

**Technische Universität München**

TUM School of Engineering and Design

## **Kooperative Lkw-Überholmanöver mit V2X**

**Jan Cedric Mertens, M.Sc.**

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der  
Technischen Universität München zur Erlangung eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

genehmigten Dissertation.

Vorsitz:

Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Prüfer\*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger

Die Dissertation wurde am 21.10.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die TUM School of Engineering and Design am 23.03.2022 angenommen.



»Lies den Satz nochmal und sag mir was dort wirklich steht.«



# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Kooperation mit der MAN Truck & Bus SE von 2017 bis 2021.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, vor allem für das von ihm entgegengebrachte Vertrauen und die Entscheidungsfreiheit bei der Bearbeitung des Themas. Auch Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie Prof. Dr.-phil. Klaus Bengler für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinem Betreuer bei der MAN Truck & Bus SE, Dr. Sven Kraus, danke ich für das dauerhafte Vertrauen und die konstruktiven Gespräche, insbesondere während schwieriger Projektphasen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, allen voran meiner Forschungsgruppe *Automatisiertes Fahren*, danke ich für die großartige Zusammenarbeit und Atmosphäre, aber vor allem für die schöne, humorvolle und kollegiale Zeit. Ein besonderer Dank gilt Jürgen Hauenstein, der mich sowohl am Lehrstuhl als auch im Projekt in allen Phasen begleitet hat und auf dessen Unterstützung, Expertise und freundschaftlichen Ratschläge ich mich immer verlassen konnte.

Meiner Freundin, Svenja Escherle, danke ich für die Ermunterungen, mich an die Dissertation zu setzen aber genauso diese auch wegzulegen, um gemeinsam schöne Momente zu verbringen.

Der größte Dank gilt meiner Mutter und meinen beiden Brüdern, die immer an mich glauben und mir den nötigen Rückhalt bieten. Ohne ihre bedingungslose Unterstützung wäre der Weg hin zur Dissertation und die letzten 4 Jahre nicht möglich gewesen. Ich danke Euch von ganzem Herzen!

München, im August 2021

Jan Cedric Mertens



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivation.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Aufbau der Arbeit .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Lkw-Überholmanöver.....</b>	<b>5</b>
2.1.1 Gesetzliche Vorgaben vs. Reale Durchführung.....	5
2.1.2 Ursachen und Folgen .....	6
2.1.3 Forschungsstand zu Lkw-Überholmanövern .....	7
<b>2.2 Kooperation in Multiagentensystemen .....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Straßenverkehr als Multiagentensystem.....	8
2.2.2 Kooperation und soziale Dilemmas .....	8
2.2.3 Nash Equilibrium vs. Globales Optimum .....	9
2.2.4 Planungsprinzipien für Kooperation .....	10
<b>2.3 Kommunikation über V2X.....</b>	<b>10</b>
2.3.1 Kommunikations-Technologien .....	11
2.3.2 Nachrichten und Protokolle.....	13
2.3.3 Hardware .....	16
<b>2.4 Kooperative Manöverplanung.....</b>	<b>17</b>
2.4.1 Hierarchischer Manöverplaner.....	18
2.4.2 Technischer Hintergrund .....	19
2.4.3 Kooperative Manöverplanung.....	23
<b>2.5 Lkw-Assistenzsysteme zur Längsregelung.....</b>	<b>29</b>
2.5.1 GPS-Tempomat.....	29
2.5.2 Platooning.....	31
<b>3 Forschungsfrage und Lösungsansatz .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Herleitung der Forschungsfrage.....</b>	<b>33</b>

<b>3.2</b>	<b>Lösungsansatz .....</b>	<b>34</b>
3.2.1	Vorgehen .....	34
<b>4</b>	<b>Methodik und Implementierung .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Manöverplanung.....</b>	<b>37</b>
4.1.1	Verringerter Sicherheitsabstand .....	38
4.1.2	Auswahl der Überholstelle (Passiv) .....	40
4.1.3	Angepasste Geschwindigkeit (Aktiv).....	42
4.1.4	Kooperativer Spurwechsel .....	43
4.1.5	Monetäre Bewertung .....	43
4.1.6	Kooperationslevel .....	43
<b>4.2</b>	<b>Kooperative Abstimmung.....</b>	<b>44</b>
4.2.1	Verteilter Zustandsautomat.....	45
4.2.2	Nachrichtenspezifikation: IMAGinE Driving Strategy Message .....	47
<b>4.3</b>	<b>Implementierung.....</b>	<b>48</b>
4.3.1	Implementierung des kooperativen Manöverplaners .....	49
4.3.2	Implementierung des kooperativen Überholassistenten .....	50
<b>4.4</b>	<b>Simulation und Realfahrzeug .....</b>	<b>51</b>
4.4.1	Simulation .....	51
4.4.2	Versuchsträger .....	52
<b>5</b>	<b>Untersuchungen und Ergebnisse.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>V2X-Sicherheitsabstand .....</b>	<b>53</b>
<b>5.2</b>	<b>V2X-Antennenpositionen für Lkw.....</b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b>Manöverplanung für einzelne Szenarien.....</b>	<b>56</b>
5.3.1	Ergebnisse auf konstanten Steigungen .....	57
5.3.2	Ergebnisse auf dynamischen Steigungen .....	60
<b>5.4</b>	<b>Bestimmung der IDSM-Übertragungsfrequenz .....</b>	<b>63</b>
<b>5.5</b>	<b>Auswirkung der Kooperation auf Langstrecken .....</b>	<b>64</b>
<b>5.6</b>	<b>Realversuch: Proof of Concept der Abstimmung .....</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>Diskussion der Methodik.....</b>	<b>69</b>
6.1.1	Manöverplanung .....	69
6.1.2	Manöverabstimmung .....	71
6.1.3	Implementierung, Simulation und Realfahrzeug .....	72
<b>6.2</b>	<b>Diskussion der Untersuchungen .....</b>	<b>73</b>



---

6.2.1	V2X-Sicherheitsabstand .....	73
6.2.2	V2X-Antennenpositionen für Lkw .....	73
6.2.3	Manöverplanung für einzelne Szenarien .....	74
6.2.4	Bestimmung der IDSM-Übertragungsfrequenz.....	74
6.2.5	Auswirkung der Kooperation auf Langstrecken .....	75
6.2.6	Realversuch .....	76
<b>6.3</b>	<b>Limitationen .....</b>	<b>76</b>
<b>6.4</b>	<b>Erkenntnisse und Fazit .....</b>	<b>78</b>
6.4.1	Erkenntnisse .....	78
6.4.2	Fazit .....	79
<b>6.5</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>83</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>v</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
	<b>Vorveröffentlichungsliste .....</b>	<b>xxi</b>



# Abkürzungsverzeichnis

C2C CC	Car-to-Car Communication Consortium
CMM	Collaborative Maneuver Message
CMP	Collaborative Maneuver Protocol
CNN	Convolutional Neural Network
C-V2X	Cellular-V2X
D2D	Device-to-Device
DCC	Decentralized Congestion Control
DSRC	Dedicated Short Range Communication
iCLCM	i-Game Cooperative Lane Change Message
IDM	Intelligent Driver Model
IDSM	IMAGinE Driving Strategy Message
KL	Kooperationslevel
MCM	Maneuver Coordination Message
MPC	Model Predictive Control
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCM	Platooning Control Message
PnG	Pulse-and-Glide
ProSe	Proximity Service
ROS	Robot Operating System
RRT	Rapid Random Tree
STD-T109	Standard T109
StVO	Straßenverkehrsordnung
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network
VOT	Value of Travel Time
VSA	V2X-Sicherheitsabstand
WLAN	Wireless Local Area Network



# Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$SA$	m	Sicherheitsabstand vor dem zweiten Spurwechsel
$VSA$	m	Verringerter V2X-Sicherheitsabstand
$RW$	m	Reaktionsweg
$BW$	m	Bremsweg
$l$	m	Länge des Fahrzeuges
$m$	t	Gewicht des Fahrzeuges
$v$	km/h	Geschwindigkeit des Fahrzeuges
$h$	km/h	Hysterese des Fahrzeuges



# 1 Einleitung

Wir fahren nach einem anstrengenden Tag Richtung Heimat der Abendsonne entgegen und freuen uns auf den Feierabend mit der Familie. Doch plötzlich verdunkelt sich der Himmel. Das 4 m hohe Heck eines 40-Tonnners schiebt sich unaufhaltsam zwischen uns und die Freiheit der linken Spur und wirft einen Schatten auf unsere zuvor gute Laune. Grund für den Spurwechsel ist der verzweifelte Versuch eines Lkw-Fahrers, einen nahezu gleich schnell fahrenden Lkw zu überholen. Still fragen wir uns, ob das jetzt wirklich nötig ist, und greifen zum Telefon: „Schatz, ich komme heute leider erst später nach Hause...“



Abbildung 1.1: Ein Elefantenrennen auf einer zweispurigen Autobahn blockiert den Pkw-Verkehr.

Diese Schilderung beschreibt aus Sicht eines Pkw-Fahrers das typische Elefantenrennen, ein Lkw-Überholmanöver, bei dem die Differenzgeschwindigkeit der Lkw nur wenige km/h beträgt und das dadurch lange dauert. Fast jeder von uns wird eine solche Situation bereits selbst erlebt und sich daraufhin die gleiche Frage gestellt haben: „Ist das jetzt wirklich nötig?“ Das Elefantenrennen gilt damit als typisch für die Allgemeinheit der Lkw-Überholmanöver, ohne all die Lkw-Überholmanöver zu berücksichtigen, die dank aufmerksamer Lkw-Fahrer schnell und unbemerkt durchgeführt werden. Dennoch ist es nicht von der Hand zu weisen, dass Lkw-Überholmanöver regelmäßig ein temporäres Bottleneck für die Effizienz des Autobahnverkehrs darstellen [1]. Für den Lkw-Fahrer bedeutet aber bspw. ein Verzicht auf ein Überholmanöver bei 5 km/h Differenzgeschwindigkeit eine Verzögerung von ca. 30 min während einer Tagesdistanz von 600 km. In dieser Arbeit soll daher untersucht werden, wie Lkw-Überholmanöver optimiert werden können, um eine Steigerung der Sicherheit und Effizienz im Verkehrsfluss zu erreichen. Da Lkw- sowie Pkw-Fahrer gleichermaßen ein Recht auf die Benutzung der Autobahn haben, wird es nicht darum gehen, pauschal Lkw-Überholmanöver auf Kosten der Lkw-Fahrer zu verbieten, sondern durch Kooperation zwischen allen Beteiligten einen Kompromiss zu erzielen, der die gemeinsamen Kosten verringert.

## 1.1 Motivation

Der Gütertransport mit Lkw über die Autobahn stellt das Rückgrat unserer Versorgung dar. Von 2015 bis 2018 stieg der gesamte Gütertransport in Deutschland jährlich um 1,5-2 % von 4.470 Mio. t auf 4.726 Mio. t. Mit fast 80 % wird der Großteil davon über die Straße transportiert und davon wiederum 90 % mit dem Lkw [2, 3]. Erst kürzlich hat uns die Covid-19-Pandemie vor Augen geführt, welche Ängste und wirtschaftlichen Folgen zusammenbrechende Lieferketten mit sich bringen und welche wichtigen Schlüsselrollen der Lkw und der Lkw-Fahrer einnehmen [4–6]. Abseits der Krisensituation wird die Rolle des Lkw im Straßenverkehr jedoch weitaus weniger positiv wahrgenommen, weil die langsamen Geschwindigkeiten oder langandauernden Elefantenrennen die Pkw-Fahrer behindern [7].

Der Lkw-Fahrer befindet sich in einem Dilemma. Die Ware muss pünktlich geliefert werden, wobei die gesetzlichen Lenk- und Ruhezeiten strikt eingehalten werden müssen. Durch die eng getakteten Routen entsteht so schnell ein Zeitdruck, der den Lkw-Fahrer dazu zwingt, langsamere Fahrzeuge zu überholen. Um den unausweichlichen Konflikt mit den Pkw-Fahrern möglichst gering zu halten, geht der Lkw-Fahrer ein hohes Unfallrisiko ein: Damit weniger Zeit auf der Überholspur benötigt wird, unterschreitet er nämlich die Sicherheitsabstände zu dem langsameren Lkw [7]. All das muss gleichzeitig noch möglichst Kraftstoff-effizient ablaufen, weil seine Fahrweise dauerhaft durch die Spedition überwacht und beurteilt werden kann [8].

Eine scheinbar triviale Lösung für dieses Dilemma wäre ein allgemeines Überholverbot für Lkw und diese Forderung taucht dementsprechend regelmäßig in emotionalen Debatten [9] oder im politischen Wahlkampf auf [10–15]. Zahlreiche Studien haben allerdings schon die möglichen Auswirkungen eines allgemeinen Lkw-Überholverbots rational untersucht und kommen zu dem gemeinsamen Schluss, dass dies kontraproduktiv ist und den Verkehrsfluss auf den Autobahnen hemmen würde [16–22]. So ist für jeden Streckenabschnitt individuell zu prüfen, ob bspw. durch extreme Steigungen, eine Spurreduzierung, hohes Verkehrsaufkommen oder eine hohe Unfallrate ein Lkw-Überholverbot sinnvoll ist. Von den fast 13.000 km Autobahn in Deutschland, traf dies 2010 allerdings nur auf ca. 1.500 km zu, auf denen ein statisches oder dynamisches Lkw-Überholverbot umgesetzt wurde [21].

Ein zweiter Lösungsansatz, um Lkw-Überholmanöver zu vermeiden, wäre eine einheitliche Geschwindigkeit für alle Lkw. Wie in Abschnitt 2.5 vorgestellt wird, gehört zur energieeffizienten Fahrweise der Lkw jedoch ein dynamisches Geschwindigkeitsprofil, das unter anderem von der Beladung und Motorisierung abhängig ist – zwei Faktoren, die sich nicht standardisieren lassen. Ein ungünstiges Verhältnis zwischen diesen beiden Faktoren führt außerdem dazu, dass an extremen Steigungen die Wunschgeschwindigkeit des Lkw nicht erreicht werden kann und das Folgen einer einheitlichen Geschwindigkeit unmöglich wird.

Lkw-Überholmanöver werden also bis auf weiteres ein Teil unseres Straßenverkehrs bleiben und durch die steigende Transportleistung ist sogar anzunehmen, dass deren Häufigkeit steigt. Wenn sie also nicht vermeidbar sind, so soll zumindest untersucht werden, ob und um wieviel sie optimiert werden können.

Die Ausgangssituation für das Lkw-Überholmanöver ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Ein schneller Lkw 1 befindet sich hinter einem langsamer fahrenden Lkw 2, während sich von hinten schnellere Pkw nähern. In dieser Situation ist zu entscheiden, ob und wie ein Überholmanöver durchgeführt werden soll, indem die potenziellen Kosten für alle Beteiligten untereinander abgewogen werden.



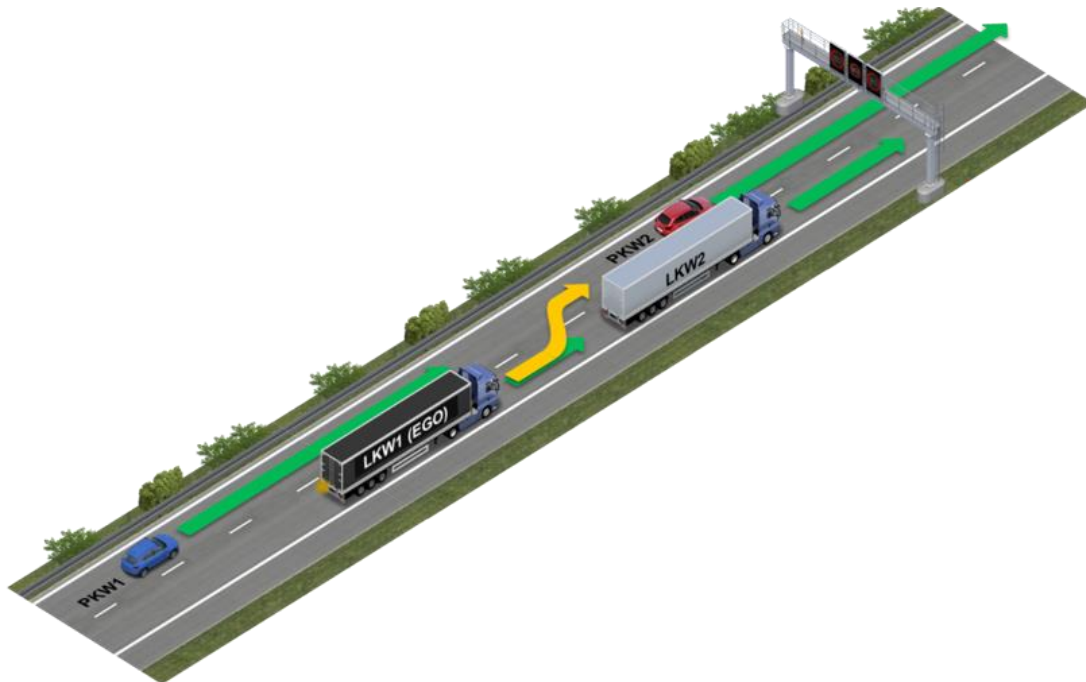


Abbildung 1.2: Ausgangssituation für das Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 Stand der Wissenschaft und Technik werden die Herausforderungen des Lkw-Überholmanövers genau analysiert und der aktuelle Forschungsstand zu Kooperation, Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation und automatisierter Manöverplanung dargelegt. Anschließend wird daraus die konkrete Forschungsfrage dieser Dissertation in Kapitel 3 abgeleitet und ein Lösungsansatz vorgestellt. In Kapitel 4 Methodik und Implementierung wird der Lösungsansatz im Detail ausgearbeitet und für eine Evaluierung in Simulation und Realversuchen implementiert. Die durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse werden anschließend in Kapitel 5 präsentiert. Daraufhin folgt eine kritische Diskussion in Kapitel 6, um die Vorgehensweise und Resultate zu bewerten und potenzielle Folgen und Anwendungsfälle abzuleiten. Den Abschluss dieser Arbeit bildet Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung aller relevanten Erkenntnisse.



## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Dieses Kapitel legt den Stand der Wissenschaft für die in dieser Arbeit relevanten Forschungsfelder dar. Zu Beginn werden Lkw-Überholmanöver und deren Folgen betrachtet. Anschließend wird definiert was Kooperation im Kontext von Multiagentensystemen (MAS) wie dem Straßenverkehr bedeutet. Weil für Kooperation in der Regel Kommunikation benötigt wird, beschreibt der nächste Abschnitt die Technologien und Nachrichten für die Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation. Darauffolgend wird das Konzept der kooperativen Manöverplanung erklärt und verschiedene Ansätze dafür vorgestellt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Übersicht und Beschreibung von Fahrerassistenzsystemen für Lkw.

### 2.1 Lkw-Überholmanöver

*Dieser Abschnitt basiert auf der Literaturrecherche aus Paper [23] und [24].*

In diesem Abschnitt wird der Begriff des Lkw-Überholmanövers definiert und die gesetzlichen Vorgaben aufgezeigt. Des Weiteren wird betrachtet wie die Lkw-Überholmanöver tatsächlich durchgeführt werden und welche Forschungsaufwände bereits in deren Optimierungen geflossen sind.

#### 2.1.1 Gesetzliche Vorgaben vs. Reale Durchführung

Im Folgenden wird unter einem Lkw-Überholmanöver die Situation verstanden, in der ein Lkw einen anderen Lkw auf der Autobahn überholt. In Deutschland gilt nach der Straßenverkehrsordnung (StVO) für beide Fahrzeuge eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h und ein Sicherheitsabstand von 50 m [25]. Um den Verkehrsfluss auf der Autobahn nicht zu behindern, werden lang andauernde Überholmanöver (Elefantenrennen) geahndet. Das Oberlandesgericht Hamm hat dafür festgelegt, dass die Dauer des Lkw-Überholmanövers 45 s nicht überschreiten darf [26]. Bei Fahrzeuglängen von je 18,75 m [27] ergibt sich damit eine relative Überholdistanz von 136 m, wie sie in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Um diese Distanz innerhalb der 45 s zu überwinden, ist eine relative Überholgeschwindigkeit von 11 km/h erforderlich. D.h. ein 80 km/h fahrender Lkw darf nur überholen, wenn der vorausfahrende Lkw 69 km/h oder weniger fährt.

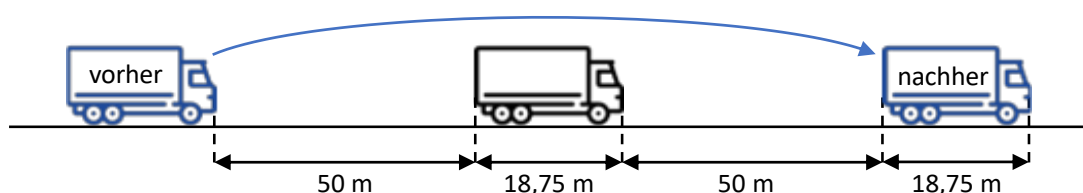


Abbildung 2.1: Zusammensetzung der relativen Überholdistanz von 136 m.

Wie Kellermann bereits 2002 zeigte, sind in der Realität jedoch weniger als 1 % der Lkw-Überholmanöver StVO-konform [17, 20]. Dies deckt sich mit den ebenfalls 2002 durchgeführten Beobachtungen und Fahrerbefragungen von Ellinghaus und Steinbrecher [7]. Ca. 40 % der Lkw-Fahrer gaben an „häufig“ oder „sehr häufig“ die erlaubte Geschwindigkeit zu überschreiten oder mit zu kleinem Sicherheitsabstand zu fahren. Speziell beim Lkw-Überholmanöver gaben 82 % der Fahrer an, „häufig“ oder „sehr häufig“ die Lichthupe zu nutzen, um dem überholenden Lkw selbst bei kleinem Sicherheitsabstand zu signalisieren, dass er wieder einscheren kann. Über 70 % starten das Lkw-Überholmanöver auch, wenn Pkw dafür bremsen müssen oder die Dauer von 45 s überschritten wird. 16 % erklärten sogar: "Auch Lkw, die nur unwesentlich langsamer fahren als der eigene Lkw, versuche ich aus Zeitgründen unbedingt zu überholen" und 18 % berichteten, dass Lkw-Überholmanöver an Steigungen abgebrochen werden mussten, weil die eigene Leistungsfähigkeit falsch eingeschätzt wurde.

Eine selbst durchgeführte Analyse der Realdaten aus dem HighD-Datensatz [28] mit ca. 20.000 Lkw aus 2018 kommt zu einem ähnlichen Ergebnis. Abbildung 2.2 zeigt, eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 87 km/h und eine durchschnittliche Relativgeschwindigkeit während des Überholmanövers von 7 km/h. Gleichzeitig war der Abstand zwischen den Lkw vor und nach dem Überholmanöver im Mittel nur bei 20 m.

In der Realität wird also auch bei deutlich niedrigeren Differenzgeschwindigkeiten als 11 km/h die Entscheidung zum Überholen getroffen. Anschließend erfolgt ein „Ansaugen“ in den Windschatten des vorderen Lkw auf bis zu 5 m [7] und das Ausscheren auf die linke Spur. Der Spurwechsel zurück wird eingeleitet lange bevor der notwendige Sicherheitsabstand erreicht ist, häufig, sobald der überholte Lkw per Lichthupe signalisiert, dass dies möglich ist.

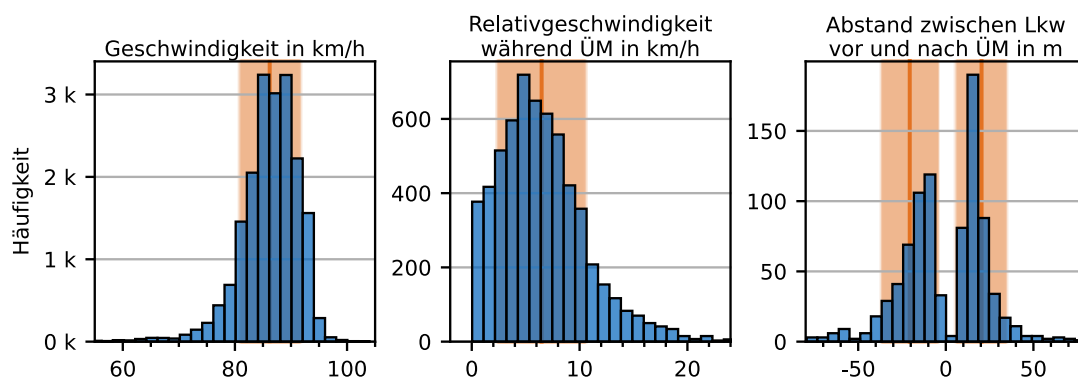


Abbildung 2.2: Die Analyse der Realdaten zeigt, dass die meisten Lkw-Überholmanöver nicht StVO-konform ablaufen.

## 2.1.2 Ursachen und Folgen

Wie die vorherige Anmerkung des Lkw-Fahrers schon angedeutet hat, ist der Hauptgrund dafür, dass die Lkw-Überholmanöver trotz Regelbruch durchgeführt werden, der Zeitdruck der Fahrer [29, 30]. So geben laut Ellinghaus und Steinbrecher 70 % der Fahrer an unter „enormen Zeitdruck“ zu leiden [7] und nach Evers haben 36 % der Fahrer Probleme, die gesetzlichen Pausen und Ruhezeiten einzuhalten [31]. Der Zeitdruck der Fahrer rührt nicht nur von den eng geschnittenen Routen der Speditionen her, sondern entsteht auch durch fehlende Infrastruktur. Durch bspw. mangelnde Parkplätze wird der Fahrer gezwungen, diese zu erreichen, bevor sie belegt sind, weil er sonst keinen Zugang zu Sanitäranlagen, warmem Essen und ruhigen Schlafmöglichkeiten bekommt [29].

Das für das Überholmanöver oftmals notwendige Überschreiten der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf bis zu 90 km/h wird in der Realität toleriert. Erst wenn 90 km/h dauerhaft überschritten werden, erfolgt ein Eintrag im digitalen Fahrtenschreiber. Die Einhaltung des Sicherheitsabstandes und der Überholdauer sind nur schwer kontrollierbar, führen jedoch bei entdecktem Verstoß direkt zu einem Punkt im Verkehrszentralregister [32]. Im schlimmsten Fall kann dies zum Verlust der Fahrerlaubnis und damit zur Arbeitsunfähigkeit führen [33], was den Druck und Stress auf den Lkw-Fahrer weiter erhöht [7, 31]. Zusätzlich belastet der Konflikt mit den Pkw-Fahrern den Lkw-Fahrer während des Überholmanövers, bspw. durch aggressives Drängeln oder ein bewusstes Verzögern, um das Ausscheren des Lkw zu verhindern [7].

Aus der Art und Weise wie Lkw-Überholmanöver derzeit durchgeführt werden, ergeben sich zwei direkte und sich gegenseitig verstärkende negative Folgen: (1) Eine erhöhte Arbeitsbelastung und Stress sowie (2) sicherheitskritische Fahrmanöver. So zeigt die deutsche Unfallstatistik auf Autobahnen von 2018, dass 30 % der Unfälle, die durch den Lkw-Fahrer verursacht wurden, auf zu geringe Abstände zurückzuführen sind, die in der Regel vor und nach dem Überholmanöver auftreten, und 8 % auf fehlerhaftes Verhalten während des Überholmanövers [34]. Ein Grund für solches Fehlverhalten kann Stress sein [31, 35], jedoch führt Stress auch zu Krankheiten und in nächster Instanz zu Arbeitsausfällen bei Lkw-Fahrern [35, 36]. Die Gesundheitsreporte der Krankenkassen über die letzten Jahre zeigen bspw., dass in den Transport- und Logistikberufen die meisten Arbeitsausfälle pro Jahr auftreten (ca. 30 % über dem Durchschnitt) und dies besonders die Fahrzeugführer betrifft, mit gemittelt 25 Tagen im Jahr (70 % über dem Durchschnitt) [37–39]. Während 27 % dieser Arbeitsausfälle auf Rückenschmerzen zurückzuführen sind, so sind immer noch 13 % durch psychische Erkrankungen aufgetreten. Der Stress und die Arbeitsbelastung verringern außerdem die Attraktivität des Berufs Lkw-Fahrer und verstärken, zusammen mit den entstehenden Arbeitsausfällen, den ohnehin schon akuten Fahrermangel [40–42] in Deutschland.

### 2.1.3 Forschungsstand zu Lkw-Überholmanövern

Es gibt bereits Forschungsbemühungen, Überholmanöver effizienter und sicherer zu gestalten, jedoch sind diese nur selten auf das Lkw-Überholmanöver bezogen oder übertragbar. Überholmanöver auf der Landstraße legen den Fokus auf den Gegenverkehr, wodurch Relativgeschwindigkeiten von bis zu 200 km/h auf unübersichtlichen Straßen entstehen [43]. Außerdem wurde dort bisher kein Lkw-Lkw-Überholmanöver betrachtet, sondern nur Pkw-Fahrrad [44], Pkw-Pkw [45–49] oder Pkw-Lkw [47, 49].

Auf der Autobahn wurde bspw. untersucht, wie ein Pkw-Pkw-Überholmanöver prädiziert [50] oder automatisiert durchgeführt werden kann [51, 52], jedoch wurden Lkw-Lkw-Überholmanöver auf Autobahnen vernachlässigt [53]. Shamir [53] widmete sich als einziger dem Thema, wie das Überholen eines langsam fahrenden Fahrzeuges optimiert werden kann. Dafür leitete er verschiedene Formeln her, um den Verlust von kinetischer Energie während der Spurwechsel zu minimieren, wobei er das langsame Fahrzeug als nicht kooperativ und mit konstanter Geschwindigkeit annahm. Die Literaturrecherche zeigt also, dass Forschungen zur Optimierung von Lkw-Überholmanövern, insbesondere durch Kooperation, derzeit nur unzureichend vorliegen.

## 2.2 Kooperation in Multiagentensystemen

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [54].*

In diesem Abschnitt wird die Analogie des Straßenverkehrs zu Multiagentensystem aufgezeigt und erklärt wie Interaktionen zu Kooperation sowie sozialen Dilemmas führen können. Außerdem werden drei Prinzipien dargelegt, nach denen Kooperation zwischen Agenten geplant werden kann.

### 2.2.1 Straßenverkehr als Multiagentensystem

In einem Multiagentensystem bewegen sich mehrere Agenten in einem gemeinsamen Umfeld und versuchen, zusammen ein Ziel zu erreichen [55]. Dieses Verhalten lässt sich gut auf den Straßenverkehr übertragen [56]. Ein Fahrzeug als Agent hat einen Zustand (Fahrzeugtyp, Position, Geschwindigkeit etc.) sowie eine Wahrnehmung, Strategie und Handlungsmöglichkeiten, analog zum Sense-Plan-Act Konzept [57]. Zusätzlich entstehen für jeden Agenten Kosten. Diese sind definiert als die Summe an Einzelkosten der bisher durchgeführten Aktionen: Bspw. bisherige Reisezeit und Kraftstoffverbrauch. Abhängig von diesen Kosten besitzt ein Agent ein privates Ziel, das erreicht werden soll: bspw. eine möglichst schnelle Ankunft am Zielort. Die Straße ist die gemeinschaftlich genutzte Umgebung und stellt Infrastruktur, wie Straßenschilder und Ampeln, sowie Einschränkungen und Regelungen durch die StVO dar. Um das MAS zu vervollständigen, fehlt noch ein gemeinsames Ziel, auf das von allen Agenten gemeinsam hin optimiert werden soll. Dieses gemeinsame Ziel kann in Kontrast zu den privaten Zielen der Agenten stehen: Bspw. steht das gemeinsame Ziel, die CO<sub>2</sub> Emissionen zu reduzieren, in Konflikt zu dem privaten Ziel eines Sportwagen-Fahrers, möglichst schnell zu fahren.

### 2.2.2 Kooperation und soziale Dilemmas

Sobald sich mehrere Agenten ein gemeinsames Umfeld teilen, kann es dazu kommen, dass eine Aktion eines Agenten einen anderen Agenten beeinflusst. Wenn dies so beabsichtigt ist, wird die durchgeführte „Aktion“ zu einer „Interaktion“. Diese werden wiederum in vier Kategorien eingeteilt, welche die entstehenden Kosten für beide Agenten unterschiedlich beeinflussen [57, 58]:

- **Gegenseitigkeit:** Beide Agenten profitieren durch verringerte Kosten.
- **Altruismus:** Der interagierende Agent nimmt Kosten auf sich, um die Kosten des anderen Agenten zu reduzieren.
- **Egoismus:** Der interagierende Agent hat reduzierte Kosten, während diese für den anderen Agenten steigen.
- **Bosheit:** Beide Agenten leiden unter steigenden Kosten.

Von Kooperation spricht man, wenn die Interaktion dem Gegenüber Kosten reduziert, also bei Gegenseitigkeit und Altruismus [59]. Dies zeigt, dass Kooperation nicht bidirektional ist, weil bspw. ein Agent mit einer altruistischen Interaktion eine Kooperation initiiert, die vom anderen Agenten durch egoistisches Verhalten ausgenutzt werden kann. Handelt ein Agent in einer mehrheitlich kooperativen Gruppe wiederholt egoistisch, wird dies Free-Riding genannt und ermöglicht dem egoistischen Agenten geringe private Kosten, während die globalen Kosten

oftmals nur gering steigen [60]. Mit den Fragen wie viele Free-Rider ein MAS verkräftet und warum dies überhaupt durch altruistisches Verhalten ermöglicht werden soll, beschäftigt sich die Spieltheorie und die Psychologie bei der Untersuchung von sozialen Dilemmas [61]. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass ein individuelles unkooperatives Verhalten kurzfristig für diesen Agenten zu verringerten Kosten führt, aber ein kollektives Ablehnen von Kooperation in steigenden Kosten für alle Agenten resultiert.

Ein klassisches Beispiel für ein soziales Dilemma ist das Gefangenen-Dilemma aus Tabelle 2.1: Zwei Gefangene werden getrennt gefragt, ob sie schweigen (mit dem anderen Gefangenen kooperieren) oder die gemeinsame Tat gestehen wollen. Wenn beide gestehen, bekommen beide je zwei Jahre Haft und wenn beide schweigen, bekommen beide je ein Jahr Haft. Wenn jedoch einer der Gefangenen schweigt während der andere gesteht, so bekommt der schweigende drei Jahre Haft und der Geständige keine Haft [61]. Dieses Dilemma zeigt, dass die Entscheidung für oder gegen eine Kooperation nicht trivial ist, wenn die Intention des anderen Agenten nicht eindeutig ist, weil bspw. nicht kommuniziert werden kann oder kein Vertrauen besteht [61, 62].

Tabelle 2.1: Haftstrafen im Gefangenen-Dilemma.

	Schweigen	Gestehen
Schweigen	1\1	3\0
Gestehen	0\3	2\2

Solche sozialen Dilemmas treten ebenfalls im Straßenverkehr auf [63]. So ist es bspw. für ein Fahrzeug auf der Autobahn kurzfristig günstiger, unvermindert weiterzufahren, statt die Geschwindigkeit zu reduzieren, um einen Lkw auf die Autobahn einfädeln zu lassen. Wird allerdings keinem Lkw das Einfädeln auf die Autobahn ermöglicht, führt dies zu Staus in den Auffahrten und die globalen Kosten steigen.

### 2.2.3 Nash-Equilibrium vs. Globales Optimum

Das Nash-Equilibrium ist ein Zustand, in dem kein Agent die eigenen Kosten unabhängig von den Entscheidungen der anderen Agenten verbessern kann [63]. Im Gefangenen-Dilemma ist das Nash-Equilibrium für beide Agenten erreicht, wenn sie gestehen, weil so keine oder zwei Jahre Haft im Gegensatz zu einem oder drei Jahren Haft möglich sind. Gleichzeitig sehen wir aber auch, dass das globale Optimum von zwei Jahren Gesamthaftzeit nur erreicht wird, wenn beide Gefangenen miteinander kooperieren und gemeinsam schweigen. Während in einer Gruppe von kooperativen Agenten also die geringsten globalen Kosten entstehen, steigt dort die Verlockung, die Kooperation der anderen auszunutzen und als Free-Rider die persönlichen Kosten zu minimieren.

Im Straßenverkehr zeigt sich, dass der menschliche Fahrer durch Emotionen, Fairnessgedanken und ggf. „schlechtes Gewissen“ in der Lage ist, komplexe soziale Interaktionen kooperativ umzusetzen. So werden nach Fekete, Vollrath et al. [63] schlechte Nash-Equilibrien, im Vergleich zur optimalen Lösung, vermieden. Die durch Emotionen mitbestimmten Aktionen der Fahrer führen so zu global besseren Kosten als reiner Eigennutzen. Dies geht sogar so weit, dass Free-Rider die Stabilität der Kooperation nicht gefährden, sondern deren Egoismus bestraft werden kann [63].

## 2.2.4 Planungsprinzipien für Kooperation

Für die Auswahl der Aktionen eines Agenten ist seine Strategie verantwortlich, die sich für oder gegen eine Kooperation entscheiden kann. Während diese Aufgabe im Fahrzeug klassischer Weise vom menschlichen Fahrer übernommen wird, übernimmt im automatisierten Fahrzeug der Manöverplaner diese Rolle. Innerhalb dessen kann die Kooperation auf drei verschiedenen Ebenen geplant werden [64]:

- Zentral
- Dezentral mit Abstimmung
- Dezentral ohne Abstimmung

Beim zentralen Prinzip gibt es eine Hierarchie, entweder zwischen den Agenten oder mit einer zusätzlichen Planungsinstanz. Die Entscheidung für oder gegen eine Kooperation ist dann von der höheren Ebene fremdbestimmt (Master-Slave Prinzip). Oftmals lassen sich so optimale Lösungen finden, jedoch ist der Rechenaufwand im Vergleich zu den anderen Prinzipien höher, die einzelnen Agenten verlieren ihre individuelle Entscheidungsgewalt und eine Kommunikation zwischen Agenten und Planungsinstanz ist notwendig [64]. Bei den dezentralen Prinzipien können die Agenten ihre Entscheidungen frei treffen, versuchen allerdings, mit den anderen Agenten als Team zusammenzuarbeiten. Wenn eine Kommunikation zwischen den Agenten möglich ist, können sie dies nutzen, um gemeinsam ihre Wünsche und Pläne abzustimmen. Ohne diese Kommunikation kann jeder Agent nur vermuten, wie die anderen Agenten auf seine Interaktionen reagieren und muss versuchen, Kooperation proaktiv anzustoßen. Dies birgt erhöhte Unsicherheiten und mehr Rechenaufwand, weshalb, wenn eine Kommunikation möglich ist, diese für eine gemeinsame Abstimmung genutzt werden sollte [54].

## 2.3 Kommunikation über V2X

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [65] und [54].*

In den aktuellen Visionen der meisten Original Equipment Manufacturer (OEM) ist der Schlüsselbegriff „vernetzte Fahrzeuge“ zu finden [66–69]. Dieser schließt zum einen den Zugang zu online Services bspw. für Navigation und Unterhaltung ein, zum anderen die „Vehicle-to-Everything“ (V2X) Kommunikation. V2X ist ein Sammelbegriff für alle Arten von digitalem Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen untereinander (Vehicle-to-Vehicle: V2V) und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (Vehicle-to-Infrastructure: V2I). Eine Mitte 2020 durchgeführte Analyse von Suchtreffern auf Google Scholar zum Suchbegriff „V2X“ zeigt in Abbildung 2.3 den steigenden Trend über die letzten Jahre und verdeutlicht damit die wachsende Bedeutung von V2X auf die Forschungslandschaft. Im Folgenden werden erst verschiedene Kommunikationstechnologien vorgestellt, die für V2X verwendet werden. Anschließend wird näher auf die spezifischen Nachrichten, die über diese Technologien versendet werden, und deren Verwendungszweck eingegangen.



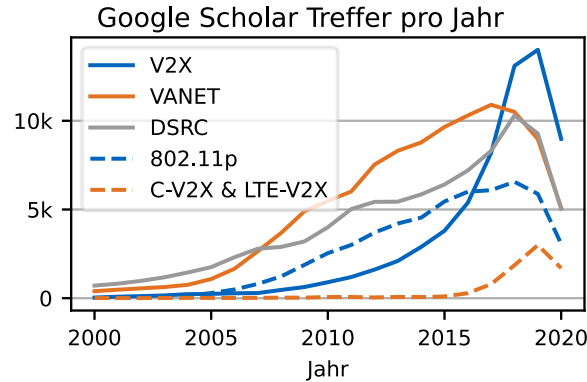


Abbildung 2.3: Anzahl an Suchergebnissen pro Jahr auf Google Scholar zu V2X und verwandten Schlüsselbegriffen (Stand Mitte 2020).

### 2.3.1 Kommunikations-Technologien

Kommunikation im Straßenverkehr ist etwas Alltägliches [63]. Bspw. wird durch den Blinker auf der Autobahn ein Spurwechsel angekündigt oder durch die Lichthupe beim Lkw-Überholmanöver signalisiert, dass der überholende Lkw wieder einscheren kann. Zusätzlich können durch implizites Handeln Intentionen kommuniziert werden. So kann bspw. ein Beschleunigen und nach links Orientieren auf der Autobahn die Intention anzeigen, Ausscheren zu wollen [70]. Im Zusammenhang mit V2X werden allerdings Funktechnologien für eine explizite Kommunikation verwendet. Diese lassen sich, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, in die zwei Gruppen Ad-Hoc Netzwerke und Mobilfunk aufteilen.



Abbildung 2.4: Links Ad-Hoc Netzwerk und rechts Mobilfunk über Infrastruktur.

#### Ad-Hoc Netzwerke

Die ersten Ideen zu „Vehicular Ad-Hoc Networks“ (VANET) sind bereits um das Jahr 2000 entstanden und basieren auf dem Ansatz, dass die Fahrzeuge während der Fahrt ein Funknetzwerk zwischen Fahrzeugen in der Nähe aufbauen [71]. Ein solches VANET bewegt sich dann mit den beteiligten Fahrzeugen entlang der Strecke und ist unabhängig von Infrastruktur. Das heißt, dass Fahrzeuge spontan in das Netzwerk ein- oder austreten können, wenn sie in gegenseitige Kommunikationsreichweite kommen, oder diese verlassen. Innerhalb eines VANET überträgt ein Fahrzeug die zu sendende Nachricht immer direkt an alle anderen Fahrzeuge (Broadcast) und empfängt Nachrichten von diesen. Falls mehrere Fahrzeuge gleichzeitig senden, „kollidieren“ die Nachrichtenpakete allerdings und es kommt zu einem Paketverlust, wodurch beide Nachrichten nicht mehr empfangen werden können. Daher müssen die Zugriffszeiten auf den Funkkanal fair zwischen den Fahrzeugen aufgeteilt werden (Congestion Control) [72, 73].

Für die Kommunikation innerhalb eines VANET wird die „Dedicated Short Range Communication“ (DSRC) verwendet [74], die sich regional in drei etablierte Standards entwickelt hat: IEEE „Wireless Access in Vehicular Environments“ (WAVE) in Nord-Amerika [75] ETSI „Intelligent Transportation System G5“ (ITS-G5) in Europa [76] und ARIB „Standard T109“ (STD-T109) in

Japan [77]. Während STD-T109 einen eigenen Kurs im 700 MHz Band eingeschlagen hat, basieren WAVE und ITS-G5 auf dem IEEE 802.11p Amendment von 2010 [78], das den Wireless Local Area Network (WLAN) Standard IEEE 802.11 für die V2X-Kommunikation erweitert. Damit liegen WAVE und ITS-G5 beide im 5,9 GHz Bereich, unterscheiden sich jedoch bspw. in der Aufteilung der Frequenz-Kanäle und deren Zugriff [76]. Grundsätzlich können beide Datenraten von 6-54 Mbit/s [75] erreichen und deren Reichweiten zwischen 300 m [79] und 800 m [80] liegen. Die Packet Delivery Rate (PDR) kann je nach Szenario zwischen 95 % und 99,9 % liegen [81] und die End-to-End Verzögerung zwischen 1-10 ms [81–83]. Die Decentralized Congestion Control (DCC) von ITS-G5 sorgt in den meisten Szenarien jedoch dafür, dass ITS-G5 eine bessere Performance erreicht als WAVE [76]. Im Vergleich zwischen ITS-G5 und STD-T109 zeigt STD-T109 eine bessere Reichweite insbesondere in bebautem Gelände, jedoch eine geringere Datenrate und ein höheres Risiko für Paketverluste [84].

Seit der Spezifikation von IEEE 802.11p gab es bspw. mit IEEE 802.11n/ac/ax technologische Fortschritte, die jedoch noch nicht auf den V2X Bereich übertragen wurden. Daher wurde in 2019 die Entwicklung von IEEE 802.11bd als nächste Evolution von IEEE 802.11p gestartet [85]. Zu den Performancezielen gehören doppelte Reichweiten und Datenraten bei bis zu 500 km/h Differenzgeschwindigkeiten, während eine Interoperabilität mit IEEE 802.11p gewährleistet werden soll.

### **Mobilfunk**

Anders als bei den VANETs wird für die Kommunikation über Mobilfunk in der Regel eine Infrastruktur benötigt. Untereinander verbundene Sendemasten der Mobilfunkbetreiber sorgen für eine möglichst große Netzabdeckung. Mobilfunkfähige Geräte können sich jeweils bei einem Sendemasten registrieren, um mit ihrer individuellen ID („Telefonnummer“) Zugang zum Mobilnetz zu erhalten. Dieser Prozess ist analog zum Einwählen mit bspw. einem Smartphone und mit entsprechenden Kosten verbunden. Wenn Mobilfunk allerdings für V2X verwendet werden soll, so muss noch ein Geo-Service eingebunden werden, weil die ID der umliegenden Fahrzeuge, mit denen kommuniziert werden soll, nicht bekannt sind [86]. Ein Fahrzeug muss also regelmäßig seine Position an die Infrastruktur übermitteln, sodass diese ermitteln kann, welche Fahrzeuge sich in der Nähe befinden und die Nachrichten zwischen diesen Fahrzeugen entsprechend weiterleitet.

Als Technologie hinter Mobilfunk hat sich weltweit Long-Term Evolution (LTE) [87] durchgesetzt und die aktuell in Deutschland meist verfügbare Version ist LTE-Release 14, auch als 4. Generation (4G) bekannt [88]. Mit theoretisch unbegrenzter Reichweite lassen sich damit Datenraten bis zu 1000 Mbit/s bei einer Verzögerung von 5 ms umsetzen [89]. Durch den aktuellen LTE-Release 15 (5G) [90] steigt die Performance weiter an und Datenraten bis 10 Gbit/s und Verzögerungen zwischen 1 ms und 6 ms werden realistisch [81, 91]. Für den Umstieg auf 5G ist jedoch ein Ausbau der Infrastruktur nötig, sodass das volle Potenzial nicht sofort und nicht überall verfügbar sein wird. Die Versorgungsaufgaben der Bundesnetzagentur an die Mobilfunkbetreiber fordern bis Ende 2022 auf allen Bundesautobahnen eine Datenrate von mindestens 100 Mbit/s und eine Latenz von höchstens 10 ms [92].

Wird Mobilfunk für V2X eingesetzt, wird von Cellular-V2X (C-V2X) oder LTE-V2X gesprochen. Es ist allerdings nicht mit V2I gleichzusetzen, weil LTE seit Release 12 zusätzliche Spezifikationen für Proximity Services (ProSe) enthält, um Device-to-Device (D2D) Kommunikation zu ermöglichen [93]. Statt einem „Uplink“ über die Infrastruktur wird ein „Sidelink“ für den direkten Nachrichtenaustausch zwischen Geräten/Fahrzeugen genutzt. Die Umsetzung und Erprobung

von D2D Kommunikation für Fahrzeugapplikationen steht zwar noch am Anfang, birgt jedoch großes Potenzial [94].

Mit dem für 2021 geplanten LTE-Release 16 wird das 5G „New Radio“ (NR) verbessert, um noch kleinere Latenzen und eine höhere Zuverlässigkeit zu erreichen. Mit diesem NR-V2X sollen sicherheitskritische Fahrzeuganwendungen wie bspw. Platooning ermöglicht werden [85, 90].

## Vergleich

Welcher der beiden Ansätze insgesamt die bessere Performance für die V2V-Kommunikation liefert und sich durchsetzen wird, ist aktuell umstritten. So gibt es Untersuchungen, die entweder IEEE 802.11p [95–97] oder LTE [86, 98, 99] im Vorteil sehen. Es muss allerdings genauer betrachtet werden, welches LTE-Release verwendet wird. So herrscht Einigkeit darüber, dass sich kurzfristig IEEE 802.11p gegenüber LTE-Rel. 14 (4G) durchsetzt. Dies ist auch damit begründet, dass LTE-Rel. 15 (5G) nicht abwärtskompatibel ist und sich Bemühungen in eine alte Technologie zu investieren, die zeitnah ersetzt werden soll, nicht lohnen. Der Netzausbau für LTE-Rel. 15 ist hingegen noch in Gange und die Technologie damit bisher nur wenig in Feldversuchen erprobt. Die Behauptung, dass sich LTE-Rel. 15 durchsetzen wird, basiert damit meist auf Simulationen und dem theoretischen Potenzial, das darin gesehen wird. Abbildung 2.3 zeigt die Anzahl der Suchergebnisse zu „802.11p“ und „C-V2X“ bzw. „LTE-V2X“ auf Google Scholar. Es ist zu erkennen, dass seit 15 Jahren schon zu IEEE 802.11p basierter V2X-Kommunikation geforscht wird. Dadurch ist mittlerweile ein reifes System entstanden, das heute verfügbar ist und bspw. bereits bei der Volkswagen AG serienmäßig in Fahrzeugen verbaut wird [100, 101]. Auf der anderen Seite ist C-V2X ein noch recht junger Ansatz, zu dem die Forschung erst innerhalb der letzten 5 Jahre begann, dem langfristig durch die Umstellung auf 5G aber ein großes Potenzial zugesprochen wird.

### 2.3.2 Nachrichten und Protokolle

Unabhängig davon, welche Kommunikationstechnologie verwendet wird, müssen sich die Fahrzeughersteller auf gemeinsame Protokoll- und Nachrichtenstandards einigen. Dazu hat das Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC) [102] eine Roadmap für Europa erstellt, die in drei zeitliche Phasen eingeteilt ist (Day 1, Day 2, Day 3+). So wie Abbildung 2.5 zeigt, steigt mit V2X-Penetration und Automatisierungslevel die Komplexität der Szenarien, die durch die entsprechenden Nachrichten ermöglicht werden. Während das Ziel der Day1-Nachrichten lediglich ist, ein Bewusstsein über die anderen Verkehrsteilnehmer zu schaffen, sollen mit Day2-Nachrichten Sensordaten ausgetauscht werden und mit Day3-Nachrichten gemeinsam kooperative Manöver abgestimmt werden.

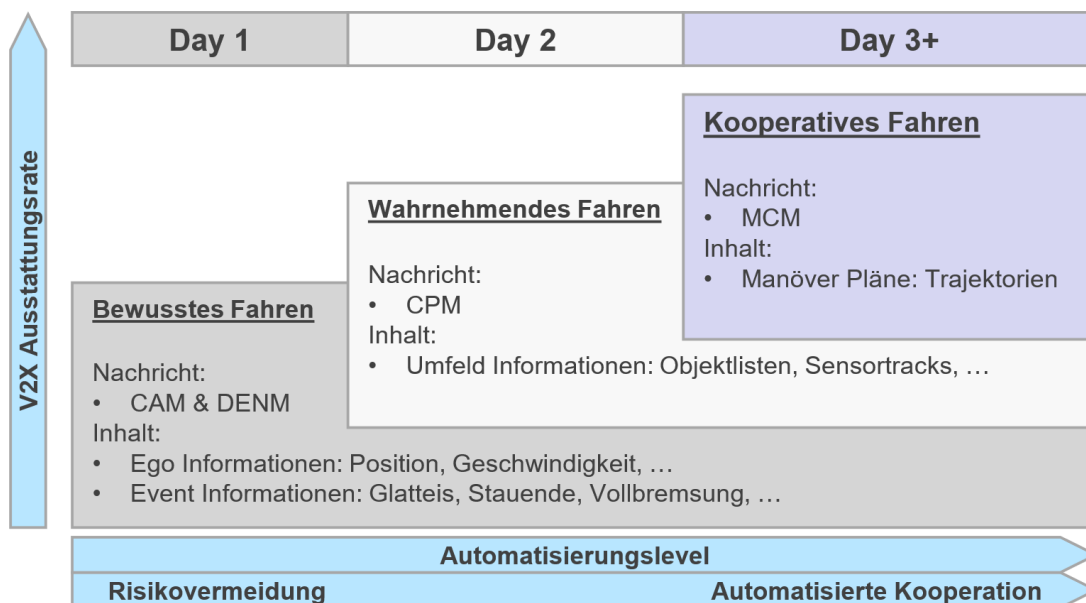


Abbildung 2.5: C2C-CC Roadmap für V2X-Nachrichten (übersetzt aus [103]).

## Day 1: Bewusstes Fahren

Die beiden zentralen Day1-Nachrichten sind die Cooperative Awareness Message (CAM) [104] und die Decentralized Environmental Notification Message (DENM) [105]. Ziel beider Nachrichten ist es, den Fahrzeugen im Umfeld über Statusinformationen den Zustand des eigenen Fahrzeuges (Ego-Fahrzeug) oder Events aus der Umgebung mitzuteilen.

Die CAM enthält dafür statische Ego-Informationen wie Fahrzeugtyp und Dimensionen, sowie dynamische Ego-Informationen wie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Zusätzlich enthält die CAM eine Station-ID, damit mehrere über die Zeit versendete Nachrichten korrekt dem gleichen Fahrzeug zugeordnet werden können. Um jedoch eine dauerhafte Überwachung oder Wiedererkennung eines Fahrzeuges auszuschließen, wird diese Station-ID regelmäßig zufällig neu gewählt. Die Frequenz, mit der eine CAM periodisch versendet wird, ist abhängig von der Dynamik des Ego-Fahrzeuges und variiert von 1 Hz bis 10 Hz. Bei Stillstand wird die CAM mit 1 Hz versendet. Bei sich schnell ändernder Position, Geschwindigkeit oder Orientierung steigt die Frequenz, sodass bspw. ab einer Geschwindigkeit von ca. 144 km/h die CAM konstant mit 10 Hz versendet wird. Grund dafür ist, dass vermieden werden soll, die Bandbreite des Funkkanals durch redundante Informationen unnötig zu belasten. Wird die CAM in einem VANET genutzt, wird die Nachricht direkt an alle umliegenden Fahrzeuge versendet (Broadcast), von dort allerdings nicht weitergeleitet (Single-Hop). So lassen sich mit der CAM nur Fahrzeuge erreichen, die in direkter Kommunikationsreichweite liegen.

Die DENM soll über besondere Ereignisse, wie ein liegengebliebenes Fahrzeug, ein Stauende oder Blitzeis informieren. Dafür enthält die DENM unter anderem einen Ereignistyp und dessen Position, Start und Dauer. Erkennt ein Fahrzeug ein relevantes Ereignis, bspw. Blitzeis, wird der Versand einer DENM an alle Fahrzeuge in der Umgebung angestoßen (eventbasiert). Beim Empfang einer DENM prüft jedes Fahrzeug, ob es sich im für das Ereignis relevanten Bereich befindet und die Dauer des Events noch gültig ist. Sollte dies der Fall sein, so wird die DENM wiederum an alle Fahrzeuge in der Umgebung weitergeleitet (Multi-Hop). Eine DENM, die über das Blitzeis warnt, kann in dem relevanten Gebiet also noch zwischen Fahrzeugen weitergeleitet werden, obwohl sich das Fahrzeug, das die DENM ursprünglich generiert hat, schon

längst aus der Kommunikationsreichweite bewegt hat. Sollte ein Fahrzeug, während die „Blitzeis-DENM“ noch gültig ist, wahrnehmen, dass sich das Blitzeis aufgelöst hat, so kann das Fahrzeug eine Negation-DENM versenden, um die weitere Verbreitung der Warnung zu stoppen. Umgekehrt, kann die Dauer der ursprünglichen Warnung verlängert werden, wenn das Ereignis weiter anhält.

## **Day 2: Wahrnehmendes Fahren**

Die zentrale Day2-Nachricht ist die Collective Perception Message (CPM) [106, 107] und soll durch das Versenden von Sensor-Informationen eine kollektive Perzeption (gemeinsames Umfeldmodell) ermöglichen. Das heißt, dass jedes Fahrzeug die Objekte (oder Freiräume), die durch die Ego-Sensorik wahrgenommen wurden, an die Fahrzeuge in der Umgebung weiterleitet. Die CPM enthält also in erster Linie keine Ego-Informationen (diese werden über die CAM versendet), sondern eine Objektliste mit Informationen über die Verkehrsteilnehmer im Wahrnehmungsgebiet der Ego-Sensorik. Die CPM wird dann per Single-Hop Broadcast mit einer variablen Frequenz von 2 Hz bis 10 Hz periodisch versendet. Dies hängt, ähnlich wie bei der CAM, davon ab wie dynamisch sich das wahrgenommene Umfeld ändert. Wenn keine Objekte im Umfeld erkannt werden, soll weiterhin eine (leere) CPM versendet werden, um die generelle Wahrnehmungs- und Sendebereitschaft zu signalisieren. Da die Wahrnehmung durch die Sensorik fehlerbehaftet sein kann, muss zu jedem Objekt die Varianz als Unsicherheitsmaß mitgeteilt werden. So können Sensordaten aus der Ego-Sensorik mit Sensordaten aus den empfangenen CPM zu einer kollektiven Perzeption fusioniert werden, die zwei direkte Vorteile bietet: (1) Zum einen können eigene Unsicherheiten bei der Objekterkennung reduziert werden und (2) zum anderen können Objekte wahrgenommen werden, die nicht im Erfassungsbereich der eigenen Sensorik liegen.

## **Day 3+: Kooperatives Fahren**

Das kooperative Fahren liegt noch weiter in der Zukunft und stellt einen wichtigen Übergang zum autonomen Fahren (Day N) dar. Auf der Grundlage des gemeinsamen Umfeldmodells sollen die Fahrzeuge mitteilen, welche Intentionen sie darin verfolgen, also wie sie sich fortbewegen wollen. Zusätzlich soll es möglich sein, die Intentionen untereinander zu koordinieren und abzustimmen, um so ein kooperatives Verhalten zu erreichen [103]. Denkbar sind dafür verschiedene Nachrichten für spezifische Manöver wie bspw. die Platooning Control Message (PCM) [108], aber auch generische Ansätze wie die Maneuver Coordination Message (MCM) [109]. Die Grundidee der MCM ist, dass jedes Fahrzeug eine StVO-konforme Trajektorie versendet, die es plant zu verfolgen (Plantrajektorie). Zusätzlich kann eine Trajektorie versendet werden, die das Fahrzeug sich wünscht zu fahren, aber bspw. wegen mangelnder Vorfahrt nicht fahren darf (Wunschtrajektorie). Dass ein Fahrzeug die Wunschtrajektorie nicht durchführen darf, ist dadurch zu erkennen, dass sie eine Kollision mit der StVO-konformen Plantrajektorie eines anderen Fahrzeuges erzeugen würde. Damit wird zusätzlich identifiziert, zwischen welchen Fahrzeugen eine Kooperation möglich wäre. Jedes Fahrzeug kann daraufhin für sich entscheiden, ob es die eigene Plantrajektorie anpasst, um die Wunschtrajektorie eines anderen Fahrzeuges zu ermöglichen.

## Aktueller Stand

Die beiden Day1-Nachrichten CAM und DENM sind durch das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) [110] bereits seit 2014 final spezifiziert [104, 105]. Wie Abbildung 2.6 zeigt, sind diese Nachrichten bereits vor 2010 Teil der Forschungslandschaft und wurden seitdem intensiv in Simulationen und Realversuchen für V2X-Anwendungen verwendet und untersucht [76, 111–117]. 2017 kündigte die Volkswagen AG an, ab 2019 die ersten Modelle mit ITS-G5 auszustatten und Day1-Nachrichten zu versenden [118]. 2020 wurde dies tatsächlich umgesetzt [101]. Die Day1-Nachrichten haben damit den Schritt aus der Entwicklung hinein in Serienfahrzeuge und damit auf die Straße geschafft. Des Weiteren werden Sie aktuell in Projekten wie IMAGinE [119] als Grundlage für die Spezifikation und Weiterentwicklung der Day2 und Day3-Nachrichten verwendet.

Zur CPM als Day2-Nachricht wurden bereits Entwürfe der Spezifikation veröffentlicht [107], jedoch steht deren Finalisierung noch aus [106]. Wie Abbildung 2.6 zeigt, wurde erst 2016 mit der Ausarbeitung der CPM begonnen, nachdem das Konzept von Günther et al. [120] vorgestellt wurde. Entsprechend gering ist die CPM derzeit noch in der Forschungslandschaft vertreten. Allerdings zeigen bereits die ersten Untersuchungen aus dem IMAGinE-Projekt, dass die CPM in Simulation und Realversuchen bspw. einen positiven Effekt auf die Kraftstoffeffizienz für Rollmanöver von Lkw haben kann [121]. So hat die CPM bereits den Schritt von ersten Spezifikationen hin zur Anwendung in prototypischen Versuchsträgern geschafft, von denen in naher Zukunft noch weitere Ergebnisse erwartet werden.

Die MCM ist als Day3-Nachricht momentan die jüngste Nachricht und befindet sich noch in der Spezifikation durch die ETSI [109]. 2018 wurde das erste Konzept durch Lehman et al. [122] veröffentlicht und anschließend im IMAGinE-Projekt für die Manöverabstimmung aufgenommen. Ein Ziel von IMAGinE ist es, erste Erfahrungen mit der MCM zu sammeln, die dann zur finalen Spezifikation durch die ETSI beitragen sollen [117]. Demnach werden erste simulative Ergebnisse zur Manöverabstimmung durch die MCM zeitnah erwartet.

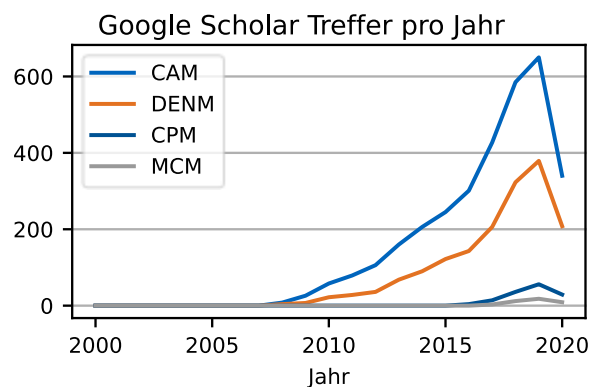


Abbildung 2.6: Anzahl an Suchergebnissen pro Jahr für verschiedene V2X-Nachrichten auf Google Scholar (Stand Mitte 2020).

### 2.3.3 Hardware

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [65].*

Für die Integration von V2X-Kommunikation in die Fahrzeuge wird zusätzliche Hardware in Form eines IEEE 802.11p- oder LTE-Routers mit Antennen benötigt. Ein hybrides Modul, das beide Funktechnologien anbietet, ist bspw. von Bosch seit 2019 auf dem Markt [123]. Es wird erwartet,

dass kommende Fahrzeuggenerationen bereits mit einer Breitbandverbindung ausgestattet werden, um einen Datenaustausch und Updates durch das OEM-Backend zu ermöglichen. Eine Erweiterung für die Verwendung von V2X wird daher, bei den in der Automobilindustrie üblichen großen Skaleneffekten, auf zusätzliche 23 \$ geschätzt [124]. Der Kostenunterschied zwischen ITS-G5-basierter und LTE-basierter Kommunikation wurde auch bereits untersucht, mit dem Ergebnis, dass die notwendigen Komponenten für LTE-V2X derzeit ca. 14 \$ mehr kosten als für ITS-G5. Mit steigender Entwicklung und Verbreitung von LTE-V2X wird allerdings erwartet, dass sich die Kosten in Zukunft annähern werden [125].

Neben dem Router müssen zusätzlich Antennen am Fahrzeug montiert werden. In der Regel werden dafür eine Rundstrahlantenne auf dem Fahrzeugdach verwendet, die als „Haifischflosse“ erkennbar ist [126]. Diese Position erfüllt die Kriterien „hoch und frei“, weil in der Vergangenheit die Kommunikation meist zu Satelliten (GPS) oder hohen Sendemasten (Radio, LTE) erfolgte [127]. Wenn allerdings die Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen erfolgen soll, sollte eine direkte Sichtverbindung zwischen den Antennen bestehen, um keine zusätzliche Dämpfung oder Reflektion zu erzeugen. Für die Kommunikation zwischen Pkw und Pkw hat sich wieder die Dachposition bewiesen und etabliert [126]. Andere Antennenkonstellationen, wie gerichtete Antennen in den Seitenspiegeln, den Stoßstangen oder den Front- und Rückscheiben, werden nur selten umgesetzt [127–129].

Mit dem Kriterium „hoch und frei“ würde die Wahl für die Antennenposition bei einem Lkw auf das Dach des Anhängers fallen. Da dieser jedoch teilweise täglich wechselt oder eine Montage bei Containeranhängern oder Kippladern nicht möglich ist, muss eine andere Antennenposition gewählt werden. Der nächsthöchste Platz ist das Dach des Fahrerhauses, was allerdings insbesondere nach hinten durch den Anhänger stark abgeschattet wird. Durch den Höhenunterschied zwischen Lkw-Dach (ca. 4 m) und Pkw-Dach (ca. 1,5 m) kann zusätzlich die Fahrerkabine selbst die Sichtverbindung zwischen den Antennen unterbrechen. In Simulationen mit Lkw zu Lkw oder Lkw zu Pkw Kommunikation wird trotzdem meist die Dachantenne ohne Rücksicht auf mögliche Signaldämpfungen durch das eigene Fahrzeug betrachtet [83]. Untersuchungen mit Realfahrzeugen wählen meist andere Antennenkonstellationen mit Antennen am Trailer oder an den Seiten [82, 130, 131]. Ein direkter Vergleich zwischen der Performance einer Dachantenne zu zwei Seitenantennen und die daraus resultierende Kommunikationsreichweite für einen Lkw ist in der aktuellen Forschungslandschaft jedoch nicht zu finden.

## 2.4 Kooperative Manöverplanung

Wie in Abschnitt 2.2.3 dargelegt wurde, verhält sich der Mensch im Straßenverkehr allgemein kooperativ und erfüllt damit §1 (1) der Straßenverkehrs-Ordnung [132]: „Die Teilnahme am Straßenverkehr erfordert ständige Vorsicht und gegenseitige Rücksicht.“ Diese abstrakte Regel ist jedoch nur schwer zu formalisieren, sodass automatisierte und autonome Fahrzeuge sich in erster Instanz an konkreten Vorschriften wie Vorfahrtsregeln und Geschwindigkeitsbegrenzungen orientieren werden. Wenn in Zuge dessen der Fokus auf die Optimierung der eigenen Kosten gelegt wird, werden automatisierte Fahrzeuge zu egoistischen Verkehrsteilnehmern. Es besteht also die Gefahr, dass durch automatisierte Fahrzeuge der Verkehrsfluss an Effizienz verliert und durch „rücksichtslose“ Fahrweisen Konflikte entstehen, wenn keine Kooperation zwischen den Fahrzeugen umgesetzt wird [63, 98]. Die Entwicklung von kooperativen automatisierten Fahrzeugen rückt damit immer weiter in den Forschungsmittelpunkt.

Verantwortlich für die Kooperation ist der kooperative Manöverplaner. Im Folgenden wird daher erst die hierarchische Aufteilung und die Funktionsweise von Manöverplanern im Allgemeinen betrachtet. Anschließend werden verschiedene Konzepte vorgestellt, wie diese Manöverplaner für Kooperation erweitert werden können.

### 2.4.1 Hierarchischer Manöverplaner

Im „Sense-Plan-Act“ Konzept für automatisierte Fahrzeuge übernimmt der Manöverplaner den „Plan“ Block. Das heißt als Eingangsdaten sind das mit der Sensorik wahrgenommene Umfeldmodell (Straße, statische/dynamische Objekte) sowie eine Zielposition vorhanden. Der Manöverplaner generiert daraufhin eine Trajektorie oder Handlungsanweisungen, die im letzten Schritt durch einen Regler und entsprechende Aktorik umgesetzt werden. Die Granularität solcher Manöverpläne kann von bspw. „Fahre über A9“ bis „Setze Lenkradwinkel auf 4°“ stark variieren. Daher wird die Manöverplanung in der Regel hierarchisch in drei Ebenen aufgeteilt [133–136], die in Abbildung 2.7 dargestellt sind.

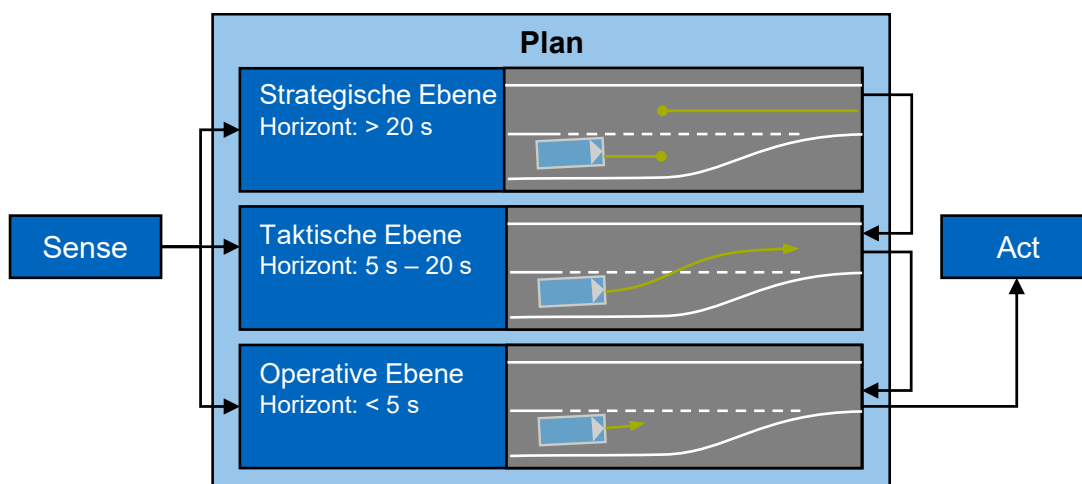


Abbildung 2.7: Einordnung und Übersicht der hierarchischen Ebenen eines Manöverplaners.

#### Strategische Ebene

Bei der strategischen Manöverplanung (auch „Mission Planning“ genannt) werden langfristige Ziele verfolgt. Dazu zählt insbesondere die Navigation, also die Wahl der Route, die gefahren werden soll, jedoch ohne Details wie bspw. die Wahl des Fahrstreifens auf einer Autobahn. Zusätzlich kann eine Richtgeschwindigkeit geplant werden, an der sich die weiteren Planungsebenen orientieren sollen. Manöver, die einen langen Planungshorizont oder eine lange Dauer benötigen, bspw. Platooning, sind strategische Entscheidungen. So umfasst die strategische Manöverplanung alle Aktionen, die mehr als 20 s bis 60 s benötigen, und wird häufig durch Zustandsautomaten umgesetzt [137]. Die Frequenz für die Berechnung bzw. Updates ist im Vergleich zu den anderen Planungsebenen die geringste, weil sich die relevanten Situationen nur langsam ändern.

#### Taktische Ebene

Die taktische Manöverplanung (auch „Behaviour Planning“ genannt) befasst sich mit der Planung von mittelfristigen Aktionen. Basierend auf der strategischen Route und



Richtgeschwindigkeit wird bspw. abhängig vom Umgebungsverkehr geplant, auf welcher Spur der Autobahn und mit welcher Geschwindigkeit gefahren werden soll. Dafür werden atomare Manöver wie „Geradeausfahrt“, „Abbiegen“ oder „Spurwechsel“ betrachtet. Um die Komplexität in Grenzen zu halten, können (müssen aber nicht) Annahmen getroffen werden, wie bspw., dass ein Spurwechsel immer von Spurmittle zu Spurmittle abläuft. Bei einer mittleren Updatefrequenz liegt der Planungshorizont für die Taktische Ebene bei 2-5 s bis 20-60 s und wird ebenfalls über Zustandsautomaten oder Trajektorien umgesetzt [134, 137].

## **Operative Ebene**

Auf der operativen Ebene (auch „Motion Planning“ genannt) werden die kurzfristigen Bewegungen des Fahrzeuges geplant. Dafür wird versucht, der Vorgabe der taktischen Ebene zu folgen und etwaige dort getroffene Vereinfachungen zurückzunehmen, sodass eine fahrbare Trajektorie ausgehend vom aktuellen Zustand des Fahrzeuges erzeugt wird. Der Planungshorizont beträgt bis zu 2-5 s und die Trajektorie muss durch die sich schnell verändernde Situation mit einer hohen Frequenz neu berechnet werden [57]. Für die operative Manöverplanung werden daher trajektorienbasierte Ansätze mit einem genauen Fahrzeugmodell verwendet. Als letzte Ebene des hierarchischen Manöverplaners wird nur die hier erzeugte Trajektorie an den Regler weitergegeben, um die Bewegung tatsächlich umzusetzen.

### **2.4.2 Technischer Hintergrund**

Die einzelnen Ebenen des hierarchischen Manöverplaners basieren entweder auf einem Zustandsautomaten oder auf einer Trajektorienberechnung. Im Folgenden werden die Grundprinzipien der beiden Varianten beschrieben.

## **Manöverplanung mit Zustandsautomaten**

Ein endlicher Zustandsautomat (engl. Finite State Machine) besteht aus Zuständen und Zustandsübergängen. In jedem Zustand sind Aufgaben bzw. Aktionen definiert, die durchgeführt werden sollen. Sollte dadurch eine Bedingung für einen Zustandsübergang erfüllt werden, so wird dieser vollzogen und die im neuen Zustand definierte Aktion durchgeführt [138]. Für die Manöverplanung eignen sich Zustandsautomaten daher auf der strategischen und taktischen Ebene, um atomare Aktionen schrittweise durchzuführen [137, 139, 140]. Um die Komplexität der Zustandsautomaten zu reduzieren, lassen sich Zustände gruppieren oder wiederum hierarchisch aufbauen. So zeigt Abbildung 2.8 einen untergeordneten Zustandsautomaten des AnnieWays's Systems der DARPA Urban Challenge 2008 für die Bewältigung einer Kreuzung auf taktischer Ebene. Das System beginnt im Zustand „IntersectionApproach“ und nähert sich der Kreuzung. Wenn erkannt wird, dass sich vor der Kreuzung eine Schlange gebildet hat, wird in den Zustand „IntersectionQueue“ gewechselt und das Fahrzeug hat dort die Aufgabe sich in die Schlange einzureihen. Löst sich die Schlange auf, wird wieder zurückgewechselt und das Fahrzeug nähert sich weiter der Kreuzung. Sobald das Fahrzeug kurz vor der Kreuzung ist, werden verschiedene Vorfahrtsregeln geprüft, die dann Übergänge in die passenden Zustände auslösen.

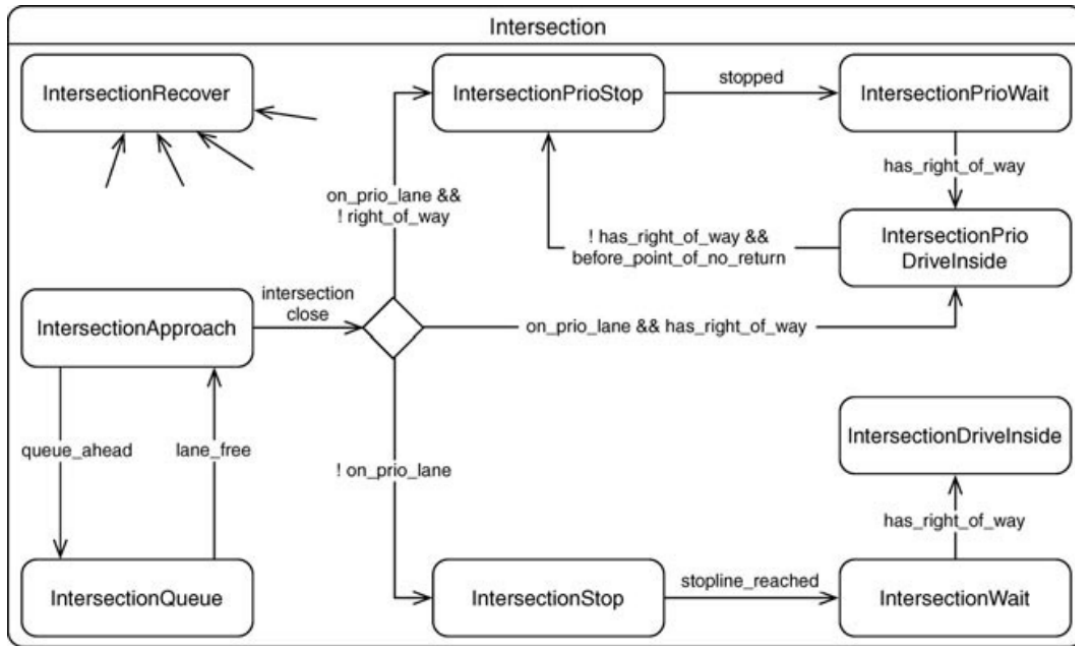


Abbildung 2.8: Zustandsautomat für die Überwindung einer Kreuzung aus der taktischen Planungsebene des AnnieWay's System für die DARPA Urban Challenge 2008 [137].

Durch Zustandsautomaten lässt sich ein komplexes Manöver also in beliebig viele verschiedene Teilmanöver / Aufgaben gliedern, die durch verschiedene Bedingungen verknüpft sind. Der Vorteil ist, dass die Manöverplanung auf diese Art gut verständlich und nachvollziehbar ist. Allerdings können so nur Manöver geplant werden, die tatsächlich durch die möglichen Zustandsabfolgen des Automaten abgedeckt sind. Es muss also manuell jedes mögliche Szenario bei der Implementierung des Zustandsautomaten bedacht werden und daher eignen sie sich nur für eine high-level Manöverplanung auf strategischer oder taktischer Ebene.

## Manöverplanung mit Trajektorien

Eine Trajektorie beschreibt die Bewegung von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt und entspricht damit einem Pfad mit zusätzlichem Geschwindigkeitsprofil. Wird die Trajektorien-generierung in einem hierarchischen Manöverplaner verwendet, so ist die übergeordnete Ebene für die Auswahl des Zielpunktes verantwortlich. Für die Darstellung von Trajektorien können eine Reihe an Stützstellen oder Polynome verwendet werden [57]. Zusätzlich kann unterschieden werden, ob die Trajektorien in einem globalen Koordinatensystem, wie dem kartesischen Koordinatensystem, liegen oder in dem lokalen Koordinatensystem des Ego-Fahrzeuges. Für die Manöverplanung wird häufig das Frenét-Koordinatensystem verwendet, das eine Trajektorien Planung relativ zur Straße ermöglicht [141]. So müssen nur Abweichungen von der Spurmitte dargestellt werden, sodass bspw. für das Folgen einer kurvigen Straße ein Polynom mit Grad 0 ausreichend ist. Abbildung 2.9 zeigt die Positionskomponente einer Trajektorie für einen Spurwechsel und ein Abbiegen im (a) kartesischen Koordinatensystem und im (b) Frenét-Koordinatensystem.

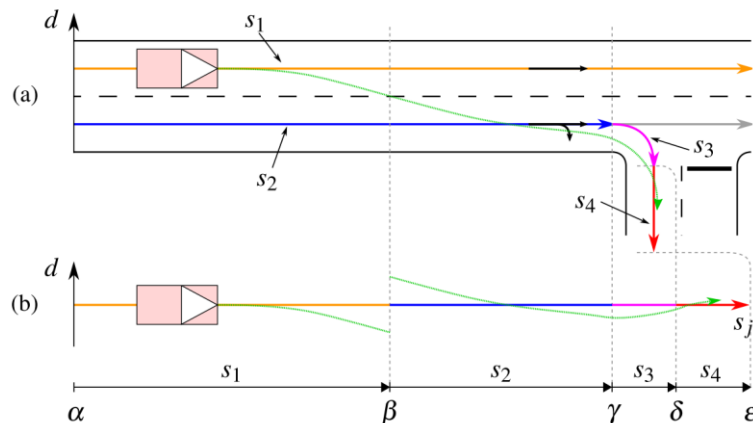


Abbildung 2.9: Die Darstellung der Positionskomponente einer Trajektorie im Kartesischen Koordinatensystem (a) und Frenét-Koordinatensystem (b) [122].

Für die Generierung der Trajektorien gibt es verschiedene Ansätze, die sich in mehrere Gruppen aufteilen lassen [142]. Bei den **Risiko Potenzial Feldern** werden Hindernissen abstoßende Kraftfelder und Freiflächen anziehende Kraftfelder zugewiesen, wie es in Abbildung 2.10 für ein sich langsam bewegendes Fahrzeug dargestellt ist. Zusätzlich bekommen Straßenmarkierungen abstoßende Kraftfelder, um ein Abkommen von der Fahrbahn oder ständige Spurwechsel zu vermeiden. So lassen sich Risikokarten des Umfeldes erstellen, in denen ebenfalls sich bewegende Hindernisse über die Zeit propagiert werden können. Um für ein Fahrzeug eine Trajektorie zu generieren, wird die erzeugte Risikokarte nach einem möglichst risikoarmen aber gleichzeitig fahrbaren Pfad vom Startpunkt zum Zielpunkt durchsucht [143].

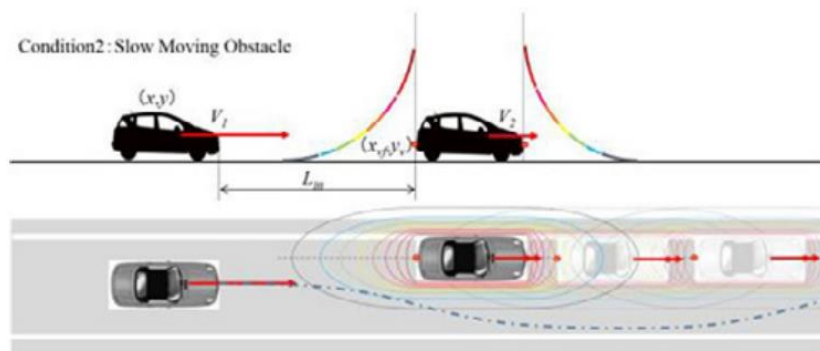


Abbildung 2.10: Das Risiko Potenzial Feld eines sich langsamen bewegenden Fahrzeugs [143]

Bei den **Sample Basierten Methoden** zur Trajektoriengenerierung ist die Grundidee, Zwischenzielpunkte zwischen Start und Zielpunkt zu legen und diese Punkte durch Polynome oder Splines zu verbinden. Jeder der so erzeugten Pfade wird anschließend durch Kostenfunktionen bewertet, um bspw. starke Krümmungen negativ zu bewerten. Der beste Pfad wird anschließend mit einem Geschwindigkeitsprofil ergänzt und ergibt die Trajektorie. Entscheidend ist die Wahl der Zwischenzielpunkte, die bspw. gleichverteilt als Raster [57] oder über Rapid Random Trees (RRT) erzeugt werden können [144, 145]. Viele Zwischenziele sorgen für eine hohe Abdeckung des Suchraumes, erzeugen aber einen hohen rechnerischen Aufwand. RRT versuchen möglichst schnell, eine Baumstruktur innerhalb des erreichbaren Suchraumes zu erzeugen. Wie Abbildung 2.11 (a) zeigt, werden wichtige Kriterien, wie möglichst konstante Kurvenradien, nicht beachtet [142], weshalb es verschiedenen Erweiterungen und Abwandlungen speziell für die Generierung von Fahrzeugtrajektorien gibt [145].

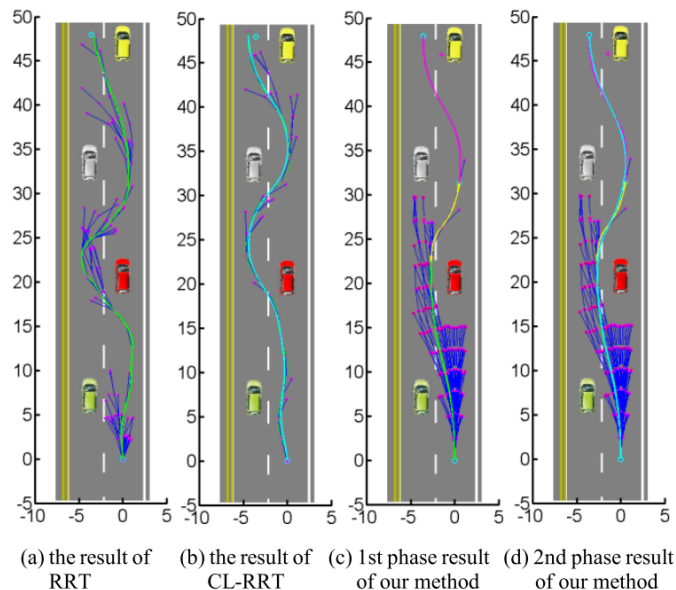


Abbildung 2.11: Die in (a) durch RRT erzeugte Trajektorie ist ruckartig, weil die für eine glatte Trajektorie benötigten Zwischenziele nicht ausgewählt/gefunden wurden. Die Erweiterung des RRT Algorithmus und Kombination mit einer vordefinierten Trajektorienschar sorgt in (d) für ein deutlich besseres Ergebnis [145].

Ansätze aus dem Bereich der **Model Predictive Control** (MPC) basieren darauf, ein Optimierungsproblem zu lösen und so eine Sequenz an Steuerbefehlen zu erhalten. Ein Ausführen dieser Sequenzen erzeugt die entsprechende Trajektorie. Beim MPC wird jedoch lediglich der erste Steuerbefehl umgesetzt und daraufhin die Optimierung neu gestartet. Entscheidend sind die Einschränkungen und Kostenfunktionen, die zusammen mit dem zu optimierenden Modell verwendet werden. Die Einschränkungen, die beachtet werden müssen, können je nach Ziel gewählt werden und betreffen Faktoren wie Kollisionsfreiheit oder maximaler Lenkwinkel [136]. Die Kostenfunktionen können die Trajektorien auf bspw. Komfort, Sicherheit oder Effizienz bewerten. So lassen sich unter den Einschränkungen und Kostenfunktionen optimale Trajektorien erzeugen. Durch nicht lineare Fahrzeugmodelle und eine große Anzahl an Einschränkungen entsteht bei der Optimierung jedoch ein großer Rechenaufwand [142, 146].

Auch im Bereich der Manöverplanung wächst der Einfluss von **Maschinellem Lernen**. Zum einen durch die Verwendung von vor allem Reinforcement Deep Learning (RDL) Methoden als Ergänzung der klassischen Pipeline, zum anderen aber auch als kompletter Ersatz der Pipeline. Bei diesem so genannten End-to-End Lernen werden tiefe CNN (Convolutional Neural Networks) verwendet, um von den Sensorinformationen direkt auf Steuerbefehle schließen zu können [147, 148]. Mit RDL können CNN jedoch zusätzlich explizit zur Generierung von Trajektorien trainiert werden. Als Input dienen das Umfeldmodell und die Manöverpläne der hierarchisch höheren Ebenen. Das Training läuft so ab, dass in Simulation, ausgehend vom Input, eine Trajektorie geplant und durchgeführt wird. Zusätzlich werden Kostenfunktionen genutzt, um die Qualität der Trajektorie zu bewerten. Durch positives oder negatives Feedback und über viele Trainingsiterationen hinweg lernt das System kontinuierlich Trajektorien von hoher Qualität zu erzeugen [149, 150].

### 2.4.3 Kooperative Manöverplanung

Bei der kooperativen Manöverplanung wird versucht, nicht nur die Kosten für das Ego-Fahrzeug zu optimieren, sondern eine gemeinschaftlich optimale Lösung zu generieren. Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, kann dies bedeuten, dass die Kosten für das Ego-Fahrzeug steigen, dafür aber vergleichsweise hohe Kosten eines anderen Verkehrsteilnehmers verhindert werden. Menschliche Fahrer verhalten sich im Rahmen ihrer Möglichkeiten in der Regel kooperativ [63]. Wenn dieses Verhalten von automatisierten Fahrzeugen erreicht wird, wird von „Cooperative Automated Driving“ (CAD) gesprochen. Die Kooperation lässt sich wie in Abschnitt 2.2.4 vorgestellt auf drei verschiedenen Planungsebenen umsetzen, die nun mit Bezug zu CAD näher erläutert werden.

#### Zentrale Planungsebene

Auf der zentralen Planungsebene gibt es eine Instanz, die die Manöverpläne für alle Fahrzeuge erstellt und an diese verteilt. Grundvoraussetzung ist dementsprechend eine V2X-Kommunikation und die Zustimmung aller Fahrzeuge, den Anweisungen zu folgen, weshalb eine weitere Unterteilung in „mit“ oder „ohne Abstimmung“ nicht existiert.

Knies et al. [64] haben 2019 einen kooperativen Manöverplaner auf zentraler Ebene für Autobahnscenarien vorgestellt. Die Grundidee war, jedem Fahrzeug sechs verschiedene Aktionen zu erlauben, wie „Geschwindigkeit halten“, „Beschleunigen“ oder „Spurwechsel nach links“, und zusätzliche Kostenfunktionen zu definieren, welche die Aktionen bewerten. So führen bspw. Kollisionen und ständige Spurwechsel zu hohen Kosten für das Ego-Fahrzeug, während eine konstante Fahrt mit Wunschgeschwindigkeit zu geringen Kosten führt. Aus den Aktionen, die für die Fahrzeuge möglich sind, wurde dann ein Suchbaum generiert, um alle Kombinationen an Aktionen durchzuspielen, zu bewerten und das beste Manöver auszuwählen. Da die Größe des Suchbaumes und damit der Rechenaufwand allerdings exponentiell mit steigender Fahrzeuganzahl und längerem Planungshorizont wächst, kann nicht der gesamte Suchbaum generiert werden. Stattdessen wurde eine Monte-Carlo Tree Search (MCTS) als Heuristik implementiert. So wird der Suchbaum iterativ aufgebaut, indem nur vielversprechende Pfade (Kombinationen an Aktionen) weiter simuliert und bewertet werden. In Simulation wurde so gezeigt, dass Kooperation in 10 s langen Autobahnscenarien mit drei Fahrzeugen umgesetzt werden kann und die globalen Kosten für die Fahrzeuge dadurch reduziert werden. Als Nachteil ihrer Methode geben die Autoren den Trade-Off zwischen Diskretisierung in Aktionen und Zeitschritte sowie den Rechenaufwand an. Sie folgern daraus, dass ihre Methode durch Rechen- und Kommunikationsaufwände nicht echtzeitfähig ist und keine Anwendung in Realfahrzeugen finden wird. Vielmehr soll ihr Ansatz dazu verwendet werden, eine nahezu optimale Lösung für ein Szenario zu bestimmen, die dann als Benchmark für kooperative Manöverplaner auf dezentraler Ebene dienen soll.

Ein weiteres Beispiel für die zentrale Planungsebene kommt von Akti et al. aus dem Jahr 2020 mit konkretem Fokus auf eine Spurreduzierung auf der Autobahn [151]. Unter der Annahme einer perfekten Kommunikation zwischen allen Fahrzeugen und einer zentralen Steuerinstanz sowie einer starken Diskretisierung der Fahrmanöver, wird in der Simulationsumgebung SUMO [152] eine Geschwindigkeitsharmonisierung durchgeführt. Ziel ist, ein flüssiges Reißverschlussverfahren zu ermöglichen, um Stauwellen zu vermeiden. Für die Wahl der Fahrzeuggeschwindigkeiten wird ein spieltheoretischer Ansatz verfolgt, was laut Akti et al. zu

vielversprechenden Ergebnissen führt und den Verkehrsfluss in den getesteten Szenarien signifikant verbessert hat.

2016 entwickelten Düring und Lemmer [57] in Simulation einen kooperativen Manöverplaner am Beispielszenario eines Pkw der einen Lkw auf der Landstraße mit Gegenverkehr überholt. Der überholende Pkw generiert operative Trajektorien für alle drei am Szenario beteiligten Fahrzeuge und verteilt diese über V2X. Als Besonderheit haben die anderen Fahrzeuge jedoch die Möglichkeit der für sie geplanten Trajektorie zuzustimmen oder zu widersprechen. Eine Beachtung von Kommunikationsausfällen oder Verzögerungen erfolgt jedoch nicht und wie genau auf einen Widerspruch reagiert wird, ist ebenfalls nicht erläutert. Vielmehr soll der Fokus ihrer Forschung auf der Trajektoriengenerierung und -bewertung liegen. Dazu werden Zielpunkte gleichverteilt als Raster über die Straße gelegt, von denen anschließend eine große Anzahl an Kombinationen durch kubische Splines als Pfade verbunden werden. Die Fahrzeugorientierung wird an jedem Zielpunkt parallel zur Straße vorausgesetzt. Die so bestimmten Pfade werden daraufhin mit einem Geschwindigkeitsprofil versehen und bilden die zu bewertende Trajektorienschar. Die Größe dieser Schar ist folglich durch die Anzahl an Zielpunkten bedingt und die Länge der Trajektorien durch deren Diskretisierung. Die Untersuchungen von Düring und Lemmer ergeben, dass ein Planungshorizont von 4 s die obere Grenze der Berechenbarkeit in ihrem Manöverplaner darstellen. Anschließend wählen sie aber sogar nur einen Planungshorizont von knapp 2 s, weil die Bewertung und der Vergleich von längeren Trajektorien besondere Herausforderungen aufwerfen. Dieser kurze Planungshorizont ist aber ausreichend, um in dem Überholenszenario ein kooperatives Manöver zu generieren, durchzuführen und so eine Kollision zu vermeiden.

Kooperative Manöverplaner, die auf zentraler Ebene arbeiten, haben die Chance, durch die zur Verfügung stehenden Informationen nahezu optimale Manöverpläne zu erzeugen, stoßen damit aber schnell an die Grenzen der Berechenbarkeit. Um dem entgegenzuwirken, müssen eine starke Diskretisierung oder Verkürzung des Planungshorizontes angewendet werden, wie Knies et al. sowie Düring und Lemmer zeigten. Andernfalls darf sich die zentrale Planung nur auf Teilaspekte wie die longitudinale Geschwindigkeit beziehen, so wie es Akti et al. vorgestellt haben. Das Problem der Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Planungsinstanz wird damit jedoch nicht adressiert und stellt ein weiteres großes Hindernis dar. Damit ist es nicht verwunderlich, dass bisher keine zentralen Planungsalgorithmen gefunden wurden, die bereits in Realfahrzeugen getestet werden konnten, weil die Anforderungen an Echtzeit und Robustheit bislang nicht erfüllt werden können.

### **Dezentrale Planungsebene mit Abstimmung**

Anstatt die kooperative Manöverplanung einer zentralen Instanz zu überlassen, wird dies auf der dezentralen Planungsebene jedem Fahrzeug selbst ermöglicht. Wenn eine V2X-Kommunikation vorhanden ist, können die Pläne gemeinsam abgestimmt werden. Der erste Schritt besteht darin zu identifizieren, wo Kooperation sinnvoll ist, woraufhin diese angefragt oder proaktiv angeboten werden kann. Dies führt zu einer Abstimmung, bei der der Grad der Kooperation gemeinsam diskutiert werden kann. Im besten Fall entsteht so eine Einigung und das Manöver wird kooperativ durchgeführt, jedoch ist dies nicht garantiert und das Manöver kann ebenfalls unkooperativ weitergeführt werden.

Heb et al. [153] haben 2018 ein Konzept für einen kooperativen Spurwechsel auf der Autobahn vorgestellt, das auf der dezentralen Planungsebene arbeitet. Jedes Fahrzeug plant für sich eine Trajektorie und identifiziert anschließend, wo mit dieser Trajektorie ein Konfliktbereich mit einem

anderen Fahrzeug auftreten könnte. Möchte bspw. ein Fahrzeug für ein Überholmanöver auf die linke Spur wechseln, so muss es die Vorfahrt der dortigen Fahrzeuge beachten und identifiziert den Abschnitt der eigenen Trajektorie, der auf der linken Spur liegt, als Konfliktbereich. Gleichzeitig muss dieser räumlichen Komponente noch eine zeitliche Komponente hinzugefügt werden, nämlich wann genau das Ego-Fahrzeug diesen Bereich benötigt. Anschließend wird eine Raum-Zeit-Reservierung für diesen Konfliktbereich über V2X an alle umgebenden Fahrzeuge gesendet. Die empfangenden Fahrzeuge wissen nicht, zu welchem Zweck diese Raum-Zeit-Reservierung angefragt wurde, sondern müssen nur entscheiden, ob dies mit den eigenen Manöverplänen vereinbar ist. Erhält das anfragende Fahrzeug im nächsten Schritt eine Bestätigung der Reservierung von den relevanten Fahrzeugen auf der linken Spur, so kann es die Überholtrajektorie abfahren. Heb et al. [153] demonstrieren, dass ihr Ansatz echtzeitfähig ist und sie die kooperativen Spurwechsel in Simulation und Realfahrzeug mit 10 Hz planen und in gewünschter Weise durchführen konnten.

2019 wurde von Hyldmar et al. ein ähnlicher Ansatz in einer Flotte von kooperativen Miniaturfahrzeugen umgesetzt [154]. Die umgebauten Spielzeugautos waren auf einem zweisepurigen Rundkurs unterwegs und wurden mit Sensorik, Recheneinheit und Funkmodul ausgestattet, um die Strecke vollautomatisiert zu beherrschen. Die Trajektoriengenerierung wurde in longitudinale und laterale Komponenten aufgeteilt. Für die longitudinale Planung wurde das Intelligent Driver Model (IDM) [155] verwendet und für die Planung von Spurwechseln das MOBIL Modell [156], jedoch wurden beide Modelle um eine kooperative Komponente erweitert, die zum C-IDM und C-MOBIL Modell führen. Der Ansatz dafür ist wie folgt: Möchte ein Fahrzeug ein Überholmanöver, bzw. einen Spurwechsel durchführen, so projiziert es über eine V2X-Nachricht ein virtuelles Fahrzeug neben sich auf die gewünschte Spur. Fahrzeuge, die eine Projektion empfangen, können dann basierend auf den Parametern ihres Modells entscheiden, ob auf dieses virtuelle Fahrzeug mit Be- oder Entschleunigen reagiert werden soll, oder ob eine Reaktion zu hohe Kosten verursacht und das virtuelle Fahrzeug ignoriert werden soll. Wird auf das virtuelle Fahrzeug reagiert, so hat das initiierende Fahrzeug die Möglichkeit, den Spurwechsel durchzuführen, anderenfalls muss es auf der eigenen Spur verzögern und es später erneut versuchen. Die Experimente zeigten, dass mit Kooperation der Fahrzeugdurchsatz 35 % bis 42 % höher war, verglichen mit dem IDM und MOBIL Modell ohne Kooperation.

Obwohl beide Ansätze das gleiche Szenario betrachten und einem ähnlichen Konzept folgen, sind sie durch unterschiedliche Manöverplaner und V2X-Nachrichten nicht miteinander kompatibel. Ploeg und de Haan [157] weisen deshalb darauf hin, dass die dezentrale Planung von kooperativen Manövern auf gemeinsamen Standards der V2X-Schnittstelle basieren muss. Gleichzeitig muss es jedoch unabhängig von der darunterliegenden Manöverplanung ablaufen, weil sonst jeder Hersteller den gleichen Manöverplaner verwenden müsste.

Genau dieser Herausforderung haben sich Lehmann et al. [122] 2018 mit einem generischen Ansatz zur dezentralen Manöverabstimmung zugewandt und damit den Grundstein zur in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten MCM gelegt. Die MCM erlaubt den Austausch von Trajektorien im Frenét-Koordinatensystem, die damit unabhängig vom jeweiligen Fahrzeug-Koordinatensystem und der fahrzeugspezifischen Trajektoriengenerierung sind. Wie Abbildung 2.12 zeigt, werden die Trajektorien zwischen Plan- und Wunschtrajektorien unterschieden und ermöglichen so einen 4-stufigen Abstimmungsprozess: (a) Grundsätzlich verschickt jedes Fahrzeug die aktuelle StVO-konforme Trajektorie, der gefolgt wird, als Plantrajektorie. (b) Wird erkannt, dass es eine bessere Trajektorie für das Ego-Fahrzeug gibt, die jedoch mit der Plantrajektorie eines anderen Fahrzeuges kollidiert, wird diese zusätzlich als Wunschtrajektorie versendet. Mit dem Konflikt aus Plan- und Wunschtrajektorie lassen sich direkt die bei der möglichen Kooperation beteiligten

Fahrzeuge identifizieren. (c) Fahrzeuge, deren Plantrajektorie eine Kollision mit einer empfangenen Wunschtrajektorie aufweisen, können nach fahrzeugspezifischen Kostenfunktionen entscheiden, ob und wie die eigene Plantrajektorie angepasst wird. (d) Sollte nach der Anpassung kein Konflikt mehr zwischen Plan- und Wunschtrajektorie bestehen, so ist die Kooperationsanfrage angenommen worden und die ursprüngliche Wunschtrajektorie kann zur Plantrajektorie umgewandelt und abgefahren werden.

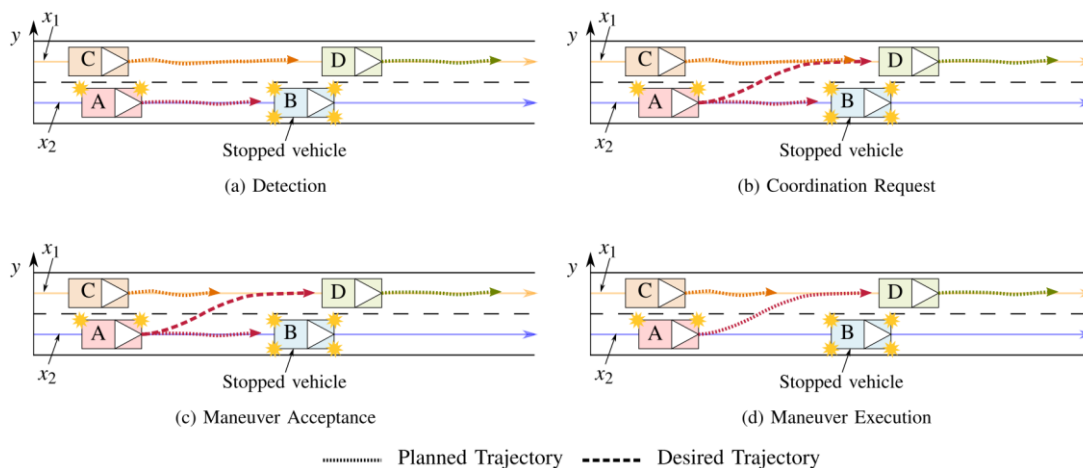


Abbildung 2.12: Der Abstimmungsprozess mit Plan- und Wunschtrajektorien über MCM [122].

Dieses generische Konzept ist losgelöst von speziellen Szenarien oder konkreten Implementierungen des Manöverplaners, benötigt aber genaue Trajektorien, weil andernfalls die zuverlässige Bestimmung von Konflikten zwischen Trajektorien fehlschlägt. Wie bereits erläutert birgt jedoch die Generierung von langen und gleichzeitig genauen Trajektorien besondere Herausforderung an die Rechenleistung, weshalb das Konzept von Lehmann et al. [122] nur Anwendung auf operativer oder taktischer Ebene mit kurzen Trajektorien finden kann.

Eine kooperative Manöverplanung auf taktischer Ebene mit Zustandsautomaten wurde 2016 von Sahin et al. [111] in der Grand Cooperative Driving Challenge (GCDC) angewendet und 2018 veröffentlicht. Die Zustandsautomaten enthalten die V2X-Protokolle für zwei Szenarien und Zustandswechsel werden teilweise durch das Versenden oder Empfangen bestimmter Nachrichten eingeleitet. Die betrachteten Szenarien sind das Zusammenführen zweier Platoons im Reißverschlussverfahren und das Linksabbiegen an T-Kreuzungen. Die entsprechenden Zustandsautomaten sind so angelegt, dass die Fahrzeuge keine Möglichkeit haben, nicht an der Kooperation teilzunehmen. Die mit den Realfahrzeugen durchgeführten Experimente zielten analog immer darauf ab, dass eine Kooperation zustande kommen soll. Für den Informationsaustausch wurden CAM, DENM und eine extra für die GCDC spezifizierte „i-Game Cooperative Lane Change Message“ (iCLCM) verwendet. Die erfolgreichen Kooperationsfahrten zeigten, dass die unterschiedlichen Teams durch die iCLCM als gemeinsame Schnittstelle kooperieren konnten, ohne den identischen Manöverplaner zu verwenden. Statt der für die CAM maximalen Übertragungsfrequenz von 10 Hz wurden allerdings alle Nachrichten mit 25 Hz über ITS-G5 versendet, weil manche Fahrzeuge mit keiner eigenen Sensorik ausgestattet waren und damit auf die CAM der anderen Fahrzeuge angewiesen waren. Die daraus resultierende gestiegene Kanallast könnte ein Grund dafür sein, dass zwischen 100 m und 300 m Kommunikationsreichweite ein Paketverlust von über 20 % auftrat und über 300 m keine Kommunikation mehr möglich war. Unter diesen Bedingungen gaben die Autoren an, dass die größte Herausforderung für kooperatives Fahren Robustheit ist. Trotz der Abhängigkeit der Fahrzeuge



untereinander muss durch Rückfallebenen vermieden werden, dass mit Ausfall eines Fahrzeuges das ganze System zusammenbricht.

Auch Sawade et al. [158] haben 2018 erkannt, dass eine robuste Kommunikation für eine dezentrale kooperative Manöverplanung mit Abstimmung essenziell ist. Um dies zu erreichen, haben sie das „Collaborative Maneuver Protocol“ (CMP) mit der entsprechenden „Collaborative Maneuver Message“ (CMM) entwickelt. Das Konzept stützt sich auf einen verteilten Zustandsautomaten, der in jedem Fahrzeug vorhanden sein muss. Das CMP ermöglicht dann den Fahrzeugen eine Session zu erstellen und andere Fahrzeuge zu dieser Session einzuladen. Dies bedeutet, dass alle Fahrzeuge einer Session gemeinsam in einem initialen Zustand starten und fortan Zustandswechsel nur synchron nach einer Abstimmung durchführen. Um die Synchronität zu gewährleisten, wird über die CMM periodisch ein Heartbeat-Signal versendet, das den Hash der aktuellen Session des Ego-Fahrzeuges enthält. Sollte sich der Hash zweier Fahrzeuge unterscheiden oder die Heartbeat-Nachricht eines Fahrzeuges ausbleiben, so muss eine Resynchronisierung durchgeführt werden. Im initialen Zustand wird jedem Fahrzeug eine feste Rolle für den weiteren Verlauf der Session zugewiesen. Betrachten wir das Einfädelszenario auf der Autobahn, so könnte bspw. das Fahrzeug auf dem Beschleunigungsstreifen der Session mit der Rolle „Einfädelnder“ beitreten und das Fahrzeug auf der Autobahn mit der Rolle „Lückenersteller“. Sind alle eingeladenen Fahrzeuge der Session beigetreten und deren Rollen bestimmt, kann jeder Teilnehmer der Session eine Abstimmung für einen Zustandswechsel initiieren. Dafür wird eine CMM mit dem aktuellen und dem Wunschzustand versendet und sobald alle Teilnehmer der Session exakt denselben Wunschzustand versenden, wird synchron in diesen Zustand gewechselt. Zu einem Wunschzustand kann eine Payload gehören, die das Manöver weiter parametrisiert, und auf die sich alle Fahrzeuge mit dem Zustandswechsel einigen müssen. Für das Auffahrscenario könnte der nächste Zustand „Einfädeln vorbereiten“ heißen und die Payload die Position enthalten, an der der Spurwechsel durchgeführt werden soll. Jeder Zustand enthält rollenabhängige Aufgaben, sodass die Fahrzeuge, obwohl sie im gleichen Zustand synchronisiert sind, durch ihre unterschiedlichen Rollen unterschiedliche Aktionen durchführen. Während der „Lückenersteller“ bspw. die Aufgabe bekommt, die Lücke vor sich zu erstellen, kann der „Einfädelnde“ die Aufgabe bekommen zu beschleunigen. Die Autoren haben gezeigt, dass ihr Konzept selbst unter byzantinischen Netzwerkbedingungen Synchronität garantiert und funktionsbasierte Kooperation ermöglicht. Das heißt, dass das Konzept zwar generisch ist, es jedoch für jede kooperative Funktion wie „Einfädeln“, „Abbiegen“ oder „Platooning“ einen spezifischen verteilten Zustandsautomaten geben muss. Die Beschreibung des Manövers durch den Zustandsautomaten sollte auf einer möglichst abstrakten Ebene stattfinden, um innerhalb der Funktion wieder möglichst generisch zu werden. Damit ist das CMP besonders gut geeignet, um kooperative Manöver auf strategischer und taktischer Ebene abzustimmen, jedoch nicht für die operative Ebene, weil dort konkrete Trajektorien bestimmt werden müssen.

Aus diesem Grund haben Eiermann et al. [159] 2020 das CMP von Sawade et al. [158] für die strategische und taktische Ebene mit den MCM von Lehmann et al. [122] für die operative Ebene miteinander kombiniert, um einen kooperativen Spurwechsel zu planen. Ein verteilter Zustandsautomat mit drei Zuständen wurde entwickelt, um die Kooperationspartner zu identifizieren und sich auf den Bereich und den Zeitpunkt für den Spurwechsel zu einigen. Darauf basierend wurde ein MPC-Planer für die Trajektoriengenerierung verwendet, der die strategisch schon eingeleitete Kooperation über die MCM auf operativer Ebene fortführt. Umgesetzt in der Simulationsumgebung PHABMAX konnte gezeigt werden, dass das entwickelte System die Größe der Lücken um ca. 50 % erhöht und so ein sichereres, effizienteres und komfortableres Einscheren auf die gewünschte Spur zulässt. Die Übertragung der V2X-Nachrichten über ITS-

G5 wurde ebenfalls simuliert und die Kanallast ausgewertet. Neben der CMM und der MCM wurden zusätzlich CAM mit 10 Hz simuliert. Die Untersuchung zeigte, dass in einer aktiven Session das CMP ca. 800 Bytes/s pro Fahrzeug benötigt und damit Sessiongrößen von über 50 Fahrzeugen realisierbar sind, ohne die Kanallast an ihre Grenze zu bringen. Mit der Kombination des CMP und der Abstimmung durch MCM zeigten Eiermann et al. [159], dass Kooperation, die auf strategischer oder taktischer Ebene initiiert wurde, auf operativer Ebene weitergeführt werden kann. So existieren bereits zwei geeignete Konzepte für die dezentrale Manöverabstimmung, die für weitere Funktionen erweitert werden können und sich in den hierarchischen Manöverplaner eingliedern.

### **Dezentrale Planungsebene ohne Abstimmung**

Die Abstimmung von dezentral geplanten Manövern stellt die Bedingung, dass alle beteiligten Fahrzeuge kommunizieren können und denselben Standard für Protokolle und Nachrichten verwenden. Doch auch wenn keine Abstimmung durch V2X möglich ist, kann versucht werden, kooperativ zu planen. Insbesondere in Szenarien mit Mischverkehr, wenn hoch automatisierte Fahrzeuge auf von Menschen gesteuerte Fahrzeuge treffen, wird dies von Relevanz sein.

Burger et al. [160] stellten 2020 einen kooperativen Trajektorienplaner für mehrere Agenten basierend auf einem MPC Ansatz vor. Das Ego-Fahrzeug schätzt die Intentionen der anderen Verkehrsteilnehmer basierend auf der wahrgenommenen Historie der Fahrzeuge. Die Autoren nehmen an, dass jedes Fahrzeug immer nur genau einer Intention folgt, bspw. „Spurwechsel“. Basierend auf den geschätzten Interaktionen bestimmt das Ego-Fahrzeug für sich und alle umgebenden Fahrzeuge Trajektorien und bewertet diese. Um Kooperation zu erreichen, werden bei der Wahl der Trajektorienkombination die gemeinschaftlichen Kosten höher gewichtet als nur die Ego-Kosten. Wie beim MPC üblich wird daraufhin nur der erste Schritt der Planung durchgeführt und anschließend das Szenario neu bewertet. Die neu wahrgenommenen Aktionen der anderen Verkehrsteilnehmer werden wieder zur Bewertung ihrer Intentionen verwendet und können im Fall einer Kooperation zu der geschätzten Intention „Lücke erstellen“ führen. In ihren simulativen Experimenten, zeigten die Autoren, dass im Spurwechsel-Szenario kooperative Manöver geplant und durchgeführt werden konnten. Unklar ist, wie genau die Gewichtung für oder gegen eine Kooperation erfolgte. Außerdem ist die Methode stark abhängig von der korrekten Schätzung der Intentionen und der Annahme, dass jedes Fahrzeug die Kostenfunktionen für alle anderen Fahrzeuge kennt.

2016 stellten Lenz et al. [161] einen taktischen Manöverplaner vor, der durch die Verwendung von MCTS robuste Pläne liefern soll, selbst wenn die gegenseitigen Kostenfunktionen nicht genau bekannt sind. Wieder am Beispiel des Spurwechsels wurde demonstriert, dass je nach Wahl der Kooperationsbereitschaft altruistische bis egoistische Manöver geplant und durchgeführt wurden. Die Kooperationsbereitschaft lässt sich jedoch nicht abhängig von der Situation dynamisch bestimmen, sondern muss von vorneherein pauschal festgelegt werden. Kurzer et al. [162, 163] stellten 2018 ebenfalls zwei Konzepte zur dezentralen Manöverplanung ohne Abstimmung durch MCTS vor, die für den in den Szenarien untersuchten Spurwechsel kooperatives Verhalten erzeugten. Alle genannten Konzepte müssen aber mit der Annahme arbeiten, dass die beteiligten Fahrzeuge nicht naiv ihre eigenen Kosten optimieren, sondern die gemeinschaftlichen Kosten betrachten. Damit sind diese Ansätze nicht losgelöst von gemeinsamen Standards, bzw. der gemeinsamen Übereinkunft, generell kooperativ zu handeln.

Existiert diese Übereinkunft nicht, können kooperative Manöverplaner verwendet werden, die auf Spieltheorie basieren, so wie 2020 von Le Cleach et al. vorgestellt [164]. Ziel ist es ein Nash

Gleichgewicht zu erzeugen, also die eigenen Entscheidungen so zu wählen, dass sie unabhängig von den Strategien der anderen Fahrzeuge zu den geringsten Kosten führen. Dies führt generell zu einem „vorsichtigen“ Fahren, weil bspw. während eines Einfädelszenarios das Fahrzeug auf der Autobahn damit rechnen muss, dass der Einfädelnde einen „dreisten“ Spurwechsel durchführt, der das Fahrzeug auf der Autobahn zu einer starken Bremsung zwingt. Daher wird das Fahrzeug auf der Autobahn proaktiv die Geschwindigkeit verlangsamen, bis die Intention des Einfädelnden, vor oder nach ihm einzufädeln, genauer bestimmt werden kann. Das Verlangsamen kann so als Kooperationsangebot wahrgenommen werden, was den Einfädelnden darin bestärkt, den Spurwechsel vor dem verlangsamenen Fahrzeug durchzuführen. Jedoch ist zusätzlich der Fall möglich, dass das Kooperationsangebot nicht verstanden, oder nicht angenommen wird. Das Fahrzeug auf der Autobahn müsste daraufhin wieder beschleunigen und hätte damit, ohne dass eine Kooperation zustande gekommen ist, höhere Kosten als ohne Kooperationsangebot.

Ohne Abstimmung über V2X, ja sogar ohne gemeinsame Einigung kooperativ zu fahren, lässt sich Kooperation dezentral planen, jedoch basieren die Ansätze stark auf der Abschätzung, wie die anderen Verkehrsteilnehmer sich wahrscheinlich verhalten. Die damit verbundenen Ungenauigkeiten und ungenutzten Kooperationsangebote können aber zu Missverständnissen führen und im schlimmsten Fall die Manöverkosten sogar erhöhen.

## 2.5 Lkw-Assistenzsysteme zur Längsregelung

Neben den klassischen Assistenzsystemen, wie dem Notbrems- und Spurhalteassistent, die ebenfalls im Pkw Anwendung finden, gibt es verschiedene Lkw-spezifische Assistenzsysteme, von denen im Folgenden zwei genauer vorgestellt werden. Zum einen den GPS-Tempomat, der sich bereits bei vielen Herstellern etabliert hat, und zum anderen Platooning, eine kooperative Fahrweise, um Kraftstoff zu sparen, die derzeit intensiv erprobt wird.

### 2.5.1 GPS-Tempomat

Der GPS-Tempomat ermöglicht eine kraftstoffeffiziente Fahrweise durch die Anpassung der Geschwindigkeit an die kommende Straßentopologie. Der Fahrer stellt dafür eine Wunschgeschwindigkeit, bspw. 80 km/h, und eine Hysterese ein, innerhalb der das Assistenzsystem die Geschwindigkeit variieren kann, bspw.  $\pm 5$  km/h. Dies würde in einer min.-Geschwindigkeit von 75 km/h und max.-Geschwindigkeit von 85 km/h resultieren. Wie Abbildung 2.13 darstellt, kann vor einer Steigung die Geschwindigkeit erhöht werden, um ein Rückschalten an der Steigung zu verhindern. Vor der Kuppel beginnt der Lkw auszurollen, um mit der min.-Geschwindigkeit über die Kuppel zu rollen und anschließend im Gefälle durch die Hangabtriebskraft auf die max.-Geschwindigkeit zu beschleunigen. Je nach Gefälle kann sogar die max.-Geschwindigkeit am Ende des Gefälles überschritten werden, um Geschwindigkeit für den nächsten Abschnitt mitzunehmen [165].

Für die Wahl der Geschwindigkeit haben Passenberg, Kock et al. [166–168] 2008 einen MPC Ansatz entwickelt, der folgende Eingangsgrößen benötigt:

- Straßentopologie über die nächsten 3 km beginnend von der aktuellen Position
- Motormodell und Gesamtmasse des Lkw
- Eingestellte Wunschgeschwindigkeit und Hysterese

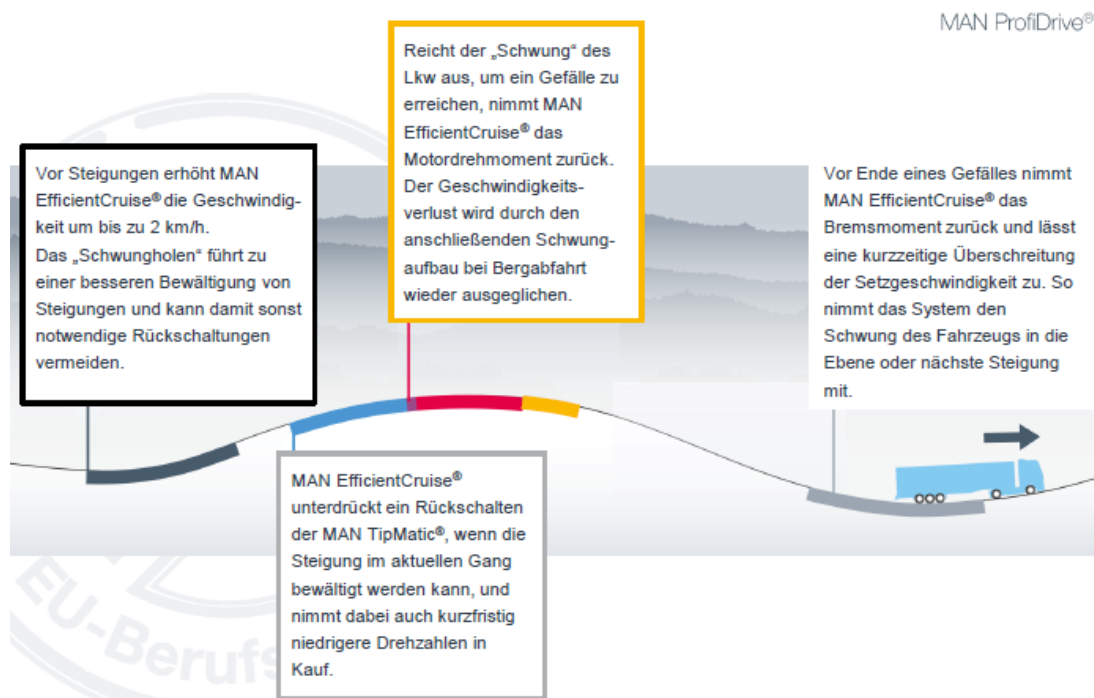


Abbildung 2.13: Funktionsprinzip eines GPS-Tempomaten [169].

Die zu optimierenden Größen sind die gesamten Betriebskosten, sodass bspw. die erhöhte Arbeitszeit des Fahrers mitberücksichtigt wird, wenn der Lkw durch eine kraftstoffeffiziente Fahrweise langsamer fährt. Ihre Simulation zeigt auf einer 47 km langen Strecke mit Steigungen von  $\pm 5\%$  eine Kraftstoffeinsparung von 1,5 l und einen Zeitverlust von 94 s. Dies resultiert in einem gestiegenen Profit von 0,68 € durch den GPS-Tempomaten [168]. Doch nicht nur in Simulation, sondern auch in Realfahrten konnte die positive Wirkung von GPS-Tempomaten bestätigt werden [170].

Aktuelle GPS-Tempomaten gehen so weit, dass sie ebenfalls auf flachen Streckenabschnitten die Geschwindigkeit nach dem Pulse-and-Glide (PnG) Prinzip variieren [171, 172]. Der Lkw wird im effizienten Motorbereich beschleunigt (Pulse) und anschließend rollen gelassen (Glide), wodurch ein Sägezahnprofil im Geschwindigkeitsverlauf gebildet wird. Wie von Li et al. [173, 174] gezeigt wurde, ermöglicht diese Art von periodischer Geschwindigkeitsveränderung eine theoretische Kraftstoffersparnis von bis zu 8 % und ist besonders für Lkw relevant, weil bei steigender Geschwindigkeit eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit effizienter wird. Anders als bei der wählbaren Hysterese von  $\pm 3$  km/h bis etwa  $\pm 10$  km/h für das Überrollen von Kuppeln, wird die Geschwindigkeit bei PnG im Serieneinsatz nur um etwa  $\pm 3$  km/h variiert [175], um eine Behinderung des Verkehrsflusses zu vermeiden. In diesem realen Anwendungsfall für Lkw führt PnG zu einer erwartbaren Kraftstoffeinsparung von ca. 0,5 % [176].

## 2.5.2 Platooning

Beim Platooning nutzen die Lkw den Windschatteneffekt aus, indem sie mit verringerten Abständen hintereinanderfahren. Dadurch erreichen beide Fahrzeuge, aber insbesondere das hintere, einen geringeren Luftwiderstand, was zu einer Einsparung von Kraftstoff führt [177]. Je nach Abstand können so bis zu 10 % Kraftstoff eingespart werden [178]. Damit diese geringen Abstände möglich werden, müssen Informationen über V2X ausgetauscht werden (Abbildung 2.14). Insbesondere die Ankündigung von Bremsmanövern des Vorderfahrzeuges ist nötig, damit das hintere Fahrzeug automatisiert eine Bremsung einleiten kann. Platooning gehört damit zu den ersten kooperativen Fahrmanövern, die durch V2X in Zukunft Realität werden können. Zahng et al. [179] gaben 2020 einen ausführlichen Überblick über Lkw-Platooning und dessen Potenzial. Sie betonen, dass trotz vieler Forschung auf diesem Gebiet bislang nur wenige Untersuchungen unter realen Bedingungen vorliegen. Die erste Untersuchung dieser Art kam 2018 von der MAN Truck and Bus SE in Kooperation mit DB Schenker in dem Projekt „EDDI“ [131]. Zwei mit dem Assistenzsystem ausgestattete Lkw fahren mit 80 km/h und ca. 15 m Abstand insgesamt 35.000 km über die A9 zwischen München und Nürnberg. Obwohl der GPS-Tempomat während den Fahrten nicht genutzt wurde, konnte eine Kraftstoffersparnis von 1,3 % für den vorderen und 3-4 % für den hinteren Lkw erreicht werden.

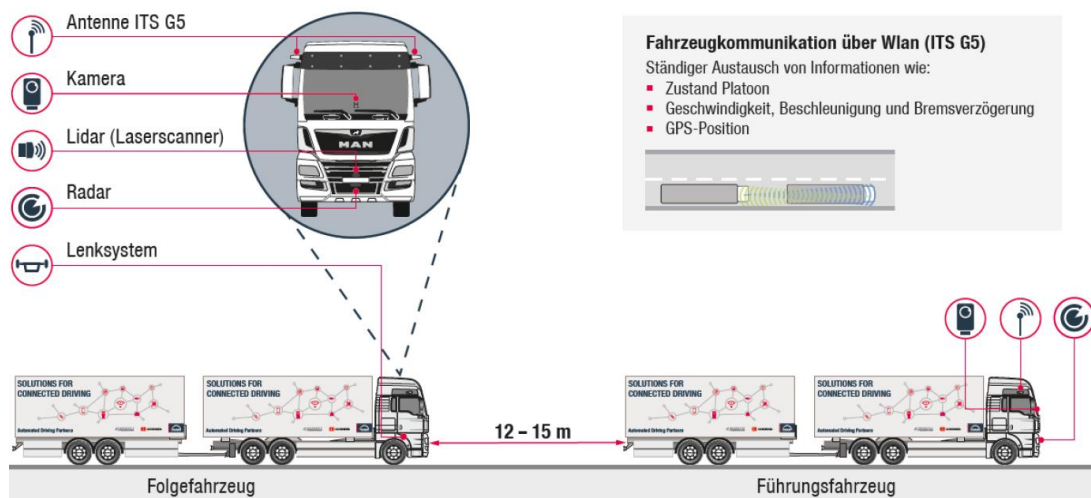


Abbildung 2.14: Veranschaulichung des Platooning-Konzepts [131].



# 3 Forschungsfrage und Lösungsansatz

In diesem Kapitel wird die Forschungsfrage aus dem aktuellen Stand der Wissenschaft hergeleitet und anschließend ein passender Lösungsansatz skizziert, der in den folgenden Kapiteln umgesetzt und evaluiert wird.

## 3.1 Herleitung der Forschungsfrage

Das Lkw-Überholmanöver ist geprägt von kleinen Differenzgeschwindigkeiten zwischen Lkw und Lkw sowie großen Differenzgeschwindigkeiten zwischen Lkw und Pkw. Zusammen mit der langen Dauer von bis zu 45 s und dem Konflikt zwischen Lkw-Fahrer und Pkw-Fahrer um die Überholspur, wird das Lkw-Überholmanöver zu einem komplexen Szenario. Dies resultiert in einer erhöhten Anfälligkeit für Verkehrsunfälle und stressbedingter Arbeitsausfälle, was beides zu einem gesamtgesellschaftlichen Schaden führt. Des Weiteren trägt die Belastung des Lkw-Fahrers dazu bei, dass der Beruf des Lkw-Fahrers als unattraktiv wahrgenommen wird, was den ohnehin akuten Fahrermangel verstärkt. Es ist klar, dass wir alle direkt abhängig sind von einem funktionierenden Gütertransport, der in Deutschland überwiegend durch Lkw geleistet wird. Die COVID-19-Pandemie hat allen vor Augen geführt, wie anfällig Lieferketten sind und wie wichtig der Lkw-Verkehr für deren Erhalt ist. Kurzfristig muss daher in Forschungsbemühungen investiert werden, um den Job des Lkw-Fahrers attraktiver und nachhaltiger zu gestalten.

Mit den Entwicklungen in Richtung vollautomatisierten Fahrens wird sich in weiterer Zukunft aber die Rolle des Lkw-Fahrers verändern. Der Hub-to-Hub Verkehr für Lkw, insbesondere die Autobahnabschnitte, gelten als die Operational-Design-Domain für welche als erstes Level 4 automatisiertes Fahren profitabel Anwendung finden kann. Langfristig müssen, mit dem Wegfall des Fahrers als derzeitigen Treiber von Kooperation, Konzepte erarbeitet und etabliert werden, wie Kooperation unter automatisierten Fahrzeugen und im Mischverkehr umgesetzt werden kann.

Mit einer Entwicklung eines Assistenzsystems für kooperative Lkw-Überholmanöver lassen sich die Herausforderung aus dem kurzfristigen und dem langfristigen Ziel angehen. Doch die Betrachtung der aktuellen Forschungslandschaft hat verdeutlicht, dass beim Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn in der Vergangenheit nicht untersucht wurde, wie dieses Manöver optimiert und kooperativ geplant werden kann, sondern lediglich, ob es verboten werden soll. Da allerdings ein Konsens darüber besteht, dass ein Verbot nicht allgemein sinnvoll ist, ist nun die Zeit gekommen die Optimierung voranzutreiben. Da Kooperation über V2X großes Potenzial birgt, wird die Forschungsfrage wie folgt definiert:

**„Wie kann mit V2X das Lkw-Überholmanöver in Hinblick auf Sicherheit, Effizienz und Arbeitsbelastung optimiert werden?“**

Der folgende Abschnitt erläutert, welche Lösungsansätze verfolgt wurden, um diese Forschungsfrage zu beantworten.

## 3.2 Lösungsansatz

Um die Forschungsfrage zu beantworten, soll ein Fahrerassistenzsystem entwickelt werden, welches das Lkw-Überholmanöver bezüglich Zeit und Kraftstoffverbrauch optimiert und zusätzlich die Entscheidung übernimmt, ob bzw. wie das Überholmanöver durchgeführt werden soll. Für die Entscheidung sollen jedoch nicht nur die eigenen Kosten bewertet werden, sondern die Kosten aller beteiligten Fahrzeuge berücksichtigt werden. Außerdem soll, wenn eine Entscheidung zum Überholen getroffen wird, diese mit den anderen Verkehrsteilnehmern kooperativ abgestimmt werden. Für einen Lkw-Fahrer, der die Anweisungen des Überholassistenten umsetzt, bedeutet dies Gewissheit darüber, dass das Manöver abgesichert ist und im gegenseitigen Einvernehmen stattfindet. Neben der gestiegenen Effizienz sollen so zusätzlich Unfälle und Konflikte mit anderen Fahrzeugen verringert werden. Das Anzeige- und Bedienkonzept steht jedoch nicht im Fokus. Vielmehr soll der Fahrer in den Untersuchungen nur als „Regler“ dienen, sodass der Überholassistent in einer nächsten Instanz für das automatisierte Fahren übernommen werden kann.

Da kurzfristig keine zentrale Manöverplanung vorstellbar ist, weil die notwendige Infrastruktur nicht existiert und die Fahrzeuge samt Lkw-Fahrer fremdgesteuert wären, soll das Überholmanöver auf der dezentralen Planungsebene mit Abstimmung erfolgen. Für die Abstimmung soll ITS-G5 (IEEE 802.11p) verwendet werden, weil diese Technologie bereits erprobt und vor allem verfügbar ist. Die darüber ausgetauschten Nachrichten sollen sich an etablierte Standards halten, um eine Interoperabilität mit anderen Systemen zu ermöglichen. Die Manöverplanung selbst soll auf der strategischen Ebene ablaufen, damit lange Überholmanöver bis zu 45 s koordiniert werden können und der Start eines Überholmanövers in bis zu 10 km Entfernung liegen kann. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die geplanten Funktionsanforderungen, Implementierung und Erprobung.

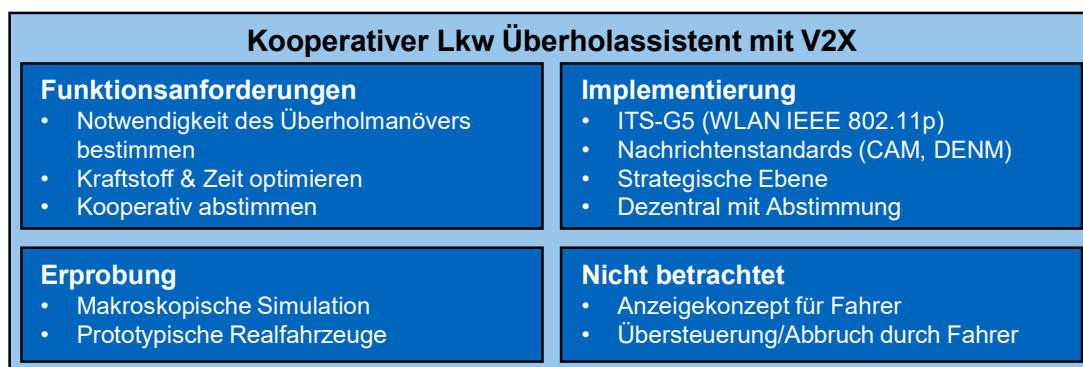


Abbildung 3.1: Übersicht über das geplante Assistenzsystem als Lösungsansatz.

### 3.2.1 Vorgehen

Abbildung 3.2 zeigt die wichtigsten Schritte beim Vorgehen für die Entwicklung, Erprobung und Beurteilung des kooperativen Lkw-Überholassistenten. Zu Beginn wird in Abschnitt 4.1 eine Manöverplanung mit vier Ansatzpunkten vorgestellt. Wie das so geplante Manöver kooperativ abgestimmt werden kann, wird in Abschnitt 4.2 ausgearbeitet. Anschließend werden beide Komponenten in der Implementierung des kooperativen Lkw-Überholassistenten in Abschnitt 4.3.2 zusammengefügt. Für die Untersuchungen werden außerdem eine Simulationsumgebung in



Abschnitt 4.4.1 erstellt und zwei Versuchsträger für Realversuche in Abschnitt 4.4.2 aufgebaut. Der darauffolgende Abschnitt 5 befasst sich mit sechs Untersuchungen, in denen der kooperative Lkw-Überholassistent entweder in der Simulation oder in den Versuchsträgern erprobt wird, und stellt auch die entsprechenden Ergebnisse dar. Alle entwickelten Komponenten, die durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnisse fließen anschließend in eine Diskussion in Abschnitt 6 ein, um den kooperativen Lkw-Überholassistenten abschließend zu bewerten.

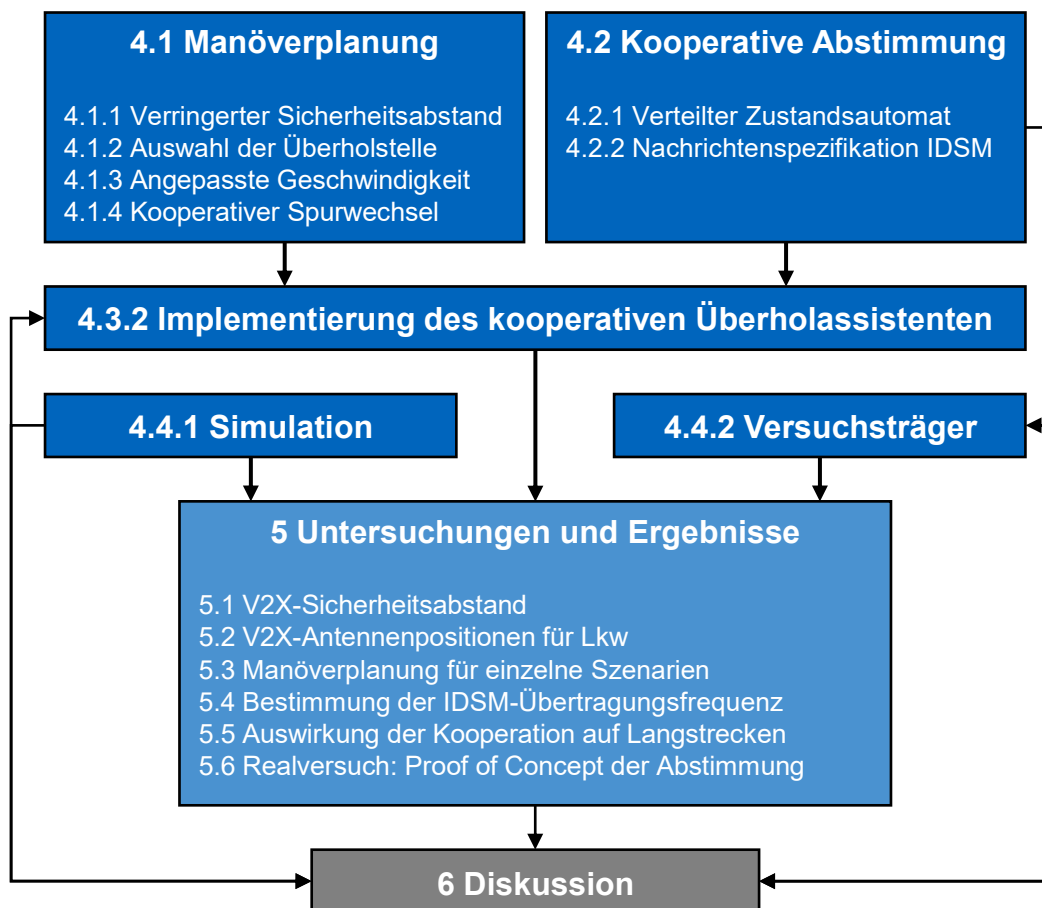


Abbildung 3.2: Vorgehen zur Entwicklung, Erprobung und Bewertung des kooperativen Lkw-Überholassistenten.



# 4 Methodik und Implementierung

Dieses Kapitel legt in vier Abschnitten dar, welche Methoden für die Umsetzung und die Erprobung des Lkw-Überholassistenten verwendet und wie sie implementiert wurden. Der erste Abschnitt befasst sich mit der kooperativen Manöverplanung für den Überholvorgang und zeigt auf, welche Ansätze verfolgt wurden, um die Effizienz und Sicherheit für alle Beteiligten zu steigern. Der nächste Abschnitt erklärt, wie die Abstimmung der geplanten Manöver über V2X zwischen den Fahrzeugen abläuft, indem die notwendigen Protokolle, Nachrichten sowie technischen Voraussetzungen aufgezeigt werden. Im dritten Abschnitt folgen Details zur Simulationsumgebung, die für die ersten Untersuchungen des Überholassistenten aufgebaut und verwendet wurde. Der letzte Abschnitt befasst sich mit den Versuchsträgern, in denen der Überholassistent mit entsprechender Hardware eingebaut wurde, um so einen Proof of Concept im Realfahrzeug durchführen zu können.

## 4.1 Manöverplanung

Die größte Herausforderung für das Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn ist die lange Dauer, die zu einer Beeinträchtigung des Verkehrsflusses auf der Überholspur sorgt. Diese Überholdauer wird durch zwei Faktoren beeinflusst: (1) Die relative Überholdistanz und (2) die Differenzgeschwindigkeit zwischen den Lkw. Die relative Überholdistanz setzt sich zusammen aus den Fahrzeuglängen und den Sicherheitsabständen. Während die Fahrzeuglängen nicht beeinflussbar sind, können die Sicherheitsabstände, ähnlich wie beim Platooning, reduziert werden, um die benötigte relative Überholdistanz zu verringern. Der erste Ansatz für ein optimiertes Überholmanöver ist also, den Sicherheitsabstand während des Manövers zu verringern und wird in Abschnitt 4.1.1 „Verringerter Sicherheitsabstand“ detailliert erläutert. Eine höhere Differenzgeschwindigkeit trägt ebenfalls dazu bei, dass das Überholmanöver schneller absolviert werden kann. Eine Möglichkeit dafür ist die aktive Anpassung der Geschwindigkeit, bspw. durch Beschleunigen des Überholenden und Verzögern des Überholten. Durch diese Anpassungen, die in Abschnitt 4.1.3 vorgestellt werden, können Kosten in Form von Zeit und Kraftstoffverbrauch entstehen, die in Relation zu den gesamten Kosten gesetzt werden müssen. Bedingt durch den GPS-Tempomaten und die Topologie variieren die Geschwindigkeiten der Lkw, wodurch an unterschiedlichen Stellen auf der Autobahn unterschiedliche Differenzgeschwindigkeiten auftreten können. Um diese natürlichen Schwankungen auszunutzen, wird in Abschnitt 4.1.2 versucht, durch eine geeignete Auswahl der Überholstelle das Überholmanöver zu beschleunigen. Sobald die Überholstelle feststeht, kann mit dem rückwärtigen Verkehr ein kooperativer Spurwechsel geplant werden, sodass insbesondere der Spurwechsel auf die Überholspur tatsächlich durchführbar ist. Konzepte dafür werden in Abschnitt 4.1.4 vorgestellt. Anschließend werden diese vier Ansätze kombiniert und die so generierten Manöver bewertet, um das beste Lkw-Überholmanöver für alle Beteiligten auszuwählen, oder sich gegen ein Überholmanöver zu entscheiden.

### 4.1.1 Verringerter Sicherheitsabstand

Dieser Abschnitt basiert auf Paper [180].

Die Distanz, die der überholende Lkw (Lkw A) relativ zum überholten Lkw (Lkw B) überwinden muss, setzt sich, wie Abbildung 4.1 zeigt, aus vier Komponenten zusammen:

- Der Sicherheitsabstand vor dem ersten Spurwechsel:  $SA_{pre}$
- Die Fahrzeuglänge des überholten Lkw B:  $l_B$
- Der Sicherheitsabstand vor dem zweiten Spurwechsel:  $SA_{post}$
- Die Fahrzeuglänge des überholenden Lkw A:  $l_A$

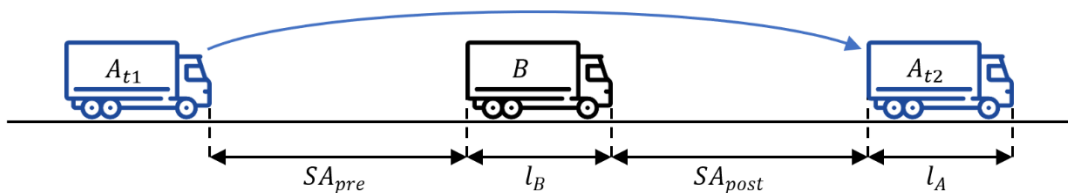


Abbildung 4.1: Vier Komponenten der relativen Überholdistanz.

Die Fahrzeuglängen  $l_A$  und  $l_B$  betragen je nach Fahrzeugtyp 16,5 m oder 18,75 m [27], wobei wir im Folgenden von Letzterem ausgehen. Mit dem gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsabstand von 50 m ab 50 km/h [132] ergibt dies eine relative Überholdistanz von 137,5 m. Wie in Abschnitt 2.1.1 dargelegt, wird der Sicherheitsabstand von den Lkw-Fahrern aber häufig unterschritten, was zu sicherheitskritischen Situationen führt. In Abschnitt 2.5.2 wurde vorgestellt, wie beim Platooning der Sicherheitsabstand zwischen den Lkw jedoch durch die Verwendung von V2X sicher unterschritten werden kann. Dieses Konzept kann ebenfalls für das kooperative Lkw-Überholmanöver angewendet werden. Statt des normalen Sicherheitsabstandes von 50 m soll also ein verringerter V2X-Sicherheitsabstand (VSA) verwendet werden. Dies ist der technisch minimal notwendige Abstand zwischen den Lkw, sodass im Fall einer Vollbremsung des vorausfahrenden Lkw der hintere Lkw nach dem Empfangen einer V2X-Nachricht ebenfalls mit einer Vollbremsung reagieren kann, ohne dass es zu einer Kollision kommt.

Um den VSA zu bestimmen, müssen die Bremswege (BW) und Reaktionswege (RW) näher betrachtet werden. Abbildung 4.2 zeigt wie sich so der VSA errechnen lässt. Als der vordere Lkw sich an Position A befindet, tritt ein Grund für eine Vollbremsung ein, der durch den Lkw erkannt wird. An Position B hat der vordere Lkw auf den Grund reagiert, leitet das Bremsmanöver ein und versendet ein Notbremssignal. Bis dieses Signal bei dem hinteren Lkw angekommen ist und verarbeitet wurde, befindet dieser sich an Position C und leitet das eigene Bremsmanöver ein. An Position D kommt der vordere Lkw zum Stehen und an Position E der hintere. Um eine Kollision zu vermeiden, muss sich Position E vor Position D befinden, weshalb der VSA nötig ist. Die Formel für den VSA ist:

$$RW_{hinten} + BW_{hinten} - BW_{vorne} = VSA \tag{4.1}$$

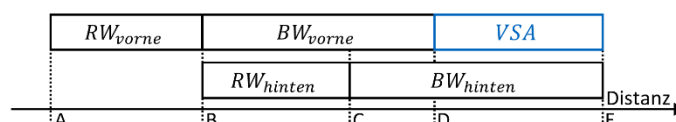


Abbildung 4.2: Zusammenhang zwischen Bremsweg, Reaktionsweg und V2X-Sicherheitsabstand.

## Reaktionsweg

Der Reaktionsweg ist die Distanz, die vom hinteren Lkw in der Zeit zwischen Einleiten der Bremsung des vorderen Lkw bis zum Einleiten der Bremsung des hinteren Lkw, zurückgelegt wird. Damit ist der Reaktionsweg proportional von der Reaktionszeit und der Fahrzeuggeschwindigkeit abgänglich. Die Reaktionszeit lässt sich wiederum in zwei additive Komponenten aufteilen: Die Übertragungszeit des Bremssignals über V2X und die Planungszeit, um die empfangene Nachricht zu verarbeiten und ein Bremsmanöver einzuleiten.

Für die Übertragungszeit muss zwischen periodisch und eventbasiert verschickten Nachrichten unterschieden werden. Wird bspw. die mit 10 Hz versendete CAM verwendet, kann im Worstcase bereits eine Verzögerung von 100 ms auftreten, bevor die Nachricht überhaupt versendet wird. Daher sollten entweder hohe Frequenzen oder, wie im Folgenden, eventbasierte Nachrichten wie die DENM verwendet werden. Anschließend muss die Wahrscheinlichkeit betrachtet werden, dass die Nachricht tatsächlich vom hinteren Lkw empfangen wird. Für ITS-G5 liegt die PDR wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben bei 95 % bis 99,99 % [81], jedoch wird für Platooning eine PDR von 99,999 % empfohlen [181], sodass eine wiederholte Übertragung notwendig ist, um die PDR zu erhöhen. Die tatsächliche Sendeverzögerung auf physikalischer Ebene liegt zwischen 1 ms und 10 ms [81–83], weshalb für die weitere Worstcase Betrachtung 10 ms angenommen werden. Für die Planungszeit einer Notfalltrajektorie mit Vollbremsung geben Garba et al. [91] an 50 ms bis 100 ms zu benötigen.

Als Worstcase Abschätzung des Reaktionsweges kann also eine Verzögerung von 100 ms angenommen werden und eine mehrfache Übertragung der V2X-Nachricht mit 10 ms Verzögerung. Unter Berücksichtigung der Generierungszeit für die V2X-Nachricht und eines zusätzlichen Puffers, wird im Folgenden eine Reaktionszeit von 200 ms angenommen, was zu folgender Formel für den Reaktionsweg in Metern führt, mit  $v$  in km/h:

$$RW(v) = 0,2 \frac{v}{3,6} \quad (4.2)$$

Bei Geschwindigkeiten bis 90 km/h beträgt der Reaktionsweg folglich maximal 5 m und ist, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird, um den Faktor 4-10 kleiner als der Bremsweg. Da die Berechnung des Bremsweges gleichzeitig mit Ungenauigkeit in der Größenordnung des Reaktionsweges verbunden ist, lohnt sich eine genauere Betrachtung des Reaktionsweges erst, wenn der Bremsweg genauer bestimmt werden kann.

## Bremsweg

Der Bremsweg ist die Distanz, die zwischen Aktivierung der Bremse und Stillstand zurückgelegt wird. Wie Gl. (4.1) zeigt, ist für den VSA nicht der absolute Bremsweg relevant, sondern der Unterschied zwischen den Bremswegen der beiden Lkw. Für viele der externen Faktoren wie Wind, Reibwert und Steigung wird daher angenommen, dass sie für beide Lkw identisch sind. Die größten Faktoren für die Bestimmung des Bremsweges sind das Gewicht  $m$  und die Geschwindigkeit  $v$ . Simulationsreihen in TruckMaker von IPG [182] sowie eine Literaturrecherche zeigen Bremswege zwischen 22,8 m bei 70 km/h und 14 t bzw. 44,1 m bei 90 km/h und 44 t [180, 183]. In diesen Ergebnissen ist, wie in Simulationen üblich, jedoch kein Prozessrauschen enthalten und es ist anzunehmen, dass unter realen Bedingungen Abweichungen auftreten werden. Aus mehreren Serien von Lkw-Vollbremsungen unter möglichst konstanten Bedingungen wurde daher eine Standardabweichung von  $5 \pm 2\%$  abgeleitet [184]. Unter der Annahme der

Normalverteilung liegen 99,99 % der Bremswege im 3,3 Sigma-Intervall von  $\pm 16,5\%$ . Neben der Masse und der Geschwindigkeit gibt es noch weitere Faktoren wie Reifentyp, Alterung des Bremssystems oder Temperatur, die den Bremsweg beeinflussen, aber schwer zu modellieren sind [177]. Um diese Faktoren pauschal zu berücksichtigen, wird das Intervall für mögliche Abweichung verdoppelt auf  $\pm 33\%$ . Damit entsprechen die minimalen und maximalen Bremsverzögerungen  $-4,5 \text{ m/s}^2$  bzw.  $-8,5 \text{ m/s}^2$  und sind damit deckungsgleich mit der Literatur und den gesetzlichen Voraussetzungen [177, 185].

Die Bremswege aus den Simulationsreihen in TruckMaker wurden für die weitere Verwendung durch ein Polynom zweiten Grades approximiert. Alle weiteren Berechnungen des Bremsweges in Meter beziehen sich auf folgende Formel mit  $v$  in km/h und  $m$  in Tonnen (Koeffizienten sind für bessere Darstellung gerundet):

$$\begin{aligned}
 BW(v, m) &= 4,815 - 0,035v - 0,285g + 0,005vm + 0,004v^2 + 0,002m^2 & (4.3) \\
 BW_{\min}(v, m) &= 0,67 BW(v, m) & BW_{\max}(v, m) = 1,33 BW(v, m)
 \end{aligned}$$

## V2X-Sicherheitsabstand

Während beim Platoon alle Lkw mit der gleichen Geschwindigkeit fahren, müssen beim Lkw-Überholmanöver unterschiedliche Geschwindigkeiten bedacht werden. Wenn Lkw A den langsamer fahrenden Lkw B überholt, müssen zwei VSA berechnet werden:  $VSA_{\text{pre}}$  vor dem ersten Spurwechsel und  $VSA_{\text{post}}$  nach dem zweiten Spurwechsel. Die Kombination aus Reaktionsweg und Bremsweg ergeben dafür folgende Formeln als Zwischenschritt:

$$\begin{aligned}
 VSA_{\widehat{\text{pre}}}(v_A, m_A, v_B, m_B) &= RW(v_A) + BW_{\max}(v_A, m_A) - BW_{\min}(v_B, m_B) & (4.4) \\
 VSA_{\widehat{\text{post}}}(v_A, m_A, v_B, m_B) &= RW(v_B) + BW_{\max}(v_B, m_B) - BW_{\min}(v_A, m_A)
 \end{aligned}$$

So wird die Worstcase Annahme getroffen, dass jeweils der vordere Lkw den kürzest und der hintere Lkw den längst möglichen Bremsweg hat. Rein rechnerisch sind so jedoch negative Sicherheitsabstände möglich, wenn der Bremsweg des vorderen Lkw im Vergleich zum hinteren Lkw deutlich länger ist. In der Praxis darf der VSA jedoch nie den Reaktionsweg des hinteren Lkw unterschreiten, weil während dieser Zeit der hintere Lkw ungebremst auf den bereits verzögernden vorderen Lkw auffährt. Als finale Formel für den VSA gilt:

$$\begin{aligned}
 VSA_{\text{pre}}(v_A, m_A, v_B, m_B) &= \max\left(VSA_{\widehat{\text{pre}}}(v_A, m_A, v_B, m_B), RW(v_A)\right) & (4.5) \\
 VSA_{\text{post}}(v_A, m_A, v_B, m_B) &= \max\left(VSA_{\widehat{\text{post}}}(v_A, m_A, v_B, m_B), RW(v_B)\right)
 \end{aligned}$$

### 4.1.2 Auswahl der Überholstelle (Passiv)

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [23]*

Durch die Topologie und die damit durch den GPS-Tempomaten bestimmte oder durch die Motorleistung limitierte Geschwindigkeit können unterschiedliche Differenzgeschwindigkeiten zwischen den Lkw auftreten. Um eine geeignete Stelle mit möglichst großer Differenzgeschwindigkeit zu identifizieren, werden die Geschwindigkeitsprofile beider Lkw benötigt. Dafür muss ein GPS-Tempomat, wie in Abschnitt 2.5.1 beschrieben, implementiert werden, der aus den folgenden Inputdaten ein Geschwindigkeitsprofil über das weitere Streckenprofil berechnet:

- Steigungsverlauf der Straße über die kommenden 10 km
- Lkw mit Position, Masse und Motormodell
- Wunschgeschwindigkeit  $v_w$  mit positiver und negativer Hysterese  $h_p$  und  $h_n$

Zur Berechnung des Geschwindigkeitsprofils wird zuerst der Steigungsverlauf der Straße in fallende (Steigung  $< -0,5\%$ ), flache ( $-0,5 \leq \text{Steigung} \leq 0,5\%$ ) und steigende (Steigung  $> 0,5\%$ ) Abschnitte eingeteilt. Flachen und steigenden Abschnitten wird die konstante Geschwindigkeit  $v_w$  zugeordnet. Sollte jedoch die Motorisierung nicht ausreichen, um an einer Steigung die Geschwindigkeit  $v_w$  zu erreichen oder zu halten, wird diesem Abschnitt das maximal mögliche Geschwindigkeitsprofil zugeordnet. In fallenden Abschnitten wird ausgehend von der Startgeschwindigkeit in dem Abschnitt geprüft, welche Geschwindigkeit durch die Hangabtriebskraft erreicht werden kann. Liegt diese über  $v_w$ , so wird die erreichbare Rollgeschwindigkeit gewählt, jedoch bei maximal  $v_w+h_p$  begrenzt. Sollte die Hangabtriebskraft nicht ausreichen, um das Fahrzeug über  $v_w$  zu beschleunigen, wird der effizienteste Motorbetriebspunkt verwendet, um auf genau  $v_w$  als Zielgeschwindigkeit zu beschleunigen und dieser Verlauf als Geschwindigkeitsprofil für den Abschnitt verwendet.

Als nächstes müssen die Übergänge zwischen den unterschiedlichen Abschnitten genauer betrachtet werden. Wenn ein flacher oder fallender Abschnitt in einen steigenden Abschnitt übergeht, wird vor dem Übergang effizient auf  $v_w+3$  km/h beschleunigt, sofern die Zielgeschwindigkeit durch das Gefälle nicht ohnehin höher ist. Gegen Ende eines steigenden Abschnittes wird so ausgerollt, dass genau zum Ende die Geschwindigkeit  $v_w-h_n$  erreicht wird. Die Anpassung der Endgeschwindigkeit eines Abschnittes zur Zielgeschwindigkeit des folgenden Abschnittes erfolgt nach Möglichkeit immer durch Ausrollen oder effizientes Beschleunigen.

Tabelle 4.1 fasst die Eckpunkte für die Berechnung des Geschwindigkeitsprofils zusammen. Die so bestimmten Profile spiegeln die unter Berücksichtigung der Ladung, Motorisierung und Topologie real fahrbaren Geschwindigkeiten wider, inklusive spritsparender Maßnahmen.

Tabelle 4.1: Zielgeschwindigkeiten für die Berechnung der Geschwindigkeitsprofile.

Abschnitt / Übergang	Zielgeschwindigkeit
„Fallend“	$v_w+h_p$ , wenn Hangabtriebskraft ausreicht
„Flach“	$v_w$
„Steigend“	$v_w$ , wenn Motorisierung es zulässt
Vor „Steigend“	Effizient auf $v_w+3$ km/h beschleunigen
Nach „Steigend“	Auf $v_w-h_n$ ausrollen

Ist das Geschwindigkeitsprofil für beide Lkw bestimmt, kann ausgehend von der aktuellen Position der Lkw berechnet werden, wann der hintere Lkw so weit aufgeholt hat, dass der Abstand zwischen den Lkw dem Sicherheitsabstand (50 m oder VSA) entspricht. Sollte dieser Fall nie eintreten, ist kein Überholmanöver notwendig. Falls dieser Abstand aber erreicht wird, so ist die Position, an der sich der hintere Lkw zu dem Zeitpunkt befindet, die erste mögliche Stelle für einen Start des Überholmanövers. Von dieser Stelle aus können für alle weiteren Stellen Überholmanöver durchsimuliert werden und der Einfluss auf die Kosten der beteiligten Verkehrsteilnehmer bestimmt werden.

Damit ein späterer Überholzeitpunkt erreicht wird, muss der hintere Lkw seine Geschwindigkeit aktiv vermindern, um so ein frühzeitiges Auffahren auf den vorderen Lkw und damit einhergehendes Bremsen zu vermeiden. Während eine verminderte Geschwindigkeit mit einer Kraftstoffeinsparung einhergeht, bedeutet dies jedoch einen Zeitverlust für den hinteren Lkw und macht es notwendig, wieder auf Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen, sobald die gewünschte Überholstelle erreicht wird. Von dort aus wird die Überholdauer bestimmt, also die Zeit, die der hintere Lkw benötigt, um die relative Überholdistanz zu überwinden. Während der vordere Lkw in diesem Ansatz unvermindert mit seiner Wunschgeschwindigkeit fährt, entstehen keine veränderten Kosten für ihn, weshalb es als „passive Kooperation“ kategorisiert wird [54]. Die Überholdauer hat jedoch Auswirkungen darauf, wie viel Zeitverlust für die Pkw auf der Überholspur entstehen. Von allen durchgespielten möglichen Überholzeitpunkten müssen also die Kosten für den überholenden Lkw und die Pkw verrechnet werden, um die Überholstelle zu identifizieren, welche die geringsten gemeinschaftlichen Kosten generiert. Damit die Kosten vergleichbar werden, wird eine monetäre Bewertung der Kosten für Pkw und Lkw durchgeführt, wie sie in Abschnitt 4.1.5 vorgestellt wird. Außerdem wird, um den Umfang zu reduzieren, nicht jede mögliche Überholstelle simuliert, sondern nur diskretisiert mit einer Abtaste von 10 m. Begonnen wird mit der ersten möglichen Überholstelle bis zu dem ersten Punkt, an dem die Länge der berechneten Geschwindigkeitsprofile nicht ausreicht, um das Überholmanöver abzuschließen.

### 4.1.3 Angepasste Geschwindigkeit (Aktiv)

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [23].*

Aufbauend auf der Auswahl einer geeigneten Überholstelle kann parallel die Geschwindigkeit der beiden Lkw während des Überholmanövers aktiv angepasst werden. Die Anpassung soll sich an der eingestellten Hysterese orientieren. Da Geschwindigkeitsanpassungen in dieser Größenordnung durch den GPS-Tempomaten toleriert werden, ist die Annahme, dass dies ebenfalls für das kooperative Überholmanöver akzeptiert wird.

Der Ablauf ist analog zur Auswahl der besten Überholstelle, indem die Geschwindigkeitsprofile der Lkw verwendet werden, um die erste mögliche Überholstelle zu identifizieren. Von dort an werden wieder alle Überholmanöver durchsimuliert, wobei jedoch der überholende Lkw als Zielgeschwindigkeit die eigentliche Wunschgeschwindigkeit plus die positive Hysterese wählt und der überholte Lkw die eigentliche Wunschgeschwindigkeit minus die negative Hysterese. Da beide Lkw also aktiv von der eigentlichen Wunschgeschwindigkeit abweichen und so Kosten in Kauf nehmen, wird dies als „aktive Kooperation“ bezeichnet. Sobald die relative Überholdistanz überwunden ist, wird die Geschwindigkeit wieder an das durch den GPS-Tempomaten berechnete Geschwindigkeitsprofil angepasst. Die Anpassung der Geschwindigkeit soll möglichst effizient erfolgen, durch Ausrollen oder den effizientesten Betriebspunkt des Motors. Sollte auf einem Gefälle das Ausrollen nicht zu der nötigen Verzögerung führen, kann der Retarder zugeschaltet werden. Auf Steigungen kann es jedoch dazu kommen, dass die Motorisierung selbst unter Vollast nicht ausreicht, um auf die erhöhte Zielgeschwindigkeit zu beschleunigen. In diesem Fall wird das Überholmanöver mit der maximal erreichbaren Geschwindigkeit durchgeführt. Die jeweils erreichten Geschwindigkeiten beeinflussen wiederum direkt den VSA, was für die Bestimmung der relativen Überholdistanz bedacht werden muss.

Damit aus der Menge an simulierten Überholmanövern das beste bestimmt werden kann, müssen die Kosten für die beteiligten Fahrzeuge betrachtet werden. So sind, wie bei der Auswahl der Überholstelle, die Verzögerung der Pkw-Fahrer sowie die Zeit- und Kraftstoff-Kosten für den



überholenden Lkw relevant. Da bei diesem Ansatz jedoch ebenfalls der überholte Lkw aktiv seine Geschwindigkeit anpasst, muss dessen Zeit- und Kraftstoffverbrauch mitberücksichtigt werden. Die so beschriebene Anpassung der Geschwindigkeit geht so immer mit einer Auswahl der dafür am besten geeigneten Überholstelle einher, sodass die Topologie genutzt wird, um die Geschwindigkeitsanpassungen möglichst effizient zu gestalten.

#### 4.1.4 Kooperativer Spurwechsel

Der letzte Ansatzpunkt für die Optimierung des Lkw-Überholmanövers ist der kooperative Spurwechsel. Ein rückwärtiger Pkw kooperiert mit dem überholenden Lkw, indem auf der Überholspur eine Lücke erstellt wird, in die der Lkw einscheren kann. Während die Entscheidung, wo ein Spurwechsel sinnvoll ist, auf der strategischen Ebene getroffen werden kann, so gehört das Spurwechselmanöver an sich zur taktischen Planungsebene. In Abschnitt 2.4.3 wurden bereits mehrere Ansätze für eine erfolgreiche Planung von kooperativen Spurwechseln vorgestellt [111, 122, 151, 153, 154, 159–163], weshalb die technischen Details nicht weiter betrachtet werden. Es wird angenommen, dass die taktische Manöverplanung, parametrisiert durch bspw. die gewünschte Spurwechselstelle der strategischen Manöverplanung, in der Lage ist einen kooperativen Spurwechsel zu planen. Dafür soll auf die sich im Standardisierungsprozess befindende MCM zurückgegriffen werden, weil sich diese V2X-Nachricht bereits in der Roadmap der C2C CC etabliert hat. Des Weiteren wird angenommen, dass der kooperative Spurwechsel immer erfolgreich durchgeführt werden kann, wenn die Überholdauer sich innerhalb der gesetzlich erlaubten 45 s befindet und das Lkw-Überholmanöver die Gesamtkosten aller Beteiligten optimiert. Für die Pkw-Kosten wird dafür insbesondere der Zeitverlust betrachtet, der entsteht, wenn für das Erstellen einer Lücke ausgerollt wird und anschließend dem überholenden Lkw mit verminderter Geschwindigkeit gefolgt wird. Da sich die Verzögerung auf den rückwärtigen Verkehr übertragen kann, wird insgesamt der Zeitverlust für 10 Pkw mit Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h betrachtet.

#### 4.1.5 Monetäre Bewertung

Bei der Auswahl der Überholstelle und Anpassung der Geschwindigkeit werden viele verschiedene Überholmanöver simuliert, um anschließend das beste auszuwählen. Dafür wird der Faktor Zeit für die Lkw und Pkw sowie der Faktor Kraftstoff für die Lkw betrachtet. Damit die jeweiligen Kosten vergleichbar werden, wird eine monetäre Bewertung durchgeführt, um alle Kosten in der Einheit Euro darstellen zu können. Bourdon [186] hat dafür 2017 den Stundenlohn von Berufskraftfahrern, die Fahrzeughaltungskosten sowie die Kraftstoffpreise analysiert und hat die Umrechnungsfaktoren von 22,94 €/h und 1,16 €/l ermittelt. Um die bis 2018 gestiegenen Kraftstoffpreise zu berücksichtigen, wird jedoch im Folgenden mit 1,3 €/l gerechnet [187].

Für die monetäre Bewertung des Zeitverlustes für die Pkw-Fahrer wurde der 2015 von Ehreke et al. [188] ermittelte „Value of Travel Time“ (VOT) in Deutschland für Pkw-Fahrten von 4,66 €/h verwendet.

#### 4.1.6 Kooperationslevel

Abhängig davon, wie die vorgestellten Ansätze zur Optimierung des Überholmanövers kombiniert werden, lassen sich verschiedene Kooperationslevel (KL) definieren. Auf Level 0 wird keine Kooperation auf strategischer Ebene umgesetzt; beide Lkw folgen unvermindert dem

Geschwindigkeitsprofil des GPS-Tempomaten und das Überholmanöver wird direkt eingeleitet, wenn der Sicherheitsabstand von 50 m erreicht ist. Dies führt dazu, dass bei kleinen Differenzgeschwindigkeiten Überholmanöver von langer Dauer durchgeführt werden. Level 1 beschränkt diese Dauer auf 45 s, sodass, wenn die Differenzgeschwindigkeit nicht ausreichend ist, in eine Fahrgasse übergegangen wird, statt das Überholmanöver zu starten. Streng genommen ist jedoch ebenfalls Level 1 noch keine Kooperation, weil es sich nur um die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben handelt, was anderenfalls geahndet wird. Die erste Kooperation tritt in Level 2 auf, indem durch den Austausch von Informationen über V2X eine geeignete Überholstelle identifiziert werden kann. Level 3 erweitert dies, indem statt dem Sicherheitsabstand von 50 m der VSA verwendet wird. In den Leveln 2 und 3 kooperiert der Lkw, der potenziell überholt wird, nur durch Informationsaustausch und ohne Anpassung des eigenen Fahrverhaltens, weshalb die Kooperation „passiv“ genannt wird. In Level 4 und 5 wird zusätzlich zur Auswahl der Überholstelle ebenfalls die Geschwindigkeit angepasst. Analog zu Level 2 und 3 wird in Level 4 der 50 m Sicherheitsabstand verwendet und in Level 5 der VSA. Da neben dem Austausch von Informationen nun zusätzlich die Geschwindigkeiten bewusst angepasst werden, wird von einer „aktiven“ Kooperation gesprochen. Tabelle 4.2 fasst die sechs Kooperationslevel noch einmal mit kurzer Beschreibung zusammen.

Tabelle 4.2: Beschreibung der sechs Kooperationslevel.

Kooperationslevel	Beschreibung
0: „Direkt“	Das Überholmanöver wird ohne Kooperation oder Optimierung direkt gestartet, wenn der hintere Lkw bis auf 50 m aufgefahren ist.
1: „StVO“	Wie Level 0, aber nur bei einer Überholdauer von höchstens 45 s.
2: „Passiv“	Wie Level 1, aber mit Auswahl einer geeigneten Überholstelle.
3: „Passiv + VSA“	Wie Level 2, aber unter Verwendung des VSA.
4: „Aktiv“	Wie Level 2, aber mit zusätzlicher Anpassung der Geschwindigkeiten.
5: „Aktiv + VSA“	Wie Level 4, aber unter Verwendung des VSA.

## 4.2 Kooperative Abstimmung

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [24].*

Im vorherigen Abschnitt wurde beschrieben, wie das Manöver geplant werden kann, jedoch muss der generierte Manöverplan anschließend dezentral zwischen den Kooperationsteilnehmern abgestimmt werden. Dafür wird im Folgenden zuerst ein funktionspezifischer Zustandsautomat entworfen, der mit atomaren Schritten durch das kooperative Lkw-Überholmanöver führt. Anschließend werden Nachrichteninhalte der „IMAGinE Driving Strategy Message“ (IDSM) definiert, um die Parametrisierung des Zustandsautomaten zwischen den Fahrzeugen auszutauschen und alle Fahrzeuge gemeinsam in einem Zustand des Automaten zu synchronisieren.

## 4.2.1 Verteilter Zustandsautomat

Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, wurde von Sawade et al. [158] das Konzept eines funktions-spezifischen und rollenbasierten verteilten Zustandsautomaten vorgestellt. Im Folgenden wird der spezifisch für das kooperative Lkw-Überholmanöver entworfene Zustandsautomat beschrieben. Jedem Zustand sind atomare Aufgaben für die Rolle des überholenden Lkw A oder des überholten Lkw B zugewiesen. Zusätzlich sind Bedingungen beschrieben, die entweder zu einem Abbruch oder zum Initialisieren eines synchronisierten Zustandswechsel führen.

### Zustand 1: Solofahrt

Der erste Zustand wird nicht zwischen den Fahrzeugen synchronisiert, weil es sich um eine Solofahrt handelt. D. h., dass keine anderen Lkw in der Umgebung fahren, oder dass alle Lkw bereits auf einer Blacklist vermerkt sind, weil ein Überholen nicht sinnvoll ist. Fahrzeuge werden nach einem Timeout wieder von der Blacklist gestrichen, weil sich die Situation so weit verändert haben kann, dass ein Überholen in Erwägung gezogen werden kann. Der Lkw folgt während der Zustände 1 bis 3 dem Geschwindigkeitsprofil des GPS-Tempomaten, sofern er nicht durch ein vorausfahrendes Fahrzeug gehindert wird, das nicht überholt werden kann. Wie für alle folgenden Zustände sendet der Lkw periodisch CAM, um von anderen Fahrzeugen in Kommunikationsreichweite wahrgenommen werden zu können. Sobald die CAM eines Lkw empfangen wird, der nicht auf der Blacklist notiert ist, wird in Zustand 2 gewechselt.

### Zustand 2: Initialisierung

Die Initialisierung bereitet die Synchronisierung und Rollenzuordnung der Lkw ein. Die IDSM wird versendet, um fahrzeugspezifische Parameter auszutauschen. Daraus lässt sich bestimmen, ob sich Fahrzeuge in Zukunft weiter annähern und wer die Rolle des „(A) Überholenden“ und „(B) Überholten“ einnimmt. Kann eine Zuordnung nicht durchgeführt werden, wird zurück in Zustand 1 gewechselt und die Fahrzeuge werden jeweils auf die Blacklist gesetzt. Anderenfalls wird eine Session initialisiert und beide Fahrzeuge wechseln synchronisiert zu Zustand 3.

### Zustand 3: Manöverplanung

Beide Lkw planen das kooperative Lkw-Überholmanöver unter Berücksichtigung der gemeinschaftlichen Kosten. Wird kein mögliches Überholmanöver identifiziert, oder keine Einigung während eines Timeout erzielt, so wird zu Zustand 1 gewechselt und die Fahrzeuge jeweils auf die Blacklist gesetzt. Wird erfolgreich ein Manöverplan erstellt, wird ein Wunsch geäußert in den nächsten Zustand zu wechseln. Diesem Wunsch sind alle nötigen Parameter angehängt, um das Manöver zu beschreiben. Der Empfänger vergleicht diese mit den selbst bestimmten Parametern für das Manöver. Sollte die Abweichung unter einem definierten Schwellwert liegen, wird der Wunsch zum Zustandswechsel erwidert. Anderenfalls wird ein Wunsch zum Zustandswechsel mit den selbst bestimmten Parametern versendet. Die Manöverplanung wird periodisch auf beiden Fahrzeugen wiederholt und die Parameter des Wunschzustandes entsprechend angepasst.

### Zustand 4: Annäherung

Die Planung des Lkw-Überholmanövers kann durch die Kommunikationsreichweite abgeschlossen werden, wenn der Abstand zwischen den Lkw noch mehrere hundert Meter beträgt. In diesem Zustand soll die Annäherung der beiden Fahrzeuge durchgeführt werden, damit der geplante Sicherheitsabstand beim geplanten Überholzeitpunkt erreicht wird.

(A) Überholender Lkw: Kontinuierliche Anpassung der Geschwindigkeit, damit die Annäherung möglichst genau am geplanten Überholzeitpunkt abgeschlossen wird.

(B) Überholter Lkw: Ursprüngliches Geschwindigkeitsprofil weiterverfolgen.

Sobald der Abstand zwischen den Lkw auf 60 m reduziert wurde, wird zu Zustand 5 gewechselt.

### **Zustand 5: Abstand absichern (pre)**

Dieser Zustand ist nur relevant, wenn das Kooperationslevel die Reduktion des Sicherheitsabstandes enthält. Es wird weiter den Geschwindigkeitsprofilen aus Zustand 4 gefolgt. Sobald der gewünschte Sicherheitsabstand von 50 m oder der VSA erreicht ist, wird in den nächsten Zustand gewechselt.

(A) Überholender Lkw: Verringern des Sicherheitsabstands und auf mögliche Bremsignale des vorausfahrenden Lkw reagieren.

(B) Überholter Lkw: Im Fall eines Bremsmanövers DENM versenden.

### **Zustand 6: Spurwechsel nach links**

Während diesem Zustand wird der kooperative Spurwechsel zusammen mit dem rückwärtigen Pkw-Verkehr durchgeführt. Wenn der Sicherheitsabstand verringert wurde, wird dieser weiterhin abgesichert. Sobald der Spurwechsel abgeschlossen ist, wird in Zustand 7 gewechselt.

(A) Überholender Lkw: Spurwechsel nach links durchführen.

(B) Überholter Lkw: Ursprüngliches Geschwindigkeitsprofil weiterverfolgen.

### **Zustand 7: Vorbeifahren**

In diesem Zustand passiert der überholende Lkw den überholten Lkw. Je nach Kooperationslevel werden dafür die Geschwindigkeiten aktiv angepasst. Wenn der für das wieder Einscheren benötigte Sicherheitsabstand erreicht wird, wird in den nächsten Zustand gewechselt.

(A) Überholender Lkw und (B) überholter Lkw: Je nach Kooperationslevel dem ursprünglichem Geschwindigkeitsprofil folgen oder die Geschwindigkeit effizient auf  $v_w+h_p / v_w-h_r$  anpassen.

### **Zustand 8: Spurwechsel nach rechts**

Analog zu Zustand 6, jedoch ist keine Kooperation mit dem Pkw-Verkehr notwendig.

### **Zustand 9: Abstand absichern (post)**

Analog zu Zustand 5. Der Wechsel in den nächsten Zustand erfolgt bei 50 m Abstand.

### **Zustand 10: Manöverende**

Mit diesem Zustand ist das Überholmanöver abgeschlossen. Die Synchronisierung wird aufgelöst und die kooperative Session beendet. Die Parametrisierung des verteilten Zustandsautomaten wird zurückgesetzt und es wird zu Zustand 1 gewechselt.

In allen Zuständen gibt es zusätzliche Abbruchbedingungen, die das Manöver unabgeschlossen beenden und zu Zustand 1 führen. Gründe dafür können bspw. eine Missachtung der Kooperationsvereinbarungen sein oder der Ausfall eines Kooperationspartners. Die planmäßigen Zustandswechsel starten über das Äußern eines Wunsches zum Zustandswechsel, der von jedem initialisiert werden kann, und erst durchgeführt wird, wenn dieser Wunsch von allen innerhalb einer Abstimmungszeit erwidert wird. Die Bedingungen für die Zustandswechsel hängen nicht direkt von den in Zustand 3 absolut bestimmten Parametern ab. Statt also bspw. genau beim geplanten Überholzeitpunkt den Spurwechsel durchzuführen, wird der Spurwechsel durchgeführt, wenn der relative Abstand zwischen den Fahrzeugen den dynamisch angepassten VSA oder 50 m erreicht. So kann auf etwaige Regelfehler während der Annäherung oder äußere Faktoren wie starker Gegenwind beim Ausrollen reagiert werden. Mit jedem Zustandswechsel wird also wieder eine Einigung auf die Parameter des neuen Zustandes erzielt. Das in Zustand 3 geplante Manöver gilt grundsätzlich als Orientierung, allerdings ist es so möglich, kleine Änderungen des Manöverplans umzusetzen, ohne das Manöver abbrechen zu müssen.

## 4.2.2 Nachrichtenspezifikation: IMAGinE Driving Strategy Message

Für den Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen werden verschiedene V2X-Nachrichten benötigt. Dafür werden zum einen die Cooperative Awareness Message (CAM) und die Decentralized Environmental Notification Message (DENM) verwendet, so wie sie durch die ETSI spezifiziert und in Abschnitt 2.3.2 „Nachrichten und Protokolle“ beschrieben sind. Für die Planung des kooperativen Spurwechsels zwischen Lkw und Pkw kann zusätzlich die dort ebenfalls beschriebene Maneuver Coordination Message (MCM) versendet werden. Die strategische Abstimmung und die Synchronisierung des verteilten Zustandsautomaten erfordert jedoch noch eine weitere Nachricht, die im Folgenden als IMAGinE Driving Strategy Message (IDSM) vorgestellt wird und auf Basis der Collaborative Maneuver Message im IMAGinE-Projekt spezifiziert wurde.

### Generischer Teil

Der Aufbau der IDSM ist generisch, sodass sie allgemein für strategische Abstimmungen über verteilte Zustandsautomaten verwendet werden kann, und ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Das erste Element ist der Header gefolgt von den eigentlichen fahrstrategischen Inhalten. Mit „Nature“ lässt sich festlegen, welche funktionspezifische Manöverplanung derzeit aktiv ist und welcher verteilte Zustandsautomat verwendet werden soll. Anschließend folgen eine notwendige „Current Session“ und eine optionale „Desired Session“. Beide enthalten eine „State-ID“, um zu übermitteln, in welchem Zustand des verteilten Zustandsautomaten sich das Fahrzeug aktuell befindet, oder in welchen Zustand es wechseln möchte. Dazu gehört jeweils eine „Payload“, die die gesamte Parametrisierung des verteilten Zustandsautomaten enthält. Im Falle der „Desired Session“ ist zusätzlich ein „Vote Timeout“ enthalten, das vorgibt, wie lange der Wunsch gültig ist. Ein weiterer Teil der Session ist eine Liste mit den aktuellen oder gewünschten Teilnehmern, in Form einer eindeutigen Teilnehmer-ID und eine Rollenzuordnung. Um weitere teilnehmerspezifischen Informationen auszutauschen, die nicht bereits über die CAM oder die DENM abgedeckt sind, kann eine „Participant Payload“ mitversendet werden. Da diese Payload für beide Sessions gilt, wird sie nur in der „Current Session“ versendet.

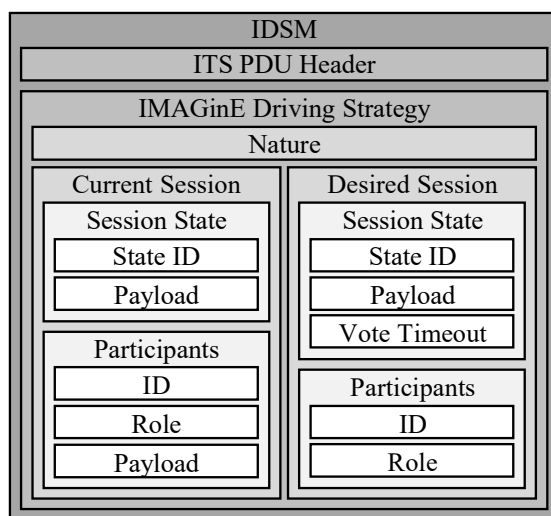


Abbildung 4.3: Aufbau der IDSM basierend auf der CMM [24].

## Funktionsspezifischer Teil

Neben dem generischen Teil der IDSM müssen spezifisch für das kooperative Lkw-Überholmanöver weitere Inhalte definiert werden: Die „Session Payload“ und die „Participant Payload“, wie sie in Abbildung 4.4 dargestellt sind. Innerhalb der IDSM sind diese als optionale Bytearrays definiert und erst durch den Verweis auf die kooperative Funktion aus dem „Nature“ Attribut kann die passende Deserialisierung ausgewählt werden. Alle für die Manöverplanung in Abschnitt 4.1 beschriebenen Parameter werden in der „Participant Payload“ abgebildet. Das geplante Manöver lässt sich auf der strategischen Ebene anschließend eindeutig durch die sechs Elemente der „Session Payload“ beschreiben. Wenn also die „Session Payload“, die durch die beiden Lkw unabhängig bestimmt wurde, bis auf kleine Abweichungen übereinstimmt, kann angenommen werden, dass beide Lkw das identische Manöver durchführen wollen. Die Elemente der „Session Payload“ werden dann verwendet, um den verteilten Zustandsautomaten aus Abschnitt 4.2.1 zu parametrisieren.

Session Payload	Participant Payload
Cooperation Mode	Cooperation Mode
Start Position	Set Velocity
End Position	Min Hysteresis
Duration	Max Hysteresis
Safety Gap Pre	Weight
Safety Gap Post	Engine

Abbildung 4.4: Funktionsspezifische Payload der IDSM für kooperative Lkw-Überholmanöver [24].

## 4.3 Implementierung

Die in Abschnitt 4.1 „Manöverplanung“ und 4.2 „Kooperative Abstimmung“ vorgestellten Methoden wurden für Simulationen und anschließende Untersuchungen im Realfahrzeug in Python unter Ubuntu 16.04 LTS implementiert. Die beiden Kernmodule „Kooperativer Manöverplaner“ und „Lkw-Überholassistent“ werden im Folgenden näher beschrieben. Abbildung 4.5 zeigt, wie diese Module in die Softwarearchitektur eingegliedert sind. Zum Großteil wird dafür das Robot Operating System (ROS1) Kinetic Kame [189] verwendet, das es erlaubt, modulare Komponenten (ROS-Nodes) zu entwerfen, die über definierbare Schnittstellen (ROS-Messages) miteinander interagieren können. Details des Realfahrzeugs und der Simulation werden anschließend in Abschnitt 4.4 beschrieben.

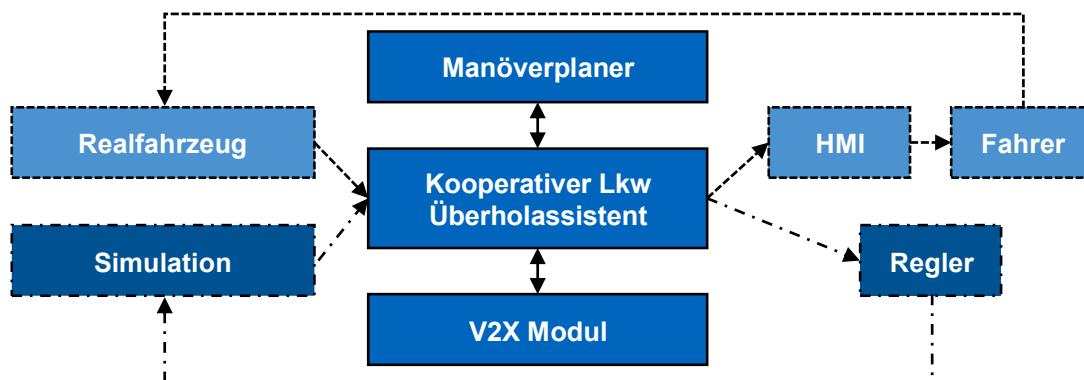


Abbildung 4.5: Softwarearchitektur mit Informationsfluss für Simulation und Realfahrzeug.

### 4.3.1 Implementierung des kooperativen Manöverplaners

Dieser Abschnitt basiert auf Paper [23], das Softwaremodul ist open-source verfügbar [190].

Das Modul des kooperativen Manöverplaners nimmt als Input die „Participant Payload“, definiert in Abschnitt 4.2.2, sowie die Fahrzeugpositionen und die Straßentopologie über eine dynamische Länge von 5 km bis 10 km in 50 m Segmenten. Wenn auf Basis der Inputdaten ein Überholmanöver möglich und sinnvoll ist, werden die Parameter des Überholmanövers in Form der „Session Payload“ ausgegeben. Außerdem wird ein Geschwindigkeitsprofil mit einer Auflösung von 10 m für den Lkw generiert, das entweder einer Solofahrt, einer Folgefahrt (kein Überholmanöver) oder eines kooperativen Lkw-Überholmanövers entspricht. Der Rechen- und Speicherbedarf der Manöverplanung steigt linear mit der Größe der Inputdaten, explizit mit der Länge des Straßenabschnitts, für den das Überholmanöver geplant werden soll. Durch eine Parallelisierung der rechenaufwändigen Schritte, wird auf einem Entwicklungslaptop (Intel i7, 16 GB) eine absolute Laufzeit von ca. 1 s erreicht, was ausreichend für eine strategische Manöverplanung ist. Für den integrierten GPS-Tempomaten werden die Fahrwiderstände Luftwiderstand, Rollwiderstand, Steigungswiderstand und Beschleunigungswiderstände [191] verwendet und mit einem MAN TGA mit D2866 LF20 (350 kW) Motor [27] parametrisiert.

Für die Entwicklung und Untersuchung der kooperativen Manöverplanung wurde zusätzlich eine Stand-Alone Applikation implementiert. Die in Abbildung 4.6 dargestellte GUI erlaubt, beliebige Inputszenarien zu generieren und die Zwischenschritte, Ergebnisse und Kosten der kooperativen Manöverplanung zu visualisieren. Eine detaillierte Beschreibung sowie die Implementierung des Manöverplaners inkl. GUI ist open-source auf GitHub verfügbar [190].

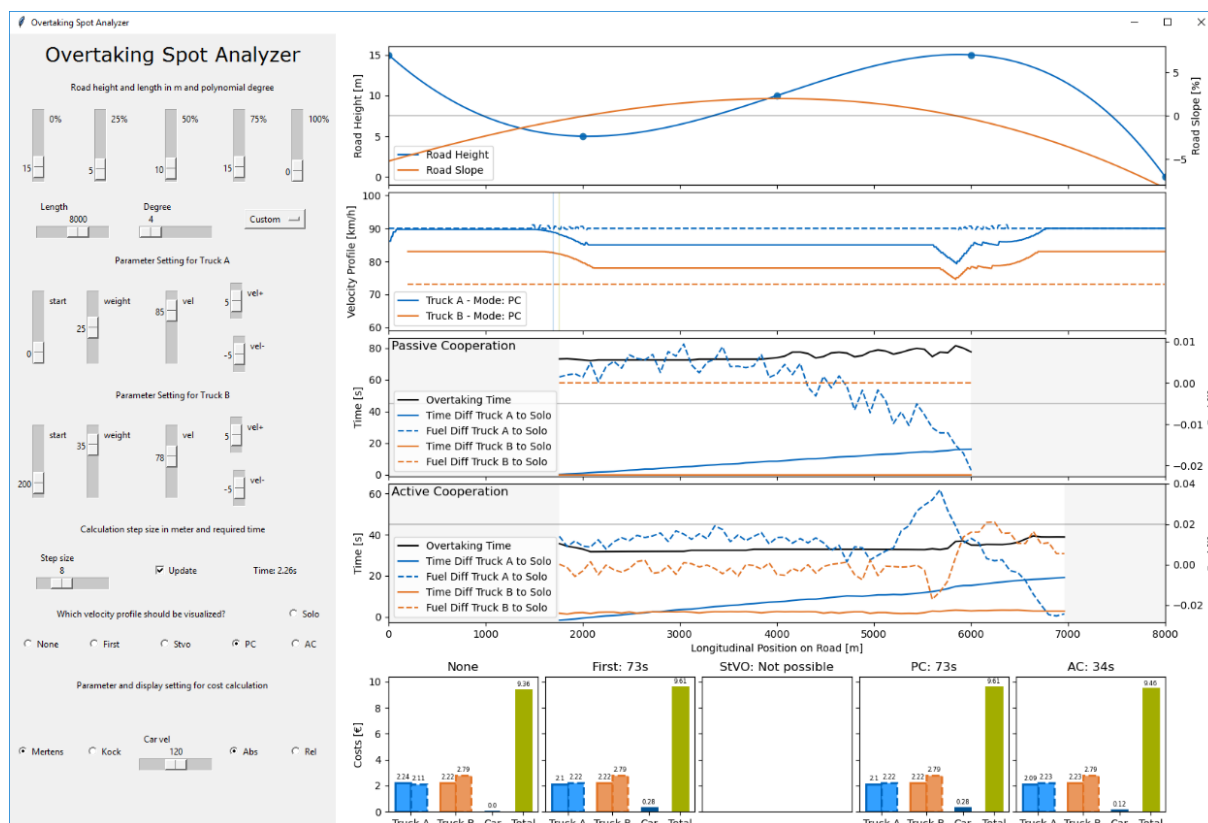


Abbildung 4.6: Kooperativer Manöverplaner als Stand-Alone Applikation mit manueller Auswahl der Inputdaten (links) und Visualisierung der berechneten Geschwindigkeitsprofile und Kosten für unterschiedliche Kooperationslevel.

### 4.3.2 Implementierung des kooperativen Überholassistenten

Das Modul „Kooperativer Überholassistent“ ist als ROS-Node umgesetzt und wird zu Beginn mit den notwendigen Parametern für die „Participant Payload“ initialisiert, die statisch gespeichert werden. Als weitere Eingangsgrößen werden die Ego-Position und -Geschwindigkeit sowie die Positionen und Geschwindigkeiten der über die CAM empfangenen umgebenden Fahrzeuge verwendet. Basierend auf den Positionen wird dynamisch die Straßentopologie über die kommenden 7 km geladen, um ausreichend Planungshorizont verfügbar zu haben, um das kooperative Lkw-Überholmanöver an einer geeigneten Stelle zu starten und innerhalb der betrachteten Topologie abzuschließen. Die Ausgaben des kooperativen Überholassistenten sind zum einen die IDSM, welche über V2X mit den anderen Fahrzeugen ausgetauscht werden, sowie Handlungsempfehlungen, die entweder an ein Mensch-Maschine-Interface oder in der Simulation direkt an einen Regler versendet werden. Intern ist der in Abschnitt 4.2.1 vorgestellte verteilte Zustandsautomat das Kernelement dieses Moduls. Innerhalb dessen wird der zuvor vorgestellte kooperative Manöverplaner getriggert. Die IDSM-Nachrichten sind als Google Protocol Buffers [192] Nachrichten definiert, um die Serialisierung und Deserialisierung für die Übertragung als Bytearray auf dem V2X-Kanal zu ermöglichen.

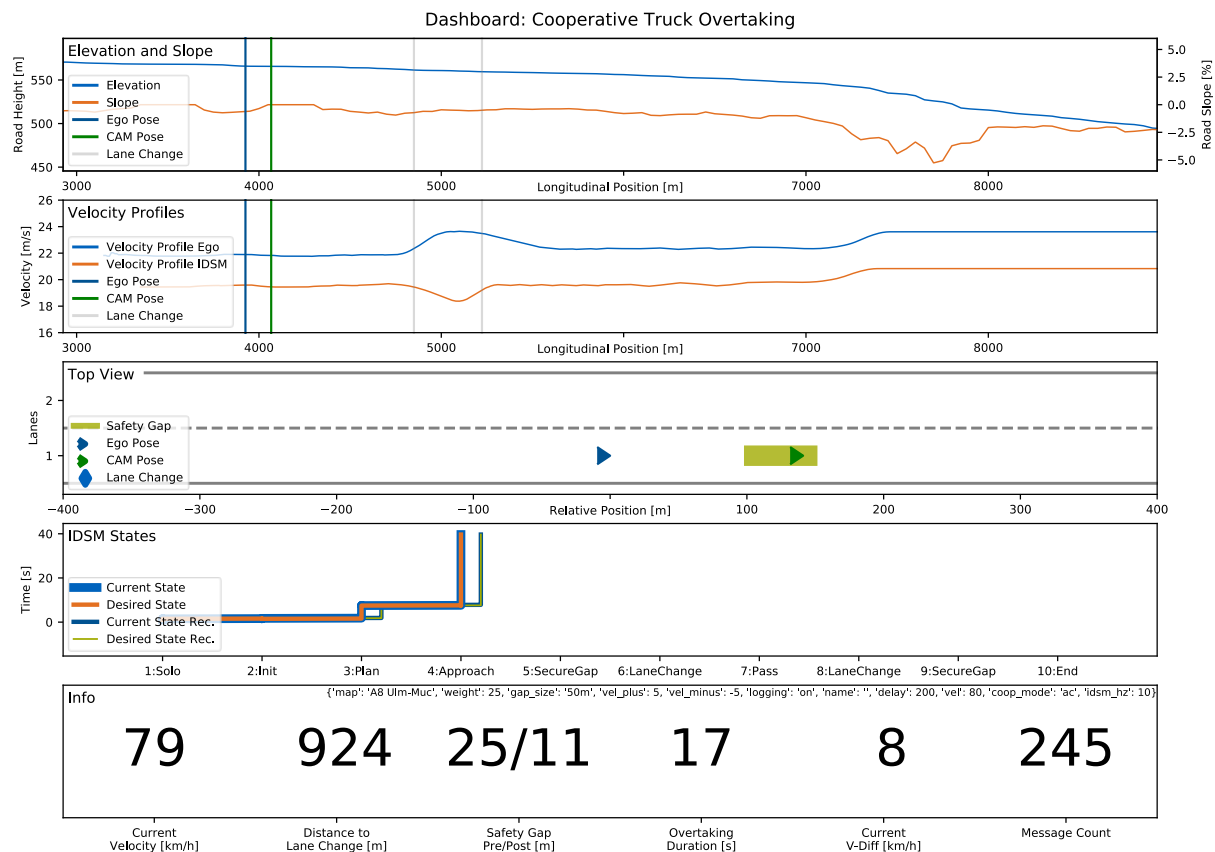


Abbildung 4.7: Dashboard des kooperativen Lkw-Überholassistenten.

Für die Entwicklung und Untersuchung der Abstimmungsmechanik wurde zusätzlich ein Dashboard implementiert, das live die Abstimmung und Durchführung des Lkw-Überholmanövers visualisiert. Abbildung 4.7 zeigt einen Screenshot des Dashboards mit dem Höhen- und Steigungsprofil über den kommenden Straßenabschnitt im obersten Plot. Darunter werden die geplanten Geschwindigkeitsprofile des überholenden Lkw (in diesem Fall das Ego-Fahrzeug) und des Lkw, der überholt wird, angezeigt. Zusätzlich werden in beiden Plots die aktuellen



Positionen der Lkw sowie der geplanten Spurwechsel markiert. Der dritte Plot stellt eine ego-zentrierte Top-View der Straße dar, in der ebenfalls der zu überholende Lkw sowie die benötigten verringerten Sicherheitsabstände zu sehen sind. Der vierte Plot zeigt eine Historie über die aktuellen und gewünschten Zustände des verteilten Zustandsautomaten des Ego-Fahrzeugs und des Kooperationspartners (leicht nach rechts versetzt). Die letzte Zeile des Dashboards gibt eine textuelle Beschreibung der aktuell wichtigsten Werte, wie die aktuelle Geschwindigkeit, die Distanz zum Spurwechsel oder die Dauer des geplanten Überholmanövers.

## 4.4 Simulation und Realfahrzeug

Für die Erprobung und Analyse des Lkw-Überholassistenten wurden eine Simulationsumgebung sowie zwei Versuchsträger aufgebaut. Wie Abbildung 4.5 zeigt, sind die als ROS-Messages definierten Schnittstellen identisch, sodass die Simulation und Versuchsträger beliebig ausgetauscht werden können. Alle Softwaremodule laufen in Echtzeit, um Realversuche zu ermöglichen und sind in Python und C++ implementiert.

### 4.4.1 Simulation

In der Simulation wird die Bewegung von zwei Lkw auf der Autobahn dargestellt. Es wird angenommen, dass die Fahrzeuge sich immer auf der Spurmitte befinden und nur zwei Aktionen zur Verfügung stehen: Einen Spurwechsel durchzuführen und eine Geschwindigkeit einzuregulieren. Als Straßenabschnitte wurden ca. 90 km der A7 von Kirchheim nach Göttingen ( $\pm 6\%$  Steigung, Kassler Berge), ca. 115 km der A8 von München nach Ulm ( $\pm 3\%$  Steigung) und ca. 75 km der A9 von München nach Ingolstadt ( $\pm 3\%$  Steigung) aus Open Street Maps [193] exportiert. Das Höhenprofil der Abschnitte wurde anschließend durch die Elevation-API von Google Maps ermittelt [194]. Für die V2X-Kommunikation wurde ein idealer Kommunikationskanal angenommen, sodass die Nachrichten ohne Paketausfall und Verzögerungen übermittelt werden. Die Kommunikationsreichweite kann dafür beliebig eingestellt werden. Die Berechnung des VSA basiert trotzdem weiterhin auf den in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Annahmen eines realistischen Kommunikationskanals. Die simulierten Lkw versenden mit 10 Hz CAM-Nachrichten und die Übertragungsfrequenz der IDSM ist zwischen 1 Hz und 10 Hz wählbar. Da im Versuchsträger ein Modul zur hochgenauen Lokalisierung verbaut ist, wird in der Simulation eine entsprechende Positionsungenauigkeit von nur  $\pm 0,2$  m angenommen. Für beide simulierten Lkw werden eigenständige Instanzen des kooperativen Lkw-Überholassistenten gestartet, die nur über die simulierten V2X-Nachrichten Informationen austauschen können. Die Handlungsempfehlungen des Assistenten werden zur Umsetzung an einen Regler ausgegeben. Da dies im Versuchsträger durch einen menschlichen Fahrer übernommen wird, der durch den Tempomaten die Geschwindigkeit in 1 km/h Schritten setzen kann, wird eine Regelgenauigkeit von 0,5 km/h angenommen. Damit mehrere Überholmanöver hintereinander ausgeführt werden können, wird der Lkw, der erfolgreich überholt wurde, aus der Simulation entfernt und ein neuer Lkw 150 m vor dem überholenden Lkw platziert. Diese Distanz ist abgeleitet aus dem HighD-Datensatz [28], dessen Auswertung ergab, dass der mittlere Abstand zwischen zwei Lkw, die sich nicht in direkter Folgefahrt befinden,  $112 \pm 43$  m beträgt. Da jedoch nicht der mittlere, sondern der initiale und damit größere Abstand gesucht wird, wurde  $112 \text{ m} + 43 \text{ m} \approx 150 \text{ m}$  gewählt. Die Parametrisierung aller simulierten Lkw mit insbesondere der Wunschgeschwindigkeit und Hysterese sowie der Masse und des Kooperationslevels ist flexibel einstellbar. Der Ablauf der Simulation

lässt sich über das Dashboard des Überholassistenten visualisieren, und für eine anschließende Auswertung werden alle relevanten Daten geloggt. Bevor die Simulation jedoch aussagekräftig verwendet werden kann, müssen erst die beiden noch fehlenden Parameter, die Kommunikationsreichweite und die Übertragungsfrequenz der IDSM, durch die in Abschnitt 5 durchgeführten Untersuchungen ermittelt werden.

### 4.4.2 Versuchsträger

Damit der kooperative Lkw-Überholassistent in Realfahrten getestet werden kann, wurden zwei Versuchsträger aufgebaut. Dafür wurden zwei MAN TGX 18.500 4x2 Zugmaschinen mit D2676LF51 Motor (500 PS) mit verschiedenen Hardware- und Software-Modulen ausgestattet. Als Rechenmodul wurde ein Industrie-PC mit Ubuntu 16.04 LTS verwendet, der über eine CAN-Schnittstelle alle relevanten Fahrzeugdaten auslesen kann. Für die Positionierung wurde eine RTK-GPS & IMU Sensorfusion mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich verbaut. Damit Anzeigen für den Fahrer dargestellt werden können, wurde ein frei programmierbares Kombidisplay sowie ein Entwicklungsmonitor integriert. Kernstück des Hardwareaufbaus ist das Kommunikationsmodul, eine WaveBee plus von Nordsys [195], die als V2X-Entwicklungsplattform die ITS-G5 Kommunikation zwischen den Fahrzeugen ermöglicht. Für das Senden und Empfangen werden zusätzlich noch MultiMark LTM402 Rundstrahlantennen [196] als ITS-G5 Antennen an die WaveBee angeschlossen. Da jedoch, wie in Abschnitt 2.3.3 gezeigt wurde, unklar ist, ob eine Dachantenne oder Seitenantennen für die V2X-Kommunikation mit Lkw eine bessere Performance bieten, wurden beide Konstellationen für eine spätere Evaluierung umgesetzt. Während die Dachantenne zentral auf dem Dach montiert werden kann, mussten für die Seitenantennen spezielle Antennenhalter angefertigt werden, die über den Türen links und rechts am Fahrerhaus angebracht wurden. Abbildung 4.8 zeigt die zwei fertig aufgebauten Trucks auf der Teststrecke der MAN Truck & Bus SE, auf der ein Großteil der Integrations- und Erprobungsfahrten stattgefunden haben. Analog zur Simulation sind die meisten Softwaremodule als ROS-Nodes in C++ und Python umgesetzt und können beim Fahrzeugstart automatisch durch Shell-Skripte gestartet werden.



Abbildung 4.8: Zwei Versuchsträger mit sichtbaren Antennenhaltern über den Türen.

# 5 Untersuchungen und Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt sechs Untersuchungen und deren Ergebnisse. Zu Beginn wird analytisch hergeleitet, wie klein der VSA gewählt werden kann und welches Optimierungspotenzial daraus für das Überholmanöver besteht. Anschließend wird mit Tests an den Versuchsträgern untersucht, welche Antennenpositionen an den Lkw die beste V2X-Reichweite liefert, um die folgenden Simulationen korrekt parametrisieren zu können. Im dritten Abschnitt werden einzelne Überholmanöver geplant, damit das Potenzial der einzelnen Kooperationslevel abgeschätzt werden kann. Drauffolgend wird simulativ bestimmt, welche IDSM-Übertragungsfrequenz für die Manöverabstimmung den besten Trade-Off zwischen Manöverqualität und Kanallast bietet. Um die Auswirkung des Lkw-Überholassistenten unter realistischen Bedingungen zu bestimmen, wird anschließend eine längere Lkw-Fahrt mit einer aus Realdaten abgeleitete Verkehrsverteilung durchgeführt. Als letztes wurde eine Erprobungsfahrt mit den Versuchsträgern auf der Autobahn als Proof of Concept durchgeführt, um zu zeigen, dass sich die theoretisch und simulativ entwickelt und getesteten Konzepte ebenfalls in Realität bewähren.

## 5.1 V2X-Sicherheitsabstand

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [180].*

In Abschnitt 4.1.1 wurde der VSA vorgestellt, um die relative Überholdistanz zu verkürzen. Statt des gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsabstands von 50 m sollen die Fahrzeuge den Abstand vor und nach dem Überholen reduzieren und durch V2X-Nachrichten absichern. Um die Auswirkung auf das Überholmanöver zu analysieren, muss der kombinierte Sicherheitsabstand, also  $VSA_{pre} + VSA_{post} = VSA_{kom}$ , betrachtet werden. Die in Abschnitt 4.1.1 hergeleiteten Formeln wurden verwendet, um rechnerisch den kombinierten Sicherheitsabstand abhängig von den Lkw Geschwindigkeiten und Massen zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

Wenn ein 71 km/h fahrender Lkw einen 70 km/h fahrenden Lkw überholen möchte, wird im Mittel über alle Masse-Kombinationen der beiden Lkw ein  $VSA_{kom}$  von ca. 42 m benötigt. Mit steigenden Geschwindigkeiten steigt dieser ebenfalls auf bis zu 62 m an. Ein ähnlicher Effekt ist bei der Masse zu betrachten. Überholt ein Lkw mit 18 t einen anderen Lkw mit 18 t wird, im Mittel über alle Geschwindigkeits-Kombinationen der Lkw ein  $VSA_{kom}$  von 48 m benötigt. Mit steigender Masse der Lkw wächst der benötigte Abstand auf bis zu ca. 56 m an. Während die Spanne bei den Massen also bei 8 m liegt, betrug sie bei den Geschwindigkeiten 20 m. Die Geschwindigkeit ist damit, wie zu erwarten, der größte Einflussfaktor für den VSA.

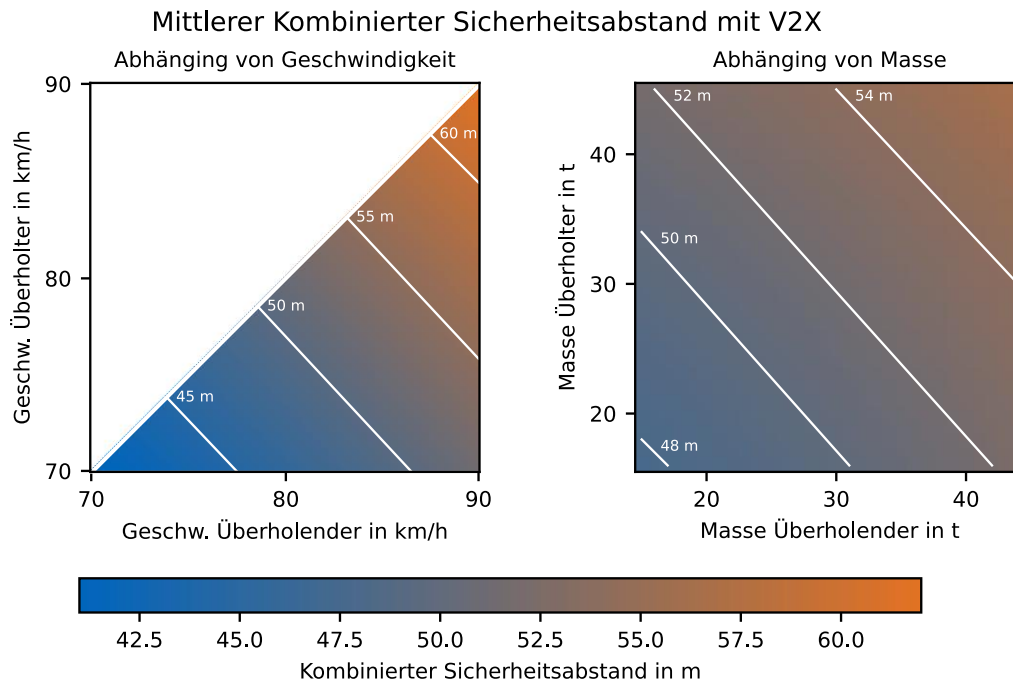


Abbildung 5.1: Einfluss von Geschwindigkeit und Masse auf den kombinierten VSA.

Mit dem klassischen Sicherheitsabstand betrug die relative Überholdistanz 137,5 m. Durch den VSA kann dies nun je nach Lkw-Konstellation auf ca. 80 m bis 100 m verringert werden, was einer Reduktion von 40 % und 30 % entspricht. Daraus lässt sich folgern, dass das Überholmanöver durch den VSA ebenfalls um 30-40 % beschleunigt wird. Statt einer Relativgeschwindigkeit von 11 km/h für eine Überholdauer von 45 s sind nur noch 6,5-8 km/h nötig. Diese Beschleunigung des Überholmanövers wird allein durch einen V2X-Informationsaustausch, nämlich der ggf. auftretenden Bremssignale, und einer automatisierten Ansteuerung der Bremse ermöglicht, ohne dass für eines der Fahrzeuge Kosten entstehen.

## 5.2 V2X-Antennenpositionen für Lkw

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [65].*

Wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, sind die Versuchsträger mit einer Dachantenne und mit zwei Seitenantennen an speziellen Haltern über den Türen ausgestattet, um zu evaluieren, welche Konstellation die bessere Performance liefert. Da durch den Höhenunterschied zwischen Lkw und Pkw die Herausforderungen für Lkw-Pkw Kommunikation höher sind als für Lkw-Lkw-Kommunikation, wurde ein Pkw mit Rundstrahldachantenne für den folgenden Test als Kommunikationspartner verwendet. Während der Lkw auf einer Teststrecke geparkt wurde, ist der Pkw in unterschiedlichen Abständen um den Lkw gefahren. Beide Fahrzeuge haben konstant mit 10 Hz CAM-Nachrichten versendet. Da die Kommunikation symmetrisch ist, wurden nur die am Lkw empfangenen Nachrichten inklusive Signalstärke geloggt. Aus der in der CAM übermittelten Position konnte in einer anschließenden Auswertung die relative Position des Pkw zum Lkw für jede empfangene Nachricht ermittelt werden. Diese Versuche wurden mit zwei unterschiedlichen Anhängern (Planen- und Container-Auflieger) und Anhänger Winkeln (0° und 30°) wiederholt, wobei der Lkw entweder nur die Dachantenne oder nur die Seitenantennen

verwendet hat. Abbildung 5.2 zeigt den Versuchsträger mit dem verwendeten Container-Auflieger aus Stahl.



Abbildung 5.2: Versuchsträger mit Container-Auflieger ohne Winkel (0°).

Die erste Erkenntnis dieses Experiments ist, dass eine stabile Kommunikation mit 10 Hz über ca. 425 m bei direkter Sichtverbindung möglich ist. Bei 450 m sinkt die Package Delivery Rate bereits von vorher 98 % auf 79 %. Eine Sichtverbindung zwischen Dachantenne des Lkw und Pkw ist jedoch nie vorhanden und das Signal wird im Vergleich zu den Seitenantennen um 10 dB durch das Fahrerhaus gedämpft. Die maximale Kommunikationsreichweite zwischen Lkw-Dachantenne und Pkw reduziert sich damit um 66% auf 150 m. Als nächstes wurde die Auswirkung der Anhänger ausgewertet, indem insbesondere die Signalstärke bei der Kommunikation nach hinten (vom Lkw gesehen) betrachtet wurde. Da wie erwartet der Container-Auflieger im Vergleich zum Planen-Auflieger durch den Stahl eine deutlich höhere Dämpfung (ca. +6 dB) erzeugt, wird im Folgenden nur der Container-Auflieger betrachtet. Abbildung 5.3 zeigt, welche Auswirkung die Dachantenne bzw. die Seitenantennen und der Anhängerwinkel auf die Kommunikationsreichweite haben. Der Anhänger mit 0° Winkel erzeugt eine Dämpfung von 1,5 dB nach hinten, wenn die Seitenantennen verwendet werden. Die Kommunikationsreichweite sinkt damit auf ca. 400 m. Wenn die Dachantenne verwendet wird, erhöht sich die Dämpfung zusätzlich zu den 10 dB durch das Fahrerhaus um weitere 5,3 dB, was die Kommunikationsreichweite auf ca. 40 m reduziert. Wird der Anhänger um 30° nach rechts geknickt, ist die Dämpfung in dem Bereich hinter dem Anhänger bei beiden Antennenpositionen nochmal höher. Für die Seitenantennen führt es zu einer Dämpfung von 8,8 dB und für die Dachantenne von 9,1 dB. Die Kommunikationsreichweite sinkt so auf ca. 180 m und 20 m.

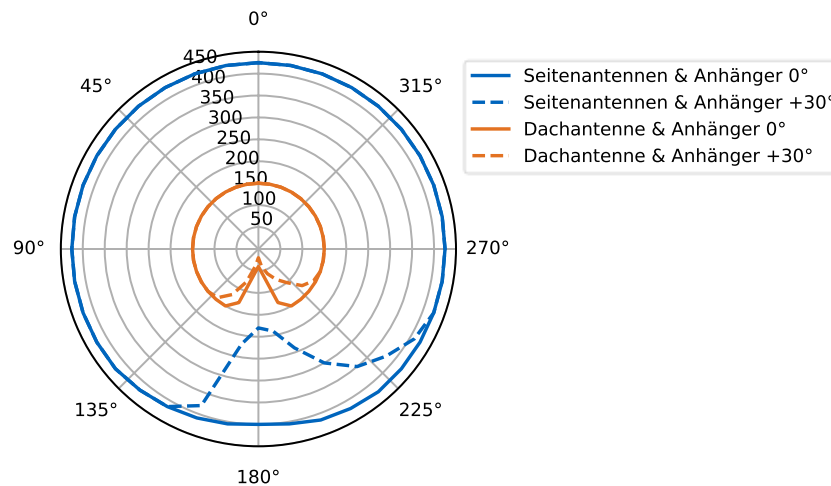


Abbildung 5.3: Der Lkw ist in der Mitte mit Ausrichtung auf 0°. Die farbigen Linien stellen die maximale Kommunikationsreichweite [m] in alle Richtungen abhängig vom Anhängerkwinkel und Antennenpositionen dar. Der Anhänger dämpft die Kommunikation nach hinten (180°).

Die Auswertung der beiden Antennenkonstellationen hat deutlich gezeigt, dass, obwohl in Simulation für Lkw meist von einer Dachantenne für die V2X-Kommunikation ausgegangen wird, diese in Realität keine ausreichende Performance liefert. Das Fahrerhaus und der Anhänger erzeugen eine zusätzliche Dämpfung von bis zu 19,1 dB bei gewinkeltem Container-Auflieger, was eine Kommunikation nach hinten verhindert. Mit zwei Antennen jeweils an den Seiten des Fahrerhauses kann bei geradem Anhänger hingegen über 400 m kommuniziert werden. Da dies dem Anwendungsfall der Autobahnfahrt entspricht, wird im Folgenden für die Kommunikationsreichweite, ebenfalls zwischen zwei Lkw, 400 m angenommen.

### 5.3 Manöverplanung für einzelne Szenarien

In dieser Untersuchung wurden einzelne Szenarien mit verschiedenen Kooperationsleveln simuliert, um deren Einfluss auf das Überholmanöver zu bestimmen. So wurde zunächst nur der Manöverplaner ohne die Abstimmung über die IDSM betrachtet, um zu klären, ob die generierten kooperativen Manöver überhaupt das Lkw-Überholmanöver optimieren können. Jedes Szenario wurde auf einer 14 km langen Straße durchgeführt, mit dem überholenden Lkw A bei 0 m startend und dem vorausfahrenden Lkw B bei 200 m. Als Höhenprofile für die Straße wurden zwei Gruppen gebildet: „Konstante Steigungen“ von -2 %, 0 % und +2 % sowie „Dynamische Steigungen“ mit 10 Abschnitten aus den Kassler Bergen. Die Auswertung dieser beiden Gruppen wird getrennt durchgeführt, weil angenommen wird, dass bei konstanten Steigungen die Wahl eines geeigneten Überholzeitpunktes keinen Mehrwert bringt. Für beide Lkw gab es die drei Gewichtsoptionen Leicht (20 t), Mittel (30 t) und Schwer (40 t) und die drei üblichen Hysteresen  $\pm 3$  km/h,  $\pm 7$  km/h und  $\pm 9$  km/h. Die Wunschgeschwindigkeit für den überholenden Lkw lag bei 75 km/h, 80 km/h oder 85 km/h und für den vorausfahrenden Lkw bei 73 km/h, 78 km/h oder 83 km/h, sodass Differenzgeschwindigkeiten von 2 km/h, 7 km/h oder 12 km/h erreicht werden. Alle Geschwindigkeitskombinationen, bei denen der vorausfahrende Lkw B schneller ist als Lkw A, wurden ausgelassen. Als Kooperationslevel wurden Level 0-Direkt, 2-Passiv, 3-Passiv+VSA, 4-Aktiv und 5-Aktiv+VSA ausgewählt. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über alle Szenarienparameter.

Tabelle 5.1: Übersicht der Szenarienparameter für die Simulation einzelner Lkw-Überholmanöver.

Parameter	Werte
Straßenlänge	14 km
Höhenprofil	-2 %, 0 %, +2 %, Kassler Berge
Start A	0 m
Start B	200 m
Geschwindigkeit A	75 km/h, 80 km/h, 85 km/h
Geschwindigkeit B	73 km/h, 78 km/h, 83 km/h
Gewicht A	20 t, 30 t, 40 t
Gewicht B	20 t, 30 t, 40 t
Hysterese A	$\pm 3$ km/h, $\pm 7$ km/h, $\pm 9$ km/h
Hysterese B	$\pm 3$ km/h, $\pm 7$ km/h, $\pm 9$ km/h
Kooperationslevel	0, 2, 3, 4, 5

Um die Auswirkungen der verschiedenen Kooperationslevel quantifizieren zu können, wurden verschiedene Bewertungskriterien herangezogen. Eines der wichtigsten Kriterien ist die Überholdauer, weil sie der größte Einflussfaktor für die Kosten der Pkw ist und unter 45 s liegen muss. Die nächste Metrik ist der Startpunkt für das Überholmanöver, um zu analysieren inwieweit der Manöverplaner eine späterer Überholstelle als kostengünstiger identifiziert. Für die Kosten der beteiligten Lkw werden die benötigte Zeit und der benötigte Kraftstoff für die gesamten 14 km in Relation zu den jeweiligen Werten gesetzt, wenn kein Lkw-Überholmanöver durchgeführt wird. Für die Kosten des rückwärtigen Verkehrs wird als Kriterium die durchschnittliche zeitliche Verzögerung eines Pkw durch das Überholmanöver betrachtet. Zusammenfassend werden also die folgenden sieben Bewertungskriterien analysiert:

- Dauer und Startpunkt des Überholmanövers
- Zeitunterschied im Vergleich zu „nicht Überholen“ für Lkw A, Lkw B und einen Pkw
- Kraftstoffunterschied im Vergleich zu „nicht Überholen“ für Lkw A und Lkw B

### 5.3.1 Ergebnisse auf konstanten Steigungen

Auf den Strecken mit konstanten Steigungen (K) von -2 %, 0 % und +2 % wurden je Kooperationslevel (KL) 1.377 Szenarien durchgeführt, was eine Gesamtsumme von 6.558 Szenarien ergibt. Im Folgenden wird dargestellt, wie die jeweiligen Kooperationslevel die zuvor beschriebenen Bewertungskriterien beeinflussen. Die Zahl über dem Boxplot gibt jeweils das arithmetische Mittel an. Die Y-Achsen wurden für eine bessere Vergleichbarkeit jeweils identisch zu den entsprechenden Plots in Abschnitt 5.3.2 zu den Ergebnissen in den Kassler Bergen gewählt.

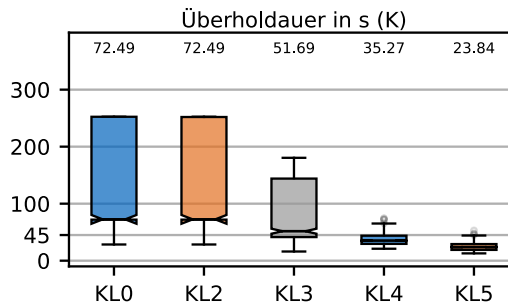


Abbildung 5.4: Auswirkung der Kooperationslevel auf die Überholdauer bei konstanten Steigungen.

In Abbildung 5.4 ist die Dauer der Überholmanöver dargestellt und es fällt auf, dass die Werte für KL0 und KL2 identisch sind und den größten Wertebereich von 30 s bis zu 250 s abdecken. Da die Steigung über die gesamte Strecke konstant ist, kann keine Stelle mit einer besseren Topologie für das Überholmanöver identifiziert werden. Daraus folgt, dass die Reduktion der Überholdauer von KL2 ( $\bar{\varnothing}$  72,4 s) zu KL3 ( $\bar{\varnothing}$  51,6 s) um ca. 30 % nur auf den verringerten Sicherheitsabstand zurückzuführen ist. Die Reduktion von KL2 ( $\bar{\varnothing}$  72,4 s) zu KL4 ( $\bar{\varnothing}$  35,2 s) um ca. 50 % wird hingegen nur durch die aktive Anpassung der Geschwindigkeit erreicht. Die schnellsten Überholmanöver werden mit KL5 ( $\bar{\varnothing}$  23,8 s) durchgeführt, was einer Reduktion von 67 % entspricht und fast alle Überholmanöver in unter 45 s ermöglicht.

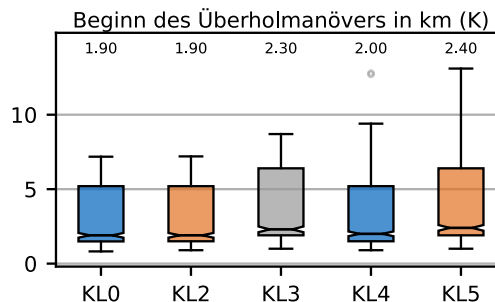


Abbildung 5.5: Auswirkung der Kooperationslevel auf die Startstelle des Überholmanövers bei konstanten Steigungen.

Abbildung 5.5 fasst zusammen, nach welchen Distanzen das Überholmanöver gestartet wurde, das für das direkte Überholmanöver in KL0 nur durch die ursprünglichen Relativgeschwindigkeiten beeinflusst wird. Bei allen anderen Kooperationsleveln wurde die gesamte zur Verfügung stehende Strecke betrachtet, um eine optimale Überholstelle zu identifizieren. Wie zuvor bei der Überholdauer gibt es keinen Unterschied zwischen KL0 ( $\bar{\varnothing}$  1,9 km) und KL2 ( $\bar{\varnothing}$  1,9 km). Dies ist damit zu begründen, dass durch die konstante Topologie keine Vorteile für einen späteren Überholzeitpunkt entstehen, sondern nur eine Verzögerung für den überholenden Lkw, weil dieser dafür länger hinter dem langsamen Lkw verbleiben müsste. Durch die aktive Kooperation in KL4 ( $\bar{\varnothing}$  2,0 km) verschiebt sich die Überholstelle um 100 m nach hinten und durch den VSA in KL3 ( $\bar{\varnothing}$  2,3 km) und KL5 ( $\bar{\varnothing}$  2,4 km) um jeweils 400 m nach hinten. Während ein späterer Startpunkt des Überholmanövers mit VSA erwartet wurde, weil der Startpunkt als Beginn des Spurwechsels definiert wurde und dieser sich mit kleinerem Abstand nach hinten verschiebt, wird auf den Einfluss der aktiven Kooperation in der Diskussion näher eingegangen.



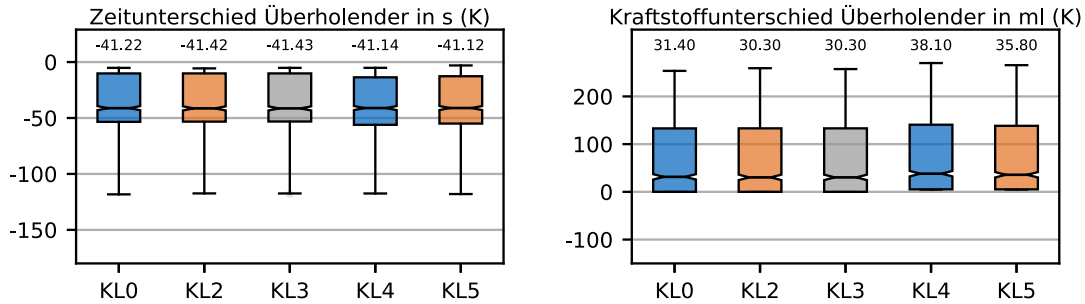


Abbildung 5.6: Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholenden Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver bei konstanter Steigung.

In Abbildung 5.6 ist dargestellt, wie sich die benötigte Zeit und Kraftstoffmenge zwischen den Überholmanövern der jeweiligen Kooperationslevel und einer Folgefahrt ohne Überholmanöver unterscheiden. Die absoluten Werte sind maßgeblich von der Gesamtlänge der Strecke abhängig. Wird bspw. einem langsamen Lkw für 10 km gefolgt, ist der Zeitverlust deutlich geringer, als wenn dem langsamen Lkw für 100 km gefolgt werden muss. Daher ist im Folgenden besonders der relative Unterschied zwischen den Kooperationsleveln relevant, der mit maximal 0,31 s für den Zeitunterschied gering ausfällt. Dies liegt daran, dass in allen Szenarien direkt überholt wird und damit kein Zeitverlust durch Warten auf eine bessere Überholstelle entsteht. Bei dem Kraftstoffunterschied fällt auf, dass bei über 25 % der Szenarien kein Kraftstoffunterschied zwischen Überholen und Folgefahrt entstanden ist. Dies ist damit erklärbar, dass 33 % der Szenarien während einer konstanten Bergabfahrt durchgeführt wurden, auf der durch die Hangabtriebskraft absolut kein Kraftstoff verbraucht wurde. Den großen Einfluss dieser Fahrten auf den Mittelwert gilt es im Folgenden zu bedenken. Die relativen Unterschiede beim Kraftstoffverbrauch liegen ohne aktive Anpassung der Geschwindigkeit (KL0, KL2 & KL3) vernachlässigbar bei 1,1 ml. Bei der aktiven Anpassung ist allerdings eine relative Erhöhung von ca. 8 ml für KL4 (Ø 38,1 ml) und 5 ml für KL5 (Ø 35,1 ml) ablesbar. Dies ist insbesondere auf die aktive Erhöhung der Geschwindigkeit während der Fahrten mit positiver Steigung zurückzuführen.

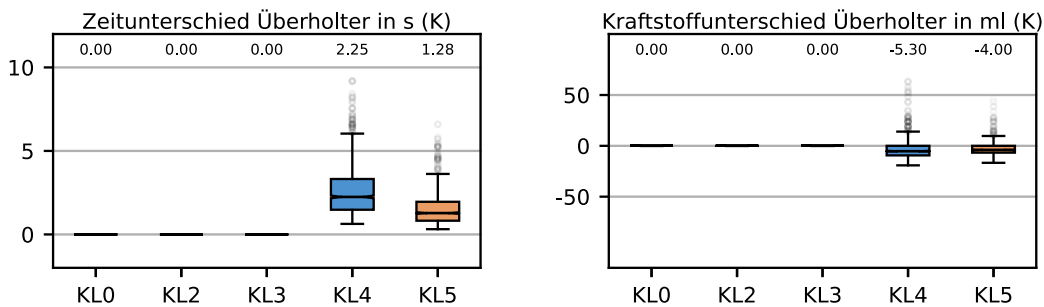


Abbildung 5.7: Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholten Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver bei konstanter Steigung.

Analog zur vorherigen Abbildung zeigt Abbildung 5.7 den Zeit- und Kraftstoffunterschied für den überholten Lkw. Die absoluten Werte stellen die Kosten für ein Überholmanöver dar und sind nicht abhängig von der Streckenlänge des Szenarios. Da der Lkw, der überholt wird, nur während der aktiven Kooperation seine Geschwindigkeit anpasst, ist der Unterschied bei KL0, KL2 und KL3 entsprechend 0 s und 0 ml. Bei KL4 verliert der Lkw Zeit (Ø 2,25 s) durch das Verlangsamten, spart dadurch jedoch Kraftstoff (Ø -5,3 ml). Durch die verkürzte Überholdauer mit VSA sind die Auswirkungen auf den überholten Lkw in KL5 etwas geringer (Ø 1,28 s und (Ø -4,0 ml).

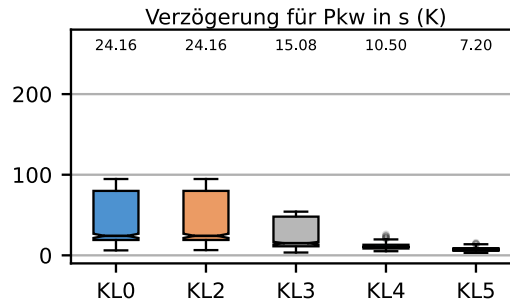


Abbildung 5.8: Durchschnittliche Zeitverzögerung für einen Pkw durch ein Überholmanöver bei konstanten Steigungen.

Abbildung 5.8 zeigt die durchschnittliche Zeitverzögerung durch das Überholmanöver für einen der insgesamt zehn von hinten heranfahrenden Pkw. Die in der Planung berücksichtigte Gesamtverzögerung für den Pkw-Verkehr liegt also jeweils zehnmal höher. Da die Verzögerung für den Pkw ausschließlich von der Überholdauer abhängt, ist ein ähnlicher Verlauf wie in Abbildung 5.4 zu erkennen. Während für KL0 und KL2 die Verzögerung bis zu 100 s betragen kann (Ø 24,16 s), sinkt sie mit steigendem Kooperationslevel um bis zu 70 % in KL5 (Ø 7,20 s).

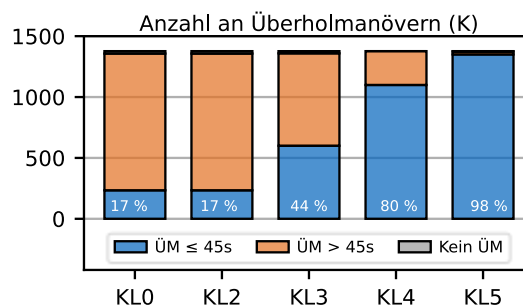


Abbildung 5.9: Übersicht der in unter 45 s durchgeführten Überholmanöver bei konstanter Steigung.

Zum Abschluss zeigt Abbildung 5.9 eine Übersicht, in wie vielen der getesteten Szenarien ein Überholmanöver durchführbar war und welcher Anteil insgesamt die 45 s Überholdauer nicht überschritten hat. Die Streckenlänge von 14 km wurde erfolgreich so gewählt, dass möglichst viele Überholmanöver in allen Kooperationsleveln abgeschlossen werden können. Während die Wahl des Überholzeitpunkts in KL2 den Anteil an Überholmanövern unter 45 s nicht erhöht (17 %), kann mit dem VSA in KL3 der Anteil auf 44 % gesteigert werden. Die aktive Kooperation allein in KL4 lässt den Anteil noch deutlicher auf 80 % steigern, während die Kombination aus aktiver Kooperation und VSA in KL5 einen Spitzenwert von 98 % erreicht.

### 5.3.2 Ergebnisse auf dynamischen Steigungen

Im Gegensatz zu den Szenarien mit konstanten Steigungen sind die Kasserle Berge durch eine dynamische (D) und extreme Topologie mit bis zu ±6 % Steigungen bekannt. Der entsprechende 90 km lange Teil der A7 wurde gleichmäßig in zehn sich teilweise überlappende 14 km Abschnitte aufgeteilt, um möglichst realistische und vielfältige Szenarien zu erzeugen. Über alle Szenarienparameter hinweg wurden je Kooperationslevel 4.566 Szenarien simuliert, was eine Gesamtanzahl von 23.275 Szenarien ergibt. Im Folgenden werden die Ergebnisse analog zu den Szenarien mit konstanten Steigungen dargestellt, wobei der Fokus jedoch auf dem Unterschied durch die gewechselte Topologie liegt.

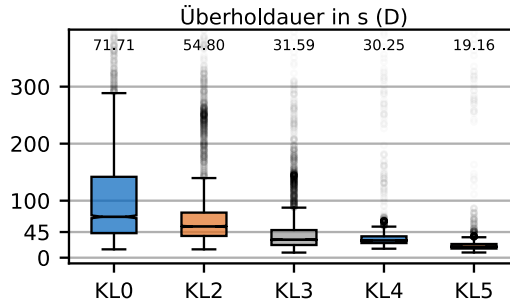


Abbildung 5.10: Auswirkung der Kooperationslevel auf die Überholdauer in den Kassler Bergen.

Abbildung 5.10 zeigt, wie schon bei der konstanten Steigung ( $\bar{\varnothing}$  72,4 s), eine hohe Überholdauer für KL0 ( $\bar{\varnothing}$  71,7 s). Durch die dynamische Topologie kann jedoch schon allein mit einer geeigneten Wahl der Überholstelle in KL2 die Dauer um 23 % reduziert werden ( $\bar{\varnothing}$  54,8 s). Der zusätzliche VSA in KL3 verringert die Dauer weiter um 40 % ( $\bar{\varnothing}$  31,5 s) auf in etwa das gleiche Niveau wie KL4 mit der aktiven Kooperation ohne VSA ( $\bar{\varnothing}$  30,2 s). Die Kombination in KL5 erreicht nochmal 36 % kürzere Überholdauern ( $\bar{\varnothing}$  19,1 s) und liegt damit sogar 20 % unter den Überholdauern mit KL5 auf den konstanten Steigungen ( $\bar{\varnothing}$  23,8 s).

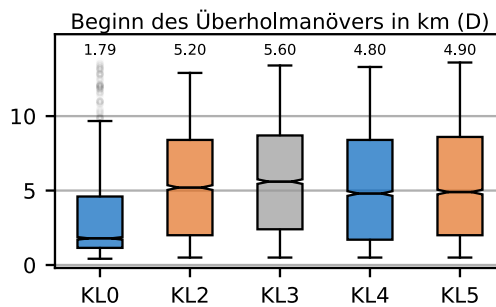


Abbildung 5.11: Auswirkung der Kooperationslevel auf die Startstelle des Überholmanövers in den Kassler Bergen.

Während es bei den konstanten Steigungen keinen Vorteil brachte, das Überholmanöver später zu starten, zeigt Abbildung 5.11, dass diese Möglichkeit zur Optimierung in den Kassler Bergen in über 50 % der Fälle genutzt wird. Während beim direkten Überholmanöver in KL0 das Überholmanöver erwartungsgemäß am frühesten durchgeführt wird ( $\bar{\varnothing}$  1,8 km), zögern die anderen Kooperationslevel den Start um 3,8 km bis 3,8 km hinaus (KL4  $\bar{\varnothing}$  4,8 km; KL3:  $\bar{\varnothing}$  5,6 km). Es zeigt sich wieder, dass die passive Kooperation in KL2 und KL3 das Überholmanöver 400 m bis 700 m später startet als die aktive Kooperation in KL4 und KL5.

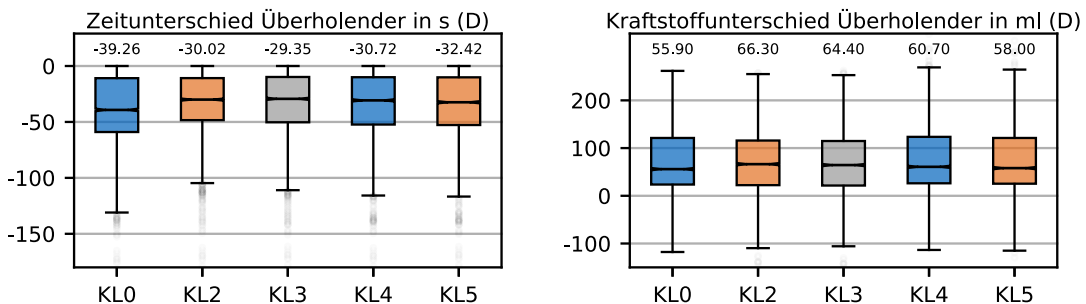


Abbildung 5.12: Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholenden Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver in den Kassler Bergen.

Durch einen späteren Start des Überholmanövers verändert sich der Zeitunterschied in den verschiedenen Kooperationsleveln. Während in KL0 keine Verzögerung in Kauf genommen wird ( $\emptyset$  -39,2 s), verliert der mit KL3 überholende Lkw 10 s durch die Kooperation ( $\emptyset$  -29,3 s). Der geringste Zeitverlust von ca. 7 s für die Kooperation im Vergleich zum direkten Überholen wird mit dem höchsten Kooperationslevel KL5 erreicht ( $\emptyset$  -32,4 s). Analog zeigt KL0 im Vergleich zur Folgefahrt für den überholenden Lkw ebenfalls den geringsten Unterschied beim Kraftstoffverbrauch ( $\emptyset$  55,9 ml). Durch die Kooperation steigt dieser um bis zu 11 ml an, wobei wieder der geringste Zuwachs von 2 ml durch das höchste Kooperationslevel KL5 erreicht wird ( $\emptyset$  58,0 ml).

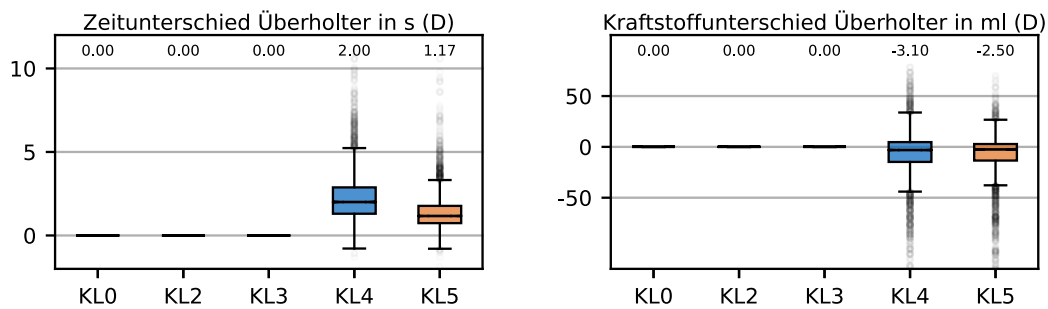


Abbildung 5.13: Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholten Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver in den Kassler Bergen.

Abbildung 5.13 zeigt analog zu den Szenarien mit konstanten Steigungen, dass der überholte Lkw durch die aktive Kooperation in KL4 und KL5 geringfügig Zeit verliert ( $\emptyset$  2,0 s;  $\emptyset$  1,1 s), jedoch geringfügig Kraftstoff einspart ( $\emptyset$  -3,1 ml;  $\emptyset$  -2,5 ml).

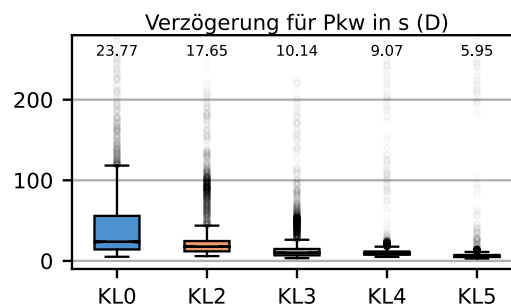


Abbildung 5.14: Durchschnittliche Zeitverzögerung für einen Pkw durch ein Überholmanöver in den Kassler Bergen.

Für die durchschnittliche Verzögerung eines Pkw spiegeln sich in Abbildung 5.14 dieselben Erkenntnisse wider, wie schon zuvor für die Überholdauer beschrieben. Bereits KL2 ( $\emptyset$  17,6 s) führt durch die Wahl der Überholstelle zu einer Verminderung von 25 % und das höchste Kooperationslevel KL5 ( $\emptyset$  5,9 s) zu einer Verminderung von 75 %.

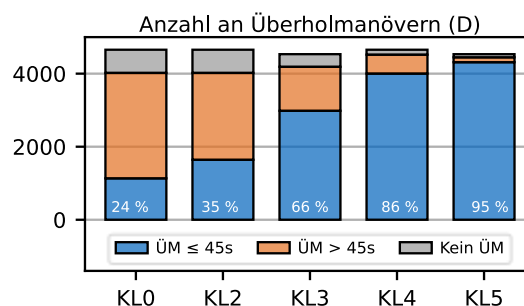


Abbildung 5.15: Übersicht der in unter 45 s durchgeführten Überholmanöver in den Kassler Bergen.

Wie zuvor schließt Abbildung 5.15 mit einer Übersicht der erfolgreich und innerhalb 45 s abgeschlossenen Überholmanöver ab. Trotz der bei den konstanten Steigungen ausreichenden Streckenlänge von 14 km, können ohne Kooperation (KL0) in den Kassler Bergen nur ca. 90 % der Überholmanöver innerhalb der Strecke erfolgreich abgeschlossen werden. Während KL1 den Anteil an innerhalb 45 s abgeschlossener Überholmanöver von 24 % auf 35 % anheben kann, bleibt die Anzahl an nicht abgeschlossenen Überholmanövern gleich. Der VSA in KL3 und die aktive Kooperation in KL4 erhöhen den Anteil der in unter 45 s abgeschlossenen Überholmanöver deutlich auf 66 % und 86 %. Die Kombination in KL5 schafft den höchsten Anteil von 95 %, was allerdings 3 % unter dem Ergebnis auf konstanten Steigungen liegt.

## 5.4 Bestimmung der IDSM-Übertragungsfrequenz

*Dieser Abschnitt basiert auf Paper [24].*

Nachdem der Manöverplaner im vorherigen Abschnitt vielversprechende Ergebnisse geliefert hat, gilt es nun zu testen, ob die Manöver über den verteilten Zustandsautomaten verlässlich abgestimmt werden können und welche Übertragungsfrequenz für die IDSM den besten Trade-Off zwischen Manöverqualität und Kanallast bietet. Weil der Übertragungskanal von allen Fahrzeugen und für alle Nachrichten gemeinsam genutzt wird, müssen die versandten Informationen auf ein notwendiges Minimum reduziert werden, um die Kanallast nicht zu überschreiten. Während die Nachrichtengröße der IDSM durch die benötigten Inhalte in Abschnitt 4.2.2 definiert ist und im Durchschnitt unter 100 Bytes liegt, verbleibt nur die Übertragungsfrequenz als Stellenschraube für die Kanallast. Die in Abschnitt 4.3.2 vorgestellte Implementierung des kooperativen Lkw-Überholassistenten wurde daher genutzt, um je 100 Überholmanöver mit den IDSM-Frequenzen 1, 2, 3, 5, 7 und 10 Hz in Simulation zu planen und abzustimmen. Als Strecke wurden zufällige Abschnitte der A7, A8 und A9 ausgewählt und die Überholmanöver wurden je zu 50 % in Kooperationslevel 4 und 5 durchgeführt. Während die Masse für beide Lkw immer bei 25 t und der initiale Fahrzeugabstand bei 200 m lag, wurden die weiteren Fahrzeugparameter zu je 20 % wie folgt variiert, um möglichst vielfältige Szenarien zu erhalten:

- Lkw A: 80 km/h, Lkw B: 70 km/h, Hysteresen A/B:  $\pm 5$  km/h
- Lkw A: 85 km/h, Lkw B: 75 km/h, Hysteresen A/B:  $\pm 5$  km/h
- Lkw A: 75 km/h, Lkw B: 70 km/h, Hysteresen A/B:  $\pm 7$  km/h
- Lkw A: 80 km/h, Lkw B: 77 km/h, Hysteresen A/B:  $\pm 7$  km/h
- Lkw A: 85 km/h, Lkw B: 80 km/h, Hysteresen A/B:  $\pm 7$  km/h

Für die Auswertung der insgesamt 600 Szenarien wurden verschiedene Bewertungskriterien wie die Anzahl an versendeten Nachrichten, die Zeit, die in den jeweiligen Zuständen verbracht wurde, und die Qualität des Überholmanövers betrachtet. Die Anzahl an versendeten Nachrichten steigt von ca. 120 bei 1 Hz gleichmäßig zu ca. 1.200 bei 10 Hz an. Es wird angenommen, dass mit der höchsten Übertragungsfrequenz das Überholmanöver am besten abgestimmt werden kann, weil die Informationen häufiger und damit mit geringeren Verzögerungen ausgetauscht werden. Für den Vergleich der Manöverqualität werden daher die Ergebnisse aus den Abstimmungen mit 10 Hz als optimal angenommen und geprüft, inwieweit eine geringere Frequenz zu Abweichungen führt.

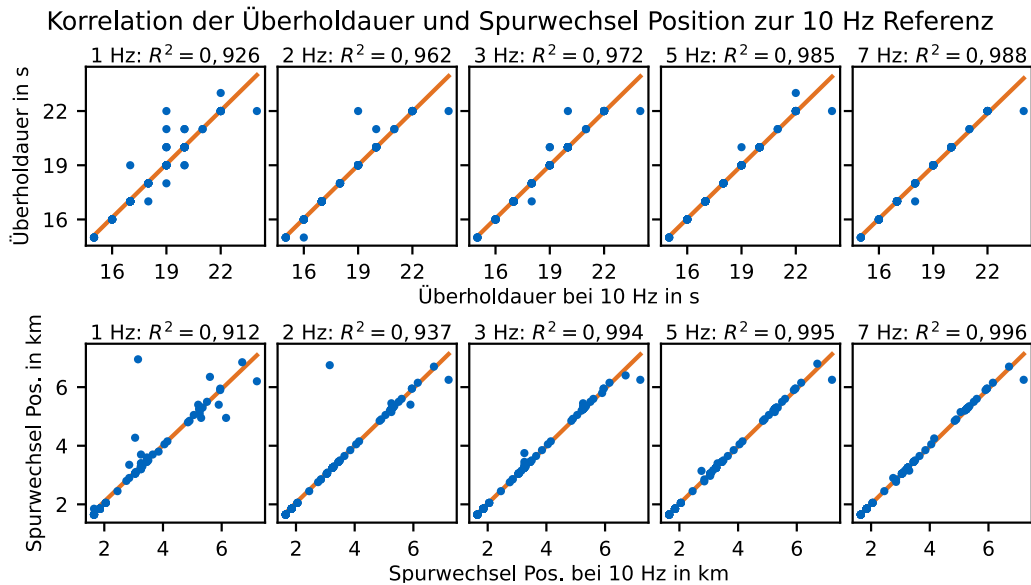


Abbildung 5.16: Korrelation der Überholdauer und des Überholstarts zwischen verringerten IDSM-Frequenzen und 10 Hz [24].

Als zwei wesentliche Einflussfaktoren auf die Manöverqualität werden im Folgenden die Überholdauer und die Startposition des Überholmanövers betrachtet. Abbildung 5.16 zeigt dafür die Korrelation dieser Werte zwischen verringerten IDSM-Frequenzen und 10 Hz. Für die Überholdauer bei 7 Hz ( $R^2 = 0,98$ ) und 5 Hz ( $R^2 = 0,98$ ) ist eine sehr starke Korrelation erkennbar. Mit weiter fallenden Frequenzen sinkt diese auf einen Tiefstwert bei 1 Hz ( $R^2 = 0,92$ ) und verursacht im Durchschnitt längere Überholdauern. Für den Beginn des Überholmanövers gibt es für 3, 5 und 7 Hz ebenfalls eine sehr starke Korrelation ( $R^2 = 0,99$ ). Für 1 Hz ( $R^2 = 0,91$ ) und 2 Hz ( $R^2 = 0,93$ ) werden allerdings Abweichungen vom optimalen Überholmanöver deutlich.

Über alle Einflussgrößen der Manöverqualität zeigt sich eine starke Korrelation zwischen den mit 5 Hz und 7 Hz abgestimmten Manövern. Für 2 Hz und 3 Hz sind Abweichungen erkennbar, die jedoch je nach Situation tolerabel sein können. Mit 1 Hz wurden die Manöver weiterhin erfolgreich abgestimmt und durchgeführt, jedoch fand die Abstimmung teilweise zu langsam statt, sodass bspw. der eigentlich optimale Überholzeitpunkt verpasst wurde. Den besten Trade-Off zwischen Manöverqualität und Kanallast bietet daher eine IDSM-Übertragungsfrequenz von 5 Hz. Wenn der Übertragungskanal bereits durch viele andere Nachrichten wie CAM, CPM oder MCM stark ausgelastet ist, kann die IDSM-Frequenz jedoch auf bis zu 2 Hz gesenkt werden. Da bei 1 Hz die Manöverqualität degradiert und ein bereits stark ausgelasteter Übertragungskanal mit höheren Wahrscheinlichkeiten zu Paketverlusten führt, sollte eine IDSM-Frequenz von unter 2 Hz vermieden werden.

## 5.5 Auswirkung der Kooperation auf Langstrecken

Nachdem in Abschnitt 5.3 die Manöverplanung und in Abschnitt 5.4 die Abstimmung betrachtet wurde, soll nun untersucht werden, welchen Einfluss der kooperative Lkw-Überholassistent bei längeren Fahrten hat. Dafür wurden verschiedene Simulationen über die gesamten Streckenabschnitte der A7, A8 und A9 durchgeführt, bei denen ein überholender Lkw jeweils am Anfang startet und sich einem langsamer fahrenden Lkw nähert. Wird der langsamere Lkw überholt, verschwindet dieser und ein neuer Lkw wird, wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, 150 m vor dem

überholenden Lkw erstellt. Kann ein vorausfahrender Lkw nicht überholt werden, wird in eine Folgefahrt bis zum Streckenende übergegangen. Für eine möglichst realistische und repräsentative Verkehrsverteilung wurde diese aus dem HighD-Datensatz abgeleitet. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt ist die häufigste Geschwindigkeit für einen Lkw 85 km/h, weshalb diese als Geschwindigkeit für den überholenden Lkw gesetzt wurde. Als Hysterese wurde die Standardeinstellung des MAN Truck & Bus GPS-Tempomaten von  $\pm 7$  km/h gesetzt und ein passend zur Geschwindigkeit eher leichtes Gewicht von 25 t angenommen. Für die zu überholenden Lkw wurden aus der Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten 1x75 km/h, 2x77 km/h, 4x79 km/h, 7x81 km/h und 10x83 km/h abgeleitet. Diese 24 Lkw reichen aus, dass über die gesamte Streckenlänge nach jedem erfolgreichen Überholmanöver ein neuer langsamer Lkw vor den überholenden Lkw gesetzt werden kann. Die zu überholenden Lkw sind aufsteigend nach der Geschwindigkeit sortiert, um sicherzustellen, dass nicht ein „schweres“ Überholmanöver mit geringer Relativgeschwindigkeit mögliche „leichtere“ Überholmanöver mit hoher Relativgeschwindigkeit verhindert. Die Hysteresen von  $\pm 3$  km/h,  $\pm 5$  km/h und  $\pm 7$  km/h wurden gleichmäßig verteilt und die Massen von 20 t, 30 t und 40 t so zugeordnet, dass langsame Lkw tendenziell schwerer beladen sind. Mit dieser Verkehrsverteilung wurde die Simulation auf den drei Abschnitten jeweils mit Kooperationslevel KL0 bis KL5 durchgeführt, sodass der überholende Lkw insgesamt ca. 1.680 km in 18 Fahrten zurücklegte. Die für die Abstimmung und Durchführung des Manövers notwendigen IDSM wurden durchgehend mit einer Übertragungsfrequenz von 5 Hz versendet. Tabelle 5.2 fasst nachfolgend die Eckdaten der beschriebenen Simulationsdurchläufe zusammen.

Tabelle 5.2: Parameterübersicht der Simulationsfahrten.

Parameter	Werte
Strecken	90 km A7 (Kir→Göt), 115 km A8 (Muc→Ulm), 75 km A9 (Muc→Ing)
Startpositionen	Überholender Lkw 0 m Zu überholende Lkw je 150 m vor überholendem Lkw
Kooperationslevel	0 bis 5
Überholender Lkw	85 $\pm$ 7 km/h, 25 t
Überholte Lkw	75 $\pm$ 3 km/h, 40 t; 77 $\pm$ 5 km/h, 40 t; 77 $\pm$ 7 km/h, 30 t; 79 $\pm$ 3 km/h, 40 t; 79 $\pm$ 5 km/h, 30 t; 79 $\pm$ 7 km/h, 40 t; 79 $\pm$ 3 km/h, 30 t; 81 $\pm$ 5 km/h, 40 t; 81 $\pm$ 7 km/h, 30 t; 81 $\pm$ 3 km/h, 30 t; 81 $\pm$ 5 km/h, 20 t; 81 $\pm$ 7 km/h, 40 t; 81 $\pm$ 3 km/h, 30 t; 81 $\pm$ 5 km/h, 30 t; 83 $\pm$ 7 km/h, 40 t; 83 $\pm$ 3 km/h, 30 t; 83 $\pm$ 5 km/h, 30 t; 83 $\pm$ 7 km/h, 20 t; 83 $\pm$ 3 km/h, 40 t; 83 $\pm$ 5 km/h, 30 t; 83 $\pm$ 7 km/h, 30 t; 83 $\pm$ 3 km/h, 20 t; 83 $\pm$ 5 km/h, 40 t; 83 $\pm$ 7 km/h, 30 t;

Alle Simulationsfahrten liefen stabil und erfolgreich durch. Abbildung 5.17 zeigt einen Ausschnitt der Geschwindigkeitsverläufe des überholenden und fünf überholter Lkw auf der A8. Durch die aktive Kooperation in KL5 wurde die Geschwindigkeit während der Überholmanöver im Rahmen der vorgegebenen Hysteresen angepasst. Außerdem ist zu erkennen, wie der überholende Lkw vor dem zweiten Überholmanöver erst die Geschwindigkeit reduziert, um eine spätere Überholstelle zu erreichen. Die kleinen Lücken zwischen den Geschwindigkeitsprofilen der überholten Lkw stellen den Wechsel dar, von dem zuletzt überholten Lkw zu dem nächsten Lkw, der vor dem überholenden Lkw fährt. Durch die Kooperation lagen die Überholdauern in diesem Abschnitt mit 22 s bis 27 s deutlich unter 45 s.

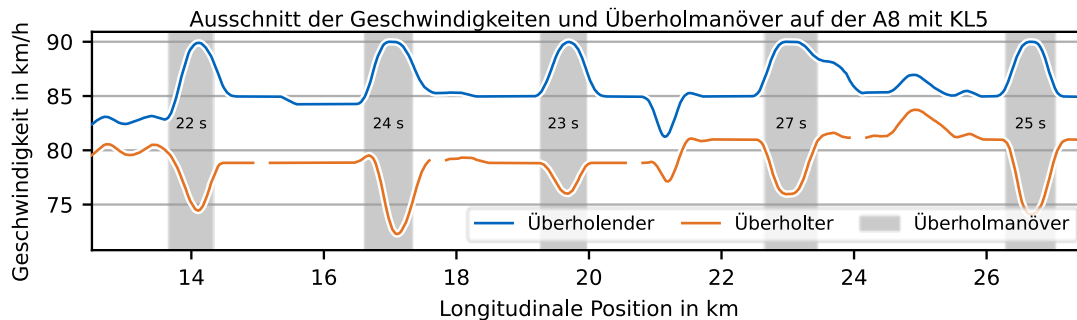


Abbildung 5.17: Ausschnitt der Geschwindigkeitsprofile des überholenden Lkw und fünf langsamer fahrenden Lkw, die in KL5 überholt wurden.

Um die Auswirkung der einzelnen Kooperationslevel genauer zu verstehen, wurden im Folgenden die Kooperationslevel jeweils kumuliert über die drei Autobahnabschnitte von summiert ca. 280 km betrachtet. In Abbildung 5.18 wird dargestellt wie viele Überholmanöver so insgesamt pro Kooperationslevel möglich waren und wie lange sie durchschnittlich gedauert haben. Durch das direkte und unkooperative Überholen in KL0 konnten mit 46 die zweitmeisten Überholmanöver durchgeführt werden. Im Durchschnitt lag die Dauer für diese Überholmanöver jedoch bei über 100 s. StVO-konform ohne Kooperation konnten in KL1 nur zwei Überholmanöver abgeschlossen werden, die Dauer lag dafür entsprechend niedriger bei 40 s. Durch die Auswahl der besten Überholstelle in KL2 konnte nur ein Überholmanöver durchgeführt werden, wenn auch mit 34 s um 6 s schneller. Dass trotz mehr Kooperation weniger Überholmanöver möglich waren, lässt sich wie folgt erklären: Obwohl die aktuelle Topologie schon geeignet war, um das erste Überholmanöver durchzuführen, wurde auf eine spätere bessere Überholstelle gewartet. Dadurch war direkt anschließend für das zweite Überholmanöver der einzige Abschnitt, auf dem das Überholmanöver möglich gewesen wäre, schon passiert. Mit dem zusätzlichen VSA in KL3 konnte der erste positive Effekt durch die Kooperation mit insgesamt 6 erfolgreichen Überholmanövern unter 45s wahrgenommen werden. Die aktive Kooperation steigert dies nochmal deutlich mit 39 Überholmanövern in durchschnittlich 37 s. Ergänzt mit dem VSA in KL5 konnten mit 55 die meisten Überholmanöver durchgeführt werden. Gleichzeitig wurden diese mit durchschnittlich 27 s am schnellsten durchgeführt, ca. 75 % schneller als in KL0. Trotz 9 mehr Überholmanövern als in KL0 konnte dadurch die Zeit, die der überholende Lkw auf der Überholspur verbringt, von 82 Minuten um 70 % auf 25 Minuten reduziert werden.

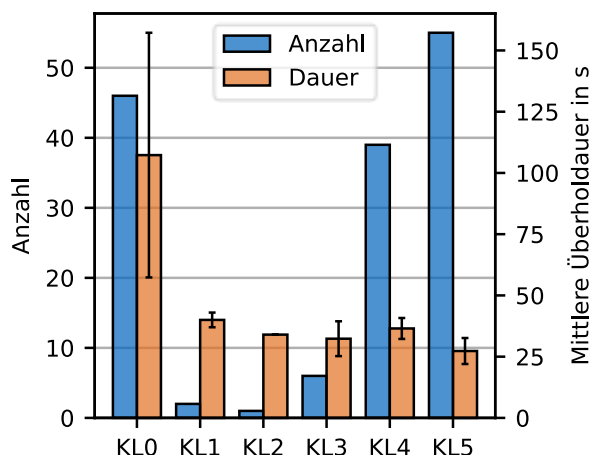


Abbildung 5.18: Kumulierte Anzahl an Überholmanövern und durchschnittliche Überholdauer je Kooperationslevel über die drei Autobahnabschnitte.



Im Folgenden werden die Kosten pro 100 km der einzelnen Manöverteilnehmer betrachtet. Abbildung 5.19 zeigt dafür jeweils die Kostendifferenz der verschiedenen Kooperationslevel zu einer Fahrt mit gleicher Verkehrsverteilung aber ohne Überholmanöver. In KL0 bis KL3 passt der Lkw, der überholt wird, seine Geschwindigkeit nicht an, wodurch keine Unterschiede bei den Zeit- und Kraftstoffkosten entstehen. Für den überholenden Lkw sind jedoch klare Unterschiede erkennbar. Durch die Überholmanöver in KL0 kann statt der langsamen Folgefahrt eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit gefahren werden, was in einem höheren Kraftstoffverbrauch (+0,38 l/100 km) und einer Zeitersparnis (-8,75 min/100 km) resultiert. Durch die vielen und langsamen Überholmanöver entsteht gleichzeitig jedoch die größte Verzögerung für die Pkw. Wäre theoretisch der gleiche Pkw bei allen Überholmanövern beteiligt, so würde er nur durch die Überholmanöver fast 10 min mehr für 100 km benötigen. Praktisch wird diese Verzögerung zum einen auf jeweils unterschiedliche Pkw bei den Überholmanövern aufgeteilt, zum anderen kann ein Überholmanöver aber mehr als nur einen Pkw betreffen (in der Manöverplanung wird von bis zu 10 Pkw ausgegangen). Mit der geringen Anzahl an Überholmanövern in KL1 und KL2 sind ebenfalls keine relevanten Unterschiede bei Kraftstoff- und Zeitkosten zu erkennen. In KL3 sind trotz der etwa nur 2 Überholmanöver pro 100 km eine Zeitersparnis von über 3 min/100 km und ein erhöhter Kraftstoffverbrauch von 0,21 l/100 km aufgetreten. Mit den wenigen und schnellen Überholmanövern treten gleichzeitig nur Verzögerungen von unter 0,5 min/100 km für die Pkw auf. Durch die aktive Kooperation in KL4 und KL5 sparen die überholten Lkw 0,05 bis 0,09 l/100 km ein, benötigen aber etwa 0,5 min länger auf 100 km. Für den überholenden Lkw ist mit der höheren Durchschnittsgeschwindigkeit wieder ein erhöhter Kraftstoffverbrauch von 0,56 und 0,48 l/100 km verbunden. Dies führt allerdings zu einer Zeitersparnis von -7,8 min/100 km für KL4 und einem Spitzenwert von -9,3 min/100 km für KL5. Im Vergleich zu KL0 liegt die dadurch verursachte Verzögerung für den Pkw um ca. 75 % tiefer bei +2,5 min/100 km.

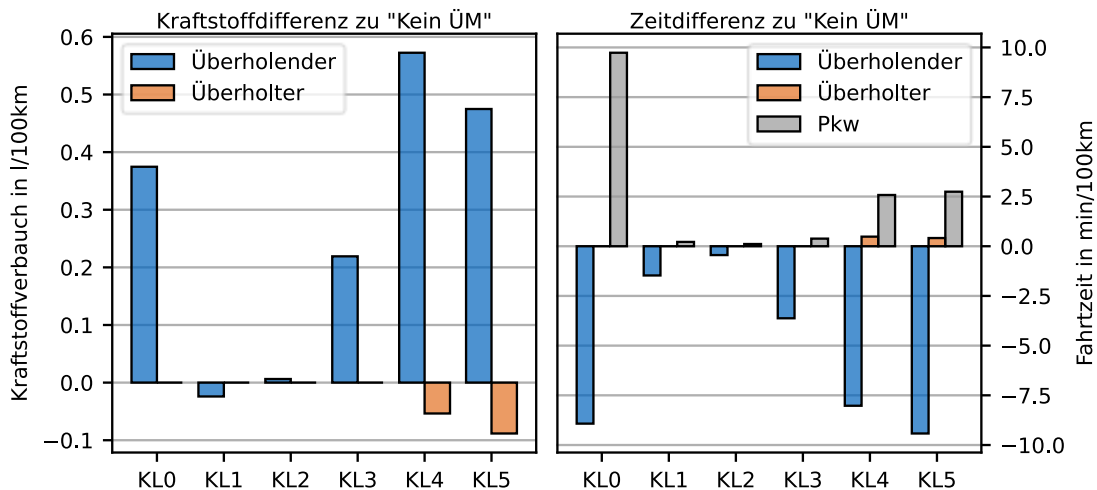


Abbildung 5.19: Kraftstoff- (links) und Zeitdifferenz (rechts) je 100 km in den verschiedenen Kooperationsleveln für alle Manöverteilnehmer.

## 5.6 Realversuch: Proof of Concept der Abstimmung

Die letzte Untersuchung dient als Proof of Concept der Kommunikation und des Abstimmungskonzeptes. Da in der Simulation ein perfekter Kommunikationskanal angenommen wurde, soll im Folgenden gezeigt werden, dass der kooperative Lkw-Überholassistent ebenfalls unter realen Bedingungen das Manöver erfolgreich abstimmen kann.

Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, können die Module der Simulation nahtlos durch die Module des Realfahrzeuges ausgetauscht werden. Als erster Schritt wurde nur das Kommunikationsmodul der Simulation gegen die reale Kommunikation durch die WaveBee ausgetauscht. Dafür wurde auf den Rechnern in beiden Fahrzeugen die Fahrzeugsimulation und der Überholassistent gestartet und mit der jeweiligen WaveBee gekoppelt. Anschließend wurden stichprobenartig fünf Simulationsfahrten aus Abschnitt 5.5 wiederholt, während die Versuchsträger 20 m auseinander auf einer freien Teststrecke standen. Der Vergleich zu den Simulationsfahrten ohne WaveBee zeigte keinerlei Unterschiede bei den Ergebnissen.

Abschließend sollte ein kooperatives Lkw-Überholmanöver zwischen den Versuchsträgern während einer Autobahnfahrt durchgeführt werden. Dafür wurde die Fahrzeugsimulation durch die direkte Anbindung an die Fahrzeugdaten der Versuchsträger ausgetauscht. Die Regelung des Fahrzeugs erfolgte jeweils durch einen geschulten Lkw-Fahrer, der versuchte den Handlungsempfehlungen des Assistenten zu folgen. Als Autobahnabschnitt wurde die A8 zwischen München und Odelzhausen ausgewählt, die durch die Erreichbarkeit, drei Spuren, kein Lkw-Überholverbot und die geringe Auslastung am Vormittag gute Voraussetzungen bietet. Die Versuchsträger wurden ohne Anhänger gefahren, um zusätzliche Komplexität in der Fahrzeugführung zu vermeiden. Zum Ausgleich der kürzeren Fahrzeuglänge wurde der Sicherheitsabstand entsprechend um 10 m auf 60 m erhöht. Ein verringerter Sicherheitsabstand während eines Realtests auf der Autobahn ist ausgeschlossen; das Kooperationslevel entsprach daher KL4 mit einer in beiden Versuchsträgern eingestellten Hysterese von  $\pm 5$  km/h. Zu Beginn wurden die Versuchsträger an der Autobahnraststätte Fuchsberg Ost geparkt, um die Systeme vorzubereiten. Anschließend wurden beide Versuchsträger auf die Autobahn gefahren und der Lkw-Überholassistent bei einem Abstand von ca. 200 m und einer Differenzgeschwindigkeit von 5 km/h gestartet. Das kooperative Lkw-Überholmanöver wurde umgehend abgestimmt und die Geschwindigkeitsprofile angezeigt. Durch den Geschwindigkeitsbegrenzer konnten die Lkw-Fahrer die Geschwindigkeit des Versuchsträgers entsprechend in 1 km/h Schritten anpassen. Zum geplanten Zeitpunkt des ersten Spurwechsels bei 60 m Sicherheitsabstand wurde dieser jedoch durch einen Pkw auf der linken Spur verhindert. Der tatsächliche Spurwechsel wurde anschließend bei einem Sicherheitsabstand von ca. 50 m durchgeführt. Die darauffolgende Anpassung der Geschwindigkeit wurde vom Fahrer des überholten Lkw gut umgesetzt ( $\pm 1$  km/h), während der Fahrer des überholenden Lkw erst nach vollständig abgeschlossenem Spurwechsel (ca. 8 s später) damit begann, dann aber ebenfalls gut folgen konnte. Der Spurwechsel zurück erfolgte wie geplant bei einem Sicherheitsabstand von 60 m und beendete das Überholmanöver nach 36 s. Dies entspricht der tatsächlich durch den Lkw-Überholassistenten geplanten Zeit, was jedoch daran liegt, dass sich die Effekte des verspäteten Spurwechsels und der verspäteten Anpassung der Geschwindigkeit zufälligerweise ausgleichen. Dennoch zeigt der Versuch, dass die Abstimmung des Manövers und die Synchronisierung der Lkw über die IDS M unter realen Bedingungen während einer Autobahnfahrt möglich ist.

# 6 Diskussion

Dieses Kapitel setzt sich mit der in dieser Arbeit verwendeten Methodik sowie den Untersuchungen zur Erprobung und Evaluierung kritisch auseinander. Limitationen durch getroffene Annahmen oder technische Grenzen werden hervorgehoben und die aus dieser Forschung neu gewonnenen Erkenntnisse gesammelt. Anschließend wird der kooperative Lkw-Überholassistent bewertet und ein ausführliches Fazit gezogen, sowie ein Ausblick für anschließende Arbeiten gegeben.

## 6.1 Diskussion der Methodik

Im Folgenden wird die in Kapitel 4 vorgestellte Methodik hinterfragt und diskutiert. Der Aufbau ist analog zur dortigen Kapitelstruktur.

### 6.1.1 Manöverplanung

Für die Manöverplanung wurden vier Ansatzpunkte identifiziert, die zur Optimierung des Überholmanövers beitragen sollen und in verschiedenen Kooperationsleveln miteinander kombiniert werden. Die genauen Auswirkungen der Kooperationslevel werden anschließend in der Diskussion der Untersuchungen betrachtet; es ist allerdings schon vorwegzunehmen, dass die betrachteten Ansätze positive Effekte zeigten. Es ist nicht möglich, die Vollständigkeit zu garantieren, dass es neben den betrachteten Ansätzen, keine weiteren Möglichkeiten gibt, um das Überholmanöver zu optimieren. Jedoch konnten nach den Untersuchungen und der intensiven Beschäftigung mit den Lkw-Überholmanövern keine neuen Ansätze zur weiteren Optimierung identifiziert werden. Daher wird angenommen, dass in der Tat die relevantesten Elemente für die Manöverplanung betrachtet wurden. Als Ausgangssituation für das Lkw-Überholmanöver wurde allerdings nur das in Abbildung 1.1 beschriebene Szenario betrachtet, in dem ein Lkw einen anderen Lkw überholt. Es könnten aber zusätzlich die Fälle eintreten, dass ein Lkw direkt mehrere Lkw überholen möchte, oder dass vor dem überholten Lkw kein Platz für den überholenden Lkw zum Einscheren vorhanden ist. Die Ansätze für das kooperative Lkw-Überholmanöver in diesen Situationen bleiben gleich, dennoch müsste das Konzept erweitert werden. Durch Verlangsamung der Geschwindigkeit des Lkw, der überholt wird, kann dieser bspw. vor sich eine Lücke erstellen, in die der Überholende einschert.

Die mathematische Formel für den verringerten Sicherheitsabstand über V2X wurde durch eine Analyse des Brems- und Reaktionswegs aufgestellt, wobei die Abschätzungen konservativ erfolgten, um ein möglichst hohes Maß an Sicherheit zu gewährleisten. Durch bspw. neue Methoden zur genaueren Bestimmung des Bremswegs könnte die Formel nahtlos angepasst bzw. erweitert werden. Der größte Diskussionspunkt liegt aber in der Wahl eines wichtigen Einflussfaktors, der Reaktionszeit. Die Annahme von 200 ms basiert auf der Verwendung von DENM für die Übertragung des Bremssignals und der CAM für die Überwachung der

Sendebereitschaft. Dies ist ein valider Ansatz und greift auf etablierte Standards zurück, ist jedoch nicht für die VSA optimiert. Mit dedizierten Platooning-Nachrichten, die mit höheren Frequenzen versendet werden, kann eine engere Überwachung der Sendebereitschaft und schnellere Reaktion auf Bremssignale erreicht werden. Dies würde jedoch auf Kosten der Kanallast geschehen, was gegen einen noch kleineren VSA abzuwägen ist. Für eine Erprobung des Systems in Realversuchen müssten außerdem noch einige konzeptionelle Erweiterungen in Form eines Watchdogs umgesetzt werden, der die Kommunikation überwacht und das Bremsmanöver auf der operativen Ebene dann tatsächlich umsetzt. Zusätzlich müssen Systeme, die bei Fehlfunktionen zu sicherheitskritischen Situationen führen können, spezielle Normen erfüllen (ISO 26262/ASIL-D) und durch redundante Systeme abgesichert werden. Neben den technischen Herausforderungen für eine reale Umsetzung, sind zusätzlich die gesetzlichen Rahmenbedingungen zu klären. Nach der StVO gilt für Lkw ein Sicherheitsabstand von mindestens 50 m auf der Autobahn, der nicht bewusst unterschritten werden darf. Da dies jedoch ebenfalls für Platooning notwendig ist, wurde bereits eine juristische Diskussion angestoßen, um die Absicherung von kleinen Abständen über V2X in die StVO aufzunehmen [197]. Der VSA für das Lkw-Überholmanöver könnte in Zukunft also von den rechtlichen Grundlagen, die für das Platooning entworfen werden, profitieren.

Die Auswahl der Überholstelle ermöglicht es, Abschnitte zu identifizieren, auf denen durch die Topologie besonders hohe Differenzgeschwindigkeiten auftreten, bzw. die Kosten für das Überholmanöver am geringsten sind. Diese passive Kooperation basiert hauptsächlich auf einem Informationsaustausch zwischen den beteiligten Lkw, sodass der Lkw, der überholt wird, seine Fahrt unverändert durchführen kann und nur der überholende Lkw seine Geschwindigkeit leicht anpasst, um genau die Überholstelle zu treffen. Da dadurch außerdem keine sicherheitskritischen Situationen auftreten, ist dieser Ansatz leicht als empfehlendes Fahrerassistenzsystem umsetzbar. Den größten Nutzen bringt dieser Ansatz, wenn beide Lkw mit einem GPS-Tempomaten fahren und damit einem dynamischen Geschwindigkeitsprofil folgen. Wenn der GPS-Tempomat deaktiviert ist, fährt der Lkw, solange die Steigung es zulässt, mit einer konstanten Geschwindigkeit. Damit würde eine Auswahl der Überholstelle nur an extremen Steigungen einen Vorteil bieten. Die Prädiktion des Geschwindigkeitsprofils erfolgt bspw. beim GPS-Tempomaten von MAN über 3 km, während für den kooperativen Überholassistenten 7 km verwendet werden. Die Berechnung eines längeren Geschwindigkeitsprofils ist möglich, jedoch stellt sich die Frage, inwieweit dies anschließend fahrbar ist, weil nicht präzisiert werden kann, ob der Lkw bspw. durch andere Fahrzeuge ausgebremst wird. Während kleiner Abweichungen auf der strategischen Ebene keine Probleme darstellen und diese durch das Design des verteilten Zustandsautomaten abgefangen werden können, könnten größere Abweichungen dazu führen, dass das Überholmanöver nur mit deutlich höheren Kosten durchführbar ist. In dieser Arbeit wurde angenommen, dass nur kleine Abweichungen auftreten. Wie häufig im Straßenverkehr größere Abweichungen auftreten, welche Auswirkung dies auf die Kosten der Überholmanöver hat und wie darauf reagiert werden kann, müsste für eine vollumfängliche Bewertung dieses Ansatzes noch beantwortet werden.

Durch eine aktive Anpassung der Geschwindigkeit während des Überholmanövers kann die Differenzgeschwindigkeit deutlich erhöht werden. Da für den Lkw eine Geschwindigkeitsabweichung im Rahmen der GPS-Tempomaten Hysterese üblich ist und toleriert wird, wurde für das kooperative Lkw-Überholmanöver die gleiche Hysterese verwendet. Natürlich ist es aber möglich, diese zu trennen, sodass bspw. bei einer kleinen Hysterese für den GPS-Tempomaten die Geschwindigkeit während des Überholmanövers dennoch stark angepasst werden kann. Falls das System nicht an die Hysterese des GPS-Tempomaten gebunden ist, stellt sich die

Frage, was die besten Geschwindigkeiten für das Überholmanöver sind. In dieser Arbeit wurde untersucht, welchen Benefit eine jeweils fest vorgegebene Geschwindigkeitsanpassung bewirkt. Das System kann jedoch nicht ermitteln, welche Hysterese zu den geringsten Kosten für das Überholmanöver führen würde.

Die Wahl der strategischen Ebene für die Manöverplanung erwies sich durch die langen Prädiktionshorizonte als angemessen und notwendig, jedoch ist für ein Level 4 automatisiertes System zusätzlich die taktische und operative Planungsebene notwendig. Diese wurden in der vorliegenden Arbeit nicht im Detail betrachtet, auch wenn Konzepte aus der Literatur vorgestellt wurden und erläutert wurde, wie die strategische Ebene die taktische Ebene parametrieren kann. Ohne die taktische Ebene wurde jedoch der kooperative Spurwechsel zwischen Lkw und Pkw nicht umgesetzt, sondern es wurde angenommen, dass dieser immer erfolgreich durchgeführt werden kann. Obwohl der kooperative Spurwechsel nach Definition des hierarchischen Manöverplaners zur taktischen Ebene gehört, hätte er für die Untersuchungen in abstrahierter Form ebenfalls in der strategischen Ebene umgesetzt werden können. Dies hätte es ermöglicht zu untersuchen wie bspw. mit Manöverabbrüchen umgegangen werden kann, wenn der Spurwechsel durch unkooperative Pkw nicht erfolgen kann. Um die tatsächliche Häufigkeit und damit die Auswirkungen bestimmen zu können wäre allerdings eine mikroskopische Verkehrssimulation nötig.

### 6.1.2 Manöverabstimmung

Die Manöverabstimmung basiert auf der Synchronisierung der Lkw im verteilten Zustandsautomaten über die IDSM. Grundlage dafür war das generische Collaborative Maneuver Protocol, das funktionspezifisch erweitert und angepasst wurde. Die Wahl eines Zustandsautomaten für die strategische Manöverplanung hatte sich in der Literatur bewährt und war ebenfalls in dieser Anwendung zielführend. Die Zustände und Bedingungen für Zustandswechsel waren passend gewählt, um das gesamte Manöver inkl. Planung abzudecken. Für Kooperationslevel ohne VSA hätten die Zustände „Abstand absichern“ jedoch direkt übersprungen werden können, um zwei Zustandswechsel zu vermeiden, weil ohne VSA der Sicherheitsabstand nur von 60 m bis 50 m abgesichert wird. Für die zuvor angesprochene Umsetzung der kooperativen Spurwechsel auf der strategischen Ebene wäre eine weitere Rolle „Spurwechsel gewährender Pkw“ nötig gewesen, die nachträglich ohne Anpassung der anderen Rollen ergänzt werden kann.

Die Synchronisierung erfolgte über die IDSM. Die funktionspezifische Payload war so entworfen, dass alle nötigen Informationen ausgetauscht werden konnten. Diese Informationen wurden dann unter anderem genutzt, um die Geschwindigkeitsprofile für die Lkw zu bestimmen. Eine Alternative wäre es, direkt die Geschwindigkeitsprofile auszutauschen. Damit müsste der empfangende Lkw nicht mehr die Berechnung durchführen; es wäre sogar nicht einmal mehr nötig, dass der empfangende Lkw weiß auf welche Weise der andere Lkw sein Geschwindigkeitsprofil berechnet hat. Für eine Kooperation zwischen Lkw verschiedener Hersteller könnte dies von Vorteil sein, wobei sich das Konzept der GPS-Tempomaten aller Hersteller stark ähnelt. Ein vollständiges Geschwindigkeitsprofil über 7 km ist jedoch, was den Speicherbedarf und damit die zu übertragene Daten betrifft, größer als nur die über die IDSM übermittelten Parameter. In [198] wurde daher die IDSM mit Geschwindigkeitsprofilen als Payload untersucht mit dem Ergebnis, dass deren Übertragung über V2X in einer speichereffizienten Komprimierung möglich ist. Beim Auftreten einer Desynchronisierung wird konsequent abgebrochen, um in eine StVO-konforme Solofahrt überzugehen. Abhängig davon, in welchem Zustand die Desynchronisierung eintritt, folgt allerdings weder eine sicherheits- noch manöverkritische Situation, womit kein

direktes Abbrechen nötig ist. Im Zustand „Vorbereitung“ wird bspw. der Abstand zwischen den Lkw von zu Beginn bis zu 400 m auf 60 m so reduziert, dass genau die Überholstelle getroffen wird. Bei einer Desynchronisierung in diesem Zustand könnten die Lkw asynchron im Zustand verweilen und das Manöver fortsetzen, während parallel versucht wird wieder zu synchronisieren. Ist dies innerhalb eines Timeouts oder gegen Erreichen der Überholstelle nicht möglich, wird der Manöverabbruch erst notwendig. Neben einer feineren Formulierung der Abbruchsbedingungen pro Zustand könnte die notwendige Frequenz der IDSM in jedem Zustand angepasst werden. Um nochmal auf den Zustand „Vorbereitung“ einzugehen, könnte hier durch die geringe Dynamik die IDSM-Frequenz reduziert werden. Obwohl dies keinen Einfluss auf die Manöverqualität haben sollte, könnte so die Kanallast verringert werden.

### 6.1.3 Implementierung, Simulation und Realfahrzeug

Die Implementierung des Überholassistenten und der Simulation sowie die Integration in die Versuchsträger im ROS1-Framework war erfolgreich. Ein für die Durchführung notwendiges Modul ist der GPS-Tempomat, der ebenfalls in dieser Arbeit umgesetzt wurde. Es wurde jedoch noch nicht das Pulse-and-Glide Konzept integriert, das mit den neuen Fahrzeuggenerationen mehr an Bedeutung gewinnt. Dadurch wählt der GPS-Tempomat auf flachen Straßenabschnitten eine konstante Geschwindigkeit, weshalb die Auswahl einer geeigneten Überholstelle keinen Vorteil bringt. Mit dem Pulse-and-Glide Verfahren, könnte die Überholstelle so gewählt werden, dass die Pulse-Phase des überholenden Lkw und die Glide-Phase des überholten Lkw genau aufeinandertreffen. In [199] wurde daher noch untersucht, welche Kosten durch das Abstimmen der Pulse-and-Glide Phasen während Überholmanövern auf flachen Abschnitten eingespart werden können: Zwischen Worstcase und abgestimmten Best Case konnten 11 % der Kosten reduziert werden. Da die Pulse-and-Glide Hysteresen auf 3 km/h begrenzt sind, um den umliegenden Verkehr nicht zu behindern, ist das Potenzial der Abstimmung damit beschränkt. Die Fahrt ohne Pulse-and-Glide entspricht dem Average Case, daher wird angenommen, dass die Ergebnisse dieser Arbeit durch Pulse-and-Glide GPS-Tempomat auf flachen Abschnitten um 5,5 % verbessert werden können. Durch die modulare Architektur kann für weitere Untersuchungen der verwendete GPS-Tempomat beliebig ausgetauscht werden.

Die Auswahl des besten Überholmanövers erfolgte nach einem naiven Ansatz, indem alle möglichen Überholmanöver simuliert und bewertet wurden. Diese Berechnung erfolgte ca. mit 1 Hz, was durch die geringe Dynamik auf strategischer Ebene vollkommen ausreichend ist. Wenn, wie in Abschnitt 6.1.1 angesprochen, aber nicht die Hysteresen des GPS-Tempomaten verwendet werden, sondern die Hysteresen für jedes Überholmanöver optimiert werden sollen, steigt die Komplexität des Optimierungsproblems. Durch eine Baumsuche anstatt einer naiven Suche und einer Implementierung in C++ statt Python sollte dies ebenfalls mit ca. 1 Hz berechenbar sein.

Die IDSM wurde als Protobuffer-Nachricht implementiert und folgt damit einem etablierten Standard zur Serialisierung von Nachrichten. Für die V2X-Kommunikation wird jedoch, um möglichst speichereffiziente Nachrichten zu erhalten, meistens ASN.1 für die Spezifikation verwendet [200]. Mit der Kommunikation zwischen nur zwei Lkw, wie in dieser Arbeit, ist die Kanallast durch die IDSM jedoch kein Bottleneck. Wenn aber umfangreiche Verkehrssimulationen mit Analyse der Kanallast folgen sollten, müsste das Modul zur Serialisierung der Nachrichten mit Protobuffer durch ASN.1 ausgetauscht werden.

Die Versuchsträger, die aufgebaut wurden, enthielten alle notwendigen Komponenten für die prototypische Erprobung und der Überholassistent konnte über einen einzigen ROS-launch Befehl gestartet werden. Das geplante Manöver wurde allerdings nicht automatisiert ausgeführt,

sondern es wurden lediglich Handlungsempfehlungen über ein Entwicklerdisplay an den Fahrer ausgegeben. Die Entwicklung des HMI lag nicht im Rahmen dieser Arbeit, daher wurde nicht untersucht, wie der Fahrer auf die kooperativen Überholmanöver reagiert, ob er die Handlungsempfehlungen tatsächlich umsetzt und wie sie am besten dargestellt werden sollten. Ebenfalls die verringerten Sicherheitsabstände konnten aufgrund der hohen Komplexität der Absicherung in den Versuchsträgern nicht getestet werden. Verschiedene Platooning-Projekte haben in der Vergangenheit aber gezeigt, dass die Abstände über V2X verringert werden können, weshalb der Fokus bei diesem Proof of Concept mit Realfahrzeugen bei der Planung und Abstimmung der Manöver lag.

## 6.2 Diskussion der Untersuchungen

Im Folgenden werden die in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen und Ergebnisse hinterfragt und diskutiert. Der Aufbau ist analog zur dortigen Kapitelstruktur.

### 6.2.1 V2X-Sicherheitsabstand

Diese erste analytische Untersuchung des VSA zeigte, dass sich die relative Überholdistanz technisch um 30-40 % reduzieren lässt. Es wurde aber nicht untersucht, inwieweit dies in Realität von den Lkw-Fahrern akzeptiert wird und welche Belastung dies für sie bedeutet. Da Lkw-Fahrer aber häufig ohne Absicherung den Sicherheitsabstand deutlich unterschreiten und Platooning Untersuchungen gezeigt haben, dass lange Fahrten mit VSA praktikabel sind, ist anzunehmen, dass der VSA ebenfalls beim Überholen Akzeptanz findet. Ein Nachweis bspw. in Fahrsimulatorstudien steht jedoch noch aus.

### 6.2.2 V2X-Antennenpositionen für Lkw

In dieser Untersuchung wurden die Versuchsträger verwendet, um die Seitenantennen mit der Dachantenne zu vergleichen. Es sollten die Seitenantennen verwendet werden, weil Fahrerhaus und Anhänger die Dachantenne zu stark abschirmen. Aus dieser Untersuchung kann jedoch nicht abgeleitet werden, was die absolut beste Antennenposition am Lkw ist, weil dies durch die große Anzahl an Bauformen für jeden Lkw individuell betrachtet werden muss. Es ist aber davon auszugehen, dass eine einzige Dachantenne nicht ausreicht und dass bspw. eine Integration der Antennen in die Seitenspiegel oder Kamerahalter des Spiegeleratzsystems großes Potenzial bietet. Ob die verwendeten Rundstrahlantennen oder bspw. eine Konstellation aus mehreren gerichteten Antennen eine bessere Performance bietet, ist eine relevante Frage, die sich direkt an diese Untersuchung anschließt. Dass zwei Antennen benötigt werden, ist außerdem eine wichtige Erkenntnis für Kanallastuntersuchungen, weil mit beiden Antennen nicht gleichzeitig gesendet werden kann, sondern dies nacheinander erfolgen muss, um Interferenzen zu vermeiden. Damit erzeugt ein Lkw eine doppelte Kanallast, was in den meisten Untersuchungen mit der generellen Annahme einer Antenne pro Fahrzeug nicht berücksichtigt wird.

### 6.2.3 Manöverplanung für einzelne Szenarien

In dieser Untersuchung wurden für eine Vielzahl an Szenarien die kooperativen Überholmanöver geplant und ausgewertet. Da die Szenarien aber gleichverteilt über den möglichen Szenarienraum gewählt wurden und nicht einer realistischen Verkehrsverteilung entsprechen, stellen die Ergebnisse eher eine Tendenz und ein theoretisches Potenzial dar und nicht die absoluten Auswirkungen der kooperativen Überholmanöver. Beim Vergleich der Kosten zwischen einem Überholmanöver und einer Folgefahrt ist außerdem die Streckenlänge ein entscheidender Faktor, weshalb hier nicht die absoluten Werte, sondern nur die Tendenz betrachtet werden darf. Eine wichtige Erkenntnis aus den Untersuchungen ist, dass die Kooperation für den Lkw, der überholt wird, kostenneutral abläuft. Dies beantwortet die Frage, warum dieser Lkw überhaupt die Kooperation eingehen sollte: Da keine direkten Kosten aus der Kooperation für ihn entstehen. Indirekt könnten aber dennoch Kosten für den überholten Lkw entstehen, bspw. wenn der Lkw, der überholt hat, an der nächsten Raststätte den letzten Parkplatz besetzt. Solche indirekten Kosten sind nur schwer zu messen und wurden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Wie der Fahrer des Lkw, der überholt wird, die Kooperation empfindet und ob dies bspw. als unfair wahrgenommen wird, ist eine relevante Frage, die sich anschließt und in Fahrsimulatorstudien beantwortet werden könnte. Eine weitere Erkenntnis ist, dass auf Abschnitten mit konstanter Steigung KL2 keinen Vorteil birgt, während auf den Kassler Bergen die Überholdauer im Vergleich zu KL0 um 23 % reduziert werden kann. Der Vorteil durch das kooperative Lkw-Überholmanöver ist also klar abhängig von der Topologie der Straße und es dürfen nie nur die beiden Lkw ohne Topologie betrachtet werden. Außerdem zeigen die Untersuchungen auch, dass die Fahrten mit Überholmanövern unter rein ökologischen Gesichtspunkten nicht am effizientesten erscheinen. Durch die höhere Geschwindigkeit im Vergleich zur Folgefahrt wird entsprechend mehr Kraftstoff verbraucht. Werden aber nicht nur die einzelnen Fahrzeuge, sondern der gesamte Straßenverkehr betrachtet, sollte durch die Überholmanöver ein effizienterer Verkehrsfluss entstehen, weil anderenfalls das allgemeine Lkw-Überholverbot zu bevorzugen wäre. Wie die kooperativen Überholmanöver den Verkehrsfluss jedoch im Detail beeinflussen, müsste durch eine mikroskopische Verkehrssimulation untersucht werden.

### 6.2.4 Bestimmung der IDSM-Übertragungsfrequenz

Mit dieser Untersuchung sollte bestimmt werden, welche Übertragungsfrequenz der IDSM den besten Trade-Off zwischen Manöverqualität und Kanallast bietet. Dafür wurden je 100 verschiedene Szenarien mit 1, 2, 3, 5, 7 und 10 Hz simuliert. Bei der Wahl der Szenarien wurde versucht, möglichst realistische Szenarien zu finden. Da jedoch der Fokus auf dem Abstimmungskonzept lag, ist es ausreichend, plausible Szenarien zu wählen. Im weiteren Verlauf wurde allerdings ein perfekter Übertragungskanal ohne Paketverluste angenommen. Das Ergebnis, dass 5 Hz die beste Wahl für die IDSM ist, gilt daher nur eingeschränkt auf einen Kanal, der nicht überlastet ist. Wie mit der IDSM unter hohen Kanallasten umgegangen werden sollte, ist nicht trivial zu beantworten. Dafür müsste zuerst die Ursache für die hohe Kanallast identifiziert werden und anschließend eine Priorisierung erfolgen. In einem Szenario, in dem durch viele V2X-fähige Fahrzeuge viele CPM ausgetauscht werden, die durch doppelte Erfassung eines Objektes durch mehrere andere Fahrzeuge entsprechend viel Redundanz enthalten, könnte eine IDSM über eine CPM favorisiert werden. Wenn allerdings Manöverpläne ausgetauscht werden, insbesondere in sicherheitskritischen Situationen, sollte eine Abstimmung auf operativer oder taktischer Ebene gegenüber der strategischen Abstimmung über die IDSM bevorzugt werden. Doch bereits bevor die Kanallast ihr Limit erreicht, hätte die Untersuchung noch weiter verfeinert werden



können, indem die beste Übertragungsfrequenz je Zustand bestimmt worden wäre. So ist bspw. während der Abstimmung eine höhere Frequenz sinnvoller als während der Vorbereitung, um die Überholstelle zu erreichen. Es könnte sein, dass nur in einem Zustand die Übertragungsfrequenz von 5 Hz notwendig ist und in allen anderen Zuständen eine geringere Frequenz ausreicht. Sollte dies genauer untersucht werden, würde es sich anbieten, dies direkt mit einer zusätzlichen Simulation der Kanallast in verschiedenen Szenarien zu verbinden. Nichtsdestotrotz hat die Untersuchung einen klaren Richtwert für die IDSM-Frequenz geliefert, der es erlaubt, die Nachricht im Vergleich zu anderen etablierten Nachrichten einzuordnen. Mit 5 Hz und ca. 100 Bytes benötigt die IDSM etwa 0,5 kB/s während die CAM mit 10 Hz und ca. 400 Bytes [113] etwa 4 kB/s benötigt und damit den Übertragungskanal achtmal stärker beansprucht. Da die IDSM aber von zwei Fahrzeugen mit je zwei Antennen versendet wird, benötigt die Abstimmung insgesamt 2 kB/s. Für die Kanallast bedeutet dies, dass die Belastung durch eine Abstimmung und Durchführung eines kooperativen Lkw-Überholmanövers um 50 % geringer ist als nur die Grundbelastung durch die CAM eines einzigen Pkw.

### 6.2.5 Auswirkung der Kooperation auf Langstrecken

In der letzten simulativen Untersuchung wurden mehrere Lkw-Überholmanöver hintereinander durchgeführt. Die Ergebnisse hängen maßgeblich von den Parametern des überholenden Lkw und des umgebenden Verkehrs ab. Es wurde versucht, eine möglichst realistische Verkehrsverteilung aus dem HighD-Datensatz abzuleiten, jedoch ist dies für die Masse und Hysterese des GPS-Tempomaten nicht möglich. Außerdem waren die Lkw, die überholt werden sollten, aufsteigend nach der Geschwindigkeit sortiert. Zum einen verhindert dies, dass durch einen Lkw, der nicht überholt werden kann, ebenfalls die folgenden Überholmanöver scheitern, zum anderen stellt dies aber auch die optimale Reihenfolge dar, um möglichst viele Überholmanöver durchführen zu können. Als Wunschgeschwindigkeit für den überholenden Lkw wurde 85 km/h gewählt, weil dies die häufigste Geschwindigkeit für Lkw auf der Autobahn darstellt. Gleichzeitig sind Lkw, die mit 90 km/h fahren, jedoch die, die den größten Bedarf an Überholmanövern aufweisen. Mit einer höheren Geschwindigkeit des überholenden Lkw und gleichbleibender Geschwindigkeiten der überholten Lkw sinken entsprechend die Kosten für die Überholmanöver. Daher kann aus diesen Fahrten nicht abgeleitet werden, dass ein kooperatives Überholmanöver x Sekunden dauert, sondern es können nur die relativen Auswirkungen der einzelnen Kooperationslevel dargelegt werden. Zwei anschauliche und greifbare Faktoren sind die Anzahl an erfolgreichen Überholmanövern und die durchschnittliche Dauer. Mit KL0 konnten zwar viele (55) Überholmanöver durchgeführt werden, die jedoch lange gedauert haben (107 s). Unter der Bedingung, dass die Überholmanöver StVO-konform ablaufen, konnte so gut wie kein Überholmanöver durchgeführt werden (2). Dies deckt sich mit den Erwartungen und den Beobachtungen von realen Überholmanövern. Dass mit KL2 weiterhin kaum Überholmanöver möglich sind (1), ist zunächst überraschend, weil die vorherigen Untersuchungen, insbesondere in den Kasser Bergen, bereits großes Potenzial von ca. 20 % verringerter Überholdauer versprochen. Es muss aber bedacht werden, dass ab KL1 nur Überholmanöver durchgeführt werden, die nicht länger als 45 s dauern. Um von den 107 s ohne Kooperation auf unter 45 s zu kommen, wird aber eine Reduktion der Überholdauer von fast 60 % benötigt. Selbst mit den zusätzlichen 30 % an Reduktion durch den VSA in KL3 wird dies nur selten (6) erreicht. Erst mit der aktiven Kooperation in KL4 und KL5 wendet sich das Blatt und es werden mehr (39 & 55) Überholmanöver deutlich schneller (37 s & 27 s) durchgeführt. Als Erkenntnis ist daraus mitzunehmen, dass das Potenzial von KL2 und KL3 unter realen Verkehrsbedingungen nicht ausreicht, um die Dauer der Überholmanöver verlässlich auf unter 45 s zu reduzieren. Wenn die

45 s Grenze also weiter bestehen bleibt, ist eine aktive Kooperation unerlässlich. Gleichzeitig ist das Potenzial, das KL5 zeigt, bemerkenswert. Die Kooperation ermöglicht es, die Überholmanöver in etwa 25 % der Zeit abzuschließen, damit die Kosten für die Pkw proportional zu reduzieren, dem überholten Lkw keine direkten Kosten zu verursachen und dem überholenden Lkw eine Weiterfahrt mit Wunschgeschwindigkeit zu ermöglichen.

### 6.2.6 Realversuch

Ziel der Untersuchung eines Lkw-Überholmanövers während einer Realfahrt war es zu zeigen, dass die Abstimmung und Synchronisierung der Lkw durch die IDSM unter realen Bedingungen auf der Autobahn möglich ist. Der erfolgreiche Versuch dient daher als Proof of Concept des Kommunikationskonzepts mit dem realen V2X-Kommunikationskanal. Da jedoch nur ein kooperatives Lkw-Überholmanöver durchgeführt wurde, kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie zuverlässig und stabil die Kommunikation funktioniert. Hierfür wären deutlich längere Realfahrten nötig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden konnten. Während die kurze Realfahrt für das Abstimmungskonzept positiv verlief, wurde allerdings eine Schwachstelle der strategischen Manöverplanung aufgezeigt: Der direkte Wechsel auf die Überholspur wurde durch einen Pkw verhindert und musste verspätet durchgeführt werden. Da der Spurwechsel und die Kooperation mit dem Pkw nicht zur strategischen, sondern zur taktischen Manöverplanung gehören, ist der hier entwickelte Lkw-Überholassistent immer auf die taktische Manöverebene angewiesen.

## 6.3 Limitationen

Durch getroffene Annahmen oder technische Grenzen, entstehen für das in dieser Arbeit entwickelte und getestete Konzept Limitationen, die im vorherigen Abschnitt bereits angesprochen wurden. Die wichtigsten Limitationen werden im Folgenden noch einmal zusammengefasst.

**Ausgangssituation:** Über die gesamte Arbeit hinweg wurde angenommen, dass beim Lkw-Überholmanöver nur ein Lkw einen anderen Lkw überholt. Auf der Autobahn kann es allerdings zu Kolonnenbildungen zwischen Lkw kommen, sodass ein Lkw nicht direkt nach einem Lkw einscheren kann und mehrere Lkw gleichzeitig überholen muss. Durch Platooning wird dieser Effekt in Zukunft wahrscheinlich sogar aktiv verstärkt. Es ist zwar anzunehmen, dass die hier entwickelten Ansätze und Abstimmungsmechanismen weiterhin gültig sind, wenn mehrere Lkw überholt werden sollen, jedoch werden Anpassungen nötig sein, wie bspw. eine weitere Rolle im Zustandsautomat. Wie genau die Anpassungen aussehen müssten und welche Auswirkung dies auf die hier vorgestellten Konzepte für kooperative Lkw-Überholmanöver haben würde, wurde nicht untersucht.

**Die Rolle des Lkw-Fahrers:** Obwohl es denkbar ist, dass die kooperativen Überholmanöver in Zukunft automatisiert ablaufen können, so ist eine Umsetzung in erster Instanz als Level 2 Fahrerassistenzsystem wahrscheinlicher. Das heißt der Fahrer muss aktiv in das Manöver eingebunden werden und ist für die Durchführung selbst verantwortlich. In dieser Arbeit wurde jedoch nicht untersucht, welche Informationen über ein HMI an den Lkw-Fahrer übermittelt werden müssen, wie diese am besten dargestellt werden sollten und wie der Fahrer auf die kooperativen Lkw-Überholmanöver reagiert. Außerdem wurde nicht untersucht, welche

Auswirkungen Manöverabbrüche durch den Lkw-Fahrer haben, wenn dieser das Assistenzsystem nicht akzeptiert.

**Verkehrssimulation:** Es wurde auf makroskopischer Ebene im Detail untersucht, welchen direkten Einfluss die Kooperation während des Überholmanövers auf die beteiligten Teilnehmer hat. Der Straßenverkehr besteht jedoch aus weit mehr Fahrzeugen und durch das Überholmanöver könnten zusätzlich indirekte Kosten, positiv wie negativ, über den weiteren Streckenverlauf entstehen. In Verkehrsflusssimulationen werden Lkw-Überholmanöver, insbesondere Elefantenrennen, als Moving-Bottleneck bezeichnet. Wie sich kooperative Lkw-Überholmanöver auf den Verkehrsfluss auf mikroskopischer Ebene auswirken, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

**V2X-Übertragungskanal:** In Simulation wurde angenommen, dass innerhalb einer V2X-Reichweite von 400 m jede Nachricht, die verschickt wird, erfolgreich empfangen wird. In Realität können aber auf Grund von Abschattungen durch andere Fahrzeuge, Infrastruktur oder Topologie die Reichweite reduziert sein oder durch eine hohe Kanallast Paketverluste auftreten. Während die Simulation gezeigt hat, dass eine V2X-Reichweite von 200 m und weniger für die Abstimmung ausreichend ist, so wurden Paketverluste nicht betrachtet. Ebenfalls während des Proof of Concept mit den Versuchsträgern war nicht anzunehmen, dass durch die wenigen V2X-fähigen Fahrzeuge nennenswerte Paketverluste aufgetreten sind. Welche Auswirkung eine hohe Kanallast auf das kooperative Lkw-Überholmanöver hat, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

**Gesetzliche Vorgaben:** Ein Sicherheitsabstand von unter 50 m und eine Geschwindigkeit von über 80 km/h sind derzeit laut StVO für Lkw verboten. Obwohl Geschwindigkeitsüberschreitungen durch die Fahrer bis 90 km/h geduldet werden, so ist es zweifelhaft, ob dies ebenfalls für Level 4 automatisierte Fahrzeuge gelten wird. Es existieren zwar bspw. schon Diskussionen zu Gesetzesänderungen für Platooning-Abstände, es gibt jedoch noch keine belastbaren Entscheidungen. Bevor die Ergebnisse der Arbeit in vollem Umfang Anwendung finden können, müssen die gesetzlichen Rahmenbedingungen angepasst werden.

**Kooperation mit Pkw:** Während des kooperativen Lkw-Überholmanövers wird versucht, die summierten Kosten für alle Beteiligten zu optimieren. Es wurde allerdings angenommen, dass sich der Pkw-Verkehr von hinten mit maximal 120 km/h annähert. Sollte in der Realität ein Pkw mit bspw. 200 km/h fahren, schlägt sich dies entsprechend in den Kosten wieder und eine leichte Verschiebung der Überholstelle auf Kosten des überholenden Lkw sorgt dafür, dass der Pkw ungehindert passieren kann. Wenn der Pkw durch die begrenzte Kommunikationsreichweite jedoch erst erkannt wird, wenn der Spurwechsel bereits vollzogen wurde, resultiert dies in hohen Kosten für den Pkw-Fahrer. Solche Szenarien sind unvermeidbar und können in Einzelfällen zu erhöhten Kosten führen. Eine weitere den Pkw betreffende Annahme ist, dass der kooperative Spurwechsel auf taktischer Ebene immer erfolgreich ist. Mit von Menschen gesteuerten Fahrzeugen kann es allerdings eintreten, dass der Pkw-Fahrer die Empfehlung des Systems ignoriert. Im Rahmen der StVO hat der Lkw-Fahrer jedoch das Recht, den Pkw-Verkehr für bis zu 45 s zu behindern. Sollte der Pkw-Fahrer also die Handlungsempfehlungen missachten, kann dies dazu führen, dass der Pkw-Fahrer, statt kraftstoffeffizient auszurollen später bremsen muss oder der Spurwechsel verhindert wird. Inwieweit das kooperative Lkw-Überholmanöver vom Pkw-Fahrer akzeptiert wird und welche Auswirkung eine Ablehnung der Kooperation haben kann, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

## 6.4 Erkenntnisse und Fazit

Trotz der Limitationen konnten einige neue Erkenntnisse gewonnen werden. Im Folgenden werden die wichtigsten aus der bisherigen Diskussion zusammengefasst. Anschließend werden die Erkenntnisse bewertet und ein Fazit über den vorgestellten kooperativen Lkw-Überholassistenten gezogen.

### 6.4.1 Erkenntnisse

**Bis zu 400 m Kommunikationsreichweite mit zwei Antennen:** Aufgrund der Bauform der Lkw, dem Höhenunterschied zum Pkw und den Lkw-Anhängern ist die klassische Dachantenne für die V2X-Kommunikation mit Lkw nicht geeignet. Zwei Seitenantennen zeigen großes Potenzial und eine Reichweite von bis zu 400 m unter idealen Bedingungen. Die Notwendigkeit von zwei Antennen ist besonders wichtig für Kanallastuntersuchungen, weil sich dadurch die Kanallast durch Lkw verdoppelt.

**Trotz eines verringerten Sicherheitsabstands durch V2X von 100 m auf 40-65 m kann das Überholmanöver meistens nicht in unter 45 s durchgeführt werden:** Durch eine Übertragung von Bremssignalen über V2X kann der Sicherheitsabstand während des Überholmanövers um ca. 50 % reduziert werden. Die relative Überholdistanz und die Überholdauer verringern sich dadurch um ca. 30 %. Häufig treffen allerdings Lkw mit so geringen Differenzgeschwindigkeiten aufeinander, dass selbst diese Reduktion das Überholmanöver nicht in unter 45 s ermöglicht.

**Die Abstimmung und Durchführung des kooperativen Lkw-Überholmanövers mit IDSM erzeugt eine geringere Kanallast als die CAM eines Pkw:** Für die Kooperation zwischen den Lkw muss zusätzlich zu etablierten Nachrichten wie CAM und DENM die IDSM ausgetauscht werden, um den verteilten Zustandsautomaten zwischen den Fahrzeugen zu parametrisieren und zu synchronisieren. Durch die kompakte Größe der IDSM von ca. 100 Bytes und die ausreichende Frequenz von 5 Hz wird während der Abstimmung und Durchführung des kooperativen Lkw-Überholmanövers von den beteiligten Lkw weniger Kanallast erzeugt, als ein Pkw allein schon durch die CAM benötigt. Damit ordnet sich die IDSM im Vergleich mit der Day2-Nachricht CPM oder Day3 Nachricht MCM im unteren Spektrum der benötigten Kanallast ein, was den Versand der IDSM in den meisten Situationen ermöglichen sollte.

**Die Kooperation ist kostenneutral für den überholten Lkw:** In den passiven Kooperationsleveln KL2 und KL3 kooperiert der Lkw, der überholt wird, ausschließlich durch das Teilen von Informationen, weshalb keine Kosten in Form von erhöhtem Kraftstoffverbrauch oder Zeitverlust entstehen. Während der aktiven Kooperation wird allerdings die Geschwindigkeit verringert, wodurch ein kleiner Zeitverlust im einstelligen Sekundenbereich entsteht. Gleichzeitig reduziert dies jedoch den Kraftstoffverbrauch, weil die Kooperation einem effizienten Pulse-and-Glide Zyklus entspricht. Monetär betrachtet gleichen sich die Kraftstoffersparnis und der Zeitverzug aus, sodass die Kooperation für den überholten Lkw kostenneutral abläuft. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, weil so für keinen Beteiligten erhöhte Kosten entstehen und die Motivation zur Kooperation steigt.

**Trade-Off zwischen Zeitersparnis des überholenden Lkw und der Pkw:** Zeitdruck ist der Hauptgrund, warum ein Lkw einen anderen Lkw überholen möchte. Durch die Kooperation, besonders bei dynamischen Topologien, können allerdings optimale Überholstellen identifiziert werden, die hinter der ersten möglichen Überholstelle liegen. Der überholende Lkw wird dadurch erst zu einer Reduzierung seiner Geschwindigkeit gezwungen, was im Vergleich zum sofortigen

Überholmanöver einen Zeitverzug bedeutet. Durch das anschließende kooperative Überholmanöver mit kürzerer Überholdauer als durch ein unkooperatives sofortiges Überholmanöver, entsteht allerdings eine große Zeitersparnis für die Pkw.

**Durch die Kooperation sind mehr und kürzere Überholmanöver möglich:** Die Überholdauer ist einer der wesentlichen Faktoren, der die Kosten eines Überholmanövers bestimmt. Durch die Kooperation mit KL5 kann die Überholdauer, im Vergleich zu einem unkooperativen Überholmanöver, im Schnitt auf 25 % reduziert werden. Dadurch werden mehr Überholmanöver möglich, weil die Überholdauer unter die 45 s Grenze fällt. Gleichzeitig steigt die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit, weil weniger hinter langsameren Lkw gewartet werden muss. Mit höherer Geschwindigkeit werden wiederum mehr langsamere Lkw eingeholt, wodurch die Anzahl an möglichen Überholmanövern weiter steigt. Insgesamt können so mehr Lkw überholt werden, während die Gesamtzeit, die der überholende Lkw auf der Überholspur verbringt, im Vergleich zum unkooperativen Überholmanöver, auf 30 % fällt.

## 6.4.2 Fazit

Lkw-Überholmanöver sind und bleiben Teil des alltäglichen Straßenverkehrs. Während sie in der Vergangenheit zu gefährlichen Situationen oder Konflikten zwischen Pkw- und Lkw-Fahrern geführt haben, wurde in dieser Arbeit gezeigt, wie Lkw-Überholmanöver durch Kooperation optimiert und so die Kosten für alle Teilnehmer reduziert und sicherheitskritische Abstände vermieden werden können. Das vorgestellte Fahrerassistenzsystem ist eine denkbare Ergänzung zu den in den Lkw bereits vorhandenen GPS-Tempomaten. Es ist anzunehmen, dass für Lkw eine serienmäßige Ausstattung der benötigten Hardware für den Austausch der Day1-Nachrichten und bspw. Platooning-Nachrichten kommen wird. Für die Umsetzung der hier beschriebenen Kooperation muss damit keine weitere Hardware entwickelt werden. Da sich Lkw-Überholmanöver insbesondere durch Geschwindigkeiten, Massen und die Topologie immer unterscheiden, ist es nicht möglich, den Vorteil durch die Kooperation mit nur einer Zahl zu beziffern. Für das Fazit wird daher eine flache Autobahn, sowie für beide Lkw eine Masse von 30 t und eine Hysterese von  $\pm 5$  km/h angenommen. Abbildung 6.1 zeigt in diesem Szenario wie die Überholdauer sich für die Kooperationslevel KL0, KL3 und KL5, abhängig von der Differenzgeschwindigkeit, verändert. Ohne Kooperation wird ein Unterschied von 11 km/h benötigt, um das Überholmanöver in 45 s durchzuführen, während mit KL3 durch den verringerten Sicherheitsabstand nur 7 km/h Unterschied benötigt werden. Dies entspricht der Art und Weise wie Lkw-Fahrer aktuell überholen, jedoch ohne einer Absicherung des Abstandes über V2X [70]. Mit dem höchsten Kooperationslevel KL5 lässt sich, durch die aktive Anpassung der Geschwindigkeit, der andere Lkw sogar bei einer Differenzgeschwindigkeit von nur 1 km/h in unter 45 s überholen. Der Vorteil der Kooperation ist also bei geringen Differenzgeschwindigkeiten deutlich größer als bei hohen Differenzgeschwindigkeiten. Abbildung 6.1 zeigt außerdem auch, wie häufig die verschiedenen Differenzgeschwindigkeiten im realen Straßenverkehr auftreten. Ein Unterschied von 20 km/h, bei dem ein Überholmanöver immer problemlos in unter 30 s durchführbar ist, tritt so gut wie nie auf, während ein Unterschied von 1 km/h in über 15 % auftritt. Wichtig ist es jedoch, die Fahrzeuge mit den oft auftretenden langsameren Geschwindigkeiten zu überholen. Insbesondere in diesem Bereich der Differenzgeschwindigkeiten von 3 km/h bis 10 km/h liegt der Vorteil von KL5 gegenüber KL0 bei ca. 75 % und gegenüber KL3 bei ca. 50 %.

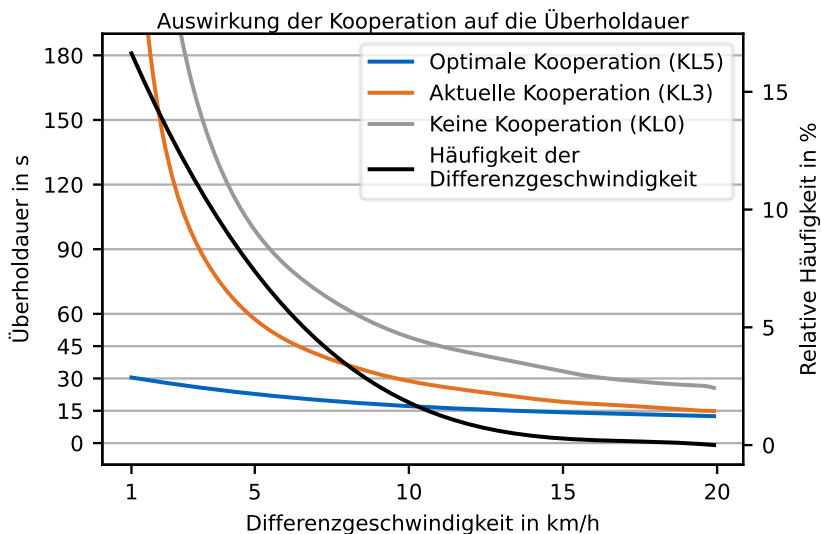


Abbildung 6.1: Die Überholdauer von drei Kooperationsleveln abhängig von der Differenzgeschwindigkeit sowie die relative Häufigkeit der verschiedenen Differenzgeschwindigkeiten.

Aus der folgenden Abbildung 6.2 lässt sich ableiten, wie groß der Anteil an Lkw ist, die abhängig von der eigenen Reisegeschwindigkeit innerhalb von 45 s überholt werden können. Dafür zeigt die Abbildung zuerst schattiert, wie groß der Anteil an anderen Lkw ist, die abhängig von der eigenen Reisegeschwindigkeit langsamer fahren. Während mit 70 km/h fast niemand (< 1 %) langsamer fährt als das eigene Fahrzeug, sind es bei 90 km/h über 90 %, die damit potenzielle Gründe für ein Überholmanöver darstellen. Mit dem höchsten Kooperationslevel KL5 lassen sich immer alle langsamer fahrenden Lkw innerhalb von 45 s überholen, während mit KL3 dies für weniger als 33 % und mit KL0 für weniger als 10 % möglich ist. Insbesondere in dem Bereich der häufigen Geschwindigkeiten um 85 km/h ist diese Diskrepanz noch größer.

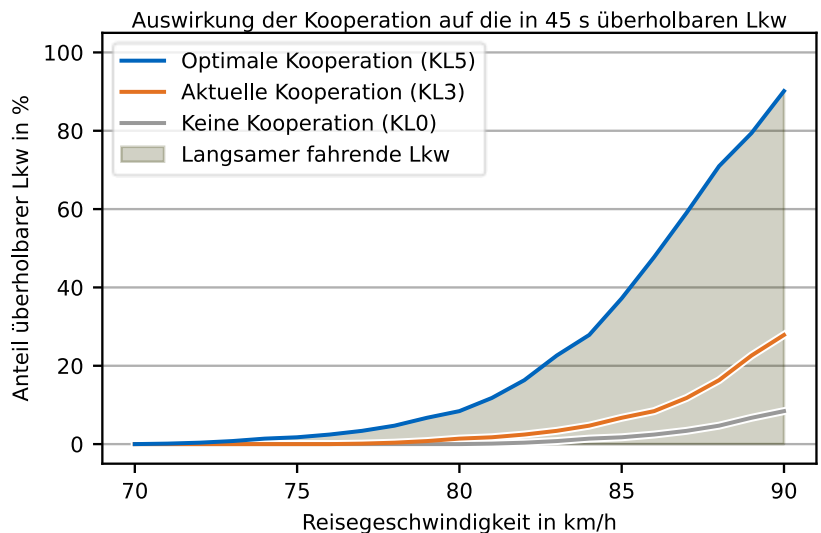


Abbildung 6.2: Anteil der Lkw, die abhängig von der eigenen Reisegeschwindigkeit langsamer fahren, sowie der Anteil an Lkw, die mit dem jeweiligen Kooperationslevel in 45 s überholt werden können.

So wie der Lkw-Fahrer heutzutage meist überholt (KL3 ohne Absicherung), werden im Vergleich zu einem unkooperativen Überholmanöver (KL0) auf den ersten Blick also bereits deutlich Kosten eingespart, weil die Überholdauer geringer ist. Dies geschieht jedoch ohne eine Absicherung der reduzierten Abstände und damit zu Lasten der Sicherheit. Ein daraus resultierender Unfall

und dessen Folgen sind unmöglich gegen die eingesparten Zeit- und Kraftstoffkosten aufzuwiegen. Die in dieser Arbeit entwickelte Kooperation ermöglicht es, mit Kooperationslevel KL3 die Performance der aktuellen Lkw-Fahrer zu erreichen, während gleichzeitig durch die Absicherung mit V2X schwerwiegende Unfälle vermieden werden können. Durch die aktive Kooperation in KL5 kann außerdem die Effizienz fast verdoppelt werden. Für den Lkw-Fahrer kann dies eine enorme Entlastung darstellen, weil mehr Lkw überholt werden können und weniger Zeitdruck entsteht. Zudem wird der Pkw-Verkehr deutlich weniger behindert und damit der Stress durch die Konflikte mit den Pkw-Fahrern reduziert. Der Vergleich zu KL0 zeigt, dass eine automatisierte Kooperation zwingend erforderlich ist, wenn der kooperative Mensch in Zukunft durch ein automatisiertes System ersetzt werden soll. Anderenfalls werden StVO-konforme Lkw-Überholmanöver so gut wie unmöglich, was einem ineffizienten allgemeinen Lkw-Überholverbot gleichzusetzten ist. Der hier vorgestellte kooperative Lkw-Überholassistent mit V2X stellt also für den Erhalt und die Steigerung der Effizienz und Sicherheit auf der Autobahn ein großes Potenzial dar.

## 6.5 Ausblick

Als Ausblick für zukünftige Arbeiten gilt es, an den in Abschnitt 6.3 aufgeführten Limitationen zu arbeiten. Nachdem hier die technische Machbarkeit eines kooperativen Lkw-Überholassistenten aufgezeigt wurde, ist es noch zwingend erforderlich, die Umsetzung des HMI und die Akzeptanz der Fahrer zu untersuchen. Dafür wurden bereits von Fank [201] Konzepte ausgearbeitet, die in kommenden Fahrsimulatorstudien weiter erprobt und verfeinert werden. Mit Erkenntnissen aus diesen Untersuchungen, bspw. der Häufigkeit von Manöverabbrüchen durch den Fahrer, kann eine mikroskopische Verkehrssimulation aufgesetzt werden, die die Auswirkung auf den gesamten Verkehrsfluss untersucht. Um gleichzeitig den V2X-Kanal zu simulieren, bietet sich die Kombination aus SUMO und OMNeT++ [202] an. Eine vollständige Verkehrssimulation hätte den Vorteil, dass die tatsächlichen Geschwindigkeiten der sich von hinten nähernden Pkw verwendet werden können und nicht die Annahme von 120 km/h getroffen werden muss. Außerdem kann so zusätzlich eine Clusterbildung von Lkw auf der Autobahn beobachtet werden. Mit einer Erweiterung des Konzepts, sollte es dann ermöglicht werden, nicht nur einen, sondern mehrere Lkw gleichzeitig zu überholen. Letztendlich müssen noch die gesetzlichen Gegebenheiten vorangetrieben werden, damit insbesondere der verringerte Sicherheitsabstand ermöglicht wird. Es ist zu beachten, dass vor allem Langstrecken Lkw sich häufig über Ländergrenzen hinwegbewegen, weshalb diesbezüglich EU-weite Regelungen notwendig sind.





# 7 Zusammenfassung

Lkw-Fahrer sind in ihrem Alltag hohen Belastungen ausgesetzt. Durch den Zeitdruck werden Lkw-Überholmanöver nötig, wobei die Lkw-Fahrer häufig versuchen, die Überholdauer und damit den Konflikt mit den Pkw-Fahren durch kleine Abstände, also auf Kosten der Sicherheit, zu reduzieren. Da ein allgemeines Lkw-Überholverbot die Verkehrseffizienz mindern würde, wurde in dieser Arbeit untersucht, wie das Lkw-Überholmanöver optimiert werden kann, um die Effizienz und Sicherheit zu steigern und den Lkw-Fahrer zu entlasten. Als größtes Potenzial für die Optimierung wurde die Kooperation der beteiligten Verkehrsteilnehmer über V2X identifiziert und daraufhin vier Ansatzpunkte für die kooperative Manöverplanung entworfen: (1) Ein verringerter Sicherheitsabstand, (2) die Wahl der besten Überholstelle, (3) die Anpassung der Geschwindigkeit während des Überholmanövers und (4) der kooperative Spurwechsel des Lkw auf die Überholspur. Diese Ansätze konnten auf verschiedene Weise zu 6 Kooperationsleveln kombiniert werden. Diese reichen von „Keine Kooperation“ (KL0) zu „Höchste Kooperation“ (KL5). Für die kooperative Abstimmung auf der strategischen Planungsebene und die Durchführung des Manövers wurde außerdem ein verteilter Zustandsautomat entworfen, der das Überholmanöver in verschiedene atomare Manöver aufteilt und diese den Teilnehmern der Kooperation als Aufgaben zuweist. Damit die Zuordnung eindeutig möglich ist, wird zuerst jedem Fahrzeug eine spezifische Rolle während der Kooperation zugewiesen. Eine Besonderheit ist, dass die gesamte Abstimmung dezentral über WLAN IEEE 802.11p erfolgt, es also keine befehlende/steuernde Instanz gibt, sondern alle Entscheidungen gemeinsam getroffen werden. Für die Kommunikation wird dafür neben den etablierten Day1-Nachrichten CAM und DENM zusätzlich die IMAGinE Driving Strategy Message, kurz IDSM, benötigt. Diese an sich generische Nachricht wurde für das Lkw-Überholmanöver funktionspezifisch erweitert, um zwei Aufgaben zu erfüllen: (1) Sie ermöglicht die Synchronisierung der verteilten Zustandsautomaten zwischen den Fahrzeugen, um so einen gemeinsamen Manöverdurchlauf zu garantieren. (2) Sie wird für den Austausch fahrzeugspezifischer Parameter sowie für die Einigung auf eine konkrete Parametrisierung des verteilten Zustandsautomaten und damit auf ein eindeutiges Überholmanöver genutzt. Der kooperative Manöverplaner sowie die Abstimmung wurden in ROS1 implementiert und in einer Simulation und zwei prototypischen Versuchsträgern erprobt und evaluiert. Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass für die V2X-Kommunikation mit Lkw eine Dachantenne nicht ausreichend ist, und stattdessen zwei Seitenantennen verwendet werden sollten. Trotz der doppelten Kanallast durch zwei Antennen, wird durch die kompakte Größe der IDSM und die ausreichende Übertragungsfrequenz von 5 Hz insgesamt weniger Kanallast erzeugt als durch die CAM eines einzelnen Pkw. Über alle Kooperationslevel hinweg gleichen sich die Zeitverluste und die Kraftstoffersparnisse des überholten Lkw aus, sodass die Kooperation für ihn kostenneutral abläuft. Für den überholenden Lkw ist die Kooperation jedoch häufig mit einem kleinen Zeitverlust verbunden, im Vergleich zu einem sofortigen unkooperativen Überholmanöver. Ohne Überholmanöver würde für ihn jedoch ein weitaus größerer Zeitverzug entstehen. Durch die Kooperation, also das in Kauf nehmen der kleinen zeitlichen Verzögerung, kann im Gegenzug die Überholdauer, und damit die Kosten für den Pkw-Verkehr drastisch gesenkt werden. Je nach Szenario sinkt die Überholdauer so auf nur noch 25 %, wodurch deutlich mehr

Überholmanöver in der gesetzlich vorgeschriebenen Höchstdauer von 45 s durchgeführt werden können. Genauer gesagt ermöglicht die höchste Kooperation in einem durchschnittlichen Szenario, dass ein Lkw mit 1 km/h Differenzgeschwindigkeit innerhalb von 30 s überholt werden kann, während ohne Kooperation 11 km/h Differenzgeschwindigkeit für ein Überholmanöver in 45 s benötigt werden. Es ist allerdings zu betonen, dass der aktuelle Verkehr nicht unkooperativ ist. Wie durch Fahrerbefragungen und Realdatensätze festgestellt, versucht der Lkw-Fahrer zu kooperieren und benötigt mit kleinem und damit sicherheitskritischem Abstand nur ca. 7 km/h Differenzgeschwindigkeit für ein Überholmanöver in 45 s. Durch V2X könnten in Zukunft diese gefährlichen Abstände abgesichert werden, um die Effizienz der aktuellen Lkw-Fahrer zu erreichen, oder diese durch das höchste Kooperationslevel noch erheblich zu steigern. Außerdem wurde deutlich, dass kooperative Lkw-Überholmanöver eine Grundvoraussetzung für Level 4 automatisierte Lkw auf der Autobahn sein müssen, weil unkooperative Lkw-Überholmanöver so gut wie nie StVO-konform durchgeführt werden können, was damit einem allgemeinen Lkw-Überholverbot gleichkommt. Das hier vorgestellte kooperative Assistenzsystem für Lkw-Überholmanöver bietet also großes Potenzial, um die Sicherheit und Effizienz auf den Autobahnen zu erhöhen, kurzfristig mit der zusätzlichen Entlastung für Lkw-Fahrer und langfristig für die automatisierten Lkw der Zukunft.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Ein Elefantenrennen auf einer zweispurigen Autobahn blockiert den Pkw-Verkehr. ....	1
Abbildung 1.2:	Ausgangssituation für das Lkw-Überholmanöver auf der Autobahn. ....	3
Abbildung 2.1:	Zusammensetzung der relativen Überholdistanz von 136 m. ....	5
Abbildung 2.2:	Die Analyse der Realdaten zeigt, dass die meisten Lkw-Überholmanöver (ÜM) nicht StVO-konform ablaufen. ....	6
Abbildung 2.3:	Anzahl an Suchergebnissen pro Jahr auf Google Scholar zu V2X und verwandten Schlüsselbegriffen (Stand Mitte 2020). ....	11
Abbildung 2.4:	Links Ad-Hoc Netzwerk und rechts Mobilfunk über Infrastruktur. ....	11
Abbildung 2.5:	C2C-CC Roadmap für V2X-Nachrichten (übersetzt aus [103]). ....	14
Abbildung 2.6:	Anzahl an Suchergebnissen pro Jahr für verschiedene V2X-Nachrichten auf Google Scholar (Stand Mitte 2020). ....	16
Abbildung 2.7:	Einordnung und Übersicht der hierarchischen Ebenen eines Manöverplaners. ....	18
Abbildung 2.8:	Zustandsautomat für die Überwindung einer Kreuzung aus der taktischen Planungsebene des AnnieWay's System für die DARPA Urban Challenge 2008 [137]. ....	20
Abbildung 2.9:	Die Darstellung der Positionskomponente einer Trajektorie im Kartesischen Koordinatensystem (a) und Frenét-Koordinatensystem (b) [122]. ....	21
Abbildung 2.10:	Das Risiko Potenzial Feld eines sich langsamen bewegenden Fahrzeugs [143] ....	21
Abbildung 2.11:	Die in (a) durch RRT erzeugte Trajektorie ist ruckartig, weil die für eine glatte Trajektorie benötigten Zwischenziele nicht ausgewählt/gefunden wurden. Die Erweiterung des RRT Algorithmus und Kombination mit einer vordefinierten Trajektorienschar sorgt in (d) für ein deutlich besseres Ergebnis [145]. ....	22
Abbildung 2.12:	Der Abstimmungsprozess mit Plan- und Wunschtrajektorien über MCM [122]. ....	26
Abbildung 2.13:	Funktionsprinzip eines GPS-Tempomaten [169]. ....	30
Abbildung 2.14:	Veranschaulichung des Platooning-Konzepts [131]. ....	31
Abbildung 3.1:	Übersicht über das geplante Assistenzsystem als Lösungsansatz. ....	34
Abbildung 3.2:	Vorgehen zur Entwicklung, Erprobung und Bewertung des kooperativen Lkw-Überholassistenten. ....	35

Abbildung 4.1:	Vier Komponenten der relativen Überholdistanz. ....	38
Abbildung 4.2:	Zusammenhang zwischen Bremsweg, Reaktionsweg und V2X-Sicherheitsabstand. ....	38
Abbildung 4.3:	Aufbau der IDSM basierend auf der CMM [24]. ....	47
Abbildung 4.4:	Funktionsspezifische Payload der IDSM für kooperative Lkw-Überholmanöver [24]. ....	48
Abbildung 4.5:	Softwarearchitektur mit Informationsfluss für Simulation und Realfahrzeug.	48
Abbildung 4.6:	Kooperativer Manöverplaner als Stand-Alone Applikation mit manueller Auswahl der Inputdaten (links) und Visualisierung der berechneten Geschwindigkeitsprofile und Kosten für unterschiedliche Kooperationslevel. ....	49
Abbildung 4.7:	Dashboard des kooperativen Lkw-Überholassistenten. ....	50
Abbildung 4.8:	Zwei Versuchsträger mit sichtbaren Antennenhaltern über den Türen. ....	52
Abbildung 5.1:	Einfluss von Geschwindigkeit und Masse auf den kombinierten VSA. ....	54
Abbildung 5.2:	Versuchsträger mit Container-Auflieger ohne Winkel (0°). ....	55
Abbildung 5.3:	Der Lkw ist in der Mitte mit Ausrichtung auf 0°. Die farbigen Linien stellen die maximale Kommunikationsreichweite [m] in alle Richtungen abhängig vom Anhängerwinkel und Antennenpositionen dar. Der Anhänger dämpft die Kommunikation nach hinten (180°). ....	56
Abbildung 5.4:	Auswirkung der Kooperationslevel auf die Überholdauer bei konstanten Steigungen. ....	58
Abbildung 5.5:	Auswirkung der Kooperationslevel auf die Startstelle des Überholmanövers bei konstanten Steigungen. ....	58
Abbildung 5.6:	Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholenden Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver bei konstanter Steigung. ...	59
Abbildung 5.7:	Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholten Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver bei konstanter Steigung. ....	59
Abbildung 5.8:	Durchschnittliche Zeitverzögerung für einen Pkw durch ein Überholmanöver bei konstanten Steigungen. ....	60
Abbildung 5.9:	Übersicht der in unter 45 s durchgeführten Überholmanöver bei konstanter Steigung. ....	60
Abbildung 5.10:	Auswirkung der Kooperationslevel auf die Überholdauer in den Kassler Bergen. ....	61
Abbildung 5.11:	Auswirkung der Kooperationslevel auf die Startstelle des Überholmanövers in den Kassler Bergen. ....	61
Abbildung 5.12:	Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholenden Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver in den Kassler Bergen. ....	61
Abbildung 5.13:	Zeit- (links) und Kraftstoffunterschied (rechts) des überholten Lkw im Vergleich zu einer Fahrt ohne Überholmanöver in den Kassler Bergen. ....	62

---

Abbildung 5.14:	Durchschnittliche Zeitverzögerung für einen Pkw durch ein Überholmanöver in den Kassler Bergen. ....	62
Abbildung 5.15:	Übersicht der in unter 45 s durchgeführten Überholmanöver in den Kassler Bergen. ....	62
Abbildung 5.16:	Korrelation der Überholdauer und des Überholstarts zwischen verringerten IDSM-Frequenzen und 10 Hz [24]. ....	64
Abbildung 5.17:	Ausschnitt der Geschwindigkeitsprofile des überholenden Lkw und fünf langsamer fahrenden Lkw, die in KL5 überholt wurden. ....	66
Abbildung 5.18:	Kumulierte Anzahl an Überholmanövern und durchschnittliche Überholdauer je Kooperationslevel über die drei Autobahnabschnitte. ....	66
Abbildung 5.19:	Kraftstoff- (links) und Zeitdifferenz (rechts) je 100 km in den verschiedenen Kooperationsleveln für alle Manöverteilnehmer. ....	67
Abbildung 6.1:	Die Überholdauer von drei Kooperationsleveln abhängig von der Differenzgeschwindigkeit sowie die relative Häufigkeit der verschiedenen Differenzgeschwindigkeiten. ....	80
Abbildung 6.2:	Anteil der Lkw, die abhängig von der eigenen Reisegeschwindigkeit langsamer fahren, sowie der Anteil an Lkw, die mit dem jeweiligen Kooperationslevel in 45 s überholt werden können. ....	80



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Haftstrafen im Gefangenen-Dilemma. ....	9
Tabelle 4.1:	Zielgeschwindigkeiten für die Berechnung der Geschwindigkeitsprofile. ....	41
Tabelle 4.2:	Beschreibung der sechs Kooperationslevel. ....	44
Tabelle 5.1:	Übersicht der Szenarienparameter für die Simulation einzelner Lkw-Überholmanöver. ....	57
Tabelle 5.2:	Parameterübersicht der Simulationsfahrten. ....	65





# Literaturverzeichnis

- [1] Jianan Zhou, "Effects of Moving Bottlenecks on Traffic Operations on Four-lane Level Freeway Segments," Dissertation, University of Nebraska, 2018.
- [2] Statistisches Bundesamt, *Beförderungsmenge und Beförderungsleistung nach Verkehrsträgern: Güterverkehr*. [Online] Verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/gueterbefoerderung-lr.html>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [3] Statista, *Anteil der Lkw an der Transportleistung im Güterverkehr in Deutschland in den Jahren von 2013 bis 2023: Verkehr & Logistik - Fahrzeuge & Straßenverkehr*. [Online] Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12195/umfrage/anteil-der-lkw-am-gueterverkehr-in-deutschland/>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *#Covid-19 Straßenverkehr*. [Online] Verfügbar: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/Corona/strassenverkehr-covid-19.html>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [5] C. Hecking, *Industrie-Lieferketten unter Druck*. [Online] Verfügbar: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/covid-19-lieferketten-in-gefahr-a-d0735376-540a-4b25-b876-8a14d7470f17>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [6] MAN Truck & Bus SE, *Corona-Entwicklung: MAN Truck & Bus stoppt die Produktion*. [Online] Verfügbar: <https://press.mantruckandbus.com/corona-entwicklung-man-truck--bus-stoppt-die-produktion/>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [7] Dr. Dieter Ellinghaus und Prof. Dr. Jürgen Steinbrecher, "Lkw im Straßenverkehr: Eine Untersuchung über die Beziehungen zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern," *UNIROYAL-Verkehrsuntersuchung 27*, 2002.
- [8] RIO, *RIO Cloud*. [Online] Verfügbar: <https://rio.cloud/de/>. Gefunden am: 01.06.21.
- [9] openPetition, *Generelles Überholverbot für Lkw auf Deutschen Autobahnen*. [Online] Verfügbar: <https://www.openpetition.de/petition/argumente/generelles-ueberholverbot-fuer-lkw-auf-deutschen-autobahnen>. Gefunden am: Jun. 24 2020.
- [10] Augsburgs Allgemeine, *SPD fordert: Überholverbot für Lkw zur Ferienzeit*. [Online] Verfügbar: <https://www.augsburger-allgemeine.de/bayern/SPD-fordert-Ueberholverbot-fuer-Lkw-zur-Ferienzeit-id26396056.html>. Gefunden am: Jun. 24 2020.
- [11] Kay Richert (FPD), *Wir sehen ein generelles Lkw-Überholverbot skeptisch*. [Online] Verfügbar: <http://www.landtag.ltsh.de/pressticker/2017-06-29-15-34-19-762c/>. Gefunden am: Jun. 24 2020.

- [12] Verkehrsrundschau, *CSU für Lkw-Überholverbot auf zweispurigen Autobahnen*. [Online] Verfügbar: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/csu-fuer-lkw-ueberholverbot-auf-zweispurigen-autobahnen-1847909.html>. Gefunden am: Jun. 24 2020.
- [13] AfD Kompakt, *Lkw-Überholverbot – erneuter Beweis für verfehlte Verkehrspolitik der Staatsregierung!* [Online] Verfügbar: <https://afdkompakt.de/2017/05/26/lkw-ueberholverbot-erneuter-beweis-fuer-verfehlte-verkehrspolitik-der-staatsregierung/>. Gefunden am: Jun. 24 2020.
- [14] Kay Müller, *Elefantenrennen auf der A7: Neuer Anlauf für Lkw-Überholverbot*. [Online] Verfügbar: <https://www.shz.de/24489012>. Gefunden am: Jun. 24 2020.
- [15] Dr. Christian Eckl, *Landrat fordert Lkw-Überholverbot auf A3*. [Online] Verfügbar: <https://www.mittelbayerische.de/region/regensburg-stadt-nachrichten/landrat-fordert-lkw-ueberholverbot-auf-a3-21179-art1888337.html>. Gefunden am: Jun. 24 2020.
- [16] W. Brilon und O. Drews, “Verkehrliche und ökologische Auswirkungen der Anordnung von Überholverböten für Lkw auf Autobahnen,” *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Rn. 731, 1996.
- [17] Minister Wittke, “Sonderarbeitsgruppe „Lkw-Überholverböte auf zweistreifigen Autobahnrichtungs-fahrbahnen“,“ *Verkehrsministerkonferenz*, 2007.
- [18] M. R. Luehder, “Lkw-Überholverböte auf Bundesautobahnen,” *Straßenverkehrstechnik*, Rn. 34, 1990.
- [19] S. P. Hoogendoorn und P. H. Bovy, “A Closer Examination of Overtaking Prohibitions for Trucks,” *IFAC Proceedings Volumes*, Bd. 33, Rn. 9, S. 227–234, 2000.
- [20] G. Kellermann, “Erkenntnisse zum Lkw-Überholverbot auf Autobahnen,” *Straßenverkehrstechnik*, Rn. 46, S. 196–200, <https://trid.trb.org/view/957118>, 2002.
- [21] Ewan Hardman, Ben Morris, Peter Owlett und Tim Rees, “Die Auswirkungen des gegenseitigen Überholverböts für Lkw auf zweispurigen Fernstraßen auf den Verkehrsfluss und die Transportwege,” *Fachabteilung B: Struktur- und Kohäsionspolitik*, [http://publications.europa.eu/resource/cellar/ea078a7b-9b1f-4b7f-a219-5004c7454790.0006.02/DOC\\_1](http://publications.europa.eu/resource/cellar/ea078a7b-9b1f-4b7f-a219-5004c7454790.0006.02/DOC_1), 2010.
- [22] Alain Reme, “Verkehrsmanagementdienste: Lkw-Überholverböte,” *EasyWay - Harmonising European ITS Services and Actions*, 2012.
- [23] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer, L. Jahn, und S. Kraus, “Cooperative Truck Overtaking on Freeways,” *Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, S. 1–15, 2020.
- [24] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer, und A. Zimmermann, “Strategic Coordination of Cooperative Truck Overtaking Maneuver,” *Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*, 2021.
- [25] German Law, *German Road Traffic Regulations*. [Online] Verfügbar: <https://germanlawarchive.iuscomp.org/?p=1290>. Gefunden am: Mai. 14 2020.
- [26] OLG Hamm, *Beschluss 4 Ss OWi 629/08*. [Online] Verfügbar: <https://openjur.de/u/31853.html>.
- [27] MAN Truck & Bus SE, *Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik: Lehrbuch der MAN Academy*. Kirschbaum, 2016.

- [28] Robert Krajewski, Julian Bock, Laurent Kloeker, und Lutz Eckstein, "The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems," 2018.
- [29] D. Lohre, T. Bernecker, und W. Stock, "ZF-Zukunftsstudie Fernfahrer 2.0: Der Mensch im Transport und Logistikmarkt," 2014.
- [30] Dr. Jürgen Brauckmann und Wilfried Echterhoff, "Einflüsse auf Gesundheit, Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit von LKW-Fahrern im Güterfernverkehr: Eine Studie der Gesellschaft für Ursachenforschung bei Verkehrsunfällen e.V. im Auftrag von TÜV Rheinland," 2007.
- [31] C. Evers, "Auswirkungen von Belastungen und Stress auf das Verkehrsverhalten von Lkw-Fahrern," *Bundesanstalt für Straßenwesen - Forschung Kompakt*, 2010.
- [32] VFR Verlag für Rechtsjournalismus GmbH, *Bussgeldkatalog 2020*. [Online] Verfügbar: <https://www.bussgeldkatalog.org/lkw/>. Gefunden am: Jul. 02 2020.
- [33] Truck Wash, *The new 2019 schedule of penalties – an overview for truck drivers*. [Online] Verfügbar: <https://www.truck-wash.com/blog/new-schedule-of-penalties-2019-overview-for-truck-drivers/>. Gefunden am: Jul. 02 2020.
- [34] Statistisches Bundesamt, "Verkehrsunfälle - Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr," 2018.
- [35] Konradin Industrie, *Psychische und physische Belastungsfaktoren von Berufskraftfahrern*. [Online] Verfügbar: <https://www.sifa-sibe.de/fachbeitraege/stress-auf-raedern/>. Gefunden am: Sep. 30 2020.
- [36] J. Bergrath, *Der Job des Lkw-Fahrers verursacht Krankheiten*. [Online] Verfügbar: <https://www.eurotransport.de/artikel/lkw-fahrer-haben-berufskrankheiten-384486.html>. Gefunden am: Sep. 30 2020.
- [37] S. Bessel, "TK Gesundheitsreport 2020: Arbeitsunfähigkeiten," 2020.
- [38] F. Knieps und H. Pfaff, Hrsg, *BKK Gesundheitsreport 2016: Gesundheit und Arbeit: Zahlen, Daten, Fakten ; mit Gastbeiträgen aus Wissenschaft, Politik und Praxis*. Berlin: MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 2016.
- [39] Martin Kordt, "DAK Gesundheitsreport 2019," 2019.
- [40] C. Schlamp, *LKW Fahrermangel: Tausende LKW Fahrer fehlen.: Sind Arbeitskräfte aus Nicht-EU-Ländern die Lösung?* [Online] Verfügbar: <https://lkw-fahrer-gesucht.com/fernfahrer-magazin/32/lkw-fahrermangel-was-tun.html>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [41] J. Bergrath und H. Binhammer, *Fahrermangel in Deutschland - Wer will den Job noch machen?* [Online] Verfügbar: <https://www.eurotransport.de/artikel/fahrermangel-in-deutschland-wer-will-den-job-noch-machen-11173627.html>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [42] Transport Logistik, *LKW-Fahrermangel & Laderaumknappheit: Mögliche Lösungsansätze für die Logistikbranche*. [Online] Verfügbar: <https://www.transportlogistic.de/de/messe/industry-insights/lkw-fahrermangel/>. Gefunden am: Dez. 15 2020.
- [43] T. Richter, S. Ruhl, J. Ortlepp, und E. Bakaba, "Prevention of Overtaking Accidents on Two-lane Rural Roads," *Transportation Research Procedia*, Bd. 14, S. 4140–4149, 2016.
- [44] M. Dozza, R. Schindler, G. Bianchi-Piccinini, und J. Karlsson, "How do drivers overtake cyclists?," (eng), *Accident; analysis and prevention*, Bd. 88, Rn. 88, S. 29–36, 2016.

- [45] Abishai Polus, Moshe Livneh, und and Benyamin Frischer, "Evaluation of the Passing Process on Two-Lane Rural Highways,"
- [46] M. Kretschmer, L. König, J. Neubeck, und J. Wiedemann, "Erkennung und Prädiktion des Fahrerhaltens während eines Überholvorgangs," *2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1145352/1145352.pdf>, 2006.
- [47] A. A. Muayyadi, *2014 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile: 28 - 30 Aug. 2014, Bali, Indonesia*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014.
- [48] J. Raj, "VANET based Overtake mishap preventive advance road safety system,"
- [49] Ray Lattarulo, Daniel He, und Joshue Perez, *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV): 26-30 June 2018*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018.
- [50] C. Blaschke, J. Schmitt, und B. Färber, "Überholmanöver-Prädiktion über CAN-Bus-Daten," *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 110, Rn. 11, S. 1022–1028, 2008.
- [51] S. Dixit *et al*, "Trajectory Planning for Autonomous High-Speed Overtaking using MPC with Terminal Set Constraints," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*: IEEE, Nov. 2018 - Nov. 2018, S. 1061–1068.
- [52] Jianwei Gong, Youzhi Xu, Chao Lu, Guangming Xiong, "Decision-making Model of Overtaking Behavior for Automated Driving on Freeways," (eng), *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7547855>, 2016.
- [53] Tazila Shamir, "How Should an Autonomous Vehicle Overtake a Slower Moving Vehicle: Design and Analysis of an Optimal Trajectory," *IEEE Trans. Automat. Contr*, Bd. 49, Rn. 4, S. 607–610, 2004.
- [54] J. C. Mertens, C. Knies, F. Diermeyer, S. Escherle, und S. Kraus, "The Need for Cooperative Automated Driving," *Electronics*, Bd. 9, Rn. 5, S. 754, 2020.
- [55] A. Dorri, S. S. Kanhere, und R. Jurdak, "Multi-Agent Systems: A Survey," *IEEE Access*, Bd. 6, S. 28573–28593, 2018.
- [56] A. Belbachir, A. E. Fallah-Seghrouchni, A. Casals, und M. Pasin, "Smart Mobility Using Multi-Agent System," *Procedia Computer Science*, Bd. 151, S. 447–454, 2019.
- [57] M. Doring und K. Lemmer, "Cooperative Maneuver Planning for Cooperative Driving," *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag*, Bd. 8, Rn. 3, S. 8–22, 2016.
- [58] A. M. Khamis, M. S. Kamel, und M. A. Salichs, "Cooperation: Concepts and General Typology," in *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*: IEEE, Okt. 2006 - Okt. 2006, S. 1499–1505.
- [59] L.-A. Giraldeau und T. Caraco, *Social foraging theory*. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2000.
- [60] Raimo Tuomela, "On the structural aspects of collective action and free-riding," *Theory and Decision*, Rn. 32, S. 165–202, 1992.
- [61] van Lange, Paul A. M, J. Joireman, C. D. Parks, und E. van Dijk, "The psychology of social dilemmas: A review," *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Bd. 120, Rn. 2, S. 125–141, 2013.

- 
- [62] D. G. Rand und M. A. Nowak, "Human cooperation," *Trends in cognitive sciences*, Bd. 17, Rn. 8, S. 413–425, 2013.
- [63] S. Fekete, M. Vollrath, A. K. Huemer, und C. Salchow, "Interaktion im Straßenverkehr: Kooperation und Konflikt," *8. VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Fahrer, Fahrunterstützung und Bedienbarkeit*, Rn. 2264, S. 325–338, 2015.
- [64] Knies, Christian and Leonhard Hermansdorfer and Frank Diermeyer, "Cooperative Maneuver Planning for Highway Traffic Scenarios based on Monte-Carlo Tree Search," *AAET 2019 – Automatisiertes und vernetztes Fahren*, 2019.
- [65] J. C. Mertens, D. Erb, S. Kraus, und F. Diermeyer, "ITS-G5 Antenna Position on Trucks," in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*: IEEE, Okt. 2020 - Nov. 2020, S. 363–369.
- [66] BMW AG, *The BMW Vision iNEXT*. [Online] Verfügbar: <https://www.bmwgroup.com/BMW-Vision-iNEXT>. Gefunden am: Jan. 07 2020.
- [67] Daimler AG, *CASE – Intuitive Mobility*. [Online] Verfügbar: <https://www.daimler.com/innovation/case-2.html>. Gefunden am: Jan. 07 2020.
- [68] PWC, "Five Trends Transforming the Automotive Industry," <https://www.pwc.com/gx/en/industries/automotive/publications/eascy.html>, 2018.
- [69] Volkswagen AG, *Strategy TOGETHER 2025+: Shaping mobility – for generations to come*. [Online] Verfügbar: <https://www.volkswagenag.com/en/group/strategy.html>. Gefunden am: Jan. 07 2020.
- [70] J. Fank, P. Krebs, und F. Diermeyer, "Analyse von Lkw-Überholmanövern auf Autobahnen für die Entwicklung kooperativer Fahrerassistenzsysteme," *Forsch Ingenieurwes*, Bd. 83, Rn. 2, S. 305–316, 2019.
- [71] M. Elena Renda, Giovanni Resta, Paolo Santi, Francesca Martelli, und Alessandro Franchini, "IEEE 802.11p VANets: Experimental Evaluation of Packet Inter-Reception Time," *IEEE Infocom*, 2012.
- [72] Lei Ye *et al*, "Vehicle Message Distribution Mechanism Based on Improved K-Means Adaptive Clustering Algorithm,"
- [73] CAR 2 CAR Communication Consortium, "DCC Performance Analysis," 2014.
- [74] J. B. Kenney, "Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States," *Proc. IEEE*, Bd. 99, Rn. 7, S. 1162–1182, 2011.
- [75] Abdeldime M.S. Abdelgader und Wu Lenan, "The Physical Layer of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges," (eng), *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, Rn. Vol II, 2014.
- [76] David Eckhoff, Nikoletta Sofra, und Reinhard German, "A Performance Study of Cooperative Awareness in ETSI ITS G5 and IEEE WAVE," *10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, 2013.
- [77] Association of Radio Industries and Businesses, "700 MHz Band Intelligent Transport Systems: AIRB STD T109-v1.2," 2012.
- [78] Standards Committee of the IEEE Computer Society, *IEEE standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and*

- metropolitan area networks - Specific requirements*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [79] F. Arena und G. Pau, "An Overview of Vehicular Communications," *Future Internet*, Bd. 11, Rn. 2, S. 27, 2019.
- [80] T. T. Almeida, L. de C. Gomes, F. M. Ortiz, J. G. R. Junior, und L. H. M. K. Costa, "IEEE 802.11p Performance Evaluation: Simulations vs. Real Experiments," in *21st International Conference 04.11.2018 - 07.11.2018*, S. 3840–3845.
- [81] Ibrahim Rashdan und Fabian de Ponte Müller, Stepahn Sand, "ITS-G5 Challenges and 5G Solutions for Vehicular Platooning," *WWRF37*, <https://www.researchgate.net/publication/312216521>, 2016.
- [82] S. Gao, A. Lim, und D. Bevly, "An empirical study of DSRC V2V performance in truck platooning scenarios," *Digital Communications and Networks*, Bd. 2, Rn. 4, S. 233–244, 2016.
- [83] H. Peng *et al*, "Performance Analysis of IEEE 802.11p DCF for Multiplatooning Communications With Autonomous Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Bd. 66, Rn. 3, S. 2485–2498, 2017.
- [84] J. Heinovski, F. Klingler, F. Dressler, und C. Sommer, "Performance comparison of IEEE 802.11p and ARIB STD-T109," in *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC): IEEE*, Dez. 2016 - Dez. 2016, S. 1–8.
- [85] G. Naik, B. Choudhury, und J.-M. Park, "IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications," *IEEE Access*, Bd. 7, S. 70169–70184, 2019.
- [86] J. Calabuig, J. F. Monserrat, D. Gozalvez, und O. Klemp, "Safety on the Roads: LTE Alternatives for Sending ITS Messages," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Bd. 9, Rn. 4, S. 61–70, 2014.
- [87] B. Bjerke, "LTE-advanced and the evolution of LTE deployments," *IEEE Wireless Commun.*, Bd. 18, Rn. 5, S. 4–5, 2011.
- [88] 3rd Generation Partnership Project, "Technical Specification Group Services and System Aspects, Release 14 Description," 2018.
- [89] Bill Krenik, "4G Wireless Technology: When will it happen? What does it offer?: A-SSCC '08 ; 3 - 5 Nov. 2008, Fukuoka, Japan ; 2008 proceedings of technical papers," (eng), <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4695901>, 2008.
- [90] 3rd Generation Partnership Project, "5G - Evolution across three major Releases," Bd. 2020, <https://www.3gpp.org/>.
- [91] G. Mohamed und J.-M. Georg, "A Reconfigurable 5G Testbed for V2X and Industry 4.0 Applications," *Elektrotech. Inftech*, Bd. 132, Rn. 7, S. 409–416, 2015.
- [92] Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur, "5G Auktion - Präsidentenkammerentscheidungen III und IV: Aktenzeichen: BK1-17/001," [https://www.vdma.org/documents/105628/27261154/20181126\\_Entscheidunggen\\_III\\_IV\\_1543239164304.pdf/b0a1ea8e-3661-258c-a66c-53eb70afdb5c](https://www.vdma.org/documents/105628/27261154/20181126_Entscheidunggen_III_IV_1543239164304.pdf/b0a1ea8e-3661-258c-a66c-53eb70afdb5c), 2018.
- [93] Laurent Gallo und Jerome Härrı, "Unsupervised LTE D2D - Case Study for Safety-Critical V2X Communication," 2017.

- [94] V. Vukadinovic *et al*, “3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios,” *Ad Hoc Networks*, Bd. 74, S. 17–29, 2018.
- [95] Alessio Filippi, Kees Moerman, Vincent Martinez, und Andrew Turley, “IEEE802.11p ahead of LTE-V2V for safety applications,” 2017.
- [96] Andrew Turley, Kees Moerman, Alessio Filippi, und Vincent Martinez, “C-ITS: Three observations on LTE-V2X and ETSI-ITS G5,” 2018.
- [97] Alessio Filippi, Kees Moerman, Gerardo Daalderop, Paul D. Alexander, Franz Schober, and Werner Pfliegl, *Why 802.11p beats LTE and 5G for V2x*. [Online] Verfügbar: <https://www.eenewsautomotive.com/design-center/why-80211p-beats-lte-and-5g-v2x>.
- [98] A. Festag, “Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G,” *Elektrotech. Inftech*, Bd. 132, Rn. 7, S. 409–416, 2015.
- [99] Giammarco Cecchini, Alessandro Bazzi, Barbara M. Masini, Alberto Zanella, “Performance Comparison Between IEEE 802.11p and LTE-V2V In-coverage and Out-of-coverage for Cooperative Awareness,” *2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 10.1109/VNC.2017.8275637, 2017.
- [100] Christoph M. Schwarzer, *Wenn Autos mit ihrer Umgebung sprechen*. [Online] Verfügbar: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2019-11/car2x-kommunikation-sicherheitssystem-autos-verkehrssicherheit>. Gefunden am: Dez. 17 2020.
- [101] ADAC, *C2X im VW Golf 8: Erster ADAC Test*. [Online] Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/assistenzsysteme/c2x-im-vw-golf-8/>. Gefunden am: Dez. 17 2020.
- [102] Car-2-Car Communication Consortium, *Mission & Objectives*. [Online] Verfügbar: <https://www.car-2-car.org/about-us/>. Gefunden am: Feb. 04 2021.
- [103] CAR 2 CAR Communication Consortium, “Guidance for day 2 and beyond roadmap,” 2019.
- [104] ETSI - ITS, “Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service,” *EN 302 637-2 - V1.3.1 - Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications*, 2014.
- [105] ETSI - ITS, “Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service,” *EN 302 637-3 - V1.2.1 - Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications*, 2014.
- [106] ETSI, *Intelligent Transport Systems (ITS); Cooperative Perception Services*. [Online] Verfügbar: [https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report\\_WorkItem.asp?wki\\_id=46541](https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report_WorkItem.asp?wki_id=46541).
- [107] ETSI, “Technical Report; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2: TR 103 562 - V2.1.1,” [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/103500\\_103599/103562/02.01.01\\_60/tr\\_103562v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103562/02.01.01_60/tr_103562v020101p.pdf), 2019.
- [108] ETSI, *Platooning Control Message draft specification: TR 103 298*. [Online] Verfügbar: [https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report\\_WorkItem.asp?wki\\_id=44191](https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report_WorkItem.asp?wki_id=44191). Gefunden am: Feb. 05 2021.
- [109] ETSI, *Informative report for the Maneuver Coordination Service: TR 103 578*. [Online] Verfügbar:

- [https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report\\_WorkItem.asp?wki\\_id=53991](https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report_WorkItem.asp?wki_id=53991). Gefunden am: Feb. 05 2021.
- [110] ETSI, *Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen*. [Online] Verfügbar: <https://www.etsi.org/>. Gefunden am: Feb. 08 2021.
- [111] O. S. Tas *et al*, "Making Bertha Cooperate—Team AnnieWAY's Entry to the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst*, Bd. 19, Rn. 4, S. 1262–1276, 2018.
- [112] A. Costandoiu und M. Leba, "Convergence of V2X communication systems and next generation networks," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*, Bd. 477, S. 12052, 2019.
- [113] V. Martinez, "CAR 2 CAR Communicatin Consortium - Survey on CAM statistics," 2018.
- [114] CAR 2 CAR Communication Consortium, "FAQ regarding Data Protection in C-ITS," 2018.
- [115] CAR 2 CAR Communicatin Consortium, "Road Safety and Road Efficiency Spectrum Needs in the 5.9 GHz for C-ITS and Cooperative Automated Driving," 2020.
- [116] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer, und F. Dressler, "Performance Assessment of IEEE 802.11p with an Open Source SDR-Based Prototype," *IEEE Trans. on Mobile Comput*, Bd. 17, Rn. 5, S. 1162–1175, 2018.
- [117] Ignacio Llatser, Thomas Michalke, Maxim Dolgov, Florian Wildschütte, und Hendrik Fuchs, "Cooperative Automated Driving Use Cases for 5G V2X Communication," *IEEE 5G World Forum*, 2019.
- [118] Volkswagen AG, *The first Volkswagen models will be fitted with pWLAN in 2019*. [Online] Verfügbar: <https://www.volkswagenag.com/en/news/2017/06/pwlan.html>. Gefunden am: Feb. 08 2021.
- [119] IMAGinE, *Solutions for Cooperative Driving*. [Online] Verfügbar: <https://imagine-online.de>. Gefunden am: Jan. 07 2020.
- [120] H.-J. Gunther, B. Mennenga, O. Trauer, R. Riebl, und L. Wolf, "Realizing collective perception in a vehicle," in *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*: IEEE, Dez. 2016 - Dez. 2016, S. 1–8.
- [121] J. Hauenstein, J. C. Mertens, S. Kraus, und F. Diermeyer, "Collective Perception: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks," *VEHITS - 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 2021.
- [122] Bernd Lehmann, Hendrik-Jörn Günther, Lars Wolf, *A Generic Approach towards Maneuver Coordination for Automated Vehicles: November 4-7, Maui, Hawaii*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018.
- [123] Bosch, *V2X Connectivity Control Unit*. [Online] Verfügbar: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/connectivity-solutions/v2x-connectivity-control-unit/>. Gefunden am: Mrz. 17 2021.
- [124] C. Bittersohl, "V2X On Board Unit Cost Analysis," *P3 North America Inc*, <https://www.itskrs.its.dot.gov/its/benecost.nsf/ID/8c2875e02cd554d3852582910068e4f8>, 2018.
- [125] ABI Research, "V2X System Cost Analysis: DSRC+LTE and C-V2X+LTE," 2018.



- [126] Edith Condo Neira, "Antenna Evaluation for Vehicular Applications in Multipath Environment," *Chalmers University of Technology*, <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/248680/248680.pdf>, 2017.
- [127] N. Koch, "Antennas for Automobiles," in *New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering*, J. Carmo, Hrsg.: InTech, 2012.
- [128] D. Kornek *et al*, "Effects of Antenna Characteristics and Placements on a Vehicle-to-Vehicle Channel Scenario," in *2010 IEEE International Conference on Communications Workshops: IEEE, Mai. 2010 - Mai. 2010*, S. 1–5.
- [129] E. Condo Neira, U. Carlberg, J. Carlsson, K. Karlsson, und E. G. Strom, "Evaluation of V2X antenna performance using a multipath simulation tool," in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014): IEEE, Apr. 2014 - Apr. 2014*, S. 2534–2538.
- [130] C. Bergenhem, E. Hedin, und D. Skarin, "Vehicle-to-Vehicle Communication for a Platooning System," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 48, S. 1222–1233, 2012.
- [131] Andrea Brandt, Gregor Jentzsch, und Alexander Pradka, "EDDI Elektronische Deichsel - Digitale Innovation," 2018.
- [132] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, "Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)," 2013.
- [133] J. Wei, J. M. Snider, T. Gu, J. M. Dolan, und B. Litkouhi, "A behavioral planning framework for autonomous driving," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, S. 458–464, 2014.
- [134] T. Gu, J.M. Dolan, und J.-W. Lee, Hrsg, *Automated Tactical Maneuver Discovery, Reasoning and Trajectory Planning for Autonomous Driving: IEEE, Okt. 2016*.
- [135] M. Ilievski *et al*, "Design Space of Behaviour Planning for Autonomous Driving," Aug. 2019. [Online] Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/1908.07931v1>.
- [136] M. Nolte, M. Rose, T. Stolte, und M. Maurer, "Model predictive control based trajectory generation for autonomous vehicles — An architectural approach," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 798–805, 2017.
- [137] S. Kammel *et al*, "Team AnnieWAY's autonomous system for the 2007 DARPA Urban Challenge," *J. Field Robotics*, Bd. 25, Rn. 9, S. 615–639, 2008.
- [138] D. Lee und M. Yannakakis, "Principles and methods of testing finite state machines-a survey," *Proc. IEEE*, Bd. 84, Rn. 8, S. 1090–1123, 1996.
- [139] C. Urmson *et al*, "Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge," *J. Field Robotics*, Bd. 25, Rn. 8, S. 425–466, 2008.
- [140] L. Yu, D. Kong, und X. Yan, "A Driving Behavior Planning and Trajectory Generation Method for Autonomous Electric Bus," *Future Internet*, Bd. 10, Rn. 6, S. 51, 2018.
- [141] Moritz Werling, Julius Ziegler, Sören Kammel, und Sebastian Thrun, *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation: ICRA 2010 ; Anchorage, Alaska, USA, 3 - 8 May 2010*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010.
- [142] S. Dixit *et al*, "Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking: State-of-the-art and future prospects," *Annual Reviews in Control*, Bd. 45, S. 76–86, 2018.

- [143] S. Kitazawa und T. Kaneko, "Control target algorithm for direction control of autonomous vehicles in consideration of mutual accordance in mixed traffic conditions," *In Proceedings of the 2016 international symposium on advanced vehicle control*, S. 151–156, 2016.
- [144] K. Naderi, J. Rajamäki, und P. Hämmäläinen, "RT-RRT\*: a real-time path planning algorithm based on RRT\*," in *Proceedings of the 8th ACM SIGGRAPH Conference on Motion in Games*, New York, NY, USA: ACM, 11162015, S. 113–118.
- [145] L. Ma *et al*, "A fast RRT algorithm for motion planning of autonomous road vehicles," in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*: IEEE, Okt. 2014 - Okt. 2014, S. 1033–1038.
- [146] K. Zhang, J. Sprinkle, und R. G. Sanfelice, "A Hybrid Model Predictive Controller for Path Planning and Path Following," *Proceedings of the ACM/IEEE Sixth International Conference on Cyber-Physical Systems*, S. 139–148, 2015.
- [147] Y. Xiao, F. Codevilla, A. Gurram, O. Urfalioglu, und A. M. López, "Multimodal End-to-End Autonomous Driving," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, S. 1–11, <http://arxiv.org/pdf/1906.03199v2>, 2020.
- [148] Prashanth Viswanath, Soyeb Nagori, Mihir Mody, Manu Mathew, und Pramod Swami, "End to End Learning for Self-Driving Cars using JacintoNet," *IEEE International Conference on Consumer Electronics*, <http://arxiv.org/pdf/1604.07316v1>, 2018.
- [149] S. Aradi, "Survey of Deep Reinforcement Learning for Motion Planning of Autonomous Vehicles," Jan. 2020. [Online] Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/2001.11231v1>.
- [150] L. Yu, X. Shao, Y. Wei, und K. Zhou, "Intelligent Land-Vehicle Model Transfer Trajectory Planning Method Based on Deep Reinforcement Learning," (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Bd. 18, Rn. 9, 2018.
- [151] Sercan Akti, Ismet Goksad Erdagi, Mehmet Ali Silgu, und Hilmi Berk Celikoglu, "A Game-Theoretical Approach for Lane-Changing Maneuvers on Freeway Merging Segments," *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Bd. 2020, 2020.
- [152] Pablo Alvarez Lopez *et al*, *2018 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference: November 4-7, Maui, Hawaii*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018.
- [153] D. Heb *et al*, "Fast Maneuver Planning for Cooperative Automated Vehicles," *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 1625–1632, 2018.
- [154] N. Hyldmar, Y. He, und A. Prorok, "A Fleet of Miniature Cars for Experiments in Cooperative Driving," in *CoRR*
- [155] Treiber, Hennecke, und Helbing, "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations," (eng), *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics*, Bd. 62, Rn. 2 Pt A, S. 1805–1824, 2000.
- [156] A. Kesting, M. Treiber, und D. Helbing, "General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models," *Transportation Research Record*, Bd. 1999, Rn. 1, S. 86–94, 2007.
- [157] Jeroen Ploeg und Redmer de Haan, "Cooperative Automated Driving: From Platooning to Maneuvering," *Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 2019.

- [158] O. Sawade, M. Schulze, und I. Radusch, "Robust Communication for Cooperative Driving Maneuvers," *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, Bd. 10, Rn. 3, S. 159–169, 2018.
- [159] Lucas Eiermann, Oliver Sawade, Sebastian Bunk, Gabi Breuel, und Ilja Radusch, "Cooperative Automated Lane Merge with Role-Based Negotiation," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2020*, 2020.
- [160] Christoph Burger, Thomas Schneider, und Martin Lauer, "Interaction Aware Cooperative Trajectory Planning for Lane Change Maneuvers in Dense Traffic," *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, Bd. 2020, 2020.
- [161] D. Lenz, T. Kessler, und A. Knoll, "Tactical cooperative planning for autonomous highway driving using Monte-Carlo Tree Search," in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*: IEEE, Jun. 2016 - Jun. 2016, S. 447–453.
- [162] K. Kurzer, C. Zhou, und J. M. Zöllner, "Decentralized Cooperative Planning for Automated Vehicles with Hierarchical Monte Carlo Tree Search," S. 529–536, <http://arxiv.org/pdf/1807.09530v1>, 2018.
- [163] K. Kurzer, F. Engelhorn, und J. M. Zöllner, "Decentralized Cooperative Planning for Automated Vehicles with Continuous Monte Carlo Tree Search," *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, <http://arxiv.org/pdf/1809.03200v1>, 2018.
- [164] S. Le Cleac'h, M. Schwager, und Z. Manchester, "LUCIDGames: Online Unscented Inverse Dynamic Games for Adaptive Trajectory Prediction and Planning," Nov. 2020. [Online] Verfügbar: <http://arxiv.org/pdf/2011.08152v1>.
- [165] MAN Truck & Bus SE, *GPS-gestützter Tempomat: MAN EfficientCruise®*. [Online] Verfügbar: <https://www.truck.man.eu/de/en/trucks/truck-assistance-systems/man-efficientcruise.html>. Gefunden am: Jun. 26 2020.
- [166] Peter Kock, "Prediction and Predictive Control for Economic Optimisation of Vehicle Operation," 2013.
- [167] P. Kock und O. Stursberg, "Saving energy through predictive control of longitudinal dynamics of heavy trucks," *VDI Berichte*, 2008.
- [168] B. Passenberg, P. Kock, und O. Stursberg, "Combined time and fuel optimal driving of trucks based on a hybrid model," *European Control Conference (ECC)*, 2009.
- [169] Walter Anissin, "MAN Sicherheits- und Assistenzsysteme," 2016.
- [170] Trucker, "Supertest MAN TGX 18.650," *Trucker*, 01 Okt, 2014, [https://www.bus.man.eu/man/media/content\\_medien/etc/d38\\_special\\_folder/d38\\_doc/201410\\_MAN\\_TGXD38\\_Trucker\\_Supertest.pdf](https://www.bus.man.eu/man/media/content_medien/etc/d38_special_folder/d38_doc/201410_MAN_TGXD38_Trucker_Supertest.pdf).
- [171] MAN Truck & Bus SE, *Efficiency confirmed in TÜV test drive: New MAN Truck Generation saves up to 8.2 % fuel*. [Online] Verfügbar: <https://press.mantruckandbus.com/efficiency-with-tuev-seal-new-man-truck-generation-saves-up-to-82--fuel/>. Gefunden am: Jun. 26 2020.
- [172] Marion Fuchs, "Europäischen Transportpreis gewonnen," *Fahrzeug-Karosserie*, <https://www.fahrzeug-karosserie.de/europaeischen-transportpreis-gewonnen-a-671649/>, 2017.

- [173] S. E. Li und H. Peng, "Strategies to minimize the fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Bd. 226, Rn. 3, S. 419–429, 2012.
- [174] S. E. Li, Q. Guo, L. Xin, B. Cheng, und K. Li, "Fuel-Saving Servo-Loop Control for an Adaptive Cruise Control System of Road Vehicles With Step-Gear Transmission," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Bd. 66, Rn. 3, S. 2033–2043, 2017.
- [175] Trucker Supertest, "Der Löwe brüllt wieder," *Trucker*, Rn. 7, [https://www.truck.man.eu/man/media/content\\_medien/doc/business\\_websites\\_germany\\_1/neue\\_man\\_truck\\_generation\\_test\\_1/TR\\_7\\_2020\\_Der\\_Loewe\\_bruellt\\_wieder.pdf](https://www.truck.man.eu/man/media/content_medien/doc/business_websites_germany_1/neue_man_truck_generation_test_1/TR_7_2020_Der_Loewe_bruellt_wieder.pdf), 2020.
- [176] Scania, *Scania Services sind entscheidend für eine höhere Gesamtwirtschaftlichkeit*, 2017.
- [177] Stephan Kallenbach, "Truck Platooning – A Pragmatical Approach: Von der Assistenz zum automatisierten Fahren 4. Internationale ATZ-Fachtagung Automatisiertes Fahren," (ger), <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-23751-6>, 2019.
- [178] F. Stehbeck, "Designing and Scheduling Cost-Efficient Tours by Using the Concept of Truck Platooning," 2019.
- [179] L. Zhang, F. Chen, X. Ma, und X. Pan, "Fuel Economy in Truck Platooning: A Literature Overview and Directions for Future Research," *Journal of Advanced Transportation*, Bd. 2020, S. 1–10, 2020.
- [180] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer, und S. Kraus, "Reduced Safety Distance during Cooperative Truck Overtaking," *Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020.
- [181] Mikael Fallgren, Bogdan Timus, und et al, "Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System," *Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS)*, 2013.
- [182] IPG Automotive, *TruckMaker*. [Online] Verfügbar: <https://ipg-automotive.com/de/produkte-services/simulation-software/truckmaker/>.
- [183] A. Förg, A. Süßmann, und A. Wenzelis, "Lang-Lkw: Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt," *Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)*, <https://www.researchgate.net/publication/270879517>, 2014.
- [184] D.-I. C. Dorn, R. Elfring, M. Schmülling, S. Schulte, und T. Sundermann, "Forschungsbericht: Untersuchungen zur Verlängerung des Bremsweges bei falscher Beladung von Nutzfahrzeugen," *Forschungs- und Technologiezentrum Ladungssicherung Selmg GmbH*, 2015.
- [185] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, "Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)," [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/\\_32.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/_32.html), 2019.
- [186] L. Bourdon, "Auswirkung von kooperativen Lkw-Überholmanövern auf den Lkw-Verkehrfluss," *Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München*, 2018.

- [187] Statistisches Bundesamt, *Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2021*. [Online] Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/>. Gefunden am: Mrz. 05 2021.
- [188] I. Ehreke, S. Hess, C. Weis, und K. W. Axhausen, "Reliability in the German Value of Time Study," *Transportation Research Record*, Bd. 2495, Rn. 1, S. 14–22, 2015.
- [189] ROS, *Kinetic Kame*. [Online] Verfügbar: [www.wiki.ros.org/kinetic](http://www.wiki.ros.org/kinetic). Gefunden am: Feb. 06 2021.
- [190] J. C. Mertens, *Truck Overtaking Spot Analyzer*. [Online] Verfügbar: <https://github.com/TUMFTM/Truck-Overtaking-Spot-Analyzer>.
- [191] M. Hilgers, *Gesamtfahrzeug*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [192] Google, *Protocol Buffers*. [Online] Verfügbar: <https://developers.google.com/protocol-buffers>. Gefunden am: Mrz. 10 2021.
- [193] OpenStreetMap, *OpenStreetMap*. [Online] Verfügbar: <https://www.openstreetmap.de/>. Gefunden am: Jul. 02 2020.
- [194] Google, *Elevation API*. [Online] Verfügbar: <https://developers.google.com/maps/documentation/elevation/overview>. Gefunden am: Mrz. 16 2021.
- [195] Nordsys, *WaveBee plus*. [Online] Verfügbar: <https://www.nordsys.de/de/v2x/v2x-produkte/wavebee-plus>. Gefunden am: Mrz. 16 2021.
- [196] MultiMark, "LTM402 Multi-Band Antenna," <https://www.mobilemark.com/product/ltm402-2x-global-cellular-wifi-gps/>, 2018.
- [197] J. Paulson, "Truck-Platooning in Deutschland und den Niederlanden: Status quo und rechtliche Grundlagen," 2020.
- [198] Lennard Jahn, "Abstimmungskonzept für kooperative Lkw-Überholmanöver über Vehicle-to-Everything-Kommunikation (V2X)," *Masterarbeit, Technische Fakultät, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg*, 2020.
- [199] G. Buyken, "Kooperatives Fahrerassistenzsystem zur Wahl geeigneter Lkw-Überholzeitpunkte," *Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München*, 2019.
- [200] Lev Walkin, *The ASN.1 Compiler*. [Online] Verfügbar: <http://lionet.info/asn1c>. Gefunden am: Jul. 16 2020.
- [201] J. Fank, L. Santen, C. Knies, und F. Diermeyer, "Should We Allow Him to Pass?" Increasing Cooperation Between Truck Drivers Using Anthropomorphism," in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Advances in Human Factors of Transportation*, N. Stanton, Hrsg, Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 475–484.
- [202] OpenSim Ltd, *OMNeT++*. [Online] Verfügbar: <https://omnetpp.org/>.



# Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, Software und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden.

## **Zeitschriften; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)**

- [54] J. C. Mertens, C. Knies, F. Diermeyer, S. Escherle, und S. Kraus, "The Need for Cooperative Automated Driving," *Electronics*, Bd. 9, Rn. 5, S. 754, 2020.

## **Konferenzen; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)**

- [23] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer, L. Jahn, und S. Kraus, "Cooperative Truck Overtaking on Freeways," *Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, S. 1–15, 2020.
- [24] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer, und A. Zimmermann, "Strategic Coordination of Cooperative Truck Overtaking Maneuver," *Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*, 2021.
- [65] J. C. Mertens, D. Erb, S. Kraus, und F. Diermeyer, "ITS-G5 Antenna Position on Trucks," in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*: IEEE, Okt. 2020 - Nov. 2020, S. 363–369.
- [180] J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer, und S. Kraus, "Reduced Safety Distance during Cooperative Truck Overtaking," *Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2020.
- [121] J. Hauenstein, J. C. Mertens, S. Kraus, und F. Diermeyer, "Collective Perception: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks," *VEHITS - 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 2021.

## **Patente**

## **Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Berichte, Konferenzvorträge und -poster, etc.; nicht Scopus/ Web of Science gelistet**

## **Nicht-dissertationsrelevante Veröffentlichungen; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)**

J. C. Mertens, A. Boschmann, M. Schmidt, und C. Plessl, "Sprint diagnostic with GPS and inertial sensor fusion," *Sports Eng*, Bd. 33, Rn. 2, S. 439, 2018.

## **Dissertationsrelevante Open-Source Software**

[190] J. C. Mertens: „Truck Overtaking Spot Analyzer“, FTM GitHub, [Online] Verfügbar: <https://github.com/TUMFTM/Truck-Overtaking-Spot-Analyzer>, 31.07.2020

## **Betreute Studienarbeiten**

[186] L. Bourdon, "Auswirkung von kooperativen Lkw-Überholmanövern auf den Lkw-Verkehrsfluss," *Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München*, 2018.

[198] Lennard Jahn, "Abstimmungskonzept für kooperative Lkw-Überholmanöver über Vehicle-to-Everything-Kommunikation (V2X)," *Masterarbeit, Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*, 2020.

[199] G. Buyken, "Kooperatives Fahrerassistenzsystem zur Wahl geeigneter Lkw-Überholzeitpunkte," *Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München*, 2019.