

# **Machbarkeitsstudie zum automatisierten Fahren von HO-LKWs im Murgtal**

im Rahmen der Begleitforschung zum Projekt eWayBW

Dr. Martin Lauer<sup>1</sup>, Ömer Sahin Tas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

<sup>2</sup> FZI Forschungszentrum Informatik

## Publisher



FZI Forschungszentrum Informatik  
Haid-und-Neu-Str. 10-14  
76131 Karlsruhe  
Germany  
Tel.: +49 721 9654-0  
Fax: +49 721 9654-909  
Stiftung des bürgerlichen Rechts  
Stiftung Az: 14-0563.1  
ISSN 0930-3014

Der Herausgeber stellt sein Werk unter die Creative Commons-Lizenz „Namensnennung 4.0 International“ (CC BY 4.0). Die Lizenzbedingungen können Sie hier nachlesen:  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



## Inhalt

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Übersicht über automatisiertes Fahren</b> .....	<b>7</b>
2.1 Automatisierungsstufen .....	7
2.2 Architektur automatisierter Fahrzeuge .....	9
2.2.1 Erforderliche Hardware .....	9
2.2.2 Funktionale Architektur .....	10
2.3 Absicherung automatisierter Fahrzeuge .....	12
2.4 Stand der Forschung.....	13
<b>3 Hardwarearchitektur eines automatisierten LKWs</b> .....	<b>14</b>
3.1 Sensorkonzept .....	14
3.2 Aktuatorikkonzept .....	16
3.3 Rechnerkonzept und E/E-Architektur .....	18
3.3.1 Rechnerstruktur.....	18
3.3.2 Datennetzwerk .....	19
3.3.3 Energieversorgung .....	19
<b>4 Funktionale Besonderheiten automatisierter HO-LKW im Murgtal</b> .....	<b>20</b>
4.1 Fahren unter Fahrleitung .....	20
4.2 Streckenbezogene Besonderheiten .....	22
4.2.1 Linkseinbiegen in den fließenden Verkehr.....	25
4.2.2 Verflechtungsbereiche .....	27
4.2.3 Navigation im Werksgelände .....	29
4.3 Sicherer Halt .....	31
4.4 Witterungs- und Tageszeiteinflüsse .....	32
4.5 Energiebedarf.....	35
<b>5 Betrieb automatisierter LKWs</b> .....	<b>35</b>
5.1 Betriebsführung .....	35
5.2 Betriebswirtschaftliche Aspekte automatisierter Verkehre .....	37
5.3 Einführungszenarien .....	39
<b>6 Schlussfolgerungen</b> .....	<b>40</b>



## Abstract

Diese im Zuge der Begleitforschung zum Projekt eWayBW entstandene Studie untersucht die Machbarkeit automatisierten Fahrens mit Hybrid-Oberleitungs-LKWs (HO-LKWs) im unteren Murgtal. Ausgehend vom Stand der Forschung im Bereich automatisierter Fahrzeuge werden die Besonderheiten des elektrischen Betriebes unter Fahrleitung als auch die Besonderheiten der untersuchten Strecke zwischen Kuppenheim und Hilpertsau analysiert und Lösungsvorschläge entwickelt. Die Betriebsführung automatisierter und insbesondere fahrerloser Verkehre sowie die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen werden dargestellt, soweit das zum derzeitigen Stand der Entwicklung möglich ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass die technischen Fragestellungen für die Automatisierung, die durch das Fahren der HO-LKWs unter Fahrleitung entstehen, mit geringem Zusatzaufwand gelöst werden können und dass sich somit die Automatisierung von HO-LKWs nicht schwieriger darstellt als die Automatisierung anderer LKWs. Für das betrachtete Anwendungsszenario im unteren Murgtal wurden die für die Automatisierung besonders schwierigen Stellen identifiziert, die somit Knackpunkte bei der technischen Realisierung darstellen. Dies sind insbesondere die Rangiermanöver in den Werkshöfen, das Einbiegen auf stark befahrene Straßen sowie das Einfädeln und Verflechten an Auffahrten auf autobahnartige Straßen. Aus betrieblicher Sicht konnte erarbeitet werden, dass eine Automatisierung der LKW-Verkehre im unteren Murgtal erst dann nennenswerte betriebswirtschaftliche Vorteile erwarten lässt, wenn die LKW-Verkehre ganz oder zumindest über den größten Teil der Strecke fahrerlos durchgeführt werden können.

## 1 Einleitung

Elektrifizierung und Automatisierung heißen die beiden großen Trends, die die Automobilbranche derzeit massiv verändern. Der Übergang vom klassischen Verbrennungsmotor hin zu elektrischen und anderen alternativen Antrieben steht vor dem Hintergrund, den Kohlendioxid-Ausstoß aus dem Verkehrssektor massiv zu reduzieren und damit der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. Bei dieser Umstellung stellt die Frage der Speicherung der benötigten Energie in mitgeführten Batterien einen der größten Schwachpunkte dar, sowohl im Hinblick auf das hohe Gewicht und die Kosten der Batterien, als auch im Hinblick auf die begrenzte Reichweite der batterie-elektrischen Fahrzeuge. Gerade für Nutzfahrzeuge mit einem großen Energiebedarf und einer hohen täglichen Laufleistung stellt dies einen erheblichen Nachteil dar.

Daher wurde von Seiten der Siemens-AG die Idee entwickelt, Fernstraßen mit elektrischen Fahrleitungen auszurüsten, über die sich Nutzfahrzeuge mit Strom für den Antrieb und zum Nachladen der Batterien während der Fahrt versorgen können. Das Prinzip ist ähnlich dem der klassischen Oberleitungsbusse. Allerdings sieht das neue Konzept für LKWs keine Vollausrüstung des gesamten Fernstraßennetzes mit Fahrleitung vor, da davon ausgegangen wird, dass die LKW über ausreichende Batteriekapazitäten verfügen, um Fahrleitungslücken überbrücken zu können, was die Kosten für die Infrastrukturausbauten gegenüber einem Vollausbau reduziert. Außerdem bleibt dank der Batterien auch ein Überholen an beliebiger Stelle oder das Befahren einer abweichenden Route möglich. Im Vergleich zum reinen batterie-elektrischen Antrieb ist jedoch eine deutliche Reduzierung der Batterie-Kapazität möglich. Wegen der Kombination von batterie-elektrischem und fahrleitungs-elektrischem Antrieb wird dieses Fahrzeugkonzept auch Hybrid-Oberleitungs-LKW (HO-LKW) genannt. Von Seiten der Siemens-AG wurde eine prototypische Versuchsstrecke des Systems in Groß-Dölln aufgebaut [35].

In der Folge stieg das Interesse sowohl der verkehrspolitischen Akteure als auch des Speditionsgewerbes an diesem System, so dass mehrere Pilotprojekte gestartet wurden, bei denen einige Autobahnabschnitte mit Fahrleitung versehen wurden, u.a. auf der Bundesautobahn A1 zwischen Lübeck und Hamburg (Projekt FESH [15]) sowie der A5 zwischen Darmstadt und Frankfurt am Main (Projekt ELISA [12]). Um die Möglichkeit zu prüfen, ein solches System auch auf Landstraßen einzusetzen, initiierte das Land Baden-Württemberg das Projekt eWayBW [14], in dessen Rahmen eine Pilotstrecke auf der Bundesstraße 462 im unteren Murgtal eingerichtet werden soll. Damit sollen die Shuttle-LKW-Verkehre zwischen den Papierfabriken bei Obertsrot und Hilpertsau sowie dem Logistikkager in Kuppenheim mit Hilfe von HO-LKW durchgeführt werden. Insgesamt handelt es sich um 64 Fahrzeugumläufe pro Tag.

Die Automatisierung von Kraftfahrzeugen<sup>1</sup> stellt den zweiten großen Trend in der Automobilbranche dar. Das Ziel ist, den Fahrer zu entlasten, in dem das Fahrzeug selbst die Kontrolle von Lenkung, Gas und Bremse übernimmt. Im Endausbau ist ein Fahrzeug vorstellbar, das überhaupt keinen Fahrer mehr benötigt und daher auch ohne Insassen (fahrerlos) verkehren kann. Neben Vorteilen bei der Verkehrssicherheit bietet diese Automatisierung viele betriebswirtschaftliche Vorteile durch Einsparung bei den Personalkosten. Zudem ermöglicht sie neue Geschäftsmodelle. Im Bereich der Nutzfahrzeuge, in denen die Personalkosten für das Fahrpersonal einen erheblichen Anteil an den gesamten Betriebskosten haben, bietet diese Technologie daher vielversprechende Vorteile.

---

<sup>1</sup> Automatisierte Fahrzeuge werden häufig auch als autonome Fahrzeuge bezeichnet. In dieser Studie werden beide Begriffe synonym verwendet.

Daher ist es interessant zu prüfen, inwieweit die beiden Technologien, Elektrifizierung und Automatisierung von Nutzfahrzeugen sich ergänzen können und welche Synergien daraus entstehen könnten. In dieser Machbarkeitsstudie im Rahmen des Projektes eWayBW soll dies am Beispiel der Shuttle-Verkehre mit HO-LKW im unteren Murgtal untersucht werden. Hierbei sollen sowohl die technischen Anforderungen zur Automatisierung von HO-LKW als auch die betrieblichen Konsequenzen und die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen erörtert werden. Dies soll die Basis sein, um einerseits das Zusammenspiel zwischen dem Fahren unter Fahrleitung und der Automatisierung zu klären und andererseits um als Entscheidungshilfe für zukünftige Schritte hin zu einer Automatisierung von HO-LKW zu dienen. Die Machbarkeitsstudie führt in Kapitel 2 in das Thema der Fahrzeugautomatisierung ein, gibt einen Überblick über Unterscheidungsmerkmale verschiedener Ansätze und beschreibt den Stand der Forschung und Technik in diesem Bereich. Die erforderliche technische Ausstattung eines automatisierten LKWs steht im Mittelpunkt des Kapitels 3. Spezifische Aspekte des Einsatzes von HO-LKW unter der Fahrleitung sowie des Betriebs im Murgtal stehen im Zentrum von Kapitel 4. Das anschließende Kapitel 5 geht auf betriebliche Aspekte automatisierter LKW ein. Während die Kapitel 2, 3 und 5 relevante Aspekte für LKW aller Bauarten (Größe, Antrieb, usw.) diskutieren, ist das Kapitel 4 auf den Anwendungsfall im Murgtal spezialisiert.

Die Machbarkeitsstudie entstand in den Jahren 2018 und 2019 am FZI Forschungszentrum Informatik sowie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Beide Institute besitzen über eine langjährige Erfahrung in der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge und haben in verschiedenen Projekten an der Automatisierung von Straßenfahrzeugen gearbeitet [17, 8, 26, 36].

## 2 Übersicht über automatisiertes Fahren

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand des automatisierten Fahrens gegeben.

### 2.1 Automatisierungsstufen

Unter dem Begriff automatisiertes Fahren werden verschiedene Techniken mit unterschiedlichen technischen Anforderungen sowie unterschiedlichem Nutzen verstanden. Daher möchten wir in diesem Abschnitt zunächst den Begriff der Automatisierungsstufe einführen. Im weiteren Verlauf der Machbarkeitsstudie werden wir die Machbarkeit stets in Bezug zur erreichbaren Automatisierungsstufe darstellen. Die Automatisierungsstufen wurden einerseits im internationalen Kontext seitens der Society of Automotive Engineers (SAE), andererseits in Deutschland durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) eingeführt und definiert. Im Wesentlichen sind die Stufen vergleichbar, so dass an dieser Stelle keine Unterscheidung nach SAE- bzw. BaSt-Definition gemacht wird.

Die Unterscheidung nach Automatisierungsstufen erfolgt im Wesentlichen nach fünf Kriterien

- Übernimmt das Fahrzeug die Querführung (Lenken) des Fahrzeugs selbständig?
- Übernimmt das Fahrzeug die Längsführung (Beschleunigen, Bremsen) des Fahrzeugs selbständig?
- Erkennt das Fahrzeug die Systemgrenzen der Automatisierung selbständig oder muss der Fahrer die Automatisierungsfunktionen stets überwachen?
- Ist das Fahrzeug in der Lage, stets ein sicheres Anhalten zu realisieren, selbst im Falle eines technischen Fehlers der Automatisierungsfunktion?

Stufe	Längsführung	Querführung	Systemgrenzen erkennen	sicherer Halt	Verfügbarkeit
5	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	immer
4	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	teilweise
3	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrer	teilweise
2	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrer	Fahrer	teilweise
1	Fahrer oder Fahrzeug	Fahrer oder Fahrzeug	Fahrer	Fahrer	teilweise
0	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Fahrer	nie

Tabelle 1: Tabellarische Übersicht über die Automatisierungsstufen

- Beherrscht das Automatisierungssystem jedes denkbare Szenario oder ist die Automatisierung auf bestimmte Szenarien (z. B. nur Autobahnfahrt, nur bei Tageslicht, nur bei geringer Verkehrsstärke) beschränkt?

Daraus ergeben sich die Automatisierungsstufen 0 bis 5 wie folgt. Tabelle 1 fasst die Stufen zusammen. Die Automatisierungsstufe 0 umfasst das klassische, fahrgesteuerte Fahrzeug. Der Fahrer übernimmt alle Funktionen der Längs- und Querführung. Er wird dabei ggf. durch Fahrerassistenzsysteme zur Fahrdynamikstabilisierung (z. B. ABS, ESP) unterstützt.

In der Automatisierungsstufe 1 („assistiertes Fahren“) stellt das Fahrzeug Assistenzfunktionen zur Quer- oder Längsführung zur Verfügung. Der Fahrer muss das System überwachen und komplementär Längs- bzw. Querführung übernehmen. Beispiele für derartige Systeme sind Fahrspurhalteassistenten, Adaptive Cruise Control (ACC), oder einige Formen von Einparkassistenten.

In der Automatisierungsstufe 2 („teilautomatisiertes Fahren“) verfügt das Fahrzeug über ein System, das sowohl die Quer- als auch die Längsführung des Fahrzeugs übernimmt. Der Fahrer muss das System jedoch jederzeit überwachen, mit einem Fehlverhalten des Automatisierungssystems rechnen, ggf. eingreifen und die Kontrolle übernehmen. Die letzte Verantwortung für das korrekte Fahrverhalten hat in jedem Fall der Fahrer. Systeme mit Automatisierungsstufe 2 werden unter anderem von Tesla angeboten.

In Systemen der Automatisierungsstufe 3 (nach BaSt „hochautomatisiertes Fahren“, nach SAE „conditional automation“) erfolgen Quer- und Längsführung des Fahrzeugs automatisch. Das System kann jederzeit selbst erkennen, ob die Systemgrenzen des Automatisierungssystems erreicht sind und den Fahrer zur Übernahme der Kontrolle auffordern. Der Fahrer muss dann innerhalb eines hinreichend langen Übernahmeintervalls (ca. 10 s bis 30 s) die Kontrolle des Fahrzeugs übernehmen. Reagiert der Fahrer nicht innerhalb des Übergabezeitraums, kann das System den sicheren Betrieb des Fahrzeugs nicht mehr gewährleisten.

Systeme der Automatisierungsstufe 4 (nach BaSt „vollautomatisiertes Fahren“, nach SAE „highly automated driving“) sind im Gegensatz zu Systemen der Stufe 3 in der Lage, bei fehlender Fahrerübernahme automatisch einen sicheren Halt zu realisieren, d.h. das Fahrzeug gezielt und sicher an einem sicheren Ort abzustellen, z. B. auf dem Standstreifen der Autobahn oder in einer Nothaltebucht. Hierzu sind auch bei einem Teilausfall des Automatisierungssystems bestimmte Steuerungsfähigkeiten weiterhin vorzuhalten.

Während Fahrzeuge der Automatisierungsstufen 1 bis 4 nur in bestimmten Situationen automatisiertes Fahren ermöglichen müssen, müssen Fahrzeuge der Stufe 5 (nach BaSt „fahrerloses Fahren“, nach SAE „fully automated driving“) in der Lage sein, in jeder Situation automatisiert fahren zu können. Ein Fahrerarbeitsplatz ist somit hinfällig, lediglich eine Benutzerschnittstelle zur Zieleingabe ist erforderlich. Offensichtlich wachsen die technischen Anforderungen mit zunehmender Automatisierungsstufe erheblich an. Gleichzeitig verringert sich die Verantwortung des Fahrers bis hin zur technischen Möglichkeit in Stufe 5, ein Fahrzeug ganz ohne Fahrer zu betreiben. Während in der Stufe 2 der Fahrer weiterhin alle seine Aufmerksamkeit auf den Straßenverkehr richten muss, kann er in Stufe 3 im automatisierten Betrieb seine Aufmerksamkeit anderen Aufgaben zuwenden. Er muss jedoch weiterhin in der Lage sein, innerhalb des Übergabeintervalls die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Dies schließt aus, dass er den Fahrerarbeitsplatz verlässt oder schläft. In Stufe 4 führt auch das Einschlafen des Fahrers im automatisierten Betrieb zu keiner Verkehrsgefährdung, da bei einer verpassten Fahrerübergabe das Fahrzeug automatisch einen sicheren Halt realisiert. Allerdings könnte es in diesem Fall immer noch zu Verkehrsbehinderungen kommen.

Der technische Aufwand wächst sprunghaft vor allem beim Übergang von Stufe 2 nach Stufe 3 sowie von Stufe 4 nach Stufe 5. Der Sprung auf Stufe 3 ist vor allem dadurch begründet, dass der Fahrer im automatisierten Betrieb nicht mehr als Rückfallebene zur Verfügung steht. Redundante und fehler-tolerante Hardwareauslegungen und Implementierungen sind daher erforderlich. Zusätzlich wächst der Aufwand für den Sicherheitsnachweis des Systems. Der Sprung beim Aufwand von Stufe 4 nach Stufe 5 ergibt sich aus der Notwendigkeit, auch mit widrigen Umweltbedingungen umgehen zu können und komplexe Verkehrssituationen beherrschen zu müssen. In Stufe 4 kann sich die Fahrzeugautomatisierung hingegen noch auf die technisch einfacheren Szenarien beschränken.

## 2.2 Architektur automatisierter Fahrzeuge

### 2.2.1 Erforderliche Hardware

Die für das automatisierte Fahren erforderliche technische Ausrüstung umfassen die Sensorik zur Bestimmung der Eigenbewegung, und -position sowie zur Erfassung des Fahrzeugumfeldes, die Rechnerhardware zur Auswertung der Sensorinformationen und zur Verhaltensplanung sowie die Aktuatorik zum Stellen des Lenkwinkels und der Beschleunigung. Je nach Anwendungsszenario kommt eine Funkausrüstung zur Kommunikation zwischen verschiedenen Fahrzeugen bzw. zwischen Fahrzeug und Strecke hinzu.

Die Sensorik für die Erfassung des Fahrzeugumfeldes umfasst Radar-Sensoren, Lidar-Sensoren (Laserscanner) sowie monoskopische und stereoskopische Kameras [25]. Zur Erfassung des Nahbereichs sind auch Ultraschallsensoren geeignet. Für Nachtsichtanwendungen sind außerdem Infrarot-Sensoren geeignet. In der Entwicklung befinden sich zudem Time-of-Flight-Kameras, die die Funktionsprinzipien von Kamera und Lidar kombinieren. Bisher sind jedoch noch keine geeigneten Time-of-Flight-Kameras für Anwendungen im automatisierten Fahren verfügbar. Für die Bestimmung der Eigenbewegung und der Eigenposition kommen Inertialsensorik, Radencoder sowie Satellitennavigation (GNSS) zum Einsatz. Aber auch Kameras und Lidarsensoren können Beiträge zur Bestimmung der Eigenposition liefern.

Die erforderliche Rechenleistung variiert mit der Automatisierungsstufe. Für typische Systeme auf Stufe 2 eignen sich spezifische, auf Automobilanwendungen optimierte Hardwaresysteme. Bei höheren Au-

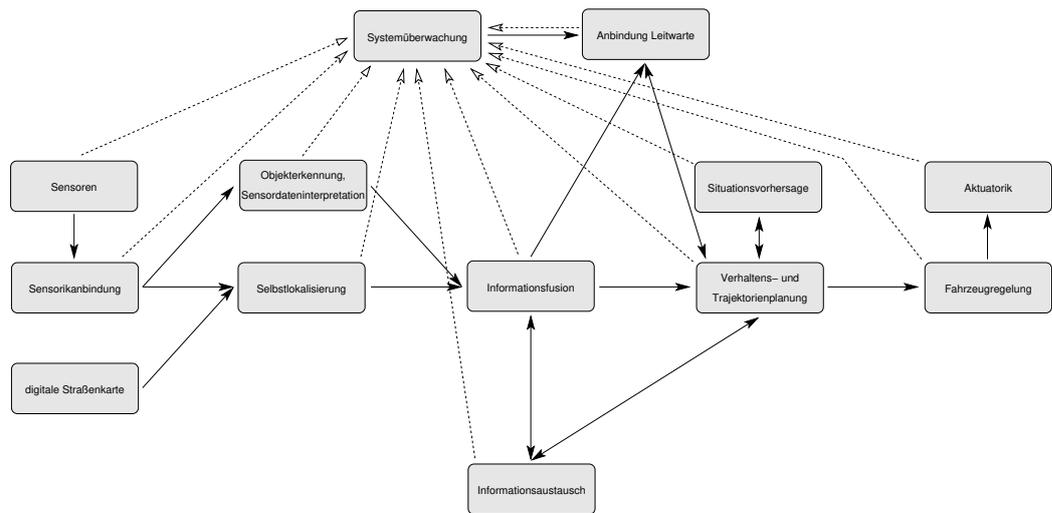


Abbildung 1: Darstellung der funktionalen Architektur in Form von Verarbeitungsblöcken, dem Datenfluss zwischen den Funktionsblöcken (durchgezogene Pfeile) sowie dem Fluss von Zustandsinformationen aus den Funktionsblöcken zur Systemüberwachung (gestrichelte Linien)

tomatisierungsstufen steigt der Bedarf nach Rechnerleistung erheblich, da die Zuverlässigkeit der Verfahren zur Umfeldwahrnehmung gewährleistet werden muss, was aufwändigere Algorithmen erfordert. Für derartige Systeme werden in heutigen Forschungsfahrzeugen überwiegend Rechnersysteme aus dem PC-Bereich verwendet. Bei der Serien-Einführung automatisierten Fahrens auf Stufe 3 und höher ist jedoch mit der Entwicklung optimierter Rechnersysteme zu rechnen.

Ab Automatisierungsstufe 3 muss Sensorik und Rechnerhardware so ausgelegt sein, dass auch der Ausfall einzelner Komponenten toleriert wird. Dies führt zwangsläufig zu aufwändigeren Lösungen mit mehrkanaligen Rechnersystemen und redundant ausgelegter Sensorik. Außerdem sind zur Gewährleistung der Sicherheit physikalisch diversitäre Sensorsysteme (z. B. Kombination von Kamera, Lidar und Radar) zu verwenden, um Common-Source-Fehler auf der sensorischen Ebene zu vermeiden. Je nach Anwendungsfall muss eine vollständige sensorielle Abdeckung des Fahrzeugumfeldes realisiert werden bzw. reicht eine Teilabdeckung der Umgebung (z. B. nur Umfeld vor der Fahrzeug) aus.

## 2.2.2 Funktionale Architektur

Die funktionale Architektur eines automatisierten Fahrzeugs besteht aus mehreren Funktionsblöcken, die ihrerseits wieder in verschiedene Teilfunktionen untergliedert sind. Im Rahmen dieses Dokuments werden nur die Funktionsblöcke als Ganzes beschrieben. Folgende Funktionsblöcke sind in einem automatisierten Fahrzeug typischerweise vorhanden:

- Sensorikanbindung
- Objekterkennung und Sensordateninterpretation
- Informationsfusion
- Selbstlokalisierung

- digitale Straßenkarte
- Situationsvorhersage
- Verhaltens- und Trajektorienplanung
- Fahrzeugregelung
- Informationsaustausch mit anderen Fahrzeugen/Infrastruktur
- Systemüberwachung
- Anbindung an Leitwarte

Der Informationsfluss zwischen den Funktionsblöcken ist in Abbildung 1 dargestellt. Im einzelnen haben die Funktionsblöcke folgende Aufgaben.

Die Sensorikanbindung realisiert die Kommunikation zwischen den Hauptcomputern und den Sensoren. Sie implementiert die Hardware-Treiber, nimmt die Sensordaten entgegen und überprüft die Vollständigkeit und Konsistenz der Sensordaten. Die empfangenen Sensordaten werden für die weitere Verarbeitung an die anderen Funktionsblöcke weitergegeben. Ferner übernimmt die Sensorikanbindung die Behandlung aller Fehler in der Kommunikation mit den Sensoren, sie erkennt nicht funktionsfähige Sensoren und berichtet den Zustand der Sensorik an die Systemüberwachung.

Die Objekterkennung und Sensordateninterpretation interpretiert die Sensordaten, detektiert Objekte innerhalb der Sensordaten und erkennt die geometrische Struktur der Szene (z. B. Fahrbahnbereiche, Fahrstreifen). Je nach verwendeter Sensorik werden auch Objektgeschwindigkeit und Objektausdehnung erfasst.

In der Informationsfusion werden die Daten, die aus unterschiedlichen Sensoren und zu unterschiedlichen Zeitpunkten extrahiert wurden, zusammengefasst und auf Konsistenz überprüft. Objektdetektionen aus unterschiedlichen Zeitpunkten werden assoziiert und somit Objekttracks erzeugt, aus denen auf die Objektbewegung zurückgeschlossen werden kann. Inkonsistente Objektdetektionen werden an die Systemüberwachung gemeldet, um Rückschlüsse über fehlerhafte Verarbeitungsvorgänge ziehen zu können. Durch die Fusion der Informationen, die aus verschiedenen Sensoren über mehrere Zeitpunkte hinweg gewonnen wurden, wird die Qualität der zur Verfügung stehenden Information erhöht.

Die Selbstlokalisierung ist verantwortlich für die Bestimmung der genauen Fahrzeugposition und Bewegungsrichtung aus den sensorischen Daten. Die Selbstlokalisierung kann sich hierbei sowohl den Daten positionsgebender Sensoren wie GNSS bedienen, als auch Kamera- und Lidardaten nutzen. Nach heutigem Stand der Technik ist nur eine Kombination mehrerer Messprinzipien in der Lage, eine hinreichend genaue und hochgradig verfügbare Eigenposition des Fahrzeugs zu liefern. Nach heutigem Stand bewegen sich akzeptable Messfehler der Eigenposition in der Größenordnung von ca. 10 cm.

Die digitale Straßenkarte dient als Navigationsgrundlage für die automatisierte Fahrzeugsteuerung. Sie enthält die genaue Geometrie des Straßennetzes bis hinab zum Verlauf der Fahrstreifen. Außerdem enthält Sie Informationen über die Verkehrsregeln (z. B. Höchstgeschwindigkeiten, Vorfahrtsregeln an Kreuzungen, Ampelstandorte, Lage von Fußgängerüberwegen). Gegenüber den in heutigen handelsüblichen Navigationssystemen verwendeten Karten enthalten die Karten für automatisiertes Fahren wesentlich mehr Details.

Die Situationsvorhersage dient dazu, die Entwicklung des Verkehrsgeschehens für die kommenden Sekunden vorherzusagen. Dies dient einerseits zur Überbrückung der im System vorhandenen Latenzen von i. d. R. mehreren Hundert Millisekunden, als auch der Absichtserkennung der umgebenden Verkehrsteilnehmer. Für einige Fragestellungen genügen für die Situationsvorhersage einfache physikalische Bewegungsmodelle, die die aktuell erkannte Bewegung unverändert fortschreiben. In anderen Szenarien sind komplexe Modelle erforderlich, die verschiedene sensorisch erfassbare Merkmale (z. B. Kopfpose eines Fußgängers) mit Kontextwissen und komplexen Verhaltensmodellen kombinieren.

Die Verhaltens- und Trajektorienplanung ist verantwortlich für die Berechnung einer Fahrzeugtrajektorie, die die zukünftige Bewegung des Egofahrzeugs für einen Prognosehorizont von mehreren Sekunden berechnet. Die Fahrzeugtrajektorie repräsentiert das geplante Fahrzeugverhalten als eine Abfolge von Wegpunkten über die Zeit. Die Trajektorie muss der Verkehrssituation angemessen sein und die Verkehrsregeln beachten. Sie muss konfliktfrei mit anderen Verkehrsteilnehmern und kollisionsfrei mit Hindernissen sein und sie darf den befahrbaren Bereich nicht verlassen.

Die Fahrzeugregelung übernimmt die Aufgabe, die vorgegebene Trajektorie durch Lenk-, Beschleunigungs- und Bremsmanöver einzuregeln.

Die optionale Komponente Informationsaustausch mit anderen Fahrzeugen/Infrastruktur kann dazu dienen, Informationen mit anderen Verkehrsteilnehmern und/oder Elementen der Infrastruktur über Funk auszutauschen. Dies dient einerseits dazu, die eigene Informationsbasis anzureichern und andererseits dazu, das eigene Verhalten mit anderen Verkehrsteilnehmern abzustimmen.

Die Systemüberwachung überwacht die Arbeitsweise der anderen Komponenten, erkennt Fehler und leitet im Fehlerfall geeignete Maßnahmen ein, um die Fehler zu beseitigen oder die Arbeitsweise des Fahrzeugs so zu ändern, dass durch die Fehler keine Gefährdung entsteht. Im Extremfall kann dies die Überführung des Fahrzeugs in den sicheren Halte-Zustand bedeuten.

Fahrerlose Fahrzeuge werden in jedem Fall durch eine Leitwarte fernüberwacht sein. Hierzu sind Komponenten zur Anbindung an Leitwarte erforderlich, die eine Beeinflussung des Fahrzeugs aus der Leitwarte sowie die Überwachung des Fahrzeugs durch die Leitwarte ermöglicht. I. d. R. wird dies technisch mit Hilfe einer Funkstrecke zwischen Fahrzeug und Leitwarte realisiert.

### 2.3 Absicherung automatisierter Fahrzeuge

Der Betrieb automatisierter Fahrzeuge erfordert eine Absicherung der gesamten Steuerungstechnik, um die Systemsicherheit jederzeit zu gewährleisten. Bis zur Automatisierungsstufe 2 sind die Anforderungen an die Absicherung geringer als bei höheren Automatisierungsstufen, da bis Stufe 2 der Fahrer zur Überwachung des Systems und ggf. zum Eingreifen verpflichtet ist. Bei höheren Automatisierungsstufen muss das System selbst in der Lage sein, Fehlfunktionen zu erkennen und in geeigneter Weise zu reagieren. Nach ISO 26262 werden das jeweils notwendige Sicherheitsniveau in die ASIL-Stufen A (niedrigste Sicherheitsstufe) bis D (höchste Sicherheitsstufe) eingeteilt. Für automatisierte Systeme ab Stufe 3 ist generell die ASIL-Stufe D anzusetzen.

Aus den Anforderungen zur Absicherung ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Systemarchitektur. Ziel ist es, das System in die Lage zu versetzen, jeden Fehler selbst zu erkennen sowie auf einen Fehler so zu reagieren, dass die Sicherheit des Fahrzeugbetriebs wiederhergestellt wird. Unter die möglichen Fehler fallen sowohl Hardware-nahe Fehler wie kippende Bits, sensorische Fehler, Fehler in der Kommunikation zwischen verschiedenen Komponenten, logische Fehler in der Verhaltensplanung,

als auch ein Ausfall der Energieversorgung der Fahrzeugelektronik und/oder der Aktuatorik. Die Wiederherstellung des sicheren Betriebs kann - je nach Fehlerursache - darin bestehen, den Fahrer bzw. eine Leitstelle zu informieren, ein Warnsignal zu geben, die Geschwindigkeit zu reduzieren oder anzuhalten. Bei einem automatisierten System ab Stufe 4 muss das System in der Lage sein, einen sicheren Zustand selbständig zu erreichen. Wie ein solcher sicherer Zustand definiert ist, hängt von der Verkehrssituation ab. Im Stadtverkehr kann ein Abbremsen zum Stillstand, Anziehen der Feststellbremse und Anschalten der Warnblinkanlage bereits als sicherer Zustand verstanden werden. Auf der Autobahn hingegen ist zumindest das Anfahren des Standstreifens oder gar eines Parkplatzes zu verlangen.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden verschiedene Strategien verfolgt. Ein Ansatz stellt die mehrkanalige Auslegung des Systems dar. Hierbei werden die Hard- und Softwarekomponenten in jeweils zweifacher Ausführung eingebaut, woraus sich zwei funktional gleichwertige Teilsysteme ergeben. Nach Möglichkeit werden Software- und Hardware in beiden Teilsystemen diversitär ausgelegt, d.h. sie werden von verschiedenen Entwicklerteams mit unterschiedlichen Entwicklungswerkzeugen unabhängig voneinander entwickelt, um Common-Source-Fehler zu vermeiden. Alle Berechnungen werden parallel auf beiden Teilsystemen durchgeführt und anschließend die Ergebnisse auf einer sicheren Vergleichshardware miteinander verglichen. Fehler in einem Teilsystem können somit erkannt werden.

Weitere Strategien stellen die Verwendung diversitärer Sensoren dar, d.h. die Nutzung von Sensoren mit unterschiedlichen physikalischen Wirkprinzipien. Fehler wirken sich dann wiederum nur in einem der Sensoren aus. Auch eine redundant ausgelegte Energieversorgung ist erforderlich.

## 2.4 Stand der Forschung

Die Forschung im Bereich automatisierter Fahrzeuge geht bis auf die ersten Arbeiten Ende der 1980er Jahre zurück, als die ersten Versuchsfahrzeuge mit teilautomatisierten Funktionen ausgestattet wurden. Bekannte Beispiele für Projekte dieser Phase sind das Fahrzeug ALVINN [29] an der Carnegie-Mellon-University sowie die Arbeiten an automatisierten Fahrzeugen an der Universität der Bundeswehr in München [10], wobei in den 1990er Jahren bereits automatisierte Autobahnfahrten mit Spurhalten, Abstandsregelung und Konvoi-Fahrten realisiert wurden. Im Zuge der DARPA Grand Challenges 2004, 2005 und 2007 [37, 3] ist eine erheblich gesteigerte Forschungsaktivität im Feld automatisiertes Fahren zu beobachten, die schließlich auch in die ersten kommerziellen Projekte zur Entwicklung automatisierter bis hin zu fahrerlosen Fahrzeugen geführt hat. Wichtige industrielle Akteure in diesem Bereich sind unter anderem Waymo, Daimler, BMW, BOSCH und Uber. Im Bereich der Wahrnehmungskomponenten haben sich mit Firmen wie Mobileeye Zulieferer etabliert, ebenfalls im Bereich der Selbstlokalisierung und Kartierung (z. B. die Firma here). Im Bereich der Forschungseinrichtungen sind intensive Aktivitäten in Europa, den USA sowie China zu beobachten.

Die meisten Arbeiten wurden im PKW-Bereich durchgeführt. Heutige Forschungsfahrzeuge und Prototypen können die üblichen Verkehrssituationen auf Autobahnen, Landstraßen sowie im Stadtverkehr beherrschen, wenngleich möglicherweise nicht immer genauso gut wie menschliche Fahrer. Leuchtturmprojekte wie die automatische Fahrt zwischen Mannheim und Pforzheim mit einem Daimler-S-Klassefahrzeug [8] im Jahr 2013 dokumentieren dies. Erste Feldversuche mit einer automatisierten Fahrzeugflotte wurden von Waymo im Jahr 2018 in den USA gestartet [11]. Im Bereich der Serienfahrzeuge sind heute Fahrfunktionen auf Automatisierungsstufe 2 bei mehreren Herstellern erhältlich. Fahrzeuge der Stufen 3 und 4 sind für Anfang der 2020er Jahre von verschiedenen Herstellern angekündigt [6].

Im Nutzfahrzeuggestrich konzentrierte sich die Forschung seit den 1990er Jahren zunächst auf das automatisierte Kolonnenfahren auf Autobahnen (sog. Platooning), von dem man sich Vorteile bezüglich Energieverbrauch und Straßenkapazitäten verspricht (siehe u.a. [22, 23, 4, 38]). Das Platooning erfordert im Wesentlichen ein stabiles und robustes Folgefahren sowie ggf. eine zuverlässige Spurhalte-technik, d.h. es verwendet Technologien, die heutzutage als Fahrerassistenzsysteme bereits sehr weit verbreitet sind. Inzwischen werden zunehmend auch komplexere regelungstechnische Aufgabenstellungen wissenschaftlich betrachtet. Dies beinhaltet insbesondere die Trajektorienplanung und Querre-gelung für Sattelzüge und Gespanne und komplexere Rangiermanöver mit Rückwärtsfahrten (siehe u.a. [1, 20, 2, 24, 34]). Ein ausführlicher Überblick über die aktuellen Arbeiten wurde in [45] erarbeitet.

Neben den Forschungsaktivitäten arbeiten verschiedene Hersteller an der Entwicklung von Prototypen und Seriensystemen zur Automatisierung von Nutzfahrzeugen. Prototypen und Konzeptfahrzeuge für autonome Lastkraftwagen wurden in den zurückliegenden Jahren u.a. von Daimler [7], Volvo [41], Scania [32], DB Schenker/Einride [9] und TuSimple [39] vorgestellt. Serienfahrzeuge auf höheren Automa-tisierungsstufen sind jedoch bisher nicht erhältlich.

## 3 Hardwarearchitektur eines automatisierten LKWs

### 3.1 Sensorkonzept

Die erforderliche Sensorik hängt sehr stark davon ab, auf welcher Automatisierungsstufe und in welchen Szenarien der LKW automatisiert fahren soll. In den Automatisierungsstufen 1 und 2 reicht eine Sensorik aus, die weder redundant ausgelegt ist, noch das gesamte Fahrzeugumfeld umfasst, da der Fahrer weiterhin in der letzten Verantwortung steht.

Für die Automatisierungsstufen 3 und 4 sind Sensorkonzepte erforderlich, die genügend Redundanz aufweisen, um den Ausfall oder Fehler einzelner Sensoren ausgleichen zu können. Das Fahrzeugum-feld muss je nach Einsatzszenario nicht notwendigerweise vollständig erfasst werden. Um die Einsatz-fähigkeit des Fahrers im Fall einer Übergabe gewährleisten zu können, muss auf Stufe 3 und 4 auch der Innenraum soweit überwacht werden, dass die Fälle erkannt werden können, in denen der Fahrer nicht mehr in der Lage ist, die Fahraufgabe zu übernehmen, z. B. weil er eingeschlafen ist oder seinen Fahrersitz verlassen hat.

Ab Stufe 5 muss die Sensorik so ausgelegt sein, dass sowohl das gesamte Fahrzeugumfeld vollständig durch die Sensorik erfasst werden kann, als auch genügend Redundanz vorhanden ist, um Ausfälle und Fehlfunktionen einzelner Sensoren erkennen und ausgleichen zu können. Bei LKW mit einer ge-wissen Bodenfreiheit ist unter Umständen auch eine sensorische Überwachung des Bereichs unter dem Fahrzeugboden erforderlich, um beispielsweise beim Anfahrvorgang sicherzustellen, dass sich keine Objekte unter dem Fahrzeug befinden. Eine Überwachung des Innenraums - falls vorhanden - ist auf Stufe 5 nicht mehr unbedingt notwendig.

Die bereits erwähnte redundante Auslegung der Sensorik erfordert nicht nur, dass mehrere Sensoren gleicher Bauart im Fahrzeug zum Einsatz kommen, sondern dass Sensoren mit unterschiedlichem Auf-bau und physikalischem Messprinzip verwendet werden. Dies hat zwei wesentliche Vorteile. Zum einen können sich verschiedene Sensoren komplementär in ihren Eigenschaften ergänzen. Zum Beispiel ist die Messgenauigkeit bei der Abstandsmessung eines Lidar-Sensors deutlich besser als die eines Ka-merasystems, dafür ist der Lidar-Sensor nicht so gut geeignet, um Texturen und insbesondere farbliche Strukturen zu erkennen. Durch die Kombination verschiedener Sensorarten können diese individuel-

len Beschränkungen größtenteils überwunden werden. Zum anderen bietet ein Ansatz mit diversitären Sensoren den Vorteil, dass sich Störungen unterschiedlich auf die verschiedenen Sensoren auswirken. Beispielsweise kann eine Kamera durch direkte Sonneneinstrahlung geblendet werden und damit kein valides Bild mehr liefern, während ein Lidarsensor in einer solchen Situation aufgrund des anderen Messprinzips immer noch eine valide Messung liefert.

Im Vergleich zu PKW-Anwendungen kommt bei LKW erschwerend hinzu, dass die Fahrzeuge deutlich größer sind und zum Teil aus mehreren beweglich miteinander verbundenen Teilen bestehen (z. B. Zugmaschine und Sattelaufleger oder Zugfahrzeug und Anhänger). Zudem ist die mechanische Belastung der Fahrzeuge deutlich höher. Zum Be- und Entladen der Fahrzeuge müssen Türen und ggf. Seitenwände weggeklappt oder gar entfernt werden, je nach LKW-Bauart.

Als mögliche technische Realisierung eines Sensorkonzepts für LKW wird daher in dieser Studie ein im Projekt UNICARagil entwickelter, modularer Sensoraufbau vorgeschlagen [19]. Dieses Konzept sieht vor, Sensormodule zu verwenden, die in sich mehrere Einzelsensoren enthalten und als feste mechanische Einheit verbaut werden können. Zusätzlich wird jedes Sensormodul mit einem Steuergerät ausgestattet, das die Ansteuerung der Sensoren sowie die Auswertung der Sensordaten übernimmt. Das im Projekt UNICARagil entwickelte Sensormodul enthält einen 32-Zeilen-Lidar-Sensor, vier Kameras, von denen zwei ein stereoskopisches Kameramodul bilden, einer Inertialmesseinheit, sowie zwei Radarsensoren (siehe Abb. 2).

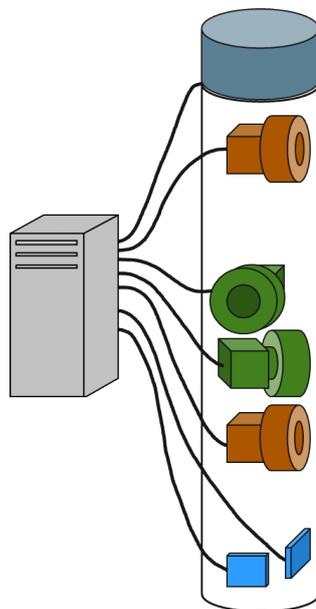


Abbildung 2: Prinzipskizze eines Sensormoduls, wie es im Projekt UNICARagil vorgeschlagen wurde. Das Sensormodul enthält, von oben nach unten, einen 32-Zeilen-Lidar-Sensor, ein vertikal angeordnetes Stereokamerasystem (braun), ein Rundumkamerasystem (grün) sowie zwei Radar-Sensoren (hellblau). Die Sensordaten werden gemeinsam in einer leistungsstarken Auswerteeinheit analysiert.

Bei Montage an einer Fahrzeugecke hat der Lidarsensor des Moduls einen Messbereich von nahezu  $270^\circ$ , kann also alle Bereich neben und vor bzw. hinter dem Fahrzeug beobachten. Durch Kombination der Kameras liefert das Sensormodul auch kamerabasiert einen  $270^\circ$ -Blick um das Fahrzeug herum.

Das Stereokameramodul erlaubt eine volle 3-dimensionale, videobasierte Wahrnehmung in einer Vorzugsrichtung, z. B. nach vorne oder hinten. Die Radarsensoren schließlich erlauben die Erfassung von Objekten neben dem Fahrzeug als auch vor bzw. hinter dem Fahrzeug. Durch die Überlappung der Sichtbereiche benachbarter Sensormodule entsteht Redundanz, so dass auch bei komplettem Ausfall eines Sensormoduls weiterhin das gesamte Fahrzeugumfeld beobachtet werden kann.

Je nach Fahrzeuggrundriss können mehrere dieser Sensormodule am Fahrzeug montiert werden. Im einfachsten Fall eines zweiachsigen LKW reichen vier Sensormodule, je eines an jeder Fahrzeugecke aus. Bei Sattelzügen müsste das Zugfahrzeug mit vier Sensormodulen ausgestattet werden (an jeder Ecke eines) zusätzliche der Auflieger - je nach Länge - mit zwei bis vier Sensormodulen (an den hinteren Ecken je eines, ggf. zusätzlich je eines pro Fahrzeugseite). Bei einem LKW mit Anhänger müsste das Zugfahrzeug mit vier Sensormodulen und der Anhänger mit je einem Sensormodul an den hinteren Ecken ausgestattet sein. Abb. 3 illustriert diese Anordnung.

Neben den Sensormodulen benötigen die Fahrzeuge zusätzlich einen GNSS/INS-Sensor, um die globale Position und die Eigenbewegung bestimmen zu können. Dies ist insbesondere für die Fahrzeugregelung erforderlich. Radencodier zur Bestimmung der Radumdrehungen ergänzen die Inertialsensorik. Ebenfalls außerhalb der Sensormodule sind die Sensoren zur Überwachung des Raums unterhalb des Fahrzeugs anzuordnen. Hierfür können sowohl Kameras als auch Lidarsensoren verwendet werden.

Typische Sensorreichweiten heutiger Umfeldsensoren umfassen bis zu ca. 200 bis 300 m bei Radar-Sensoren sowie 50-100 m bei Lidarsensoren und Kameras. Die Sensorreichweite beschreibt hierbei die Maximalentfernung, bis zu der relevante Objekte (z. B. andere Verkehrsteilnehmer) zuverlässig erkannt werden können. Durch die Wahl hochauflösender Kameras mit Objektiven mit größerer Brennweite lassen sich die Erfassungsbereiche erhöhen, allerdings zu Lasten einer größeren Rechenzeit für die Bildauswertung und eines geringeren lateralen Erfassungsbereichs.

Um die Sicherheit des automatisierten Fahrens zu gewährleisten, muss der Reaktions- und Anhalteweg des Fahrzeugs stets kleiner sein als die Sensorreichweite. Ansonsten ist das Fahrzeug nicht mehr in der Lage, bei plötzlich im Messbereich der Sensoren auftauchenden Objekten rechtzeitig durch eine Bremsung eine Kollision zu vermeiden. Bei Gegenverkehr auf dem selben Fahrstreifen darf der Reaktions- und Anhalteweg die halbe Sensorreichweite nicht überschreiten.

Bei einem Fahrzeug mit einer Sekunde Reaktionszeit sowie einer Mindestbremsverzögerung von  $4 \frac{m}{s^2}$  (gesetzliche Vorgabe) beträgt der Reaktions- und Anhalteweg 84 m bei einer Geschwindigkeit von  $80 \frac{km}{h}$ , 38 m bei einer Geschwindigkeit von  $50 \frac{km}{h}$  sowie 17 m bei einer Geschwindigkeit von  $30 \frac{km}{h}$ . Im innerörtlichen Verkehr reichen die Sensorreichweiten somit aus. Ggf. muss bei Engstellen mit Gegenverkehr die Geschwindigkeit auf etwas unter  $50 \frac{km}{h}$  gesenkt werden. Auf Landstraßen sind die derzeit erreichbaren Sensorreichweiten im Grenzbereich, insbesondere was die Lidarsensoren und die Kameras angeht. Hinzu kommt, dass ein vorausschauendes, energiesparendes und ruckarmes Fahren erst möglich wird, wenn die Sensorreichweiten deutlich größer sind als der Reaktions- und Anhalteweg.

### 3.2 Aktuatorikkonzept

Zum Betrieb eines automatisierten LKWs sind ferner Aktuatoren erforderlich, um beschleunigen und bremsen zu können und um zu lenken. Ein Automatikgetriebe wird vorausgesetzt. Heutige Fahrzeuge sind bereits serienmäßig mit Aktuatorik ausgestattet, die ein computergestütztes Fahren unterstützen. Über den fahrzeugseitigen CAN-Bus können Fahrkommandos an die Aktuatoren gegeben wer-

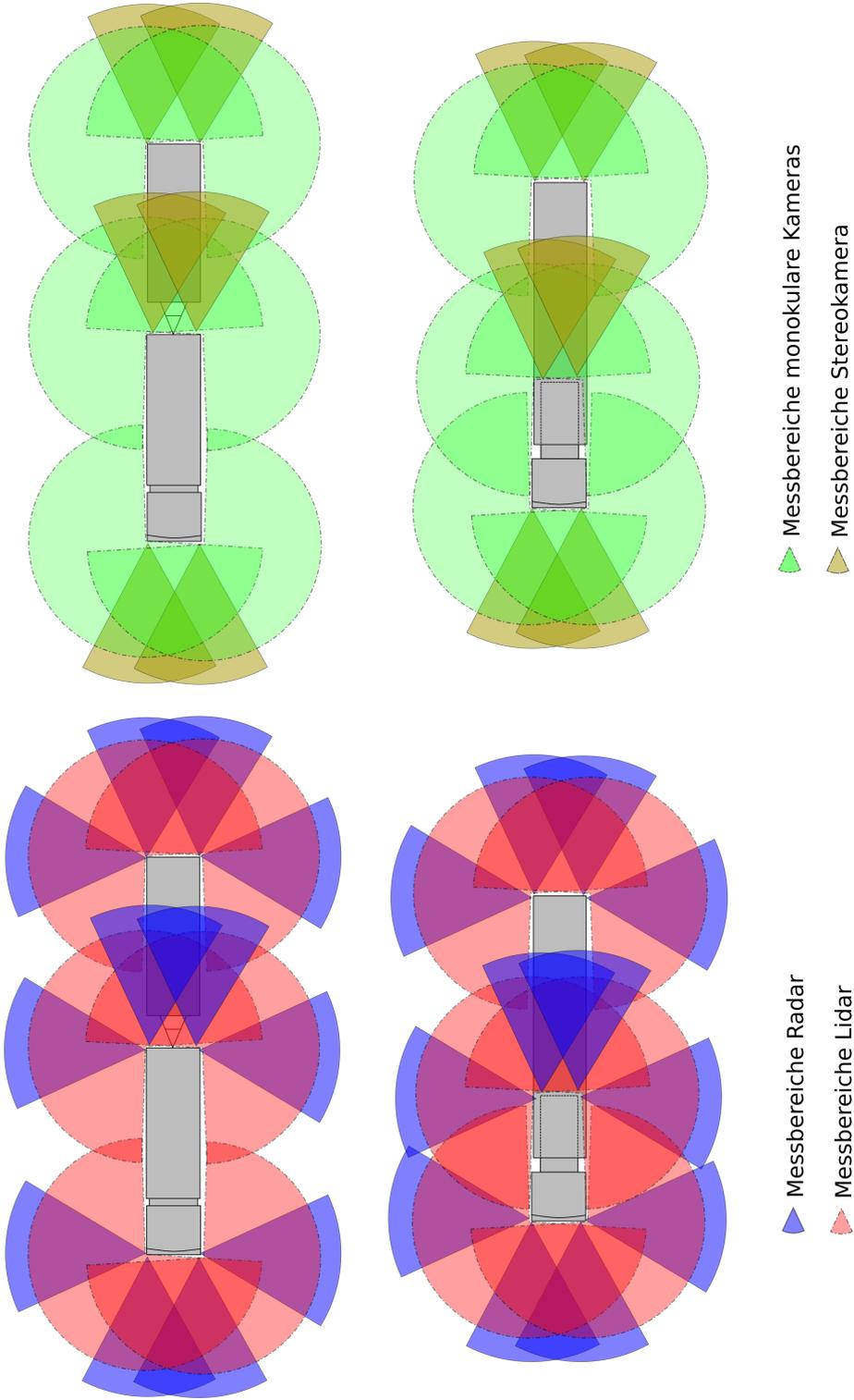


Abbildung 3: Mögliche Konfiguration von Sensormodulen an einem LKW mit Anhänger (oben) sowie einem Sattelzug (unten). Die Messbereiche von Radar- und Lidarsensoren einerseits sowie Kameras andererseits sind der Übersicht halber in getrennten Zeichnungen eingetragen. Die Darstellung der Messbereiche erfolgt nicht-maßstäblich. Die am Heck der Zugmaschine befindlichen, nach hinten ausgerichteten Kameras und Radar-Sensoren sind im Betrieb mit Sattelaufleger nicht notwendig, werden jedoch benötigt, damit die Zugmaschine auch ohne Sattelaufleger automatisch betrieben werden kann. Gleiches gilt für die am Heck des LKW befindlichen Sensoren, die im Betrieb mit Anhänger ebenfalls nicht notwendig sind.

den, die entsprechend lenken, beschleunigen und bremsen. Die klassischen Fahrerassistenzsysteme zur Fahrdynamikregelung (Anti-Blockier-System ABS, Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP, Anti-Schlupf-Regelung ASR) werden dabei als unterlegte Systeme mitgenutzt. Diese Ausstattung ist für eine Automatisierung bis zur Stufe 2 ausreichend.

Für höhere Automatisierungsstufen muss die Aktuatorik zusätzlich so ausgelegt werden, dass der Ausfall eines Aktuators nicht zu einer kritischen Situation führt. Daher sind Systeme ab Stufe 3 mindestens redundant auszulegen. Während dies für Bremssteuergeräte und Lenkung mit vergleichsweise überschaubarem Aufwand möglich ist, lässt sich eine redundante Ausführung des Hauptantriebsmotors nicht so einfach realisieren. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass beim Ausfall des Hauptantriebsmotors das Fahrzeug nur noch eine kurze Wegstrecke zurücklegen können muss, um einen kontrollierten Nothalt realisieren zu können. Hierzu ist nicht die selbe Antriebsleistung erforderlich wie für den normalen Betrieb, so dass ein zusätzlicher, batteriegespeicherter, Elektroantrieb mit deutlich geringerer Leistung ausreicht.

Bei der Realisierung eines vollelektrischen Fahrzeugs ergeben sich neue Gestaltungsmöglichkeiten, sofern bei der Konstruktion des Fahrzeugs vom Konzept eines zentralen Antriebs, der über Getriebe die einzelnen Räder antreibt, abgegangen wird. Da heutige Drehstrom-Asynchronmotoren wesentlich kleiner und leichter als Verbrennungsmotoren sind, lassen sich mit überschaubarem technischem Aufwand Antriebskonzepte entwickeln, bei dem jedes Rad über einen elektrischen Einzelradantrieb verfügt.

Ein solcher individueller Allradantrieb bietet für die Automatisierung mehrere Vorteile, da sich die Funktionen Lenken, Antreiben und Bremsen gegenseitig ersetzen können. So kann mit einem Elektromotor verschleißfrei generatorisch gebremst werden. Eine mechanische Bremse dient dann im Wesentlichen als Feststellbremse sowie als Rückfallebene beim Ausfall der elektrischen Widerstandsbremse. Auch die Funktion Lenken kann im Notfall durch die Elektromotoren realisiert werden, indem die Drehzahlen der verschiedenen Räder so aufeinander abgestimmt werden, dass das gewünschte Lenk-Drehmoment entsteht. Zwar ist eine solche Lenkung mit einem hohen Verschleiß am Reifen verbunden, stellt für den Notfall einer ausgefallenen mechanischen Lenkung aber eine valide Rückfallebene dar. Bei Verwendung von elektrischen Einzelradantrieben ergibt sich außerdem für die Funktion Antreiben eine redundante Auslegung, da der Ausfall eines Elektromotors durch die verbleibenden Motoren zusammen mit der mechanischen Lenkung kompensiert werden kann. Somit kann die Automatisierung das Fahrzeug in jedem Fall beim Ausfall einer aktuatorischen Komponente kontrolliert in einen sicheren Halt überführen. Für den Anwendungsfall eines Lieferfahrzeugs wird im Projekt UNICARagil derzeit ein solches Antriebskonzept entwickelt [43]. Eine Verallgemeinerung auf den Fall schwerer Lastkraftwagen ist denkbar.

### 3.3 Rechnerkonzept und E/E-Architektur

#### 3.3.1 Rechnerstruktur

Zum Betrieb eines automatisierten Fahrzeugs ist eine geeignete Ausstattung des Fahrzeugs mit Rechner-technik, Kommunikationsinfrastruktur sowie Energieversorgung erforderlich. Hierbei ist auf die Anforderungen der funktionalen Sicherheit Rücksicht zu nehmen, d.h. der Ausfall eines Teilsystems darf nicht zu einem Ausfall der gesamten Automatisierung führen, zumindest bei den Automatisierungsstufen 3 und höher. Außerdem müssen Fehlfunktionen in einzelnen Komponenten der E/E-Architektur erkannt werden und zu einer sicherheitsgerichteten Reaktion führen, z. B. zum Ausführen eines Nothaltes, zur

Übergabe der Fahrzeugführung an einen Fahrer (außer in Automatisierungsstufe 5), zur Benachrichtigung einer Leitstelle oder durch geeignete Umkonfiguration des Systems. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass der Bedarf an Rechenleistung für die Automatisierung hoch ist, insbesondere für die Auswertung der Sensordaten.

Die auf dem Markt befindlichen ASIL-D-fähigen Steuergeräte sind nicht leistungsfähig genug, um alle im Rahmen der Automatisierung anfallenden Aufgaben alleine zu leisten. Daher muss auf ein anderes Konzept ausgewichen werden, das den Einsatz leistungsfähiger Rechneinheiten erlaubt, die ihrerseits aber nicht die ASIL-D-Anforderungen erfüllen. Möglich ist dies z. B. mit einem klassischen, zweikanaligen Ansatz, wie er z. B. im Bereich der Leit- und Sicherungstechnik im Bereich der Schienenfahrzeugtechnik verfolgt wird. Hierbei werden alle Berechnungen parallel in zwei verschiedenen Verarbeitungssträngen auf getrennten Recheneinheiten durchgeführt. Am Ende werden die hieraus berechneten Ergebnisse auf einem ASIL-D-zertifizierten Steuergerät verglichen und nur bei übereinstimmenden Ergebnissen aus den beiden Verarbeitungssträngen wird die entsprechende Aktion ausgeführt. Andernfalls wird ein Notmanöver, z. B. ein Nothalt, ausgeführt. Bei der Konstruktion der beiden parallelen Verarbeitungsstränge ist darauf zu achten, dass sämtliche Software- und Hardwarekomponenten diversitär ausgeführt sind, um Common-Source-Fehler zu vermeiden. Diversiäre Ausführung bedeutet hierbei die Verwendung unterschiedlicher Prozessoren, unterschiedlicher Mainboards, unterschiedlicher Netzwerkadapter, unterschiedlicher Betriebssysteme, unterschiedlicher Compiler und unterschiedlicher Applikationssoftware. Abbildung 4 stellt eine solche Hardwarestruktur dar.

### 3.3.2 Datennetzwerk

Der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Rechnern erfordert eine geeignete Netzwerkstruktur. Da die zu übertragenden Datenmengen bei weitem größer sind als dies in heutigen Fahrzeugen üblich ist, sind heutige Fahrzeugbusse nicht geeignet. Es ist denkbar, stattdessen eine Ethernet-basierte Kommunikation zu verwenden, die im Bereich der Consumer-Elektronik weit verbreitet ist und für die es auch geeignete Komponenten für Fahrzeug-Anwendungen gibt [19]. Durch geeignete Konzepte aus dem Bereich der Netzwerksicherheit (Verschlüsselung, Authentifizierung) ist darauf zu achten, dass sich aus dem Bereich der Datennetze kein Angriffspotential für Hacker-Angriffe ergibt. Außerdem ist darauf zu achten, dass der Ausfall einer Netzwerkkomponente (z. B. eines Routers) kompensiert werden kann. Dies kann durch redundante Auslegung des Netzes sowie besondere Netzwerktopologien (z. B. Ringstruktur) realisiert werden.

### 3.3.3 Energieversorgung

Neben der Rechnertechnik muss auch die Energieversorgung redundant ausgelegt sein. Dies bedeutet, dass mindestens zwei voneinander unabhängige Bordnetze vorhanden sein müssen und dass die verschiedenen Stromverbraucher so an die beiden Netze angebunden sind, dass der Ausfall eines der Netze kompensiert werden kann. Bei einer Rechnerarchitektur wie in Abb. 4 dargestellt bedeutet dies zum Beispiel, dass der sichere Vergleich an beide Netze angeschlossen sein muss während die beiden Hauptrechner 1 und 2 von unterschiedlichen Bordnetzen versorgt werden müssen. Bei den Sensormodulen wäre es denkbar, jedes Sensormodul nur an eine Stromversorgung anzubinden, dabei aber benachbarte Sensormodule nicht an das selbe Bordnetz. Dank der sich überlappenden Erfassungsgebiete benachbarter Sensormodule bliebe dann selbst beim Ausfall eines der beiden Bordnetze eine

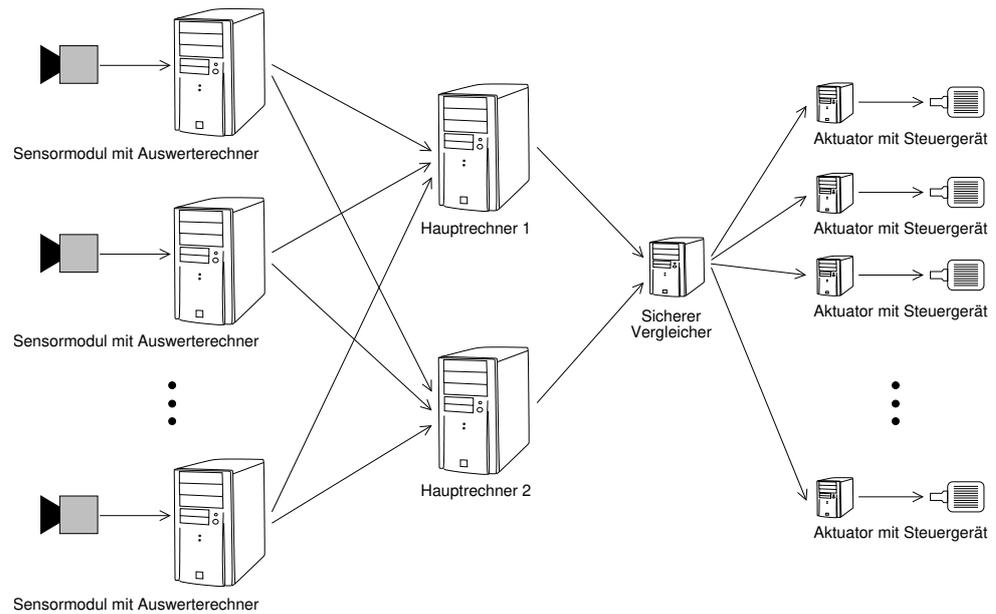


Abbildung 4: Prinzipskizze eines möglichen Rechnerarchitektur. Die beiden Hauptrechner verarbeiten die selbe Information, sind aber divers ausgeführt. Der sichere Vergleicher überprüft, ob beide Hauptrechner zu den selben Ergebnissen gekommen sind. Durch die Verwendung mehrerer Sensormodule mit überlappenden Sichtbereichen ergibt sich auch bei der Sensordatenverarbeitung Redundanz, die zur Erkennung von Fehlern genutzt werden kann. Die Größe der Computersymbole stellt qualitativ die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Rechner dar. Nur der sichere Vergleicher und ggf. die Aktuatorik-Steuergeräte müssen ASIL-D-fähig sein.

volle Umfeldwahrnehmung gewährleistet. Bei einem Fahrzeug mit vier Sensormodulen an den jeweiligen Fahrzeugecken wären somit die Module links vorne und rechts hinten an dem einen Bordnetz und die Module rechts vorne und links hinten an dem anderen.

## 4 Funktionale Besonderheiten automatisierter HO-LKW im Murgtal

### 4.1 Fahren unter Fahrleitung

Eine funktionale Besonderheit von HO-LKW gegenüber konventionellen LKW oder reinen Batterie-elektrischen LKW stellt das Fahren unter Fahrleitung dar. Bei den bisher eingesetzten, fahrgesteuerten HO-LKW übernimmt der Fahrer noch immer die Fahrzeugführung. Das Anheben und Senken des Stromabnehmers sowie das Umschalten zwischen Oberleitungs- und Batteriebetrieb erfolgt aber weitgehend automatisiert. Dazu ist das Fahrzeug mit einer Sensorik ausgestattet, die den Verlauf des doppelten Fahrdrachts über dem Fahrzeug beobachtet. Das System steuert zudem die laterale Position des Stromabnehmers, die um einige Zentimeter nach links und rechts verschoben werden kann, um hiermit dem Verlauf der Fahrleitung optimal folgen zu können [35]. Die maximal mögliche laterale Abweichung des LKW von der durch die Fahrleitung vorgegebenen Optimallinie beträgt ca. 40 cm [27]. Der LKW erkennt zudem von selbst, wenn die Fahrleitung endet oder der Fahrer den mit Fahrleitung überspannten Fahrstreifen verlässt, senkt in diesem Falle selbständig den Stromabnehmer und schaltet auf Batteriebetrieb

bzw. Dieselbetrieb um. Umgekehrt erkennt das System das Wiederkehren der Fahrleitung und wäre technisch in der Lage, in diesem Falle den Stromabnehmer wieder anzulegen. Dass das Anlegen des Stromabnehmers bei den derzeitigen Versuchsfahrzeugen durch den Fahrer initiiert werden muss, hat keine technischen, sondern nur juristische Gründe [27].

Die Kontrolle über den Stromabnehmer selbst sowie die Moduswahl zwischen Oberleitungs-, Batterie- und Dieselbetrieb ist technisch also bereits gelöst und erfordert keine aktive Entscheidung des Fahrers mehr. Allerdings ergeben sich durch den Oberleitungsbetrieb zusätzliche Anforderungen an die Trajektorienplanung des automatisierten Fahrzeugs, da auf den mit Fahrleitung versehenen Abschnitten der Strecke das Fahrzeug nach Möglichkeit so geführt werden soll, dass das Fahrzeug seine Energie aus der Fahrleitung erhalten kann.

Nach den geltenden straßenbaulichen Normen betragen die Fahrstreifenbreiten auf Landstraßen und Autobahnen in der Regel maximal 3,75 m. Bei einer Fahrzeugbreite eines LKW von 2,55 m und einer mittig über dem Fahrstreifen montierten Fahrleitung beträgt somit der maximale laterale Versatz innerhalb des Fahrstreifens ca 60 cm. Dies ist kaum mehr als die maximal möglichen 40 cm, die ein HO-LKW von der Optimallinie abweichen darf, ohne den Stromabnehmer senken zu müssen.

Die Verhaltens- und Trajektorienplanung eines automatisierten Fahrzeugs versucht i.d.R. stets, einer Referenzlinie zu folgen, die im allgemeinen der Mitte des eigenen Fahrstreifens entspricht. Nur in begründeten Fällen, wird davon abgewichen, z. B. wenn Hindernisse einen Teil des Fahrstreifens belegen, im Falle eines Überholmanövers oder zum Ausholen vor bzw. hinter engen Kurven. Daher werden mutmaßlich bereits klassische Trajektorienplaner ausreichen, um beim Betrieb unter Fahrleitung innerhalb der lateralen Toleranzbereiche zu bleiben. Sollte dies jedoch nicht ausreichen, so ist eine Anpassung der Trajektorienplaner erforderlich. Hierzu ist es erforderlich, dass dem Fahrzeug die Lage der Fahrleitung im Voraus bekannt ist. Dies wird am einfachsten dadurch erreicht, dass die Geometrie der Fahrleitung in die digitale Karte aufgenommen wird, die dem automatisierten Fahrzeug zur Orientierung dient. In dieser Karte sind ohnehin bereits die Fahrstreifenränder der Strecke abgelegt. Da die Karte bei jedem Umbau der Straße aktualisiert werden muss, stellt die Aufnahme der Fahrleitung keinen wesentlichen Zusatzaufwand dar.

Aus der bekannten Fahrleitungsgeometrie und der bekannten Position des Fahrzeugs können nunmehr zusätzliche Kriterien für die Trajektorienplanung abgeleitet werden. An dieser Stelle soll beispielhaft nur der Fall von Trajektorienplanern diskutiert werden, die auf Linear-quadratischen Optimierungsproblemen basieren, z. B. [46, 18]. Hierbei wird die Trajektorienplanung als mathematisches Optimierungsproblem modelliert. In Form von (harten) Randbedingungen werden die Systemgrenzen beschrieben, z. B. maximale Lenkwinkel, maximale Beschleunigungen sowie die Kollisionsfreiheit der Trajektorie. Die zu optimierende Zielfunktion modelliert hingegen wünschenswerte Eigenschaften, indem ungünstige Trajektorien mit Straftermen belegt werden. Beispiele für solche Strafterme sind das Quadrat der Beschleunigung in Längsrichtung (um starke Beschleunigungen zu vermeiden), das Quadrat der Beschleunigung in Querrichtung (um starke Zentrifugalkräfte zu vermeiden), der reziproke Abstand zu Hindernissen (um enge Vorbeifahrten an Hindernissen zu vermeiden) oder der quadrierte laterale Abstand von der Fahrstreifenmitte (um möglichst nicht zu nahe am Rand des Fahrstreifens zu fahren). Die verschiedenen Terme werden in Form einer gewichteten Summe ausbalanciert. Der Wunsch nach einer Fahrt unter dem Fahrdraht lässt sich bei einer solchen Modellierung einfach in Form eines Strafterms ergänzen, der den quadratischen lateralen Abstand von der Fahrdraht-Referenzlinie umfasst. Dieser Term sorgt dafür,

dass die Trajektorienplanung versuchen wird, möglichst eng an der Fahrdracht-Referenzlinie zu bleiben.

## 4.2 Streckenbezogene Besonderheiten

Die im Murgtal geplante, ca. 18 km lange Strecke zwischen Kuppenheim und Hilpertsau (siehe Abb. 5) ist durch eine große Vielfalt verschiedener Streckenabschnitte gekennzeichnet. Der längste Teil der Strecke verläuft auf der B462, die insgesamt einen sehr guten Ausbauzustand besitzt. Der nördliche Abschnitt ist vierstreifig mit getrennten Richtungsfahrbahnen ausgebaut, auf dem Rest der Strecke verfügt die B462 über eine Fahrbahn mit je einem Fahrstreifen pro Richtung. Gernsbach wird in einem Tunnel unterfahren. Die einzige echte Ortsdurchfahrt auf der B462 liegt in Hilpertsau, aber auch dort ist die Straße breit genug und erlaubt die Vorbeifahrt von zwei LKWs. Die Zufahrt von Kuppenheim zur B462 erfolgt über die L67, die über eine Fahrbahn mit je einem Fahrstreifen pro Richtung verfügt.

Während der gute Ausbauzustand auf dem größten Teil der Strecke keine besonderen Schwierigkeiten für die Automatisierung erwarten lässt, gibt es an einigen Stellen besondere Herausforderungen für die Automatisierung, die in Abb. 5 mit „S1“ bis „S9“ gekennzeichnet sind. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Stellen:

- S1 Die Anfahrt der Logistikhalle in Kuppenheim erfordert Rangierbewegungen der LKW. Zwar ist der Werkshof großzügiger gestaltet als die Werkshöfe an den Papierfabriken, jedoch erfordert die Anfahrt der Halle eine umsichtige Fahrweise, ein gewisses Geschick im Manövrieren sowie eine gute Überwachung des gesamten Fahrzeugumfeldes.
- S2 An der Einmündung der Fritz-Minhardt-Straße in die L67 müssen die LKW links auf die Landstraße einbiegen. Um dieses Manöver sicher umsetzen zu können, sind entsprechend große Sensorreichweiten erforderlich. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der L67 an dieser Stelle beträgt 50 km/h.
- S3 Zwischen der Einmündung Fritz-Minhardt-Straße und dem Anschlussknoten zur B462 befindet sich auf der L67 ein Kreisverkehr. Er ist gut einsehbar und die hier einmündende Nebenstraße besitzt nur wenig Verkehr.
- S4 Die Verknüpfung der L67 mit der B462 stellt sich in mehrfacher Hinsicht als Herausforderung dar. In Richtung Kuppenheim müssen die LKW in die L67 nach links einbiegen. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der L67 beträgt an dieser Stelle 70 km/h. In Richtung Gernsbach müssen die LKW aus der L67 nach links in die Auffahrt einbiegen und sich anschließend über einen Beschleunigungsstreifen in den fließenden Verkehr auf der B462 einfädeln. Auf den Hauptfahrbahnen der B462 gilt an dieser Stelle eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h.
- S5 Am Übergang des vierstreifigen Abschnitts zum zweistreifigen Abschnitt bei Bad Rotenfels müssen sich die Fahrzeuge der beiden zusammenfließenden Streifen verflechten. Die zusammenfließenden Fahrstreifen sind an dieser Stelle gleichberechtigt, so dass ggf. nach dem Reißverschlussverfahren vorgegangen werden muss. Dabei könnten insbesondere PKW, die die letzte Gelegenheit zum Überholen des LKW nutzen möchten, schwierig zu handhabende Situationen hervorrufen. Die erlaubte Höchstgeschwindigkeit beträgt an dieser Stelle 70 km/h.

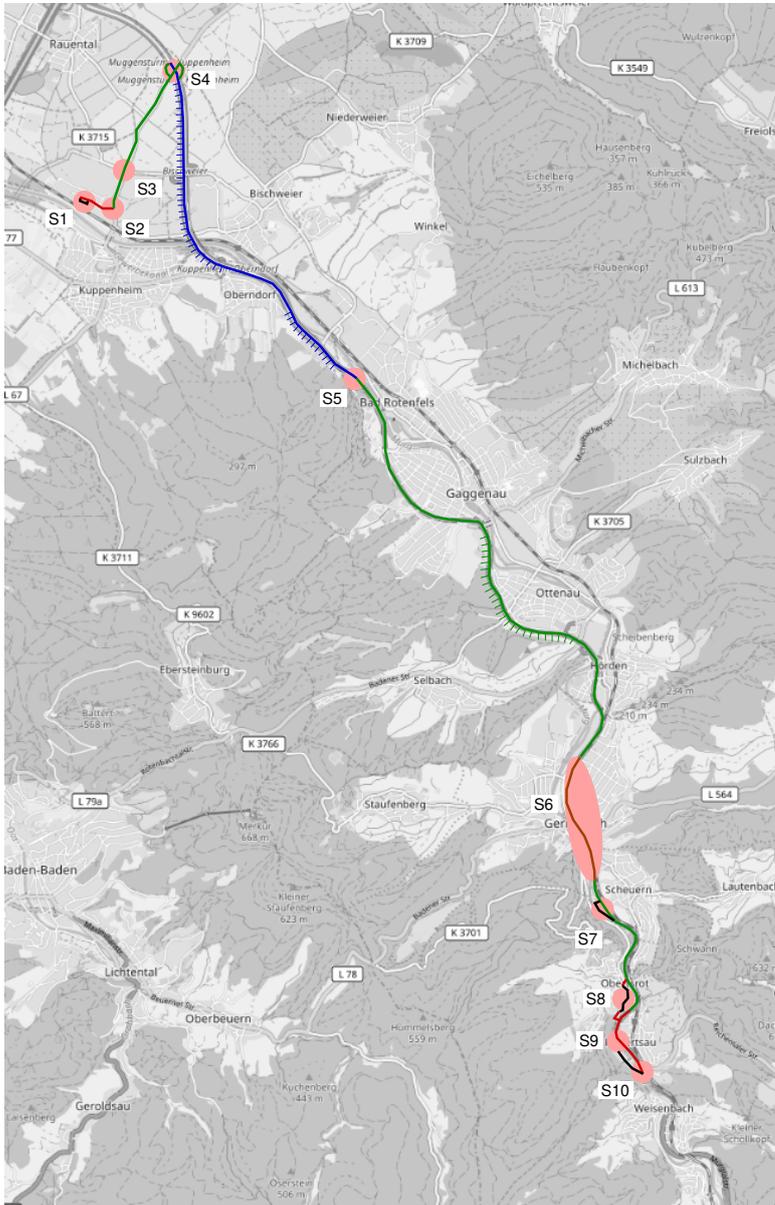


Abbildung 5: Kartenausschnitt der Versuchsstrecke im unteren Murgtal zwischen den Papierfabriken bei Obertsrot und Hilpertsau im Süden sowie dem Logistiklager Kuppenheim im Norden. Die geplante Strecke ist farblich markiert, wobei blau für autobahnähnlich ausgebaute Abschnitte steht, grün für Landstraßen, rot für innerörtliche Streckenabschnitte, braun für den Gernsbacher Tunnel sowie schwarz für Bereiche in den Werksgeländen bzw. deren Zufahrten. Für die Automatisierung besonders anspruchsvolle Stellen sind rosa unterlegt und mit „S1“ bis „S9“ beschriftet. Die mit Fahrleitung zu überspannenden Bereiche sind mit seitlichen Strichen gekennzeichnet. Kartengrundlage: OpenStreetMap. Stand: Juni 2019.

- S6 Der 1,5 km lange Gernsbacher Tunnel stellt vor allem für die Selbstlokalisierung ein Problem dar, da einerseits im Tunnel kein Satellitenempfang möglich ist, andererseits Inertialnavigation auf 1,5 km Streckenlänge bereits einen zu großen Fehler akkumuliert. Die Selbstlokalisierung der Fahrzeuge muss sich daher vollständig auf Kameras und ggf. Lidar-Sensoren stützen. Allerdings bietet die Tunnelröhre nur wenige optisch markante Merkmale, anhand deren sich die kamerabasierte Selbstlokalisierung orientieren kann. Mit Lidar-basierten Ansätzen lässt sich die laterale Position des Fahrzeugs sehr gut im Tunnel bestimmen, allerdings gibt es wenige Anhaltspunkte für den Lidar, die die Position in Längsrichtung verraten.
- S7 Der Werkshof der Firma Casimir Kast ist sehr eng und die Ausfahrt aus dem Werkshof erfordert Linkseinbiegen in die vielbefahrene B462.
- S8 Der Werkshof der Firma Mayr-Melnhof in Obertsrot ist ebenfalls sehr beengt. Die Anfahrt des Werkshofs führt über enge innerörtliche Straßen. Teilweise müssen die LKW auf die Gegenfahrbahn ausweichen, um die Kurven befahren zu können.
- S9 Die Ortsdurchfahrt von Hilpertsau (Murgtalstraße) ist die einzige Stelle entlang der B462, in der es in relevanter Größenordnung Randbebauung gibt. Die Straße verfügt abschnittsweise nicht über eine markierte Mittellinie.
- S10 Der Werkshof der Firma Smurfit Kappa in Hilpertsau ist ebenfalls eng und nur über eine schmale, einspurige Brücke zu erreichen. Bei der Ausfahrt aus dem Werksgelände müssen die LKW links in die vielbefahrene B462 einbiegen.

Die schwierigen Stellen S3 (Kreisverkehr) und S6 (Tunnel Gernsbach) und S9 (Ortsdurchfahrt Hilpertsau) sind nach dem derzeitigen Stand der Technik zwar eine Herausforderung, aber doch lösbar. Da am Kreisverkehr ohnehin langsam gefahren werden muss und die Stelle sehr gut überschaubar ist, verfügt ein automatisierter LKW an dieser Stelle über ein umfassendes Wissen über die Verkehrssituation. Da aus der hier einmündenden Nebenstraße nur wenige Fahrzeuge einbiegen, ist zu erwarten, dass sich genügend ausreichend große Zeitlücken ergeben, damit der LKW in den Kreisverkehr einfahren kann. Allerdings kann es passieren, dass der automatisierte LKW länger an der Einfahrt zum Kreisverkehr wartet als ein menschlicher LKW-Fahrer, da sich die Automatisierung insgesamt defensiver verhalten wird. Gründe hierfür sind einerseits Sicherheitserwägungen und andererseits eine schlechtere Einschätzung darüber, welche Absicht ein im Kreisverkehr befindliches Fahrzeug hat (ausfahren bzw. im Kreisverkehr bleiben).

Die schwierige Situation im Gernsbacher Tunnel ist ebenfalls technisch lösbar, erfordert aber ggf. Optimierungen auf der Seite der Automatisierung. Eine vergleichbare Herausforderung wurde 2016 im Projekt Daimler Future Bus [26] gemeistert, bei dem ein über 1 km langer Tunnel in Amsterdam mit einem automatisierten Bus befahren wurde. Eine bestehende, kamerabasierte Selbstlokalisierung wurde hierzu für diese spezielle Situation optimiert, so dass der Ausfall der Satellitennavigation sowie der Drift der Inertialnavigation komplett kompensiert werden konnten. Durch die Hinzunahme von Lidar-Daten, die eine sehr genaue Schätzung des seitlichen Abstands zur Tunnelwand erlauben [21] oder durch die Nutzung der Fahrbahnmarkierungen [28] kann dieser Lokalisierungsansatz weiter verbessert werden.



Abbildung 6: Bilder der Ortsdurchfahrt von Hilpertsau (Bereich S9)

In Hilpertsau (S9) führt die stark befahrene B462 in einem Bogen durch die Wohnbebauung hindurch, siehe Abb. 6. Abschnittsweise fehlen Fahrbahnmarkierungen. Beidseitig wird die Fahrbahn von Bürgersteigen gesäumt. Die Fahrbahnbreite beträgt ca. 6,50 m bis 7,00 m und reicht daher aus, selbst wenn sich zwei 2,55 m breite LKW an der Stelle der stärksten Krümmung begegnen. Die örtlichen Verhältnisse sind übersichtlich. Obwohl kein Halteverbot verhängt ist, ist die Fahrbahn i. d. R. frei von parkenden Fahrzeugen. Insgesamt betrachtet ist diese Ortsdurchfahrt zwar komplexer als die anderen Abschnitte der B462, jedoch ist die Automatisierung technisch ohne zusätzliche infrastrukturelle, organisatorische oder fahrzeugseitige Maßnahmen möglich.

Die verbleibenden Schwierigkeiten lassen sich im wesentlichen in drei Gruppen einteilen, die in den folgenden Abschnitten diskutiert werden: (i) Schwierigkeiten beim Linksabbiegen bzw. Linkseinbiegen (S2, S4, S7, S10), (ii) Schwierigkeiten bei den Verflechtungsbereichen (S4, S5) sowie (iii) schwierige Navigation auf beengtem Platz in den Werkshöfen (S1, S7, S8, S10).

#### 4.2.1 Linkseinbiegen in den fließenden Verkehr

Die besondere Schwierigkeit beim Linkseinbiegen in den fließenden Verkehr liegt darin, eine ausreichend große Lücke im fließenden Verkehr zu identifizieren. An den problematischen Stellen im Murgtal handelt es sich ausschließlich um T-Kreuzungen bzw. Ausfahrten aus Werksgeländen, d.h. der links einbiegende LKW muss zwei bevorrechtigte Verkehrsströme beachten. Beim links Einbiegen können – ausreichend dimensionierte Flächen vorausgesetzt – Beschleunigungen in Längsrichtung von durchschnittlich  $0,7 \text{ m/s}^2$  bis  $1,3 \text{ m/s}^2$  angenommen werden [16, 44]. Um beim Einbiegen den Konfliktbereich mit den bevorrechtigten Verkehrsströmen zu verlassen, benötigt der LKW somit ca. 6 bis 8 s, bei besonders schwierigen Verhältnissen (z. B. S10) auch länger. In dieser Zeit bewegt sich der bevorrechtigte, fließende Verkehrs bei 70 km/h Höchstgeschwindigkeit um 120 bis 160 m weiter. Dies ist insbesondere deswegen relevant, weil der einbiegende LKW vor dem Losfahren sicherstellen muss, dass sich in diesem Bereich vor der Einmündung kein bevorrechtigtes Fahrzeug befindet, da er dieses ansonsten gefährden würde. Zwar könnte der bevorrechtigte Verkehr durch Reduktion der Geschwindigkeit das Einbiegen des LKW erleichtern, dies geschieht aber nur auf freiwilliger Basis, der einbiegende Verkehr darf sich darauf nicht verlassen oder dies erzwingen.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich Konsequenzen für die Automatisierung des LKWs. So muss gewährleistet werden, dass die Sensorik des LKWs in der Lage ist, mindestens einen Bereich von 160 m vor und nach der Einmündung zu überwachen. Dies ist derzeit serienmäßig nur mit der Radar-Sensorik

möglich. Kamerasysteme und Lidarsensoren mit passenden Reichweiten lassen sich zwar grundsätzlich konstruieren, die größere Reichweite geht aber immer auf Kosten des Erfassungswinkels bzw. des Rechen- und Hardwareaufwandes. Mit Radarsensoren lassen sich robust größere Objekte wie Kraftfahrzeuge und Motorräder erkennen. Bei Radfahrern und Fußgängern sind die Erkennungsraten nicht so gut. Bei Radfahrern im Murgtal ist mit ca. 50 km/h Höchstgeschwindigkeit zu rechnen, was einem notwendigen Erfassungsbereich von ca. 90 bis 120 m entspricht. Dieser Bereich liegt an der Grenze dessen, was Standard-Kamera- und -Lidarsysteme zur Zeit abdecken können. Alle betroffenen Stellen im Murgtal sind gut einsehbar, so dass sich durch Verdeckungen i. d. R. keine Probleme ergeben (siehe Abb. 7 und 8).



Abbildung 7: Sicht nach links und rechts auf die bevorrechtigte Querstraße in Kuppenheim an der Einmündung der Fritz-Minhardt-Straße in die L67. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der L67 beträgt an dieser Stelle 50 km/h, die Straße ist sehr gut einsehbar



Abbildung 8: Sicht nach links und rechts auf die B462 in Hilpertsau an der Zufahrt zum Werks-  
gelände von Smurfit Kappa. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der B462  
beträgt an dieser Stelle 70 km/h, die Straße ist sehr gut einsehbar

Für die Verhaltens- und Trajektorienplanung stellt das Linkseinbiegen selbst bei ausreichender sensorischer Information eine Schwierigkeit dar. Zum einen kommt es auf der vielbefahrenen B462 nur selten vor, dass sich ausreichend große Lücken im fließenden Verkehr ergeben. Lange Wartezeiten können die Folge sein. Zum anderen erfolgt das Einbiegen im alltäglichen Verkehr häufig durch Kooperation zwischen den Verkehrsteilnehmern. Fahrzeugführer im fließenden Verkehr verlangsamen ihre Fahrt, um ein Einbiegen zu ermöglichen. Manchmal wird ein derartiger Vorfahrtsverzicht durch optische Signale

(Lichthupe, Geste des Fahrers) explizit kundgetan, manchmal lässt sich eine solche Absicht nur indirekt aus dem Fahrzeugverhalten schließen. Menschliche Fahrer sind durch ihre jahrelange Erfahrung im Umgang mit anderen Verkehrsteilnehmern recht gut darin, solche Signale zu deuten und entsprechend darauf zu reagieren. Für technische Systeme stellen solche kooperativen Manöver immer noch Neuland dar. Zwar gibt es Forschungsansätze, solche impliziten und expliziten Signale zu deuten und kooperatives Verhaltensweisen darauf aufzubauen, praxistaugliche Ergebnisse gibt es jedoch noch nicht. Hinzu kommt die rechtliche Unsicherheit, die ein solches Verlassen auf das Zuvorkommen bevorzogter Verkehrsteilnehmer mit sich bringt. Ebenso wenig sind Lösungen bisher im Alltag praktikabel, die eine explizite Kommunikation zwischen den beteiligten Fahrzeugen erfordern [5, 30], da hierzu eine breite Durchdringung der Fahrzeugflotte mit Funktechnologie sowie mit Automatisierungssystemen erforderlich wäre. Daher ist auf absehbare Zeit noch nicht mit fahrzeugseitigen Lösungen zu rechnen.

Möchte man sich nicht mit langen Wartezeiten zufrieden geben, so wäre an den betroffenen Stellen auch eine infrastrukturseitige Unterstützung des Einbiegens für automatisierte LKW denkbar, z. B. durch das Aufstellen von Bedarfsampeln, die den Verkehr auf der Murgtalstraße anhalten, sobald ein LKW das Werksgelände verlassen will. Durch Funkkommunikation zwischen dem automatisierten LKW und der Ampelschaltung (Car-to-Infrastructure-Kommunikation) könnte sich der LKW bei der Ampel an- und abmelden. Entsprechende funkbasierte Kommunikationsmechanismen, basierend auf dem WLAN-Standard IEEE 802.11p bzw. dem Mobilfunkstandard 5G sind bereits verfügbar bzw. deren Einführung hat begonnen.

## 4.2.2 Verflechtungsbereiche

Die Verflechtungsbereiche S4 und S5 stellen eine besondere Schwierigkeit für das automatisierte Fahren dar. Im Bereich S5 werden zwei Fahrstreifen zu einem zusammengeführt, wobei keiner der beiden Streifen dem anderen bevorzugt ist. Die Straßenverkehrsordnung sieht in diesem Fall das Reißverschlussverfahren vor. Dennoch sind alle Fahrzeuge verpflichtet, vorsichtig zu fahren und mit Abweichungen vom Reißverschlussverfahren zu rechnen. Insbesondere dürfte es an dieser Stelle immer wieder vorkommen, das eilige PKW-Fahrer noch schnell am LKW vorbeiziehen möchten, um nicht hinter diesem herfahren zu müssen. Daher sind schwierige Situationen zu erwarten, die auch die automatisierten LKW betreffen.

Ähnlich wie beim Problem des Linkseinbiegens erfordert auch das Beherrschen derartiger Verflechtungsbereiche die Fähigkeit, die Absichten anderer Fahrzeuge zu interpretieren und sein eigenes Fahrverhalten für die anderen Verkehrsteilnehmer klar interpretierbar zu machen. Wie bereits geschildert, befindet sich die Forschung in diesem Bereich noch in den Anfängen, es gibt noch keine praxistauglichen Lösungen. Eine infrastrukturseitige Möglichkeit, um den Bereich S5 für automatisierte Fahrzeuge zu entschärfen bestünde darin, eine klare Vorfahrtsregelung der beiden sich verflechtenden Fahrstreifen zu definieren, z. B. indem der rechte Fahrstreifen als durchgehender Fahrstreifen markiert wird und der linke Fahrstreifen als endender Fahrstreifen. Die HO-LKW, die sich schon wegen der Fahrleitung in diesem Bereich auf dem rechten Fahrstreifen befinden werden, hätten somit Vorrang und die überholenden Fahrzeuge müssten das Verflechtungsproblem lösen.

Im Bereich S4 müssen sich die LKW auf die durchgehenden Fahrstreifen der in diesem Bereich vierstreifig ausgebauten B462 einfädeln. Die Höchstgeschwindigkeit auf den Hauptfahrbahnen beträgt 120 km/h. Der Beschleunigungsstreifen ist ca. 150 m lang und endet an einer Leitplanke, d.h. er findet keine Fort-

setzung in Form eines Standstreifens. Die Auffahrt zur B462 erfolgt über eine enge Rechtskurve, die von den LKW nur mit reduzierter Geschwindigkeit befahren werden kann. Gehen wir von einer Geschwindigkeit von ca. 20 km/h in der Auffahrt aus und einer Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  [16], so erreicht der LKW am Ende des Beschleunigungsstreifens nach 13 s eine Geschwindigkeit von 65 km/h. Nehmen wir ferner an, auf der rechten Hauptfahrbahn fahren andere LKW mit 80 km/h Geschwindigkeit, so ergibt sich daraus eine notwendige Netto-Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden LKW von 5 s. Um ein sicheres Einfädeln zu ermöglichen, muss der auffahrende LKW nach hinten mindestens 190 m Sensorreichweite haben, was nach derzeitigen Stand der Technik nur mit Radar-Sensorik zu erreichen ist.

Schafft es der LKW allerdings nicht sich in den fließenden Verkehr einzufädeln, muss er am Ende des Beschleunigungsstreifens anhalten und von dort aus dem Stand in die Hauptfahrbahn beschleunigen. Dies erfordert im Idealfall eine Zeitlücke von 15 s und eine Sensorreichweite von ca. 300 m. An dieser Stelle muss nicht mit Fußgängern und Fahrradfahrern auf der Hauptfahrbahn gerechnet werden, sondern nur mit motorisierten Verkehrsteilnehmern, die durch die Radarsensorik erkannt werden. Dennoch gehen die Anforderungen an die Sensorik an dieser Stelle an die Grenze des derzeit technisch machbaren. Doch selbst bei verfügbarer Sensorik mit ausreichend Reichweite wird aufgrund der hohen Verkehrsdichte auf den Hauptfahrbahnen ein Anfahren und Einfädeln aus dem Stand häufig nur möglich sein unter Inkaufnahme einer Beeinträchtigung der Fahrzeuge auf den Hauptfahrbahnen, d.h. der einsicherende LKW erzwingt das Bremsen anderer Verkehrsteilnehmer.

Im Gegensatz zum Verflechtungsbereich S5 ist der auffahrende LKW an der Stelle S4 eindeutig wartepflichtig, was ihn in eine rechtlich nachteilige Situation versetzt. In welchem Ausmaß es akzeptabel ist, als einsicherendes Fahrzeug andere Fahrzeuge auf der Hauptfahrbahn zum Bremsen zu zwingen, ist in der Rechtsprechung nicht eindeutig geklärt, so dass sich auch für ein automatisiertes Fahrzeug ein schwieriger Graubereich ergibt. Wie bereits geschildert, versuchen menschliche Fahrer in derlei Situationen, das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer zu antizipieren und kooperative Lösungen zu entwickeln. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich dazu allerdings nahezu ausschließlich Arbeiten, die die Kooperation mit Hilfe expliziter, funkbasierter Kommunikation realisieren. Allerdings wird die Flottendurchdringung funkbasierter Kommunikation zwischen Fahrzeugen auf absehbare Zeit nicht ausreichen, um ein sicheres Einfädeln zu ermöglichen. Stattdessen müssen technische Lösungen entwickelt werden, die ohne diese Technologie auskommen. Wie Videoaufzeichnungen belegen, arbeiten einige Firmen an der Entwicklung geeigneter Verfahren für das Einfädeln von PKWs auf Autobahnen und Schnellstraßen. Mit welcher Zuverlässigkeit die automatisierten Fahrzeuge dies inzwischen beherrschen und welcher Aufwand erforderlich ist, diese Fähigkeiten auf LKWs zu übertragen, ist allerdings nicht bekannt.

Infrastrukturseitige Lösungsansätze für diese Stelle sind ebenfalls nicht ganz so einfach zu realisieren wie im Bereich S5. Eine Verlängerung des Beschleunigungsstreifens würde die Situation entschärfen, da der einfädelnde LKW dann mehr Handlungsspielraum hätte, eine passende Lücke zu suchen. Eine Änderung der Fahrbahnmarkierung, um im Einfädelungsbereich Fahrstreifenwechsel von links nach rechts zu unterbinden, könnte die Komplexität der Situation ebenfalls verringern. Ebenfalls wäre ortsfeste Sensorik, die den Verkehrsfluss auf den Hauptfahrbahnen beobachtet und die auffahrenden Fahrzeuge über Lücken informiert, eine Unterstützung. Schließlich könnte auch eine „Rettungszone“ hinter dem Ende des Beschleunigungsstreifens bei missratenen Einfädelversuchen helfen, gefährliche Situationen zu vermeiden.

### 4.2.3 Navigation im Werksgelände



Abbildung 9: Eines der Speditionsgelände in Kuppenheim (links) sowie Zufahrt über die Fritz-Minhardt-Straße (rechts).

Die Anfahrt der Werksgelände sowie die Navigation innerhalb der Werksgelände unterscheidet sich deutlich von den Anforderungen zum Befahren der dazwischenliegenden Strecke auf der B462 und der L67. Die Zufahrtsstraßen sind deutlich enger als die Landes- und Bundesstraße, die Werksgelände im Murgtal sind beengt, die Flächen sind teilweise verschmutzt bzw. unterliegen ständiger Veränderung durch gelagerte Güter, insbesondere auf den Altpapierlagerflächen. Hinzu kommt die Notwendigkeit, Ladestellen zentimetergenau anzufahren, wobei viele Stellen nur mithilfe von Rangiermanövern erreichbar sind. Die Abbildungen 9 und 10 geben einen Einblick.

In Kuppenheim gestaltet sich die Situation weitgehend unproblematisch. Die Werksgelände der Speditionen sind großzügig ausgeführt und bieten genügend Platz zum Anfahren der Ladestellen, zum Wenden sowie zum vorübergehenden Abstellen von Fahrzeugen. Größere Probleme für die Automatisierung sind nicht zu erwarten.

Die Werksgelände der Papierfabriken in Oberstrot und Hilpertsau sind hingegen deutlich beengter, die Zufahrt zu den Geländen erfolgt z. T. über enge Ortsstraßen bzw. über eine enge, einstreifige Brücke (siehe Abbildung 10). An einigen Stellen auf den Zufahrtswegen können sich zwei LKW nicht begegnen, in den Kurven müssen die LKW ebenfalls die Gegenfahrbahn beanspruchen. Da diese Stellen mit niedriger Geschwindigkeit befahren werden, stellen sie kein Sicherheitsrisiko dar, allerdings könnten die automatisierten LKW „steckenbleiben“ und somit den Verkehr behindern. Abhilfe könnte durch die Nutzung von Funkkommunikation zur Regelung des Verkehrs und/oder durch den Einsatz zusätzlicher, stationärer Sensoren in Kombination mit einer Leitwarte und ggf. Lichtsignalanlagen geschaffen werden, so dass die ungehinderte Erreichbarkeit des Werksgeländes durch die stationäre Technik gewährleistet wird.

Das Anfahren klar definierter Ladestellen auf den Werksgeländen ist ebenfalls grundsätzlich automatisierbar, wobei zur Erleichterung der Automatisierungsfunktionen Veränderungen im Bereich der Werksgelände vorgenommen werden könnten, z. B. durch die Anbringung optischer Markierungen, die die Selbstlokalisierung der Fahrzeuge im Firmengelände erleichtern. Etwas schwieriger gestaltet sich die Automatisierung im Bereich der Altpapierlagerflächen, da hier die genaue Definition der Entladestelle (Zielposition) aufgrund der ständigen Veränderung der Situation deutlich schwieriger ist. Außerdem könnte herumfliegendes Altpapier zu einer Störung des automatisierten Fahrbetriebs führen, da es unter Umständen vermeintlich als Hindernis erkannt wird und dadurch die Weiterfahrt des automatisierten



Abbildung 10: Bilder der Zufahrt zu den Werksgeländen in Oberstrot und Hilpertsau. Von links oben nach rechts unten: (i) Zufahrt zum Werksgelände südlich von Hilpertsau über eine schmale, einstreifige Brücke, (ii) Blick in die Altpapierlagerfläche einer der Papierfabriken, (iii)-(v) Zufahrt zur Papierfabrik Obertsrot über die enge Dorfstraße, (vi)-(viii) Zufahrt zu den Altpapierlagerflächen der Obertsroter Papierfabrik von Hilpertsau aus.

LKW behindert wird.

Abhilfe könnte geschaffen werden, indem in solchen Umgebungen ein Mensch die Automatisierungsfunktion unterstützt. Dies bedeutet nicht zwangsläufig, dass der Mensch das Fahrzeug steuert. Eine Lösung könnte auch darin bestehen, dass der Mensch die Automatisierung lediglich überwacht, die genaue Zielposition des Fahrzeugs vorgibt und dem Fahrzeug mitteilt, welche Objekte echte Hindernisse sind, und welche nur scheinbare Hindernisse. Die Interaktion mit der Automatisierung könnte entweder aus dem Führerhaus des Fahrzeugs erfolgen oder aber über Funk von einem mobilen Endgerät aus. Eine solche Vorgehensweise könnte die relativ aufwändige Entwicklung von Techniken zur Navigation in Werksgeländen umgehen und zu einer schneller entwickelbaren Lösung führen, ohne dass dadurch die wesentlichen wirtschaftlichen Vorteile der Automatisierung unterminiert werden.

### 4.3 Sicherer Halt

Eine wichtige Funktion eines automatisierten Fahrzeugs ist die Fähigkeit zum sicheren Halt. Dies bedeutet, dass das Fahrzeug jederzeit in der Lage ist, selbständig einen sicheren Halteplatz anzufahren. Dies ist insbesondere im Fall einer Panne oder einer technischen Störung bzw. Ausfall einer Automatisierungskomponente relevant.

Welche Eigenschaften ein sicherer Halteplatz haben soll, ist noch nicht abschließend geklärt, so dass die folgende Liste von Kriterien nur vorläufigen Charakter hat. Eine sichere Halteposition

1. muss im befahrbaren Bereich liegen
2. darf nicht zu einer Gefährdung für das Pannenfahrzeug oder den fließenden Verkehr führen
3. darf nicht im Bereich von Bahnübergängen liegen
4. darf sich auf Autobahnen und Schnellstraßen nicht im Bereich der durchgehenden Fahrstreifen befinden
5. sollte, wenn möglich, den fließenden Verkehr nicht behindern

Für die im Murgtal befahrene Strecke bedeutet dies, dass an allen Stellen im innerörtlichen Bereich ein sicherer Halt möglich ist, bevorzugt am rechten Fahrbahnrand außerhalb von Kreuzungsbereichen. Auf den Landstraßenabschnitten, die durchgehend übersichtlich sind und auf denen größtenteils eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h gilt, ist ein Halt am rechten Fahrbahnrand im Notfall ebenfalls machbar, nach Möglichkeit sollte aber eine Stelle abseits der Hauptfahrbahnen aufgesucht werden. Auf der Strecke im unteren Murgtal ist der längste Abschnitt zwischen zwei Abfahrten bzw. Parkplätzen ca. 2 km. Das bedeutet, bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h wird spätestens nach 4 Minuten eine Halteposition abseits der Hauptfahrbahnen erreicht. Angesichts der im automatisierten Betrieb geforderten Redundanz der technischen Komponenten wird es dem automatisierten Fahrzeug daher in den allermeisten Fällen möglich sein, ein sichere Halteposition abseits der Hauptfahrbahnen zu erreichen, selbst wenn aus Sicherheitsgründen nur noch mit geringer Geschwindigkeit weitergefahren wird.

Im Hinblick auf den sicheren Halt stellt der Schnellstraßenabschnitt der B462 zwischen Anschlussstelle L67 und Bad Rotenfels eine gewisse Schwierigkeit dar. Die erlaubte Höchstgeschwindigkeit beträgt abschnittsweise 120 km/h. Die Straße ist nicht mit einem Standstreifen ausgerüstet. Der längste Abschnitt zwischen zwei Abfahrten beträgt ca. 1,6 km. Bei einem Ausfall einer redundanten Komponente



Abbildung 11: Beispiel eines Kamerabildes mit extrem starker Störung durch Blendung bei tiefstehender Sonne. Der Lidarsensor hat in dieser Situation trotz tiefstehender Sonne die Umgebung vollständig und ungestört erfasst.

der Automatisierung (z. B. Ausfall eines Sensors, Ausfall des Hauptantriebs) kann somit der nächste sichere Halteplatz i.d.R. erreicht werden. Bei einer nicht-redundanten Komponente (z. B. Reifenpanne) muss das Fahrzeug hingegen unverzüglich zum Halten gebracht werden, was nur auf der Hauptfahrbahn der B462 möglich ist. Dieser Halt widerspräche zwar den oben genannten Kriterien, allerdings besteht mangels Standstreifen keine Alternative. Auch für ein fahrgeregeltes Fahrzeug besteht keine Alternative.

#### 4.4 Witterungs- und Tageszeiteinflüsse

Neben den räumlichen Besonderheiten können auch tageszeitliche Einflüsse (Hell-Dunkel-Wechsel) sowie Witterungseinflüsse die Möglichkeiten zum automatisierten Fahren einschränken. Hierbei treten verschiedene Effekte auf. Diese können in zwei Gruppen eingeteilt werden, (i) die Beeinträchtigung der sensorischen Funktionen des Fahrzeugs sowie (ii) die Beeinträchtigung des Fahrzeugverhaltens bzw. der Fahrzeugregelung. Beispiele für ersteres sind die Blendung der Kameras durch tiefstehende Sonne (siehe Abb. 11) oder reduzierte Messweiten durch Nebel, Beispiele für die zweite Art der Beeinträchtigung sind Kontrollverluste durch Schnee, Eis oder Aquaplaning. Da die Transporte im Murgtal 24 Stunden pro Tag an allen Tagen im Jahr abgewickelt werden müssen, soll in diesem Abschnitt dargestellt werden, wie sich tageszeitliche Einflüsse und Witterungseinflüsse auf die Funktionsweise der Fahrzeuge auswirken.

In Tabelle 2 sind die Effekte zusammengestellt, die Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Fahrzeugsensorik haben und die dadurch Einschränkungen in der Funktionsweise des Fahrzeugs zur Folge haben, in Tabelle 3 sind Einschränkungen aufgeführt, die nicht ursächlich auf Einschränkungen der Sensorik beruhen. Die Kritikalität der Einschränkungen ist in einer vierstufigen Skala von 0 bis 3 angegeben, wobei die Stufen folgende Bedeutung haben:

- 0 Der Effekt hat keine wesentlichen Funktionseinschränkungen zur Folge
- 1 Einzelne Komponenten des Fahrzeugs sind beeinträchtigt (z. B. einzelne Sensoren), diese Einschränkungen können jedoch durch andere Komponenten kompensiert werden.
- 2 Es treten Funktionseinschränkungen auf, die einen Weiterbetrieb des automatisierten Fahrzeugs mit Einschränkungen erlauben.

Ursache	Effekt	Kritikalität	Gegenmaßnahmen
tiefstehende Sonne	Blendung der Kameras	1	Kompensation durch Lidar & Radar, Einsatz von Kameras mit unterschiedlichen Blickrichtungen
Dunkelheit	reduzierter Kontrast im Kamerabild	1-2	Kompensation durch Lidar & Radar, spezialisierte Auswerteverfahren, Einsatz von Kameras mit höherer Empfindlichkeit, Einsatz von Infrarotkameras
starke Sonnenstrahlung	Über- und Unterbelichtung des Bildes	1-2	Kompensation durch Lidar & Radar, Einsatz von Kameras mit höherer Empfindlichkeit, ggf. Geschwindigkeitsreduktion
leichter Regen	geringe Störungen im Kamerabild und Lidarscan	0-1	Scheibenwischer, Kompensation durch Radar, robustere Auswerteverfahren
starker Regen	starke Störungen im Kamerabild und Lidarscan	2-3	Scheibenwischer, Reduktion der Geschwindigkeit, Fahrtunterbrechung
Graupel, Hagel	Störungen im Kamerabild und Lidarscan	2	Scheibenwischer, Reduktion der Geschwindigkeit, Fahrtunterbrechung
Nebel	reduzierte Sichtweite von Kamera und Lidar	2	Reduktion der Geschwindigkeit, Kompensation durch Radar
leichter Schneefall	geringe Störungen im Kamerabild und Lidarscan	1	Scheibenwischer, Kompensation durch Radar, robustere Auswerteverfahren
starker Schneefall	starke Störungen im Kamerabild und Lidarscan	2-3	Scheibenwischer, Reduktion der Geschwindigkeit, Fahrtunterbrechung
nasse Fahrbahn	schneebedeckte Schilder und Ampeln	2	Rückgriff auf Karteninformation, vorsichtige Einfahrt in Kreuzungen im Schrittempo
nasse Fahrbahn	Fehldetektionen im Kamerabild und Lidarscan aufgrund von Reflexionen	1-2	Reduktion der Geschwindigkeit, verstärkter Rückgriff auf Karteninformation
schneebedeckte Fahrbahn	Störungen von Kamera und Lidar durch aufgewirbelte Feuchtigkeit	1-2	Scheibenwischer, Reduktion der Geschwindigkeit
schneebedeckte Fahrbahn	Störung der Fahrbahndetektion	2	Reduktion der Geschwindigkeit, verstärkter Rückgriff auf Karteninformation
schneebedeckte Fahrbahn	Störung der Selbstlokalisierung durch verdeckte Merkmale	1	Kombination verschiedener Ansätze zur Selbstlokalisierung
Störungen des Radar	Störungen des Radar	1	Kompensation durch Lidar und Kamera

Tabelle 2: Beeinträchtigung der Wahrnehmungsfunktionen des automatisierten Fahrzeugs durch tageszeitliche oder Witterungseinflüsse.

Ursache	Effekt	Kritikalität	Gegenmaßnahmen
nasse Fahrbahn	Schmierfilm, Aquaplaning	2-3	Reduktion der Geschwindigkeit an gefährdeten Stellen, Fahrtunterbrechung
vereiste Fahrbahn	Eisglätte	3	Einstellung des Betriebs
schneebedeckte Fahrbahn	Schneeiglätte	2-3	Schneeketten, Reduktion der Geschwindigkeit, Einstellung des Betriebs
	eingeschränkte Fahrbahnbreite	2	Reduktion der Geschwindigkeit, Einsatz von Personal zur Verkehrsregelung an Engstellen (oder ähnliche Maßnahmen)
	verändertes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer	2	Reduktion der Geschwindigkeit

Tabelle 3: Beeinträchtigung der Verhaltensfunktionen des automatisierten Fahrzeugs durch tageszeitliche oder Witterungseinflüsse.

### 3 Die Funktionseinschränkungen schließen einen automatisierten Betrieb aus.

Es fällt auf, dass die tageszeitlichen und witterungsbedingten Einflüsse auf die automatisierten Fahrzeuge grundsätzlich ähnlich sind wie die Einflüsse auf menschengesteuerte Fahrzeuge. An einigen Punkten besitzen die automatisierten Fahrzeuge Vorteile gegenüber menschengesteuerten Fahrzeugen, z. B. durch die Kompensation visueller Störungen durch den unempfindlicheren Radarsensor. In anderen Punkten sind die Störungen der automatisierten Fahrzeuge mutmaßlich stärker, da gerade für seltene Ereignisse mutmaßlich nur wenige spezialisierte technische Lösungen zur Verfügung stehen werden, während menschliche Fahrer ein größeres Potential an Handlungsmöglichkeiten besitzen.

## 4.5 Energiebedarf

Die für die Automatisierung erforderlichen technischen Einrichtungen erfordern zusätzliche Energie für ihren Betrieb. Im Gegensatz zu der stark schwankenden Energienachfrage der elektrischen Antriebseinheiten handelt es sich beim Energiebedarf der Rechnerhardware um eine weitgehend konstante Dauerbelastung. Heute verwendete Versuchsfahrzeuge nutzen häufig Standardkomponenten aus dem Consumerbereich. Bei dem im Projekt UNICARagil entwickelten Fahrzeug wurde der Energiebedarf für fünf Hauptrechner, ausgestattet mit je 16 Rechenkernen und 2 Grafikkarten, auf ca. 6 kW abgeschätzt. Bei der Ausstattung eines LKW-Sattelzuges mit insgesamt sechs Sensormodulen, wie in Abschnitt 3.1 skizziert, wären ca. 9 kW Leistung erforderlich.

Durch die in den kommenden Jahren zu erwartende Entwicklung effizienterer Algorithmen und spezialisierter Hardware kann erwartet werden, dass der Energiebedarf tendenziell sinkt. Außerdem kann durch ein besseres Lastmanagement erreicht werden, dass bestimmte Funktionen nur dann ausgeführt werden, wenn sie auch tatsächlich benötigt werden, während bei den heutigen Versuchsfahrzeugen häufig alle Funktionen während der gesamten Fahrt ausgeführt werden. Daher erscheint ein Leistungsbedarf für die Automatisierungstechnik in der Höhe von 2 kW in einige Jahren erreichbar zu sein.

## 5 Betrieb automatisierter LKWs

### 5.1 Betriebsführung

Nach der derzeitigen Gesetzeslage ist auf deutschen Straßen ein Betrieb automatisierter Fahrzeuge nur bis Automatisierungsstufe 2 (teilautomatisierter Betrieb) zulässig. In diesem Fall muss das Fahrzeug stets von einem Fahrer besetzt sein, der die Systemfunktionen durchgehend überwacht. Insofern ergeben sich auf dieser Stufe für die Betriebsführung keine Veränderungen gegenüber fahrgesteuerten Fahrzeugen. Für Fahrzeuge ab Automatisierungsstufe 3 muss erst noch ein regulatorischer Rahmen geschaffen werden. Obwohl daher noch nicht klar ist, wie die Anforderungen an die Betriebsführung eines hoch- oder vollautomatisierten Fahrzeugs aussehen werden, soll an dieser Stelle diskutiert werden, wie die Betriebsführung aussehen könnte.

Als Referenz soll ein Blick auf andere, bereits seit vielen Jahren automatisierte Transport- und Verkehrssysteme geworfen werden. Dazu zählen People-Mover-Systeme wie die SkyLine (seit 1994) am Frankfurter Flughafen, die H-Bahn in Dortmund (seit 1984) sowie am Düsseldorfer Flughafen (seit 2002), die M-Bahn in Berlin (1989-1991, inzwischen abgebaut) und die Nürnberger U-Bahn-Linien U2 und U3 (seit 2008). Ferner gehören hierzu die in vielen Fabriken eingesetzten automatisierten Flurförderfahrzeuge, automatische Containertransportfahrzeuge in Häfen sowie die hunderttausendfach im Einsatz

befindlichen Personen- und Lastenaufzüge.

Allen genannten Systemen ist gemein, dass sich in bzw. auf den Fahrzeugen keine menschlichen Fahrer befinden sondern dass die Entscheidung über ein Fahrmanöver allein von einer Automatik getroffen wird. Dennoch werden alle diese Systeme von einer Leitwarte fernüberwacht. Diese ist im einfachsten Fall durch eine Sprechverbindung mit jedem Fahrzeug verbunden, so dass sich Insassen im Falle einer Störung bei der Leitwarte melden können, die dann die Beseitigung der Störung und ggf. die Bergung des gestörten Fahrzeugs organisiert. Teilweise können die Leitwarten auch auf Videobilder aus den Fahrzeugen zugreifen. Die Leitwarten sind außerdem in den meisten Fällen für die Missionsplanung der Fahrzeuge zuständig, d.h. sie geben Abfahrtsort, -zeit, Ziel und Route vor. Außerdem können sie Fahrzeuge aus dem Betrieb nehmen bzw. in Betrieb setzen. In einigen Fällen können Fahrzeuge darüber hinaus teleoperiert werden, z. B. um gestörte Fahrzeuge in die Werkstatt zu überführen. Die Fahrzeuge der genannten Systeme bewegen sich also automatisiert in dem Rahmen, der von der Leitstelle vorgegeben wurde.

Aus diesen Erfahrungen lassen sich Regelungen für die Betriebsführung automatisierter Straßenfahrzeuge ableiten. In jedem Fall gibt es für jedes Fahrzeug einen Betreiber, im Falle des Shuttle-Verkehrs im Murgtal z. B. eine Spedition, der für die Betriebsführung des Fahrzeugs zuständig ist. Diesem Betreiber obliegen die folgenden Aufgaben:

- Inbetriebnahme der Fahrzeuge
- Außerbetriebnahme der Fahrzeuge
- Sicherstellen der Funktionsfähigkeit und Sicherheit der Fahrzeuge
- Missionsplanung, d.h. Vorgabe von Start, Ziel und Route. Ggf. auch Umplanung einer Mission, falls deren Ausführung nicht möglich ist (z. B. durch eine Straßensperrung)
- Störungsbeseitigung eines defekten oder gestörten Fahrzeugs, ggf. Absicherung des gestörten Fahrzeugs und dessen Bergung
- Adäquate Reaktion bei Unfällen, Alarmierung der Rettungskräfte, Absicherung des Unfallstelle, Bergung verunfallter Fahrzeuge

Da Fahrzeuge auf den Automatisierungsstufen bis einschließlich 4 stets mit einem Fahrer besetzt sein müssen, kann dieser auch die genannten Aufgaben der Betriebsführung übernehmen. Es ergibt sich kein Unterschied zum fahrgesteuerten Fahrzeug. Auf der Automatisierungsstufe 5 ist ein fahrerloser Betrieb vorgesehen. Hierfür müssen die Aufgaben des Betreiber anders organisiert werden. Dies kann beispielsweise durch eine Leitstelle erfolgen, die über Fernüberwachung Zugang zum fahrerlosen Fahrzeug hat. Damit können die Aufgaben der Missionsplanung sowie der In- und Außerbetriebnahme abgedeckt werden. Außerdem wird die Leitstelle dafür zuständig sein, bei Unfällen und anderen Störungen eine Störungsbeseitigung zu organisieren sowie Rettungskräfte zu alarmieren. Für die Störungsbeseitigung selbst wird allerdings Personal vor Ort benötigt. Wie die Absicherung einer Unfallstelle bzw. eines Pannenfahrzeugs (z. B. zeitnahes Aufstellen des Warndreiecks) bei einem fahrerlosen Fahrzeug aussehen kann, ist derzeit unklar. Unter Umständen sind andere Formen der Absicherung, z. B. durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation oder durch Warnleuchten möglich und vorzusehen.

Aus den genannten Gründen ist es bei fahrerlosem Betrieb erforderlich, ein hinreichend dichtes Netz an Servicemitarbeitern vorzuhalten, die sich im Störfall vor Ort begeben. Wie dicht dieses Netz sein muss, d.h. wie lange die Anfahrtswege zu den Störungsstellen maximal dauern dürfen, ist derzeit noch nicht geklärt. Bei den o.g. People-Mover-Systemen sind die Netzlängen so gering, dass innerhalb weniger Minuten ein Mitarbeiter vor Ort sein kann. Bei der Nürnberger U-Bahn sind Mitarbeiter stets so auf verschiedene U-Bahn-Stationen verteilt, dass kurze Wege zu allen möglichen Störungsstellen gewährleistet sind. Bei vielen Personenaufzügen hingegen muss mit Wartezeiten von 30 Minuten und mehr gerechnet werden, bis ein Servicemitarbeiter vor Ort ist.

Örtliches Personal wird ferner benötigt, um die Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs zu gewährleisten, z. B. durch eine Prüfung auf sichtbare Beschädigungen, die vor Inbetriebsetzung des Fahrzeugs erfolgt und die während des Betriebs in regelmäßigen Abständen wiederholt wird. Dies könnte beim LKW-Shuttlevverkehr im Murgtal z. B. nach jedem Lade- und Entladevorgang durch einen vor Ort befindlichen, geschulten Mitarbeiter erfolgen.

## 5.2 Betriebswirtschaftliche Aspekte automatisierter Verkehre

Die betriebswirtschaftliche Bilanz automatisierter Verkehre hängt sehr stark von der angestrebten Automatisierungsstufe an. Einsparungspotentiale im Bereich des Fahrpersonals stehen Mehraufwendungen für die zusätzliche Technik, deren Wartung und die Vorhaltung der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Betriebsführungsprozesse gegenüber.

An Einsparungspotentialen werden erwartet:

- vollständiger Verzicht auf den LKW-Fahrer bei Automatisierungsstufe 5.
- teilweiser Verzicht auf den LKW-Fahrer bei Automatisierungsstufe 4, falls das Fahrzeug in der Lage ist, längere Abschnitte der Strecke automatisiert zu fahren und nur auf einem Teil der Strecke Fahrpersonal anwesend sein muss. Dieser Fall am Beispiel der Verkehre im Murgtal könnte bedeuten, dass die LKW im Bereich der engen Werksgelände von Fahrpersonal gesteuert oder im Sinne eines teilautomatisierten Fahrens überwacht werden, während der Hauptlauf der Verkehre zwischen Kuppenheim Ortsausgang und Obertsrot fahrerlos gefahren wird.
- die Möglichkeit, das Fahrpersonal während der Fahrt in den Automatisierungsstufen 3 und 4 durch Nebenaufgaben zu beschäftigen. Diese Nebenaufgaben können alle Tätigkeiten umfassen, die sich vom Fahrerarbeitsplatz aus erledigen lassen, z. B. Bürotätigkeiten, Telefonate führen, elektronische Kommunikation. Allerdings ist es in Automatisierungsstufe 3 nicht möglich, den Fahrerarbeitsplatz zu verlassen oder die Zeit im automatisierten Modus als Ruhezeit zu nutzen, da dies die rechtzeitige Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer gefährden würde.

Neben diesen Aspekten werden in der Literatur als weitere Kostenvorteile genannt:

- Verringerung der Unfallzahlen
- Verringerung des Energieverbrauchs durch automatisiertes Kolonnenfahren mit minimalen Fahrzeugabständen (Platooning)
- Verringerung der Stillstandszeiten der Fahrzeuge aufgrund von Lenkzeit-Regelungen

- Verringerung des Energieverbrauchs durch vorausschauendere Fahrweise

Diese fünf Argumente spielen jedoch bei den betrachteten LKW-Verkehren im Murgtal keine wesentliche Rolle. Zwar ist die Reduzierung der Unfallzahlen ein gesamtgesellschaftlich äußerst wünschenswertes Ziel, allerdings dürften die Sparpotentiale bezogen auf die Gesamtkosten eines Speditionsbetriebs vergleichsweise gering sein und kaum ins Gewicht fallen.

Die Möglichkeit des Platooning ist hauptsächlich für den Verkehr auf Autobahnen mit starkem LKW-Verkehr von Bedeutung, da nur unter diesen Voraussetzungen die Bildung von LKW-Kolonnen möglich ist. Im Murgtal hingegen ist der LKW-Verkehr nicht stark genug, um Kolonnenbildung zu ermöglichen. Der Mischverkehr mit PKW, vor allem im zweistreifigen Abschnitt südlich von Bad Rotenfels sowie die vielen Einmündungen stehen dem Platooning ebenfalls entgegen.

Anders als bei Langstreckenfahrten stellen die Ruhepausen des Fahrpersonals bei den Shuttleverkehren im Murgtal keine Einschränkung für die Fahrzeug-Nutzzeiten dar, da an den Endpunkten bei Bedarf problemlos ein Fahrerwechsel erfolgen kann. Durch fahrerlosen Betrieb lassen sich daher die Fahrzeug-Umlaufzeiten und damit der Fahrzeugbedarf nicht senken.

Die letzten beiden Aspekte sind ebenfalls sehr stark auf den Autobahnverkehr zugeschnitten und treffen im Murgtal nicht zu. Einerseits fahren viele LKW-Fahrer bereits heute sehr vorausschauend, andererseits erlauben die begrenzten Sensorreichweiten automatisierter Fahrzeuge noch keine entsprechend weite Vorausschau. Erst mit Zusatzmaßnahmen wie Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ließe sich diese Vorausschau entsprechend elektronisch erhöhen.

Als Mehrkosten für automatisierten Verkehr sind zu erwarten:

- Erhöhung der Fahrzeug-Anschaffungskosten durch die technische Ausrüstung für den automatisierten Verkehr
- Erhöhung der Fahrzeug-Wartungskosten durch die zusätzliche technische Ausrüstung
- Kosten für den Betrieb einer Leitstelle und das Vorhalten eines Pannenservices wie in Abschnitt 5.1 beschrieben

Die Kosten für die technische Zusatzausrüstung automatisierter LKW wurden in einer Studie der Unternehmensberatung Roland Berger aus dem Jahr 2017 durch Expertenbefragungen auf 23 400 US\$ bei Automatisierungsstufe 5 abgeschätzt [31], wobei 85% der Summe auf die Software und 15% auf die zusätzliche Hardwareausrüstung entfällt. Obwohl Kostenschätzungen zum jetzigen Zeitpunkt der Entwicklung noch mit Vorsicht zu betrachten sind, so stellt dies zumindest eine Größenordnung dar, in dem die Zusatzkosten zu erwarten sind. Entscheidend für die Kostenentwicklung wird sein, welchen Marktanteil automatisierte Fahrzeuge im LKW- und PKW-Bereich insgesamt erzielen können, da die Softwarekosten im Wesentlichen reine Entwicklungskosten sind, die auf die Fahrzeugflotte umgelegt werden müssen.

Die Kosten für den Betrieb von Leitstelle und Pannenservice werden sehr stark davon abhängen, welche Verbreitung automatisiertes Fahren finden wird. Solange nur einzelne Projekte zum automatisierten Fahren durchgeführt werden wird es erforderlich sein, dass jeder Betreiber seinen eigenen Service aufbaut und betreibt. Bei den im Murgtal betrachteten Verkehren umfasst dies eine eigene Leitstelle sowie ein bis zwei Stützpunkte für den Pannenservice. Bei großflächigem Ausrollen der Technologie hingegen

werden sich Anbieter entwickeln, die diese Dienstleistungen für größere Flotten anbieten, so dass die Kosten pro automatisierten Fahrzeug sinken werden.

Im Vergleich der Einsparpotentiale zu den Mehrkosten ist der größte wirtschaftliche Vorteil durch die Einsparungen im Personalbereich zu erkennen, der aber erst ab der Automatisierungsstufe 5 richtig zur Geltung kommt. Bei Stufe 4 ist Personaleinsparung nur dann möglich, wenn sich der notwendige Personaleinsatz zur Überwachung der Fahrzeugfunktionen auf kleine Bereiche beschränkt, z. B. zur Überwachung der Rangiermanöver im Werksgelände, während der Hauptlauf der Strecke fahrerlos bewältigt werden müsste. Bei Stufe 3 und darunter sind keine wesentlichen Einsparungen zu erwarten, der Einsatz der Technologie kann aber möglicherweise aus anderen Gründen, z. B. Erhöhung der Sicherheit oder Entlastung des Fahrpersonals, dennoch sinnvoll sein.

Die Autoren einer Studie für den Industrie- und Handwerkskammertag [13] stellen betriebswirtschaftliche Abschätzungen verschiedener Modellrechnungen überein. Es werden hierbei Einsparungspotential bei den Betriebskosten von 28% bis 35% genannt, wobei die Zahlen nur eingeschränkt auf den Verkehr im Murgtal übertragbar sind, da Effekte durch Platooning im Murgtal kaum eine Rolle spielen würden. Der Anteil der Einsparungen beim Fahrpersonal werden in diesen Studien mit 80% bis 90% der Gesamteinsparungen eingeschätzt, so dass für die Verkehre im Murgtal eine Betriebskosteneinsparung von ca. 22% bis 32% zu erwarten wäre. Überraschend hingegen ist das Ergebnis der bereits erwähnten Studie von Roland Berger [31], die für regionale LKW-Verkehre nur zu einer Netto-Einsparung von 900 US\$ pro Monat kommt, was zu einer Amortisierungsdauer der Investition in fahrerloses Fahren von über 24 Jahren führen würde. Dies hängt mit der dort getroffenen Annahme zusammen, dass zur Organisation des Ladegeschäftes weiterhin eine Person an Bord sein müsste. Diese Annahme ist für den Verkehr im Murgtal nicht zutreffend, da das Ladegeschäft auch durch das örtliche Personal in den Papierfabriken bzw. im Logistikzentrum organisiert und beaufsichtigt werden kann.

### 5.3 Einführungszenarien

Die Einführung automatisierter Fahrzeuge im Murgtal kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen, (i) als Pilotprojekt mit Forschungscharakter sowie (ii) im Rahmen der allgemeinen Markteinführung automatisierter Fahrzeuge.

Bei einer Einführung als Pilotprojekt handelte es sich im Wesentlichen um ein Forschungsprojekt, in dem ein oder mehrere LKW aus klassischer Produktion automatisiert würden und im Murgtal zum Einsatz kämen. Wegen des Prototypencharakters der Maßnahme wäre mutmaßlich nur eine Automatisierung mit Sicherheitsfahrer möglich, d.h. selbst bei Realisierung eines Systemkonzepts auf Automatisierungsstufe 3 oder höher wäre schon aus Sicherheitsgründen und wegen fehlender Zulassung für fahrerlosen Betrieb die Mitfahrt eines Fahrers notwendig, der das System stets aufmerksam überwacht. Die wirtschaftlichen Vorteile würden sich somit noch nicht ergeben, allerdings entfielen ein erheblicher Anteil des Aufwandes, den die Einführung eines Fahrzeugs auf Stufe 5 erfordert. So könnten besonders schwierige zu automatisierende Situationen (vgl. Abschnitte 4.2, 4.4) zunächst ausgeklammert werden und erst in späteren Schritten ergänzt werden.

Die Entwicklung automatisierter LKW für den Pilotbetrieb erforderte einen finanziellen Aufwand im sieben bis achtstelligen Euro-Bereich und ein Konsortium, in dem mindestens ein LKW-Hersteller als Fahrzeuglieferant und Systemintegrator, eine Spedition als Fahrzeugbetreiber sowie Partner mit dem benötigten Know-How im Bereich der Fahrzeugautomatisierung (Software- und Hardwarekompetenz) vertreten wä-

ren. Weitere Beteiligte aus dem Bereich Human Factors zur Ausgestaltung von Benutzerschnittstellen und Fahrzeugverhalten sowie eine wissenschaftliche Begleitung zur Analyse der Auswirkungen des automatisierten Betriebs im Vorher-Nachher-Vergleich wären sinnvoll. Ferner wäre eine enge Einbindung der Zulassungsbehörden (Regierungspräsidium, Bundesamt für Straßenwesen) sowie der Straßenbetreiber sinnvoll.

Ein solcher Pilotbetrieb könnte – ähnlich dem geplanten Pilotbetrieb mit HO-LKWs – hilfreiche Erkenntnisse für die technische Ausgestaltung späterer Serienfahrzeuge als auch für den zu schaffenden organisatorischen und rechtlichen Rahmen für den serienmäßigen Einsatz automatisierter Nutzfahrzeuge liefern. Ebenso ergäben sich konkrete Aussagen zu den betriebs- und volkswirtschaftlichen Auswirkungen automatisierter Nutzfahrzeugflotten sowie die verkehrlichen Auswirkungen. Die Realisierungszeit bis zum erstmaligen Einsatz automatisierter Fahrzeuge könnte im günstigsten Fall zwei bis drei Jahre betragen.

Anders als bei einem Pilotprojekt verhält sich die Situation bei einer Einführung eines automatisierten LKW-Shuttle-Verkehrs im Murgtal im Rahmen der allgemeinen Markteinführung. Zur Zeit sind vor allem im PKW-Bereich zwei Strategien zur Einführung automatisierter Techniken zu erkennen. Etablierte Fahrzeughersteller streben die schrittweise Erweiterung der Fähigkeiten ihrer Fahrzeuge an und damit eine schrittweise Erhöhung der Automatisierungsstufe von Stufe 1-2 auf 3-4 und schließlich auf 5. Die ersten serienmäßigen Fähigkeiten sind für ca. 2021/22 angekündigt worden. Bei dieser schrittweisen Einführung bleibt der Fahrer weiterhin notwendig, wird aber mehr und mehr von der Fahraufgabe entlastet, so dass er sich zeitweise anderen Tätigkeiten zuwenden kann. Newcomer im Bereich der Fahrzeugtechnik wie Waymo, Uber, Lyft, Navia und mutmaßlich auch Apple hingegen streben direkt die Einführung von Fahrzeugen auf Stufe 5 an, allerdings zunächst nur in räumlich begrenzten Gebieten, z. B. in bestimmten Teilen einiger Städte oder auf wenigen vordefinierten Routen. Die Verallgemeinerung der Technologie erfolgt dann durch schrittweise Ausweitung der befahrbaren Gebiete.

Im Nutzfahrzeugbereich könnte sich eine Kombination beider Strategien anbieten, da sich einerseits ohnehin nur ein Teil des Straßennetzes für einen uneingeschränkten Einsatz von LKWs eignet (insbesondere das Hauptstraßennetz) und andererseits die größten wirtschaftlichen Potentiale bei der Automatisierung und dem fahrerlosen Betrieb auf bestimmten Abschnitten liegen, z. B. auf den Autobahnen und vielbefahrenen Bundesstraßen, während sich der Aufwand für die Automatisierung wenig befahrener Strecken möglicherweise wirtschaftlich auf absehbare Zeit nicht lohnt. Der Vorteil der Einführung im Rahmen einer allgemeinen Markteinführung liegt in den deutlich geringeren Kosten pro Fahrzeug durch die Verteilung der Entwicklungskosten auf eine große Anzahl Fahrzeuge, Synergieeffekte bei der Vorhaltung und Wartung der benötigten Technologie, die Einbettung der Verkehre in den allgemeinen regulatorischen Rahmen anstelle individueller Ausnahmegenehmigungen und ggf. die Möglichkeit, auf das Fahrpersonal komplett verzichten zu können. Allerdings liegt die zeitliche Perspektive für einen serienmäßigen fahrerlosen Betrieb mit LKW bei mindestens ein bis zwei Jahrzehnten.

## 6 Schlussfolgerungen

In dieser Machbarkeitsstudie wurde die Möglichkeit untersucht, einen automatisierten LKW-Verkehr mit HO-LKW im unteren Murgtal zwischen den Speditionslagern in Kuppenheim und den Papierfabriken bei Oberstrot und Hilpertsau einzurichten. Damit würden zwei wesentliche technische Entwicklungen der Automobilindustrie unserer Zeit kombiniert, die Elektrifizierung des Verkehrs mit Hilfe von batterie-

elektrischen und fahrleitungs-elektrischen Fahrzeugen sowie die Automatisierung bis hin zum autonomen, fahrerlosen Verkehr. In der Analyse wurden folgende zentrale Erkenntnisse im Hinblick auf die technische Machbarkeit gewonnen:

Das Fahren unter Fahrleitung stellt für die Automatisierung eines HO-LKWs keine wesentliche Schwierigkeit dar (siehe Abschnitt 4.1). Die Ansätze zur Verhaltens- und Trajektorienplanung lassen sich ohne wesentlichen Zusatzaufwand so ergänzen, dass sie Trajektorien unter der Fahrleitung bevorzugen gegenüber Trajektorien abseits der Fahrleitung. Hierzu muss lediglich der geometrische Verlauf der Fahrleitung bekannt sein, was durch einen zusätzlichen Eintrag in der ohnehin für die Automatisierung erforderlichen digitalen Streckenkarte einfach realisiert werden kann. Damit kann gewährleistet werden, dass der HO-LKW unter der Fahrleitung bleibt.

Die Automatisierung der Strecke im unteren Murgtal für den LKW-Verkehr ist grundsätzlich möglich. Einige in Abschnitt 4.2 genauer analysierte Stellen entlang der Strecke stellen besondere technische Herausforderungen dar, wobei sich in erster Linie das Linkseinbiegen in vielbefahrene Straßen, das Verflechten und Einfädeln auf mehrstreifigen Fahrbahnen sowie das Rangieren in den Werksgeländen als besonders schwierig herausgestellt haben. Aus technischer Sicht stellt das Einfädeln der LKW auf die B462 bei Kuppenheim den „Knackpunkt“ der Strecke dar. Mit dem weiteren Fortschritt der Technik erwarten die Autoren dieser Studie, dass auch diese Stellen automatisiert beherrscht werden können. Infrastrukturelle Maßnahmen wie fest installierte Sensoren, zusätzliche Ampelregelungen oder eine Verlängerung der Beschleunigungsstreifen könnten ferner dazu beitragen, die Situation für automatisierte Fahrzeuge zu vereinfachen.

Zur Reduktion der Problemkomplexität sind ferner Zwischenlösungen denkbar, die bereits einen großen Teil der Vorteile des automatisierten Betriebs bieten. So ist es denkbar, die Rangiermanöver in den Werksgeländen unter Aufsicht eines Fahrers abzuwickeln, d.h. fahrgesteuert oder teilautomatisiert, während die Fahrt über die L67 und die B462 vollautomatisiert und fahrerlos erfolgen könnte.

In betriebswirtschaftlicher Hinsicht verspricht das automatisierte Fahren vor allem durch Personaleinsparung wirtschaftlichen Nutzen. Andere, vor allem in Langstreckenverkehren auf Autobahnen relevante Vorteile wie die Energieeinsparung durch Platooning sowie die Ausdehnung der Einsatzzeiten der Fahrzeuge durch Wegfall der Fahrer-Ruhepausen kommen bei dem analysierten Shuttle-Verkehr auf Landstraßen über relativ kurze Distanzen nicht zum Tragen. Daher bietet automatisiertes Fahren auf den Automatisierungsstufen 1, 2 und 3 nur wenig betriebswirtschaftliche Vorteile. Erst mit der Automatisierungsstufe 4 und 5 bei weitgehendem Verzicht auf das Fahrpersonal kommen die Vorteile zum Tragen.

Wie in Abschnitt 5.1 dargestellt ist ein vollkommener Verzicht auf Personal zum Betrieb der Fahrzeuge nicht denkbar. Ein gewisses Maß an Personal wird notwendig sein, um die Fahrzeuge regelmäßig zu inspizieren und somit ihre Einsatzfähigkeit sicherzustellen, um die Fahrzeuge zu überwachen und zu disponieren sowie um einen Pannen- und Störungsservice für liegengebliebene Fahrzeuge zu organisieren. Die Überwachung der Fahrzeuge wird beim fahrerlosen Betrieb durch Fernüberwachung aus einer Leitwarte heraus erfolgen.

Daraus ergeben sich bei fahrerlosem Betrieb deutliche betriebswirtschaftliche Einsparungspotentiale, deren Quantifizierung den Autoren dieser Studie allerdings derzeit aufgrund der vielen noch bestehenden Unwägbarkeiten nicht möglich ist. Wie in Abschnitt 5.2 dargestellt gehen andere Studien von Einsparungen im Bereich von ca. 22% bis 32% gegenüber dem fahrgesteuerten Betrieb aus.

Neben der Weiterentwicklung der Technologie erfordert die serienmäßige Einführung derartiger Technologien Weiterentwicklungen in zwei weiteren Bereichen.

Für automatisiertes Fahren muss der gesetzliche und regulatorische Rahmen geschaffen werden. Derzeit sind nur teilautomatisierte Lösungen zulassungsfähig. Um die Straßenverkehrsordnung für höhere Automatisierungsstufen zu öffnen, sind gesetzliche Änderungen erforderlich. Dies beinhaltet auch die Festlegung eines Zulassungsprozesses, die Definition von Anforderungen an die Betriebsführung automatisierter Fahrzeuge sowie die Präzisierung haftungsrechtlicher Fragen im Zusammenhang mit automatisierten Fahrzeugen. Ferner hat sich herausgestellt, dass viele Regelungen der Straßenverkehrsordnung nicht präzise genug formuliert sind, um sie rechtssicher in automatisierten Fahrzeugen zu implementieren. Beispielsweise ist nicht klar geregelt, wie stark ein in eine Vorfahrtsstraße einbiegender LKW den Verkehr auf der Vorfahrtsstraße beeinträchtigen darf, wie groß also die Zeitlücke im fließenden Verkehr mindestens sein muss, um einbiegen zu können, ohne den Fahrzeugen auf der Vorfahrtsstraße die Vorfahrt zu nehmen. Zwar haben sich in der alltäglichen Praxis in solchen Situationen bestimmte Gewohnheiten gebildet, diese werden durch den regulatorischen Rahmen jedoch nicht immer gedeckt. Eine Präzisierung der Regelungen, z. B. durch die Schaffung von Richtlinien für die Automatisierung von Fahrzeugen, würde helfen. Erste Ansätze für derartige Regelwerke wurden beispielsweise in Form des Responsibility-Sensitive Safety-Prinzips (RSS) [33] vorgeschlagen.

Ein besonderes Augenmerk muss bei der Automatisierung von Straßenfahrzeugen auf die Absicherung der Fahrzeuge und den Nachweis der Sicherheit gelegt werden. Hierzu gibt es noch keine praktikable und allseits akzeptierte Vorgehensweise [42]. Klassische Ansätze des Sicherheitsnachweises durch Absolvieren einer hinreichend großen Anzahl an Testkilometern scheiden in der Praxis aufgrund der erforderlichen Test-Fahrleistung aus. Stattdessen müssen neue Formen stärker modular angelegter Nachweisverfahren entwickelt werden. Welchen methodischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand ein solches Verfahren haben wird, ist derzeit noch nicht absehbar. Nach Meinung der Autoren muss allerdings davon ausgegangen werden, dass der Aufwand für die Sicherheitsnachweisführung erheblich sein wird. Die von der Automobilindustrie angekündigte Einführung von hochautomatisiertem Fahren auf der Autobahn (Automatisierungsstufe 3 bzw. 4) für die erste Hälfte der 2020er-Jahre [40] als auch die beabsichtigte Einführung fahrerloser Fahrzeuge im Stadtverkehr in den USA durch Firmen wie Waymo und Uber werden zeigen, welcher Aufwand erforderlich ist.

Der zeitliche Horizont für die Einführung automatisierter LKW im Murgtal ist angesichts der beschriebenen Unsicherheiten schwierig. Abgesehen von einem Pilotprojekt<sup>1</sup>, das innerhalb von zwei bis drei Jahren realisiert werden könnte, wäre der Einsatz nur im zeitlichen Einklang mit der allgemeinen Einführung automatisierter Technologie in Straßenfahrzeugen denkbar. Mutmaßlich werden sich die Hersteller von Nutzfahrzeugen zunächst auf die technologisch einfachere und wirtschaftlich vielversprechende Automatisierung von Autobahnfahrten konzentrieren. Vorausgesetzt, das hochautomatisierte Fahren auf Autobahnen wird bis 2025 erfolgreich im PKW-Bereich eingesetzt, wäre eine Einführung im Nutzfahrzeugbereich im unmittelbaren Nachgang denkbar. Fahrerloses Fahren wäre aber auch mit dieser Technologie noch nicht unbedingt möglich, außerdem blieben die Vor- und Nachläufe auf Land- und Innerortsstraßen weiterhin fahrgesteuert bzw. teilautomatisiert. Bis automatisiertes Fahren von Nutzfahrzeugen auch auf einem Netz ausgewählter Land- und innerörtlicher Hauptstraßen möglich wird, sind

---

<sup>1</sup> Bei einem Pilotprojekt müssten die Fahrzeuge weiterhin mit Sicherheitsfahrern besetzt sein.

nochmals mehrere Jahre Entwicklungszeit einzuplanen, so dass ein automatisierter Betrieb im Murgtal mutmaßlich erst nach 2030 zu erwarten sein wird.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit im Rahmen der Begleitforschung zum Projekt eWayBW.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bejar, Eduardo ; Morán, Antonio: Backing Up Control of a Self-Driving Truck-Trailer Vehicle with Deep Reinforcement Learning and Fuzzy Logic. In: IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology IEEE, 2018, S. 202–207
- [2] Beyersdorfer, Susann ; Wagner, Sebastian: Novel Model Based Path Planning for Multi-axle Steered Heavy Load Vehicles. In: International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems IEEE, 2013, S. 424–429
- [3] Buehler, Martin ; Iagnemma, Karl ; Singh, Sanjiv: The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic. Bd. 56. Springer, 2009
- [4] Calvert, Simeon C. ; Mecacci, Giulio ; Heikoop, Daniël D ; Sio, Filippo S.: Full Platoon Control in Truck Platooning: a Meaningful Human Control Perspective. In: International Conference on Intelligent Transportation Systems IEEE, 2018, S. 3320–3326
- [5] Chen, Lei ; Englund, Cristofer: Cooperative Intersection Management: A Survey. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 17 (2016), Nr. 2, S. 570–586
- [6] Automatisiertes Fahren: BMW und Daimler wollen Kräfte bündeln. Pressemitteilung der Daimler AG, [www.daimler.com/innovation/case/autonomous/bmw-daimler-cooperation.html](http://www.daimler.com/innovation/case/autonomous/bmw-daimler-cooperation.html), 2019
- [7] The pioneer of autonomous driving. Mercedes-Benz Future Truck 2025. [www.daimler.com/innovation/autonomous-driving/mercedes-benz-future-truck.html](http://www.daimler.com/innovation/autonomous-driving/mercedes-benz-future-truck.html), 2019
- [8] Dang, Thao ; Lauer, Martin ; Bender, Philipp ; Schreiber, Markus ; Ziegler, Julius ; Franke, Uwe ; Fritz, Hans ; Strauss, Tobias ; Lategahn, Henning ; Keller, Christoph G. ; Kaus, Eberhard ; Raabe, Clemens ; Appenrodt, Nils ; Pfeiffer, David ; Lindner, Frank ; Stein, Fridtjof ; Erbs, Friedrich ; Enzweiler, Markus ; Knöppel, Carsten ; Hipp, Jochen ; Haueis, Martin ; Trepte, Maximilian ; Brenk, Carsten ; Tamke, Andreas ; Ghanaat, Mohammad ; Braun, Markus ; Joos, Armin ; Mock, Horst ; Hein, Martin ; Petrich, Dominik ; Schneider, Nicolai ; Kronjäger, Winfried ; Zeeb, Eberhard ; Stiller, Christoph ; Herrtwich, Ralf G.: Autonomes Fahren auf der historischen Bertha-Benz-Route. In: tm-Technisches Messen 82 (2015), Nr. 5, S. 280–297
- [9] DB Schenker und Einride: Erster autonomer Elektro-Lkw „T-Pod“ nimmt kommerziellen Betrieb auf. [www.dbschenker.com/de-de/ueber-uns/presse-center/db-schenker-news/db-schenker-und-einride--erster-autonomer-elektro-lkw--t-pod--nimmt-kommerziellen-betrieb-auf--562174](http://www.dbschenker.com/de-de/ueber-uns/presse-center/db-schenker-news/db-schenker-und-einride--erster-autonomer-elektro-lkw--t-pod--nimmt-kommerziellen-betrieb-auf--562174), November 2018
- [10] Dickmanns, Ernst D. ; Behringer, Reinhold ; Dickmanns, Dirk ; Hildebrandt, Thomas ; Maurer, Markus ; Thomanek, Frank ; Schiehlen, Joachim: The Seeing Passenger Car'VaMoRs-P'. In: Intelligent Vehicles Symposium IEEE, 1994, S. 68–73
- [11] Eckl-Dorna, Wilfried: Google-Tochter Waymo startet Service mit Robotertaxis. manager magazin vom 7.12.2018, 2018

- [12] ELISA - Elektrifizierter, innovativer Schwerverkehr auf Autobahnen. Internet-Präsenz des Projektes, [mobil.hessen.de/ELISA](http://mobil.hessen.de/ELISA), Mai 2019
- [13] Esser, Klaus ; Kurte, Judith: Autonomes Fahren – Aktueller Stand, potentiale und Auswirkungenanalyse. Studie von KE-Consult im Auftrag des Deutschen Industrie- und Handelskammertag e.V., [www.dihk.de/ressourcen/downloads/studie-autonomes-fahren.pdf](http://www.dihk.de/ressourcen/downloads/studie-autonomes-fahren.pdf), 2018
- [14] eWayBW. Projektwebseite, [ewaybw.de/html/content/ewaybw.html](http://ewaybw.de/html/content/ewaybw.html), 2018
- [15] FESH – Feldversuch eHighway an der BAB A1 in Schleswig-Holstein. Internet-Präsenz des Projektes, [www.ehighway-sh.de](http://www.ehighway-sh.de), Mai 2019
- [16] Fürbeth, Volker ; Großer, Werner ; Kolb, Walter ; Burger, Heinz: Lkw-Anfahrbeschleunigungswerte für die Praxis. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 31 (1993), S. 182–184
- [17] Geiger, Andreas ; Lauer, Martin ; Moosmann, Frank ; Ranft, Benjamin ; Rapp, Holger ; Stiller, Christoph ; Ziegler, Julius: Team AnnieWAY's Entry to the Grand Cooperative Driving Challenge 2011. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 13 (2012), September, Nr. 3, S. 1008–1017
- [18] Gutjahr, Benjamin ; Gröll, Lutz ; Werling, Moritz: Lateral Vehicle Trajectory Optimization using Constrained Linear Time-varying MPC. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 18 (2017), Nr. 6, S. 1586–1595
- [19] Keilhoff, Dan ; Niedballa, Dennis ; Reuss, Hans-Christian ; Buchholz, Michael ; Gies, Fabian ; Dietmayer, Klaus ; Lauer, Martin ; Stiller, Christoph ; Ackermann, Stefan ; Winner, Herrmann ; Kampmann, Alexandru ; Alrifaae, Bassam ; Kowalewski, Stefan ; Klein, Fabian ; Struth, Michael ; Woopen, Timo ; Eckstein, Lutz: UNICARagil – New Architectures for Disruptive Vehicle Concepts. In: 19. Internationales Stuttgarter Symposium, 2019
- [20] Kruglov, S. P. ; Kovyrrshin, S. V.: Adaptive Trailer Backup Control. In: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies IEEE, 2018, S. 1–6
- [21] Kümmerle, Julius ; Sons, Marc ; Poggenhans, Fabian ; Kühner, Tilman ; Lauer, Martin ; Stiller, Christoph: Accurate and Efficient Self-Localization on Roads using Basic Geometric Primitives. In: Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019, S. 5965–5971
- [22] Kunze, Ralph ; Ramakers, Richard ; Henning, Klaus ; Jeschke, Sabina: Organization and Operation of Electronically Coupled Truck Platoons on German Motorways. In: Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering. Springer, 2011, S. 427–439
- [23] Lam, Stanley ; Katupitiya, Jayantha: Cooperative Autonomous Platoon Maneuvers on Highways. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics IEEE, 2013, S. 1152–1157

- [24] Liu, Xuanzuo ; Madhusudhanan, Anil K. ; Cebon, David: Minimum Swept-Path Control for Autonomous Reversing of a Tractor Semi-Trailer. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 68 (2019), Nr. 5, S. 4367–4376
- [25] Martí, Enrique ; Pérez, Joshué ; Miguel, Miguel A. ; García, Fernando: A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving. In: IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 11 (2019), Nr. 4, S. 94–108
- [26] The Mercedes-Benz Future Bus. The future of mobility. [www.daimler.com/innovation/autonomous-driving/future-bus.html](http://www.daimler.com/innovation/autonomous-driving/future-bus.html), April 2019
- [27] Mitarbeiter der Siemens AG: persönliches Gespräch. April 2018
- [28] Poggenhans, Fabian ; Salscheider, Niels O. ; Stiller, Christoph: Precise Localization in High-Definition Road Maps for Urban Regions. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2018, S. 2167–2174
- [29] Pomerleau, Dean A.: ALVINN: An Autonomous Land Vehicle in a Neural Network. In: Advances in neural information processing systems, 1989, S. 305–313
- [30] Rios-Torres, Jackeline ; Malikopoulos, Andreas A.: A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-ramps. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 18 (2017), Nr. 5, S. 1066–1077
- [31] Automated Trucks – The next big disruptor in the automotive industry? Studie der Unternehmensberatung Roland Berger, [www.rolandberger.com/de/Publications/Automated-Trucks.html](http://www.rolandberger.com/de/Publications/Automated-Trucks.html), 2017
- [32] Autonomous Transport Solutions. [www.scania.com/group/en/autonomous-transport-solutions](http://www.scania.com/group/en/autonomous-transport-solutions), 2019
- [33] Shalev-Shwartz, Shai ; Shammah, Shaked ; Shashua, Amnon: On a Formal Model of Safe and Scalable Self-driving Cars. In: CoRR abs/1708.06374 (2017). <http://arxiv.org/abs/1708.06374>
- [34] Sharafi, Mehran ; Zare, Asef ; Kamyad, Ali V. ; Nikpoor, S: Intelligent Parking Method for Trailers in Presence of Fixed and Moving Obstacles. In: 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering Bd. 6 IEEE, 2010, S. V6–353 – V6–357
- [35] Siemens AG: eHighway – elektrifizierter Straßengüterverkehr. Broschüre, [www.siemens.com/mobility/eHighway](http://www.siemens.com/mobility/eHighway), 2017
- [36] Tas, Ömer S. ; Salscheider, Niels O. ; Poggenhans, Fabian ; Wirges, Sascha ; Bandera, Claudio ; Zofka, Marc R. ; Strauss, Tobias ; Zöllner, J. M. ; Stiller, Christoph: Making Bertha Cooperate - Team AnnieWAY's Entry to the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (2017), November. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8055618>

- [37] Thrun, Sebastian ; Montemerlo, Mike ; Dahlkamp, Hendrik ; Stavens, David ; Aron, Andrei ; Diebel, James ; Fong, Philip ; Gale, John ; Halpenny, Morgan ; Hoffmann, Gabriel u. a.: Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. In: *Journal of field Robotics* 23 (2006), Nr. 9, S. 661–692
- [38] Tsugawa, Sadayuki ; Kato, Shin ; Aoki, Keiji: An Automated Truck Platoon for Energy Saving. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IEEE*, 2011, S. 4109–4114
- [39] The Future of Trucking is Now. *www.tusimple.com*, 2019
- [40] Automatisiertes Fahren. Internetpräsenz des Verband der Automobilindustrie (VDA), *www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html*, Mai 2019
- [41] The Future of Autonomous Transports. *www.volvotrucks.com/en-en/about-us/automation/vera.html*, 2019
- [42] Winner, Hermann: Quo vadis, FAS? In: Winner, Hermann (Hrsg.) ; Hakuli, Stephan (Hrsg.) ; Lotz, Felix (Hrsg.) ; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015, S. 1167–1186
- [43] Woopen, Timo ; Lampe, Bastian ; Böddeker, Torben ; Eckstein, Lutz ; Kampmann, Alexandru ; Alrifaae, Bassam ; Kowalewski, Stefan ; Moormann, Dieter ; Stolte, Torben ; Jatzkowski, Inga ; Maurer, Markus ; Möstl, Mischa ; Ernst, Rolf ; Ackermann, Stefan ; Amersbach, Christian ; Winner, Hermann ; Püllen, Dominik ; Katzenbeisser, Stefan ; Leinen, Stefan ; Becker, Matthias ; Stiller, Christoph ; Furmans, Kai ; Bengler, Klaus ; Diermeyer, Frank ; Lienkamp, Markus ; Keilhoff, Dan ; Reiss, Hans-Christian ; Buchholz, Michael ; Dietmayer, Klaus ; Lategahn, Henning ; Siepenkötter, Norbert ; Elbs, Martin ; Hinüber, Edgar von ; Hecker, Marius D.: *UNICARagil – Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts*. In: *27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2018
- [44] Yang, Guangchuan ; Xu, Hao ; Wang, Zhongren ; Tian, Zong: Truck Acceleration Behavior Study and Acceleration Lane Length Recommendations for Metered On-ramps. In: *International Journal of Transportation Science and Technology* 5 (2016), Nr. 2, S. 93–102
- [45] Zhong, Zifeng: Konzeptstudie zur Automatisierung von Nutzfahrzeugen. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2019
- [46] Ziegler, Julius ; Bender, Philipp ; Dang, Thao ; Stiller, Christoph: Trajectory planning for Bertha - A Local, Continuous Method. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2014, S. 450–457

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der funktionalen Architektur in Form von Verarbeitungsböcken .....	10
Abbildung 2: Prinzipskizze eines Sensormoduls .....	15
Abbildung 3: Mögliche Konfiguration von Sensormodulen an einem LKW mit Anhänger sowie einem Sattelzug .....	17
Abbildung 4: Prinzipskizze eines möglichen Rechnerarchitektur .....	20
Abbildung 5: Kartenausschnitt der Versuchsstrecke im unteren Murgtal .....	23
Abbildung 6: Bilder der Ortsdurchfahrt von Hilpertsau (Bereich S9) .....	25
Abbildung 7: Sicht auf die bevorrechtigte Querstraße in Kuppenheim an der Einmündung der Fritz-Minhardt-Straße in die L67 .....	26
Abbildung 8: Sicht auf die B462 an der Zufahrt zum Werksgelände von Smurfit Kappa.....	26
Abbildung 9: Speditionsgelände in Kuppenheim .....	29
Abbildung 10: Zufahrt zu den Werksgeländen in Obertsrot und Hilpertsau.....	30
Abbildung 11: Beispiel eines Kamerabildes mit extrem starker Störung durch Blendung bei tiefstehender Sonne .....	32

## **IMPRESSUM**

### Autoren

Martin Lauer, Ömer Sahin Tas

### Überschrift

Machbarkeitsstudie zum automatisierten Fahren von HO-LKWs im Murgtal

FZI Forschungszentrum Informatik

Haid-und-Neu-Str. 10–14

76131 Karlsruhe

[www.fzi.de](http://www.fzi.de)

### Vorstand

Prof. Dr. Andreas Oberweis

Jan Wiesenberger

Prof. Dr.-Ing. J. Marius Zöllner

### Vorsitzender des Kuratoriums

Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus

Erscheinungsdatum: Dezember 2019