Punkte) wurde die Bewegungsschätzung (lila Punktfolge) durchgeführt. Das Verfahren kann unter bestimmten Bedingungen erfolgreich sein, im Vergleich zur Radodometrie bei normalen Straßenverhältnissen zeigt sich aber eine geringere Genauigkeit.

Weiterhin wurde eine browserbasierte Oberfläche (GUI) für die Lokalisierung erarbeitet, um eine bessere Möglichkeit zur Bedienung und Visualisierung zu haben. Mit der GUI ist es möglich, Konfigurationen vorzunehmen, eine Karte aufzunehmen, Scandaten anzuzeigen und den Status darzustellen.

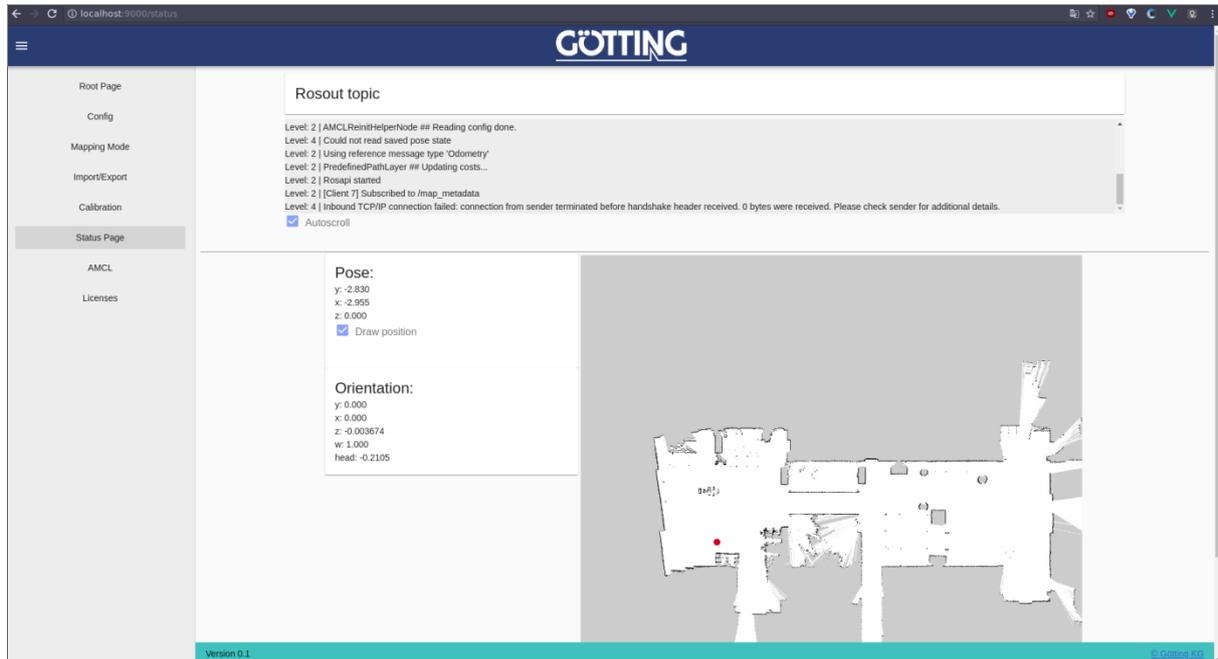


Bild 16: GUI zur Darstellung des Status sowie der AMCL-Pose

## Entwicklung der Ortungsalgorithmen

Die Ziele des APs seitens der Götting KG waren es, erstens eine abstrakte Beschreibung der Umgebungskarte zur Komprimierung der Daten zu entwickeln, sowie zweitens darauf aufbauend eine Lokalisierung zu ermöglichen.

In der Konzeptphase wurde für das Projekt festgelegt, mit einer 2D-Karte zu arbeiten, da das eing geplante IBEO-Laserscannersystem aufgrund der geringen vertikalen Spreizung nur einen sehr kleinen dreidimensionalen Ausschnitt erzeugen kann. Mit dem kleinen Ausschnitt, besonders im Nahbereich, war es nicht realistisch, dass 3D-Features ausgewertet werden können.

Weiterhin wurde bislang der weit verbreitete Ansatz einer Grauwert-Karte zur Beschreibung der Umgebung gewählt. Bei den vorliegenden Randbedingungen kann angenommen werden, dass das Übertragen der Karte vom stationären Rechner zum Fahrzeug einen zu vernachlässigenden Zeitfaktor von wenigen Sekunden (einmalig) ausmacht. Dabei wurde eine Nettorate des 802.11p Standard von 25 Mbit/s sowie eine Karte mit 100 mb angenommen. Weiterhin wurde eine Komprimierung berücksichtigt, da sich eine Grauwert-Karte sehr gut verlustfrei verdichten lässt. Die zum Packen und Entpacken notwendige Zeit hängt von einigen Faktoren ab, in der Testphase wurde in Summe ca. eine Sekunde benötigt. Zudem kann die komprimierte Karte mit der unveränderlichen Umgebung bereits vorgehalten werden, so dass der Download direkt starten kann. Eine entsprechende Schnittstelle zum De-/Komprimieren und Übertragen wurde geschaffen. Daher war keine abstrakte Beschreibung der Umgebung in Form von geometrischen Objekten (wie im Antrag angedacht) zur Komprimierung der Daten notwendig/sinnvoll.

Zur Kartenerstellung wurde ein SLAM- (Simultaneous Localization and Mapping) Verfahren basierend auf dem open-source-Modul „cartographer“ entwickelt. Der Ansatz zeigt auch bei großen Flächen und im Außenbereich gute Ergebnisse. Es können mehrere Scanner gleichzeitig sowie die Odometrie des Fahrzeugs beim Mapping eingesetzt werden. Im Vergleich zum vorher genutzten „hector mapping“ konnte der Ringschluss deutlich verbessert werden.



Bild 17: beispielhafte Umgebungskarte

Aufbauend auf der Kartenerstellung wurde von der Götting KG zur Lokalisierung ein AMCL- (Adaptive Monte Carlo Localization) Verfahren umgesetzt. Es wurden automatische Testfahrten im Außenbereich auf dem Gelände der Götting KG sowie auf einem Flughafengelände durchgeführt. Das Verfahren funktioniert in vielen anwendungsrealistischen Bedingungen eines Betriebshofes zuverlässig. Es gibt aber auch erweiterte Anforderungen in Grenzsituationen, die zu einer Fehllokalisierung führen können, bspw. gewölbte Fahrbahnen, fehlende Stützstellen, Doppelwände oder ein Verrutschen von dynamischen Objekten. Es wurde eine Handlungsempfehlung verfasst, so dass die erforderlichen Bedingungen dokumentiert sind.

Weiterhin wurde zur Vereinfachung und Ausweitung der Tests von der Götting KG eine Möglichkeit zur Simulation des Mappings und der Lokalisierung geschaffen. In der Simulationsumgebung (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 kann der Algorithmus zur Lokalisierung (AMCL) einfach aber mit hoher Aussagekraft getestet werden. Beispielsweise können nach einer Kartenaufnahme störende Hindernisse eingebracht werden, die das Scanbild einschränken, um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit zu analysieren. Die Kartenaufnahme kann ebenfalls simulativ getestet werden.

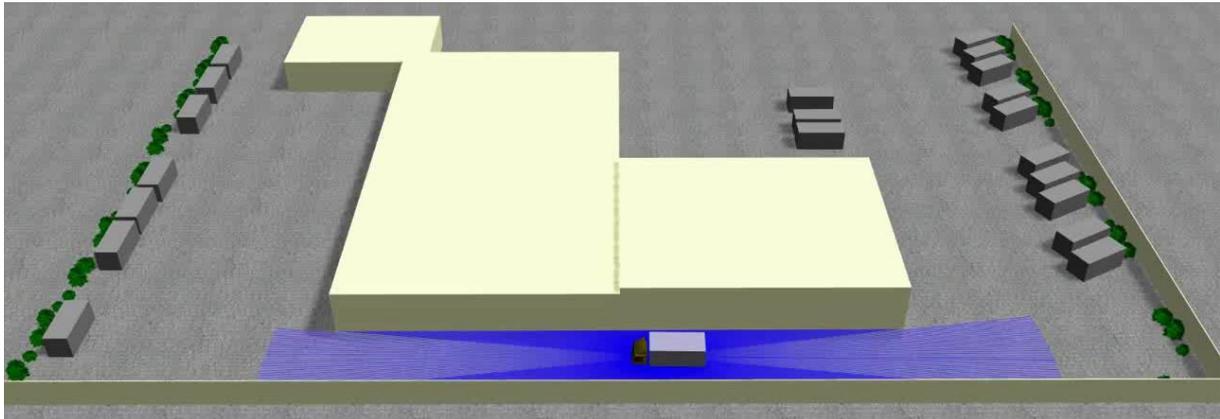


Bild 18: Simulationsumgebung für den Emons-Betriebshof mit Verteiler-LKW (unten Mitte) mit simulierten Scannerdaten (blau)

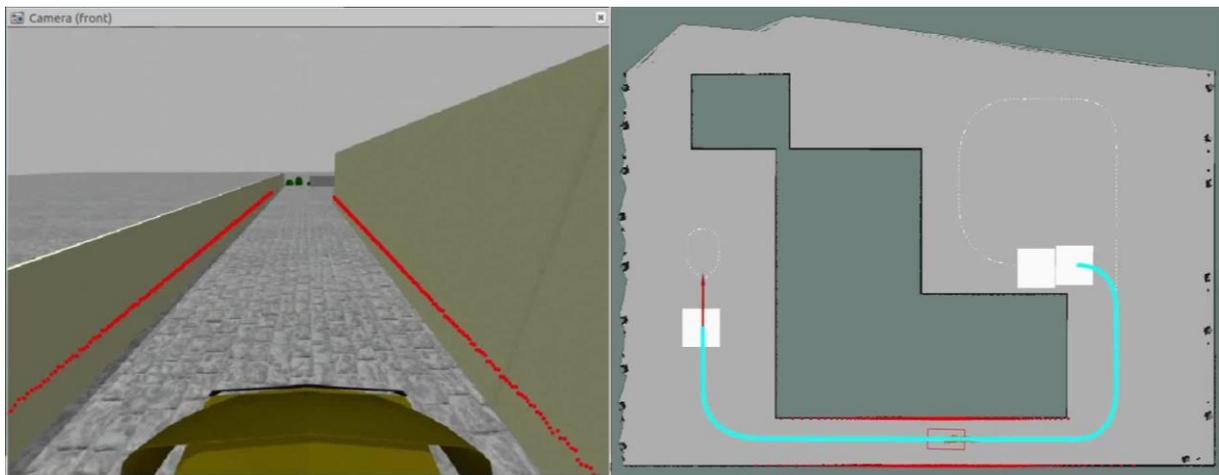


Bild 19: Mitfahrende Kamera innerhalb der Simulationsumgebung (links) und Visualisierung des AMCL-Filters (rechts); Scannwerte rot

Im Projektverlauf wurde mit mehreren 3D-Laserscannern zur Erstellung der Karte und zur Lokalisierung gearbeitet. Dabei wurden (aus oben genannten Gründen) ein oder zwei Ebenen ausgewählt, auf die dann getrennt voneinander das vorher entwickelte AMCL-Verfahren angewendet wurde. Die ausgewählte Ebene wird dafür virtuell auf den Boden projiziert (siehe Bild unten). Vorteilhaft ist es aber, dass die Scanner eine hohe Anbauposition haben, um über Hindernisse zu gucken.

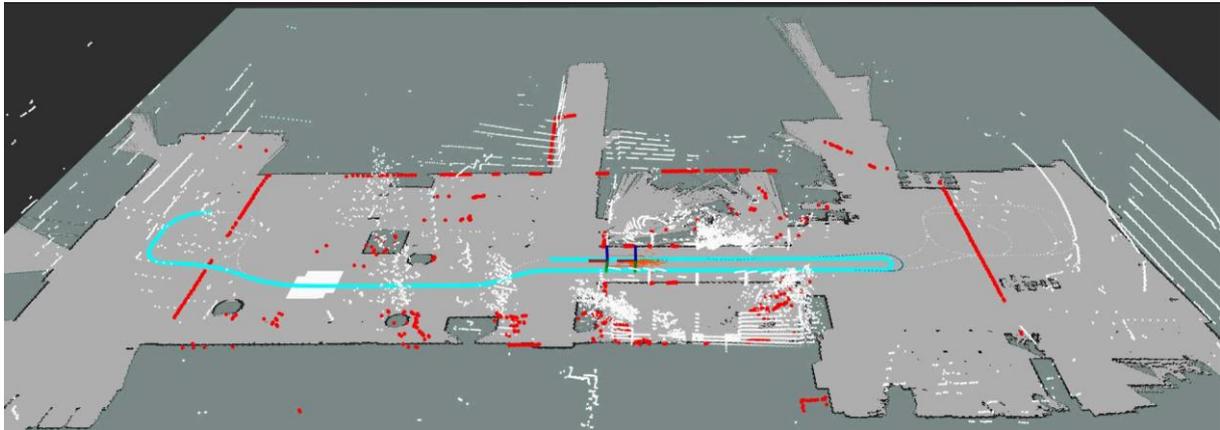


Bild 20: Darstellung der Lokalisierung mittels ausgewählter Ebene

Neben dem AMCL-Verfahren wurde ebenfalls an der Extraktion von Features zur relativen Positionierung gearbeitet. Dazu wird eine geometrische Beschreibung einer Szene erstellt und gespeichert. Im online Prozess wird dann im Scanbild nach einer passenden Struktur gesucht. Im folgenden Bild wird ein Scan dargestellt (grüne Punkte), in dem vier Beine (einer Wechselbrücke) aufgrund ihrer geometrischen Beschreibung zueinander (rote Kreise) detektiert wurden (blaue Kreise). Aufgrund der Lokalisierung anhand von Features kann eine relative Positionierung durchgeführt werden.

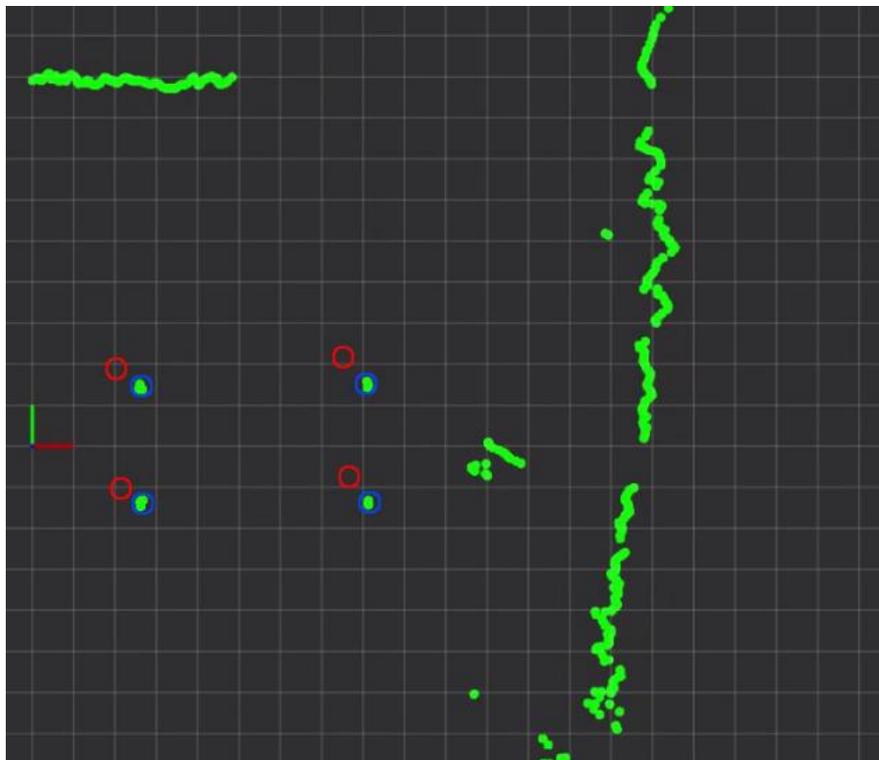


Bild 21: Auswertung von geometrisch beschriebenen Strukturen

Zum Abschluss des APs wurde die Inbetriebnahme des Satellitennavigationssystems (Genesys) im Fahrzeug abgeschlossen. Für den Betrieb wird eine zusätzliche Basisstation genutzt. Zur Initialisierung der Pose muss das Fahrzeug über eine längere Strecke bewegt werden, da lediglich eine Antenne verbaut ist, so dass über eine Messung nur die Position

(nicht aber die Orientierung) bestimmt werden kann. Funktions- und Genauigkeitsmessungen wurden erfolgreich durchgeführt.

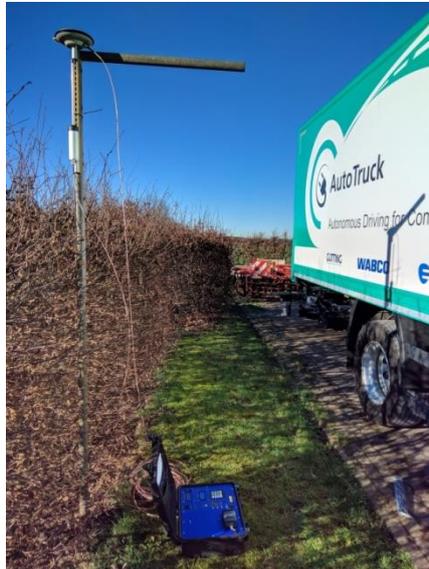


Bild 22: Basisstation der Satellitennavigation mit Antenne

### Integration der Technologie auf dem Testgelände

Das Ziel dieses APs war die Vorbereitung der Testphase auf dem Gelände der Spedition Emons.

Für die Korrekturdaten der Satellitennavigation wird in dem Projekt eine eigene Basisstation genutzt. Im Projektverlauf hat sich ergeben, dass es zweckmäßig ist, eine Basisstation transportabel in einem Koffer mit eigener Energieversorgung zu wählen. Ein solches System wurde auch für die Tests auf dem Gelände der Götting KG und vom IVI genutzt. Weitere Vorbereitungen zur festen Anbringung und Installation der Basisstation für die Testphase bei Emons waren daher nicht notwendig.

Seitens der Götting KG wurden vorbereitende Untersuchungen zur Nutzung von zusätzlichen künstlichen Marken durchgeführt. In Grenzfällen kann es notwendig sein ein oder zwei künstliche Referenzen zu schaffen, wenn der „GNSS-Schatten“ und die Umgebungsbedingungen anderenfalls nicht zu einer anwendungsgerechten Ortungsgenauigkeit führen. In der Simulationsumgebung wurden einige Spezialfälle (z. B. komplette Verdeckung des Sensorfelds, Peilung an Rampen) definiert und die Lokalisierung mit und ohne künstliche Marken untersucht. Daraus wurden Referenzobjekte abgeleitet und für die Tests auf dem Betriebshof hergestellt. Während der Testphase wurden die zusätzlichen Referenzobjekte allerdings nicht eingesetzt, weil die Lokalisierungsgenauigkeit ausreichend war.

## 5.1.6. Fahrzeugsteuerung (AP7)

### Definition notwendiger Fahrzeugfunktionen

Die Hauptaufgabe der Götting KG in diesem AP war die Zuarbeit des Fraunhofer IVI als Arbeitspaketleiter hinsichtlich der Definition der Funktionen. Folgende Funktionen wurden jeweils mit Zweck, Ein- und Ausgängen sowie der Beschreibung des gewünschten Verhaltens gemeinsam mit den Partnern definiert:

#### Funktionen der Fahrzeugsteuerung

- Trajektorien einlesen
- Elektrisch verzögern
- Geschwindigkeit stellen
- Mechanisch verzögern
- Lenkwinkel stellen
- Ladeklappen steuern
- Lichtanlage schalten
- Schalter auslesen
- Trajektorienregelung

#### Funktionen des Ortungssystems

- Fusionierte Pose ausgeben
- Confidence der fusionierten Pose bestimmen
- Odometrie-Daten einlesen
- GPS-Daten einlesen
- 3D-Laserscanner-Daten einlesen
- GUI zur Visualisierung und Parametrierung

#### Funktionen des Sicherungssystems

- Notbremsung durchführen
- Überwachung der Geschwindigkeit
- Überwachung des Abstands bezüglich Personen
- Überwachung weiterer sicherheitsrelevanter Zustände

#### Funktionen des Kommunikationssystems

- Auf Kommunikationsabriss prüfen
- Fahrzeug hinzufügen
- Daten senden an Fahrzeug XY
- Daten senden an Leitzentrale

#### Funktionen der Fahrzeugleitzentrale

- Trajektorie an Fahrzeug senden
- Fahrzeug anmelden
- Fahrzeug abmelden
- Manöverplanung anfordern
- Manöverplanung empfangen

#### Funktionen der Manöverplanung

- Aufgabe einlesen
- Trajektorie an Leitzentrale senden

## Funktionen des Fahrzeugs

- Elektrisches Bremsen
- Batteriestatus ausgeben
- Aktuellen Lenkwinkel ausgeben
- Aktuelle Geschwindigkeit ausgeben

## Entwicklung Algorithmen zur Kopplung Ortung/ Kommunikation/Steuerung

Die wesentliche Aufgabe der Götting KG in diesem AP war die Unterstützung des Fraunhofer IVI bei der Konzipierung der Programmablaufpläne, vor allem in Bezug auf die Ortung des Fahrzeugs. Gemeinsam wurde eine Vernetzungs- und Interaktionsstruktur der einzelnen Fahrzeugfunktionen erstellt. Ebenfalls wurde eine sinnvolle Struktur der sicherheitsgerichteten Steuerung aus Sicht der industriellen Praxis dargestellt. Mit dem Abschlusstest des Ortungssystems sowie den dazugehörigen Schnittstellen zum IVI auf dem Betriebshof konnte das AP erfolgreich abgeschlossen werden.

### 5.1.7. Fahrweg- und Missionsplanung (AP8)

#### Entwicklung Leitrechner

Das Ziel des APs gemäß Antrag der Götting KG war es, das Fraunhofer IVI insbesondere in der Konzeptionsphase basierend auf dem vorhandenen Know-How (bezüglich Kundenanforderungen sowie ähnlichen, bereits umgesetzten, technischen Lösungen) zum Thema Leitsteuerung zu unterstützen.

Die von der Götting KG ursprünglich entwickelte und vermarktete Leitsteuerung „TransportControl“ wurde zur Veranschaulichung einer modernen und kundengerechten Software als Beispielvorlage für das IVI eingebracht. Die Eigenschaften von TransportControl, die ebenfalls im Projekt AutoTruck angestrebt waren, wurden vorgestellt und erläutert (browserbasiert, Kommunikation, Server-Client-Architektur, Installation, Berechtigungssystem, Fernzugriff, Telegrammschnittstelle, Datenaustausch mit ext. Systemen, Scriptsystem).

Weiterhin wurde für die Testphase eine Anbindung zwischen TransportControl und der Simulation von AutoTruck geschaffen. Somit konnten Fahraufträge für die Simulation (Einzelaufträge/Dauerschleifen) mit der Leitsteuerung vorgegeben und visualisiert werden. Die Schnittstelle wurde ausgiebig getestet und für Analysen verwendet.

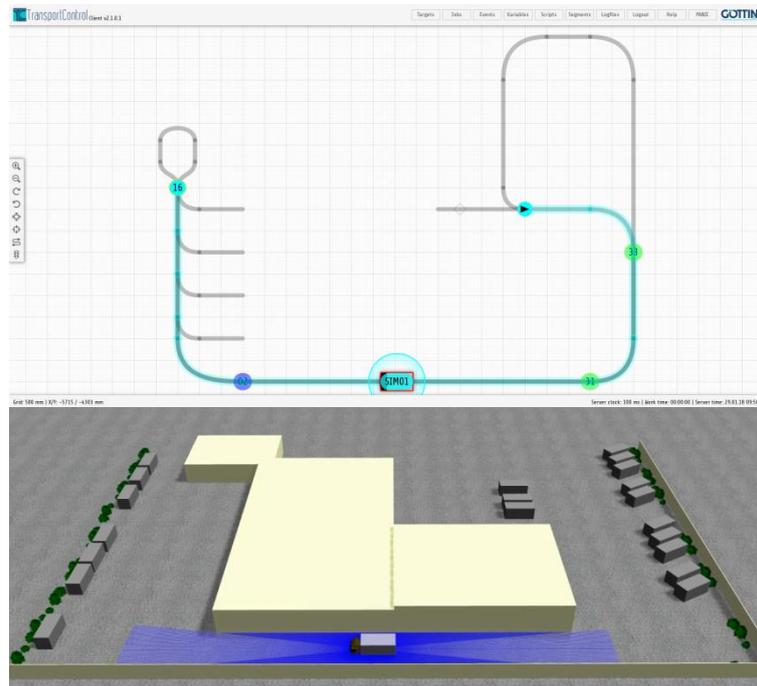


Bild 23: Erzeugung von Fahraufträgen mit TransportControl (oben) für die Simulation (unten)

### Entwicklung von Algorithmen zur Fahrwegplanung

Die wesentliche Aufgabe der Götting KG in diesem AP war die Unterstützung des Fraunhofer IVI beim Entwurf der Fahrwegplanung. Aufgrund umfassender Erfahrungen im Bereich der Fahrwegplanung von automatisch agierenden Fahrzeugen gab es in der Götting KG mehrere Möglichkeiten zur manuellen Bahnplanung. Diese Möglichkeiten wurden dem IVI vorgestellt, so dass daraus ein weiteres Vorgehen abgeleitet werden konnte.

Anders als aktuell bei der Götting KG für Industrieprojekte durchgeführt, müssen die Bahnen im Projekt AutoTruck nicht manuell im Voraus sondern vollständig oder mindestens teilweise automatisch während des Betriebs generiert werden. Sinnvollerweise werden die Bahnen dabei in mehrere Abschnitte eingeteilt, die aus Geraden und Kurven bestehen. Damit es physikalisch möglich ist, die gesamte Bahn zu fahren, müssen die Übergänge zwischen den Abschnitten und die Krümmungsverläufe bestimmten Kriterien genügen. Anhand des Planungstools „Track Editor“ der Götting KG wurden diese Kriterien dargelegt.

Der „Track Editor“ nutzt Bezierkurven, um die Übergänge zwischen einzelnen Elementen ohne Lenkwinkelsprung zeichnen zu können. Da das im Projekt eingesetzte Fahrzeug eine relativ träge Lenkung hat, spielt als weiteres Kriterium die Geschwindigkeit der Lenkwinkeländerung eine Rolle. In der Bahnplanung (im industriellen Umfeld wie im Straßenverkehr) werden daher sog. Klothoiden genutzt. Da das Tool direkt keine Erstellung von Klothoiden unterstützt, wurde das Tool für das Projekt AutoTruck dahingehend verbessert, dass die Bezierkurven möglichst identisch auf dem Verlauf einer Klothoide erzeugt werden. Da die Bezierkurven mit Steuerungspunkten erstellt werden, wurde deshalb eine Untersuchung durchgeführt, welche Parameter zu dem gewünschten Ergebnis führen. Die optimierten Parameter wurden in die aktuellste Version des Track Editors übernommen, so dass das frei zugängliche Tool ([www.goetting.de/trackeditor](http://www.goetting.de/trackeditor)) ab der Version 2.3 Bahnen erzeugen kann, die auch vom Verteiler-LKW gefahren werden können. Das Tool bzw. die

Erstellung einzelner Abschnitte kann als Vorlage zur automatischen Bahnplanung vom IVI genutzt werden. Die geplanten Strecken können auch innerhalb von TransportControl (s. AP 8) und der Simulation genutzt werden.



Bild 24: Beispiellayout im Track Editor ([www.goetting.de/trackeditor](http://www.goetting.de/trackeditor))

Darüber hinaus wurde die Überführung der virtuellen Kurven in Stützpunkte für den Lenkregler erörtert. Zur Definition der virtuellen Kurven (auch Geraden) werden Bezierkurven genutzt, da diese die Möglichkeit bieten, Strecken ohne Lenkwinkelsprung zeichnen zu können, und trotzdem von der Datenmenge sehr klein sind. Zur Beschreibung einer Bezierkurve einer beliebigen Länge sind nur vier Steuerungspunkte notwendig. Typische Regler zur Minimierung der Querabweichung führen ein Fahrzeug aber von Punkt zu Punkt, benötigen dafür also diskrete Stützpunkte. Deshalb errechnet ein Algorithmus aus der virtuellen Linie eine Liste von Punkten mit einer definierten Auflösung. Bei der Auflösung wird eine Abwägung aus der Datenmenge und der Regelqualität getroffen. Ein entscheidendes Kriterium bei der Bestimmung der Stützpunkte ist die Äquidistanz, d. h. ein gleichbleibender Abstand entlang der geregelten Bahn. Anderenfalls würde es ggf. zu einem sprunghaften Lenkverhalten führen, wenn sich kurze und lange Abstände abwechseln. Zur Bestimmung der Punkte wird vorläufig die theoretische Länge entlang der virtuellen Bahn berechnet, die dann durch die Anzahl der gewünschten Punkte geteilt wird, um einen beabsichtigten Stückpunktabstand zu bekommen. Mit diesem Abstand wird dann der erste Punkt entlang der Bahn erstellt, der allerdings aufgrund der begrenzten Auflösung immer einen (wenn auch sehr kleinen) Fehler hat. Dieser Fehler wird bei der Erstellung des nächsten Stützpunktes berücksichtigt, so dass in Summe die vorhergehenden Fehler immer möglichst gut ausgeglichen werden. Somit entsteht eine Abfolge von Punkten, die bei einer gegebenen Auflösung, die höchst mögliche Äquidistanz haben.

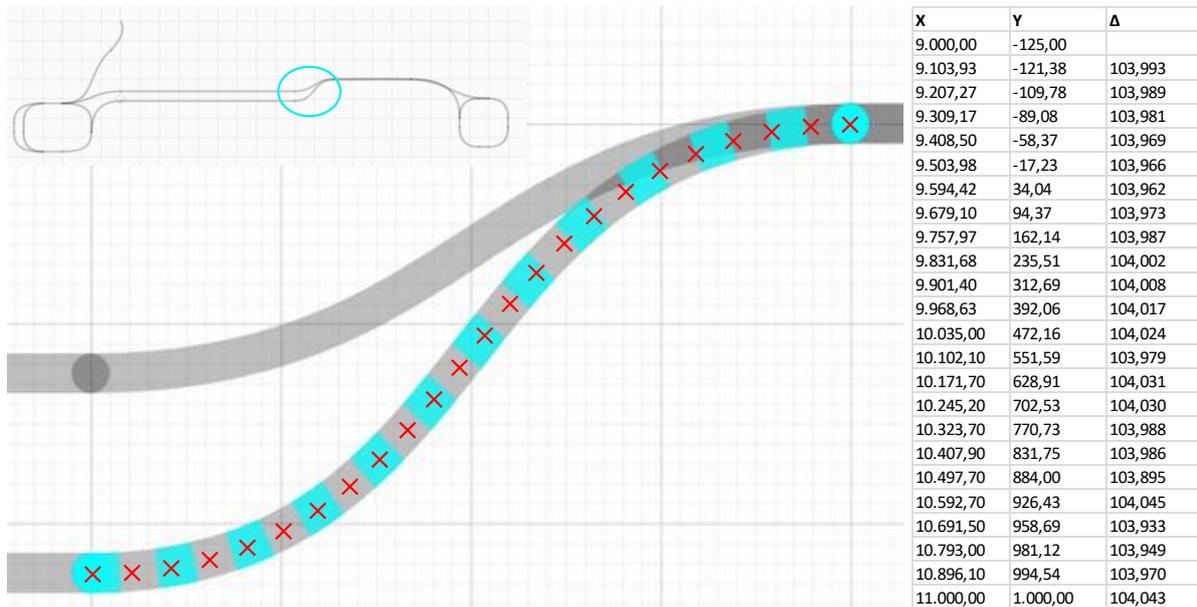


Bild 25: Veranschaulichung der Stützpunkte einer ausgewählten Bézierkurve

### 5.1.8. Demonstration und Erprobung (AP9)

#### Festlegung des Testszenarios

Die Hauptaufgabe der Götting KG in diesem AP war die Zuarbeit der Emons Spedition als Arbeitspaketleiter hinsichtlich der Erstellung der Testszenarien. Gemeinsam mit den Partnern wurden mögliche Testszenarien diskutiert und Abläufe zur Demonstration aufgezeigt. Die Details wurden hinsichtlich der Möglichkeiten und Hemmnisse kommentiert. Es ist abzuwägen welche Kosten die Umsetzung der Details verursachen und welcher Nutzen der Demonstration gegeben ist. Es wurden Ablaufpläne zu den Szenarien „Verteiler-Lkw“, „Be-/Entladen“ sowie „Wechselbrücken“ erstellt. Weiterhin wurde ein Szenario zur Funkabdeckung festgelegt.

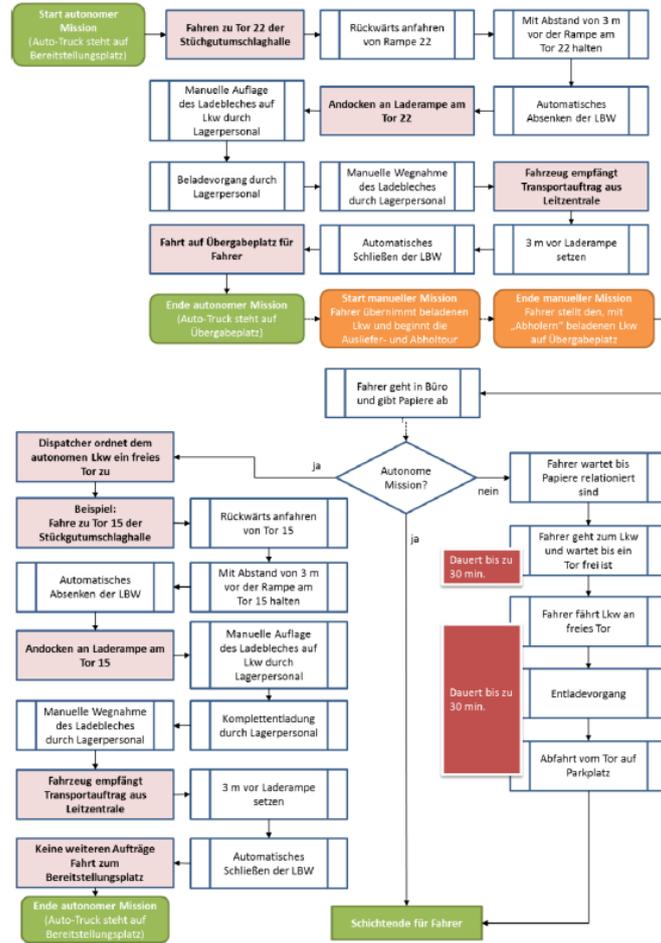


Bild 26: beispielhafter Ablaufplan für den Anwendungsfall „Verteiler LKW“

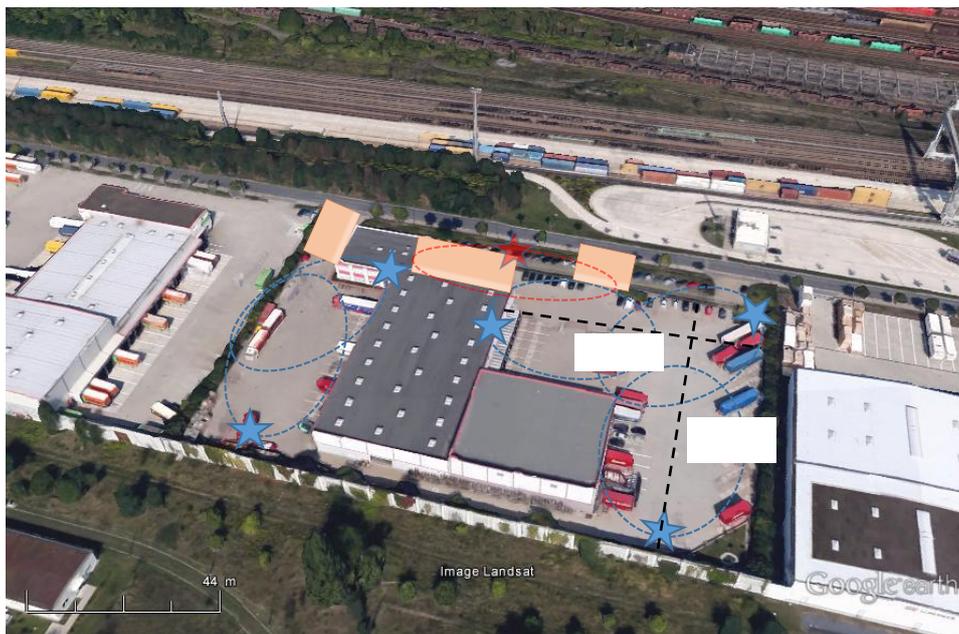


Bild 27: Übersicht des Testgeländes (Quelle: Google)

## Durchführung vollautomatischer Missionen

Das Ziel dieses APs war eine praxisnahe Versuchsphase mit dem Verteiler-LKW bei Emons.



Bild 28: AutoTruck bei Emons

Seitens der Götting KG konnten umfangreiche Tests hinsichtlich der Lokalisierung durchgeführt werden. Dazu wurden im ersten Schritt synchronisierte Rohdaten von allen Sensorquellen aufgenommen und im Anschluss zu einer Karte der Umgebung verarbeitet. Dabei hat sich herausgestellt, dass als Quelle für die Odometrie nicht die Fahrzeugsensorik, sondern das GNSS bessere Ergebnisse geliefert hat.

Aufbauend auf der Kartenerstellung wurde die Lokalisierung anhand der Umgebung getestet. Dabei hat sich bestätigt, dass in Bereichen mit Sicht auf Gebäudestrukturen eine gute Pose mit ca. 10 cm Genauigkeit erreicht werden kann. In Bereichen mit großer Abschattung durch abgestellte Fahrzeuge konnte (wie zu erwarten war) keine Aktualisierung des AMCL berechnet werden. Eine Überbrückung dieser Bereiche mittels der Odometrie war in den Tests aber erfolgreich, so dass fortlaufend eine Pose ausgegeben werden konnte.



Bild 29: Beispielkarte des Testgeländes (teilw. mit angrenzender Straße)

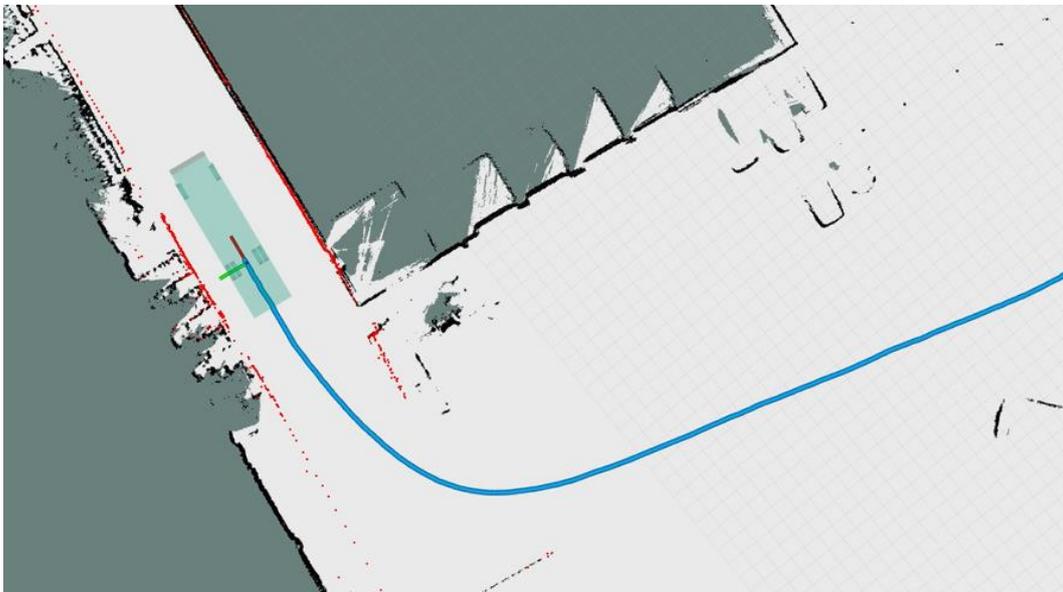


Bild 30: Kartenausschnitt mit Laserdaten (rot) und AMCL-Trajektorie (blau)

Im Anschluss wurde das GNSS-System in Betrieb genommen und getestet. Nach der Initialisierungsphase liefert das System sehr gute Werte im cm-Bereich, sogar direkt neben anderen Fahrzeugen, die physikalisch bedingt durch Reflektionen der Wellen, eine typische Störquelle für die Satellitennavigation darstellen. Die guten Ergebnisse sind durch das aufwändige System mit integrierter Inertialsensorik zu erklären. Lediglich in dem südlich gelegenen Teil des Testgeländes mit einem schmalen Fahrweg direkt am Gebäude hat das

System zu leichten Seitwärtsbewegungen geführt (siehe Bild unten). In diesem Abschnitt ist das GNSS-Signal also nicht sehr gut, aber für eine Transferfahrt immer noch ausreichend.

Als abschließende Testphase für die Lokalisierung wurde das Fusionssystem mit Laserdaten und GNSS eingerichtet und untersucht. Dazu wurden die beiden absoluten Messsysteme mittels Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Als Ergebnis kann die Fusion brauchbare Posen für die anschließende Bahnplanung und Regelung bestimmen. Es konnten keine Sprünge festgestellt werden, die einen sichtbaren Einfluss auf das Fahrzeugverhalten erzeugen könnten. Unter den gegebenen Bedingungen ist es deutlich gegeben, dass das GNSS-System einen viel größeren Einfluss auf das Ergebnis ausübt, als die Laserdaten. Das liegt zum einen an der wesentlich höheren Frequenz, zum anderen an der geringeren Varianz. In dem oben thematisierten schmalen Fahrschlauch im Süden lieferte die AMCL-Lokalisierung allerdings geringfügig bessere Werte, so dass man hier zur Optimierung einen Filter anwenden kann.

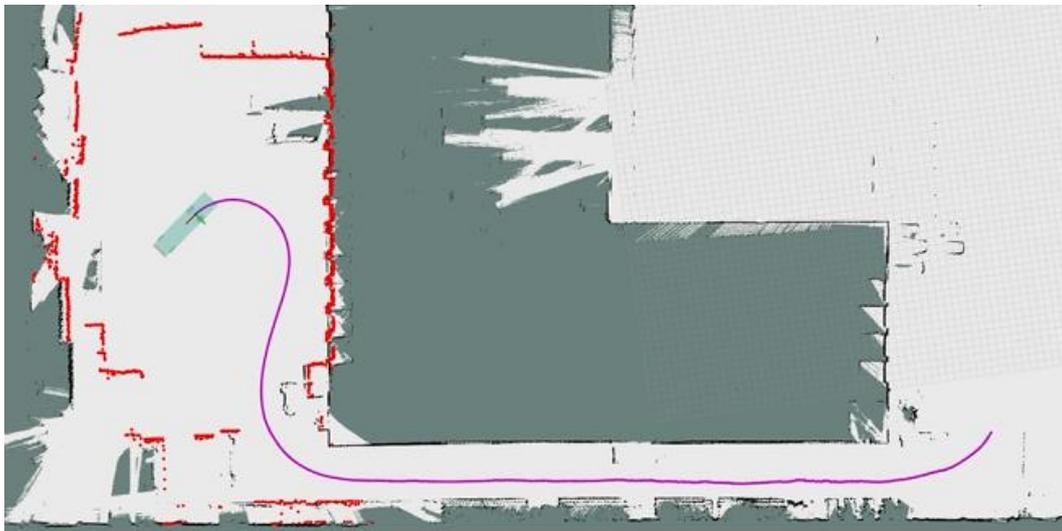


Bild 31: Kartenausschnitt mit Laserdaten (rot) und GNSS-Trajektorie (lila)

Es wurden einige Videodaten aufgenommen, die im Nachgang zu einem Imagefilm über AutoTruck verarbeitet werden sollen.

## 6. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der beantragte Zuwendungsbetrag in Höhe von 284.992,51 € (50 % der Selbstkosten des Vorhabens in Höhe von 569.985,02 €) wurde komplett angefordert. Im Rahmen der Nachkalkulation wurden Selbstkosten in Höhe ca. 600.000 € ermittelt. Neben den Personalkosten haben sich weniger als 2.000 € für Reisekosten ergeben. Weitere Kostenarten wurden nicht abgerechnet.

## 7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund des innovativen Charakters des Vorhabens sowie der damit einhergehenden wissenschaftlich-technischen Risiken sowie der individuellen wirtschaftlichen Verwertungsrisiken war eine Förderung der Tätigkeiten angemessen. Die ambitionierten

Vorhabenziele gingen deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinaus, so dass in vielen Arbeitspaketen neue, kreative Konzepte und Lösungen gefunden werden mussten. Im Vorfeld der Konzeptionsphase mussten umfangreiche Recherchen durchgeführt werden. Während des Projektverlaufs mussten die Konzepte mit Analysen und Tests untermauert werden, um eine solide Entscheidungsbasis aufzubauen. Weiterhin konnten spezifische Fragestellungen nur durch das Projektteam gemeinsam angegangen und beantwortet werden. Mit der Unterstützung dieses interdisziplinären Vorhabens wurden Forschungsergebnisse erzeugt, die für die gesamte Nutzfahrzeugbranche von hohem Interesse sind.

## 8. Nutzen und Verwertung

Als KMU ist die Götting KG daran interessiert, mit Unterstützung der Projektpartner einen vollautomatischen Lkw für Automatisierungszonen anzubieten. Dabei soll jeder Partner seine Ergebnisse einbringen ohne Konkurrenzsituationen zu schaffen. Es werden Synergien bei der Produkt-Vermarktung der Partner angestrebt. 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. Zunächst soll das AutoTruck-System vorwiegend im innerbetrieblichen Einsatz vermarktet werden. Sofern zulässig, sollen die Automatisierungszonen auf Verbindungs- bzw. Erschließungsstraßen erweitert werden.

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. Folglich kann die Amortisierungszeit von heute ca. drei bis fünf Jahren zukünftig gesenkt werden. Während zu Projektbeginn ca. 150 T€ für die Vollautomatisierung eines Lkw angesetzt werden mussten, zeigen die Ergebnisse, dass eine Automatisierung basierend auf den Seriensensoren/-aktuatoren langfristig die Umrüstkosten im Bereich von 50 T€ realistisch macht.

Insbesondere das Ergebnis seitens der Götting KG hinsichtlich der Lokalisierung bietet technische und wirtschaftliche Vorteile. Neben der Vermarktung von automatischen Fahrzeugen wird deshalb auch die Komponente der Lokalisierung als eigenständiges Produkt weiter im Fokus stehen. Diesbezüglich wird in Nachgang des Projektes eine Marktanalyse durchgeführt. Für die zukünftige Etablierung am Markt sind die Ergebnisse derart weiterzuentwickeln, dass die Funktionen zuverlässig sind, eine hohe Verfügbarkeit aufweisen und zu einem marktfähigen Preis hergestellt werden können. Hierzu ist ggf. eine Vereinfachung und Neuimplementierung erforderlich.

Da die Götting KG schon länger in dem Geschäftsbereich „Fahrerlose Transportfahrzeuge“ tätig ist und schon häufiger als Generalunternehmer Automatisierungsaufgaben durchgeführt hat, kann die Götting KG die Forschungsergebnisse weiterentwickeln, anbieten, vermarkten, liefern und auch die Gewährleistung übernehmen. Der Einstieg durch das Forschungsprojekt wird als Referenz und zur Kontaktaufnahme zu weiteren Unternehmen und ergänzenden Projekten weltweit genutzt. Eine Kooperation mit den Projektpartnern über das Forschungsprojekt hinaus ist aktuell in Arbeit.

## 9. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Hinsichtlich der Lokalisierung für Industriefahrzeuge anhand der Umgebung im Außenbereich sind weiterhin keine Firmen bekannt, die eine Lösung als Komponente anbieten. Innerhalb der Forschung wurde allerdings auch von anderen Organisationen, z. B. Fraunhofer IOSB, an dem Thema gearbeitet. Die Fusion insbesondere in Kombination mit einer Satellitennavigation ist weiterhin hoch aktuell.

Bezüglich der Sensoren, die zum Personenschutz an FTF im Außenbereich eingesetzt werden dürfen, hat die Firma SICK während der Projektlaufzeit ein neues Produkt mit SIL2 auf den Markt gebracht. Der „outdoorScan3“ wird sicherlich eine hohe Marktrelevanz erlangen.

In der Automobilindustrie ist hochautomatisiertes und autonomes Fahren ein Megatrend, dem zahlreiche Hersteller, Zulieferer und IT-Unternehmen folgen. Es ist zu erwarten, dass diese Technologien (Fahrerassistenzsysteme, Umfelderkennung, Car2X-Kommunikation etc.) teilweise auch Einzug in industriell genutzte Fahrzeuge haben werden.

## 10. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Es wurde mit Unterstützung des IVI eine öffentliche Homepage ([www.autotruck-projekt.de/](http://www.autotruck-projekt.de/)) für das Projekt eingerichtet. Neben den Informationen über das Projekt kann hier auch der Kontakt zu Firma Götting hergestellt werden. Ein Imagefilm ist aktuell in Bearbeitung und soll im Anschluss auf der Homepage veröffentlicht werden.

Zusätzlich ist es in Planung, die Ergebnisse auf einer Abschlussveranstaltung einem breiten Publikum aus Zulieferern, Fahrzeugherstellern und Logistikdienstleistern zu präsentieren. Auf diese Weise können die relevanten Kundenkreise für automatisiert agierende Lkw direkt erreicht und durch Demonstrationsfahrten von der Wirkungsweise überzeugt werden. Der Termin steht zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments noch nicht fest.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Schlussbericht Verbundvorhaben: AutoTruck - Vollautomatischer Verteiler-Lkw für Automatisierungszonen	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Behling, Sebastian	5. Abschlussdatum des Vorhabens August 2019
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum geplant
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Orten Betriebs GmbH & Co. KG, Bernkastel- Kues Wabco Development GmbH, Hannover Götting KG, Lehrte/Röddensen Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München Emons Spedition GmbH, Köln	7. Form der Publikation -
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)  Invalidenstraße 48, 10115 Berlin	9. Ber.Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 19A16002A
	11a. Seitenzahl Bericht 43
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben -
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 31
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Die Kerninnovation des Vorhabens war die Entwicklung und praktische Demonstration eines seriennahen, zulassungsfähigen Verteiler-Lkw, der in definierten Automatisierungszonen vollautomatisch von einem Leitreechner vorgegebene Missionen ausführt. Es wurde ein Demonstrator mit der notwendigen Sensor-, Ortungs- und Kommunikationstechnik aufgebaut. In dem Teilvorhaben der Götting KG konnte die Sicherheitstechnik und Lokalisierung in dem komplexen Umfeld verbessert und validiert werden.	
19. Schlagwörter Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF), Fahrerloses Transportsystem (FTS), Logistik, Automatischer LKW, Automatisierung	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. Type of Report final report	
3a. Report Title Final Report on Project: "AutoTruck - Vollautomatischer Verteiler-Lkw für Automatisierungszonen" [in German]		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Behling, Sebastian	5. End of Project August 2019	
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date planned	
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Orten Betriebs GmbH & Co. KG, Bernkastel- Kues Wabco Development GmbH, Hannover Götting KG, Lehrte/Röddensen Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München Emons Spedition GmbH, Köln	7. Form of Publication -	9. Originator's Report No. -
		10. Reference No. 19A16002A
		11a. No. of Pages Report 43
		11b. No. of Pages Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)  Invalidenstraße 48, 10115 Berlin		12. No. of References -
		14. No. of Tables 1
		15. No. of Figures 31
16. Supplementary Notes -		
17. Presented at (Title, Place, Date) -		
18. Abstract  The core innovation of the project was the development and practical demonstration of a close-to-production, approvable distribution truck, which carries out fully automatic missions specified by a host computer in defined automation zones. A demonstrator with the necessary sensor, positioning and communication technology was set up. In the sub-project of Götting KG, the safety technology and localisation in the complex environment could be improved and validated.		
19. Keywords Automated Guided Vehicle System (AGVS), Logistics, Automation, Automated Truck		
20. Publisher -	21. Price -	