

## **MASTER'S THESIS**

# **Simulative Wirkungsuntersuchung eines Kolonnenassistenten auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur**

Autor:

**B.Sc. Frederik Reinhard Bachmann**

Betreuung:

**M.Sc. Nassim Motamedidehkordi**

**M.Sc. Sabine Krause**

Tag der Abgabe: 24.03.2017

## MASTER'S THESIS

für Frederik Reinhard Bachmann

Tag der Ausgabe: 2016-10-24

Tag der Abgabe: 2017-04-23

### **Thema: Simulative Wirkungsuntersuchung eines Kolonnenassistenten auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur**

Automatisierte Fahrzeuge können mit Hilfe von Sensoren die Umgebung des Fahrzeugs erkennen und basierend auf die hinterlegte Fahrfunktionen Manöver durchführen. Eine dieser Funktionen ist der Kolonnenassistent (Platooning) für Lkw, in dem die Fahrzeuge sich durch Kommunikation koppeln und automatisiert in geringerem Abstand dem Vorderfahrzeug folgen. Der Kolonnenassistentenfunktion wird die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und die Verbesserung des Verkehrsablaufs durch höhere Kapazitäten der Autobahnen sowie durch eine gleichmäßigere Fahrweise zugesprochen. Die Auswirkung soll im Rahmen dieser Masterarbeit mit Hilfe einer Verkehrssimulation untersucht werden.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, zu untersuchen, welche Auswirkungen die Kolonnenassistentenfunktion auf die Kapazität des Autobahnnetzes hat und wie sich diese Auswirkungen mit verschiedenen Nutzungsgraden des automatisierten Fahrens entwickeln. Hierfür ist es nötig, die Funktion des Kolonnenassistenten zu definieren und diese Funktion in der Simulation darzustellen.

Folgende Punkte müssen innerhalb der Masterarbeit bearbeitet werden:

- Literaturrecherche zu bereits auf dem Markt verfügbaren oder in der Entwicklung befindlichen Kolonnenassistentenfunktionen und zu technischen Aspekten für die Kolonnenfahrt wie z.B. Festlegung der maximalen Kolonnenlänge und Modellierung der Kolonnenfahrtfunktion.

- Modellierung der Kolonnenassistentenfunktion in der Verkehrssimulation VISSIM und Durchführung der Simulation für verschiedene Netzelemente beispielsweise für Strecken, Ausfahrten, Einfahrten und Verflechtungsstrecken
- Wirkungsanalyse von der Funktion auf die Kapazität und Vergleich zum Basisszenario ‚ohne Assistenz‘

Der Thesis-Verfasser legt den Mentorinnen (M.Sc. Nassim Motamedidehkordi, M.Sc. Sabine Krause) in der fünften, der zehnten, der 15. und der 20. Woche Zwischenergebnisse vor.

Spätestens zwei Monate nach Abgabe der Thesis muss der Thesis-Verfasser einen 20minütigen Vortrag mit anschließender Diskussion halten. Der Vortrag und die Präsentation gehen in die Beurteilung ein, wenn die Notenlage der schriftlichen Arbeit nicht eindeutig ist.



---

Dr.-Ing. Karl Dumler

## **Danksagung**

An dieser Stelle bedanke ich mich vielmals bei meinen Eltern Margarete und Dietrich als auch bei meiner Schwester Johanna für ihre überragende Unterstützung, durch die mir mein Studium und mein unvergessliches Studentendasein überhaupt möglich waren.

## Kurzfassung

Weltweit nimmt der Straßenverkehr stetig zu. Insbesondere der Straßengüterverkehr erhöht jährlich seine Transportleistung und sorgt mit dafür, dass die Fernstraßeninfrastruktur immer häufiger an ihre Grenzen gelangt. Aus diesem Grund werden verschiedenste Konzepte entwickelt, um den Verkehrsfluss zu verbessern und auch ohne bauliche Maßnahmen die Kapazität der Straßen zu erhöhen.

Ein Ansatz ist es den Verkehr durch Fahrerassistenzsysteme und zunehmender Automatisierung des Fahrens, fließender und effizienter zu gestalten. Ein sich in der Entwicklung befindendes Fahrerassistenzsystem ist der Kolonnenassistent, mit dem sich diese Masterarbeit befasst.

Durch dieses Assistenzsystem sollen sich in einer Kolonne bewegende Fahrzeuge in der Lage sein, dem Führungsfahrzeug, an der Spitze des Konvois, vollautomatisch zu folgen und dabei sehr geringe Abstände einzuhalten. Während dessen sind die sich in der Kolonne befindlichen Fahrzeuge elektronisch miteinander verbunden und es besteht ein ununterbrochener Austausch von Informationen, wie beispielsweise Geschwindigkeiten und Positionen, zwischen den Kolonnenkameraden. Durch die kurzen Lücken zwischen den Fahrzeugen, wodurch diese im Windschatten ihres Vordermanns fahren, ist mit einer Einsparung von Kraftstoff und Emissionen und einer Verbesserung der Verkehrssicherheit zu rechnen.

Darüber hinaus ist auch eine Steigerung der Kapazität, durch die geringere Platzinanspruchnahme der Konvois, zu erwarten. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dieser Kapazitätssteigerung durch das Kolonnenassistenzsystem. Hierfür wurden zwei Programme entwickelt um das Verhalten solcher Konvois in dem Verkehrssimulationsprogramm Vissim darzustellen und anschließend wurden mehrere Simulationen durchgeführt und ausgewertet. Bei den insgesamt acht Simulationen wurden sowohl unterschiedliche Teilknotenpunkte, verschiedene Verkehrsstärkenverhältnisse, als auch unterschiedliche Kolonnenlängen getestet.

Die Ergebnisse unterstützen die Erwartung des Gewinns von Kapazität durch das Fahren in einer durch den Kolonnenassistenten unterstützten Konvois, zeigen aber auch deutlich, welche Faktoren negative Auswirkungen auf den Effekt der Platzeinsparung haben. Beispielsweise wird dieser durch das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer, die Art des Streckenabschnitts und das Verkehrsaufkommen beeinträchtigt. Nichts desto trotz hat das Kolonnenassistenzsystem in allen getesteten Szenarien zu einer Steigerung der Kapazität geführt.

Die vorliegende Arbeit untermauert nicht nur die positiven Auswirkungen des Kolonnenassistenten auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, sondern zeigt auch die Aktualität und den Stand diesen Assistenzsystems. Mit einer Einführung in Deutschland ist naher Zukunft zu rechnen.

## **Abstract**

Traffic is growing steadily all over the world. Particularly the road freight transport increases its transport capacity every year and ensures that long distance road infrastructure reaches its limits. For these reasons, various concepts are being developed to improve the traffic flow and to increase the capacity of the roads, while especially aiming at doing this without the need for structural measures.

One approach is to improve the traffic throughput with driver assistance systems and increasing degrees of automated driving. These systems cater for a more fluid and efficient traffic flow. A driver assistance system that is under development is the platoon assistant this master's thesis deals with.

By means of this assistance system, vehicles moving in a platoon should be able to follow the guidance vehicle, at the front of the convoy, fully automatically and thereby to keep very small distances. The vehicles in the platoon are connected electronically, which provides for an uninterrupted exchange of information, such as speeds and positions, between the convoy companions. The small gaps between the vehicles result in slipstream effects, which cater for fuel savings and emission reductions, while also improving on traffic safety.

In addition, an increase of road capacity is expected, due to the reduction of required space. The focus of this thesis is on this capacity increase by the platoon assistance system. For this purpose, two programmes were developed to display the behaviour of such convoys in the traffic simulation programme Vissim. Several simulations were then carried out and evaluated. In the eight simulations, different kinds of route sections, diverse traffic intensities, as well as different convoy lengths were tested.

The results support the expectation of the gain in capacity by driving in a convoy supported by the platoon assistance system, but also clearly show which factors have a negative impact on the effect of space saving. For example, this is affected by the behaviour of the other traffic participants, the type of the route section and the traffic volume. Nevertheless, in all the scenarios tested, the platoon assistance system has led to an increase in capacity.

This work not only underpins the positive impact of the platoon assistant on the capacity of the long distance road infrastructure, but also shows the topicality and status of this assistance system. An introduction to Germany can be expected in the near future.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	2
<b>2</b>	<b>Stand der Fahrerassistenz .....</b>	<b>4</b>
2.1	Fahrerassistenzsysteme.....	4
2.2	Der Kolonnenassistent .....	6
2.3	Die Technik hinter dem Kolonnenassistenten .....	9
2.3.1	Sensoren zur Umgebungswahrnehmung.....	9
2.3.2	Die Kombination der Technologien.....	11
2.3.3	Kommunikationssysteme .....	13
<b>3</b>	<b>Das Verhalten von Platoons.....</b>	<b>16</b>
3.1	Bilden eines Platoons.....	16
3.2	Beitreten eines Platoons .....	16
3.3	Verlassen eines Platoons .....	17
3.4	Verhalten des Platoons auf freier Strecke .....	18
3.5	Verhalten des Platoons an Autobahneinfahrten und -ausfahrten .....	19
3.6	Weitere Handlungsstrategien für Platoons.....	21
3.7	Fahrzeugabstände im Platoon und maximale Kolonnenlänge.....	21
<b>4</b>	<b>Simulationsexperiment zur Kolonnenassistenz.....</b>	<b>23</b>
4.1	Vorbereitung der Simulationen.....	23
4.1.1	Die Netzelemente .....	23
4.1.2	Die Fahrzeugtypen.....	24
4.1.3	Die simulierten Platoons .....	25
4.1.4	Verkehrsstärkenverhältnis und Intervalle .....	26
4.1.5	Simulationsparameter.....	29
4.2	Implementierung des Kolonnenassistenzsystems in Vissim.....	30
4.2.1	Erstellen der Platoons.....	31
4.2.2	Platoonmitglieder verlassen das Platoon.....	33
4.2.3	Geschwindigkeitsanpassung innerhalb des Platoons .....	35
4.2.4	Interaktion des Platoons mit anderen Verkehrsteilnehmern .....	36

5	Auswertung des Simulationsexperiments.....	42
5.1	Berechnung der Kapazität .....	42
5.2	Ergebnisse des Simulationsexperiments.....	43
6	Fazit.....	47
7	Ausblick.....	48
	Literaturverzeichnis.....	50
	Abkürzungsverzeichnis.....	55
	Glossarium .....	57
	Symbolverzeichnis.....	58
	Abbildungsverzeichnis.....	60
	Tabellenverzeichnis .....	61
	Anhang: Auswertungen der Simulationen.....	62

## 1 Einführung

Der Verkehr auf deutschen Fernstraßen nimmt mehr und mehr zu. Vom Jahr 2010 bis zum Jahr 2030 rechnet das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur mit einem Anstieg des Personenfernverkehrs um 12% und einem Zuwachs der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs von 437 Mrd. Tonnenkilometer auf 607 Mrd. Tonnenkilometer. Dies entspricht einer Erhöhung von 39% [Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014, S. 4ff]. Dadurch geraten die Autobahnen immer häufiger an ihre Belastungsgrenzen und das Auftreten von Staus nimmt zu. Laut des ADAC e.V. [2017] kam es allein auf den deutschen Fernautobahnen im Jahr 2016 zu 349.000 Staus, mit einer Gesamtlänge von 806.000 Kilometern und einer Gesamtdauer von 224.000 Stunden. Im Vergleich zum Vorjahr, entspricht dies einer Steigerung von 20% [ADAC e.V., 2017].

Um solche Verkehrsflusszusammenbrüche in Zukunft besser vermeiden zu können, forschen unter anderem Automobil- und Lastkraftwagenhersteller stetig an neuen elektronischen Fahrerassistenzsystemen, die den Verkehrsfluss in Beständigkeit und Effizienz verbessern sollen. Ein bereits in manchen Fahrzeugen serienmäßig vorkommendes Fahrerassistenzsystem ist der Abstandregeltempomat, auch Adaptive Cruise Control (ACC) genannt. Dieser sorgt nicht nur dafür, dass das Fahrzeug eine eingestellte Geschwindigkeit hält, sondern darüber hinaus erkennt das System ein direkt vor sich befindliches Fahrzeug und hält zu diesem einen eingestellten Abstand [Winner et al., 2015, S. 1017f].

Eine bereits existierende Weiterentwicklung des ACC ist der kooperative Abstandsregeltempomat, auch Cooperative Adaptive Cruise Control System (CACC) genannt. Zusätzlich zu den Funktionen des ACC, hat beim CACC das Fahrzeug die Möglichkeit der Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation, (Englisch: Car to Car Communication (C2CC)) und/oder der Fahrzeug zu Infrastruktur Kommunikation (Englisch: Car to Infrastructure Communication (C2IC)). Diese Assistenzfunktionen sorgen dafür, dass die Geschwindigkeiten der mit diesem System ausgerüsteten Fahrzeuge weniger schwanken und reduzieren somit das Risiko für auftretende Staus. Dies geschieht auf Basis von über die Infrastruktur und von anderen Verkehrsteilnehmern erhaltenen Informationen, durch die sich diese Fahrzeuge nicht nur an die Geschwindigkeit des direkt vor ihnen fahrenden Fahrzeugs anpassen können, sondern sich auch an die Verkehrslage stromabwärts frühzeitig angleichen können [Nowakowski et al., 2015, S. 3].

Der Kolonnenassistent, mit dem sich diese Masterarbeit befasst, ist ein weiterer Entwicklungsschritt im Fahrerassistenzbereich. Dieses Assistenzsystem soll die Fahrer dabei unterstützen Kolonnen zu bilden und als verbundene Einheit auf den Straßen zu verkehren, um so den Verkehrsfluss noch flüssiger zu gestalten. Man spricht hierbei auch von Platooning. Unter Platooning wird das Fahren in einem durch den Kolonnenassistenten unterstützten Konvois verstanden, durch das die sich in der Kolonne befindlichen Fahrzeuge einen sehr gerin-

gen Abstand einhalten können, ohne die Verkehrssicherheit zu gefährden [Wikimedia Foundation Inc., 2016c]. Die dem ersten Fahrzeug der Kolonne folgenden Fahrzeuge sollen hierbei vollautomatisch durch das Kolonnenassistenzsystem gesteuert werden. Platoon, das in dem Wort Platooning steckt, kommt aus dem Englischen und bedeutet Kolonne. Unter vollautomatisiertem Fahren versteht die Bundesanstalt für Straßenwesen, dass das Fahrzeug in der Lage ist sich absolut selbständig zu steuern und kein Fahrer benötigt wird. Im Gegensatz zu assistierten, teilautomatisierten und hochautomatisierten Fahren. Bei diesen Graden der Automatisierung ist die Gegenwart des Fahrers zu jeder Zeit erforderlich, da das Assistenzsystem nur für einen gewissen Zeitraum und/oder bestimmte Situationen, Teilaufgaben der Fahrzeugführung übernimmt [Maurer et al., 2015, S. 385]. Das Kolonnenassistenzsystem stellt somit eine Weiterentwicklung des CACC dar. Neben den Funktionen des CACC, wodurch es entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen bereits möglich ist sich an die Geschwindigkeit anderer Fahrzeuge anzupassen und einen definierten Abstand zu halten, verbinden sich die Fahrzeuge innerhalb des Platoons, die im Folgenden als Platoonmitglieder oder Kolonnenkameraden bezeichnet werden, elektronisch miteinander. Dadurch erhalten die Platoonmitglieder vom ersten Fahrzeug in solch einer Kolonne, das im Rahmen dieser Arbeit Platoonführer oder Führungsfahrzeug genannt wird, unter anderem Informationen wie Zielausfahrt und Geschwindigkeit, wodurch eine flüssige und platzsparende Fahrt möglich ist. Bei mit Hilfe des Kolonnenassistenzsystems gebildeten Konvois, rechnet man mit Vorteilen wie gesteigerter Sicherheit, Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen, als auch eine geringere Platzinanspruchnahme und somit eine Steigerung der Straßenkapazität [MAN SE, 2016b] [The Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment et al., 2016b]. Insbesondere im Schwerverkehrssektor wird mit Hochdruck darauf hingearbeitet. Die ersten erfolgreichen Tests fanden bereits statt und der deutsche Lkw-Hersteller MAN hält eine europaweite serienmäßige Einführung bis zum Jahr 2020 für möglich, was die Aktualität des Themas verdeutlicht [MAN SE, 2016b].

Auf der geringeren Platzinanspruchnahme der Lkw-Konvois auf den deutschen Autobahnen, durch den Einsatz von Kolonnenassistenzsystemen, liegt der Fokus der vorliegenden Masterarbeit. Mit Hilfe der Verkehrssimulationssoftware Vissim der Firma PTV, werden zwei verschiedene Autobahnscenarien, Einfahrt und Ausfahrt, simuliert, um die Auswirkung von Platooning von Schwerverkehr auf diese Abschnitte zu untersuchen und auf Basis der aus diesen Simulationen resultierenden Ergebnissen, Aussagen über den Effekt von Platooning auf die Fernstraßeninfrastruktur treffen zu können.

### **1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Die erste Aufgabe dieser Arbeit liegt darin im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche zu untersuchen, in wie weit das Kolonnenassistenzsystem bereits entwickelt ist und in wie weit es bereits im Schwerverkehrssektor zum Einsatz kam, bzw. auf dem Markt verfügbar ist. Hierbei soll insbesondere auch auf die technischen Aspekte eingegangen werden um diese zu Erläutern und Annahmen für die im weiteren Verlauf der Arbeit durchzuführenden Simula-

tionen von Bedeutung sind, z.B. Fahrzeugabstand und maximale Platoonlänge, treffen zu können.

Die in der Recherche gewonnenen Informationen werden anschließend genutzt um die Kolonnenassistentenfunktion in die Verkehrssimulationssoftware Vissim zu implementieren. Diese Modellierung der Simulationen bildet den Kern dieser Masterarbeit und ist die Vorbereitung für die darauf folgenden durchzuführenden Simulationen für die zwei Netzelemente (Einfahrt und Ausfahrt). Hierbei soll die heute existierende Verkehrssituation, ohne Platooning, mit der Situation verglichen werden, in der durch den Kolonnenassistenten verbundene Lkw-Kolonnen vorkommen.

Zum Abschluss dieser Arbeit werden die oben beschriebenen Simulationen ausgewertet und die Wirkung der Kolonnenassistentenfunktion von Schwerverkehr auf die Kapazität der oben genannten Autobahnteilknotenpunkte analysiert. Unter einem Teilknotenpunkt versteht man nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) einen „Teilbereich eines planfreien, teilplanfreien oder teilplangleichen Knotenpunkts, in dem Verkehrsströme aus- und einfädeln bzw. sich verflechten oder ab- und einbiegen bzw. sich kreuzen“ [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2015, S. A 2-2]. Im Ergebnis soll mit dieser Masterarbeit eine Aussage darüber getroffen werden können, ob die Kolonnenassistentenz eine positive Wirkung auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur hat und falls ja, ob diese zu einer signifikanten Verbesserung der heutigen Verkehrssituation ohne Kolonnenassistentenz führt.

## 2 Stand der Fahrerassistenz

### 2.1 Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme sind im heutigen Straßenverkehr keine Seltenheit mehr. In den vergangenen Jahren haben sich die Assistenzsysteme für den Individualverkehr als auch den Straßengüterverkehr stetig weiterentwickelt und wie man in Abbildung 2.1 sehen kann, wird dieser Trend fortgeführt. Galt beispielsweise vor dem Jahr 1970 der Tempomat noch als Durchbruch in der Fahrerassistenz, so wurde er bereits Ende der 1990er Jahre durch das ACC abgelöst bzw. erweitert, dass jetzt zu den serienmäßigen Standardausstattungen modernster Fahrzeuge gehört. Und auch in der Vernetzung hat sich viel getan, war zum Beispiel in den 1960er Jahren der Verkehrsfunk eine der innovativen Neuerungen in der Fahrzeugtechnik, so wurde bereits Anfang dieses Jahrhunderts im Rahmen des simTD-Projekts die Fahrzeug zu X Kommunikation (Englisch: Car to X Communication (C2XC)), erfolgreich getestet, die später noch näher erläutert wird.

Ein Meilenstein in der Fahrerassistenz ist die genannte ACC, sie kombiniert die Funktion des Tempomaten, der automatisch die Kraftstoffzufuhr im Motor reguliert und auf diese Weise das Fahrzeug auf einer voreingestellten Geschwindigkeit hält, mit der Funktion des Bremsomaten. Nach Winner et al. [2015, S. 1017] ist der Bremsomat ein Fahrerassistenzsystem, das die Tempomatenfunktion im Falle eines Hangabtriebs durch elektronische Betätigung der Bremsen unterstützt. Darüber hinaus erkennt das ACC vor sich befindliche Fahrzeuge und hält automatisch einen voreingestellten Abstand [Winner et al., 2015, S. 1018f]. Sollte es auf Grund eines zu geringen Abstands zum Vorderfahrzeug zu einer Notsituation kommen, wird das ACC in modernen Pkw und Lkw durch sogenannte Kollisionsschutzsysteme unterstützt. Diese Systeme reichen von der Fahrerwarnung bis zum automatischen Einleiten einer Vollbremsung im Extremfall [Winner et al., 2015, S. 913ff]. Ein weiteres Fahrerassistenzsystem ist der Spurhalteassistent (Englisch: Lane Keeping System (LKS)), dieser erkennt Fahrstreifen und unterstützt den Fahrer dabei die Fahrspur zu halten, auf der er sich befindet. Zusätzlich wird der Fahrer durch das Assistenzsystem Fahrstreifenverlasswarnung (Englisch: Lane Departure Warning (LDW)) gewarnt, sobald das Fahrzeug droht seine Spur zu verlassen [Winner et al., 2015, S. 937ff].

Wie die Abbildung 2.1 deutlich zeigt, entwickelt sich auch die Vernetzung der Fahrzeuge untereinander und mit der Infrastruktur stetig weiter. Bereits im vergangenen Jahrzehnt startete das Projekt „Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland“ (simTD), in dem Fahrzeuge mit C2XC ausgestattet wurden [simTD-Konsortium, 2009]. Die C2XC beschreibt den Informationsaustausch zwischen Fahrzeug und seiner Umgebung und ist somit ein Überbegriff der C2CC und C2IC [Wikimedia Foundation Inc., 2016a]. Verfügt ein Fahrzeug über die

ACC und gleichzeitig über C2XC, so spricht man von dem bereits in der Einleitung erwähnten CACC-System.

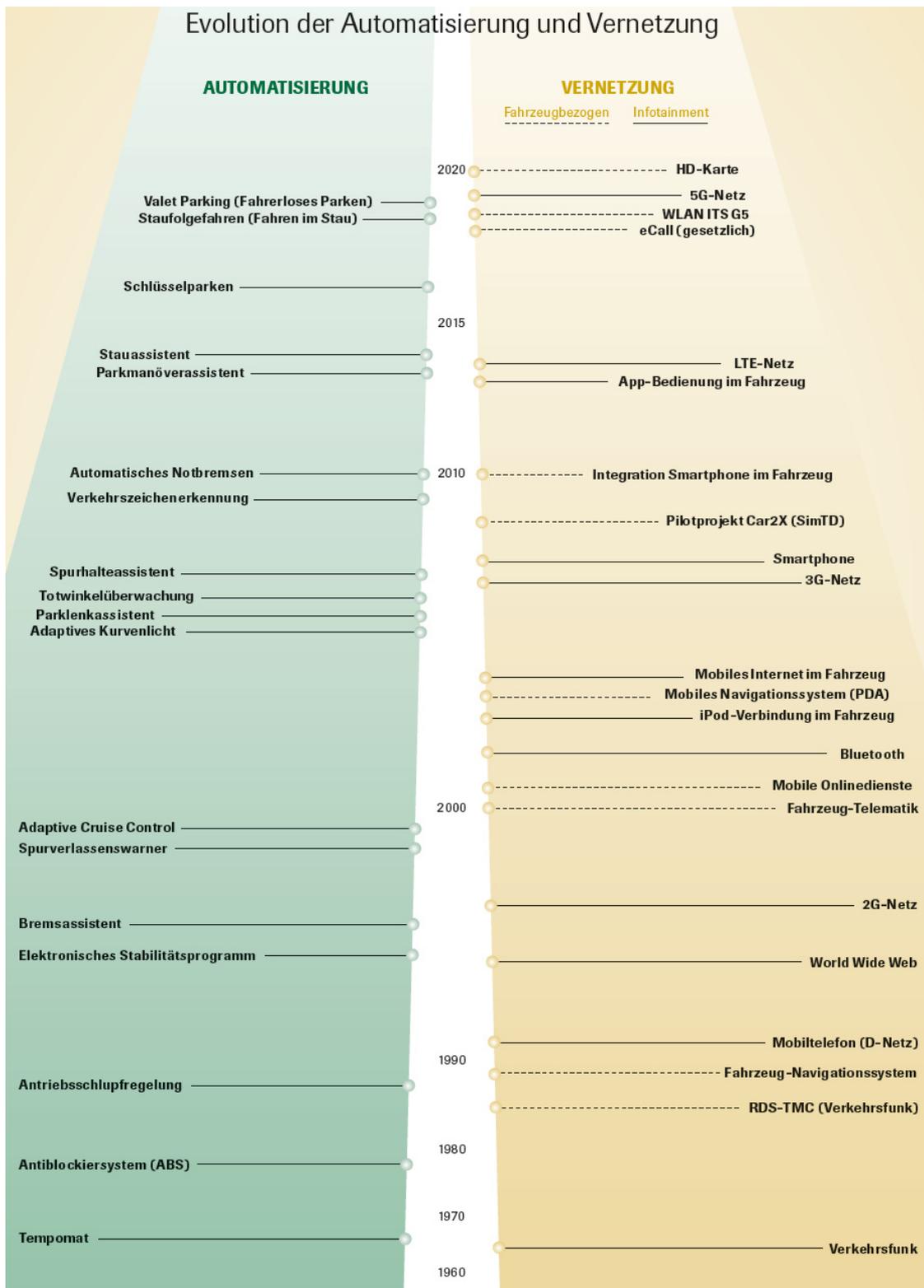


Abbildung 2.1: Evolution der Automatisierung und Vernetzung

[Verband der Automobilindustrie, 2015, S. 10]

## 2.2 Der Kolonnenassistent

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, werden Lkw-Fahrer bereits heute durch Fahrerassistenzsysteme stark dabei unterstützt in Kolonnen zu fahren und folglich den Verkehrsfluss zu verbessern. Allerdings ist es bei dem jetzigen Stand der im Verkehr vorhandenen Technik noch nicht möglich dicht fahrende Kolonneneinheiten zu bilden. Laut §4 Absatz 3 der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) müssen die Lkw nach wie vor bei einer Geschwindigkeit über 50 km/h einen Mindestabstand von 50 Metern einhalten [FORUM VERLAG HERKERT GMBH, 2015, S. 19]. Aus diesem Grund sorgen diese Kolonnen nicht für eine Platzeinsparung auf den Straßen und daher auch nicht für eine Verbesserung der Kapazität von Autobahnen. An dieser Stelle kommt das Kolonnenassistentensystem ins Spiel. Durch dieses verbinden sich Lkw zu einer Platooneinheit direkt miteinander und tauschen die notwendigen Informationen wie z.B. Geschwindigkeiten und Positionen aus [MAN SE, 2016a]. Wie bereits in der Einführung erläutert spricht man hierbei auch von Platooning, dass das Fahren in einem durch den Kolonnenassistenten verbundenen Konvoi ausdrückt. Darüber hinaus sendet der Platoonführer ein Signal an die Kolonnenkameraden, wenn es notwendig ist zu bremsen, z.B. auf Grund eines vor dem Platoon befindlichen Staus oder eines anderen Hindernisses [Daimler AG, 2016]. Durch die direkte Verbindung ist es den Platoonmitgliedern möglich einen kleineren Abstand von ca. 10 – 15 Metern, bzw. einer halben Sekunde Fahrzeit Folgeabstand zu halten, ohne die Sicherheit für die Kolonnenkameraden und den restlichen Verkehr zu erhöhen. Dies wird durch die elektronische Verbindung zwischen den Fahrzeugen, auch „elektronische Deichsel“ genannt, gewährleistet, die die Reaktionszeit der Fahrer umgeht. Die Folgefahrzeuge im Lkw-Verbund reagieren mit einer Verzögerung von lediglich 0,1 Sekunden (siehe Abbildung 2.2), deshalb erwartet man sogar eine Verbesserung der Verkehrssicherheit [Daimler AG, 2016]. Durch dieses sogenannte Windschattenfahren, reduziert sich nicht nur der Kraftstoffverbrauch und die damit verbundenen Emissionen der Lkw, sondern auch die Platzanspruchnahme, da durch die kurzen Abstände zwischen den Fahrzeugen Straßenraum gewonnen wird [Menzel, 2016].

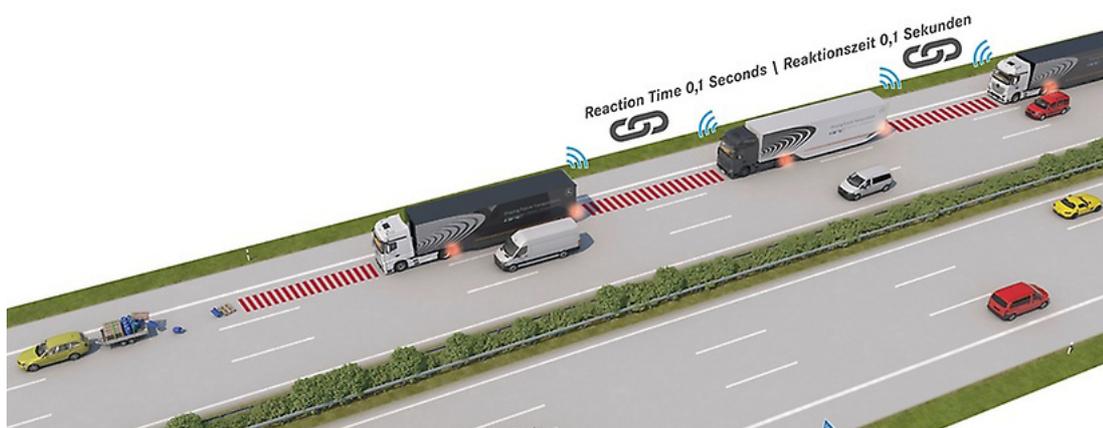


Abbildung 2.2: Reaktionszeit im Platoon

[Daimler AG]

Die zuvor erwähnte „elektronische Deichsel“ zwischen dem Führungsfahrzeug, das solch eine Kolonne anführt und den dahinter fahrenden Folgefahrzeugen basiert zu meist auf einer drahtlosen Netzwerkverbindung (Englisch: Wireless Local Area Network (WLAN)) oder einer Infrarotverbindung [Maurer et al., 2015, S. 388]. Bereits 2012 einigten sich die Teilnehmer des Car to Car Communication Consortiums, unter anderem bestehend aus 12 Fahrzeugherstellern, 17 Zulieferfirmen und 30 Forschungsinstituten, auf einen Übertragungsstandard für die Fahrzeugkommunikation, auf dessen Basis weitere Entwicklungen stattfanden und – finden, auch in Richtung der Kolonnenassistenten. Priorität der Konferenz des Konsortiums, die im Rahmen des Intelligent Transport Systems World Congress 2012 in Wien tagte, war es sich auf eine ganz und gar für C2XC vorbehaltene Übertragungsfrequenz zu einigen. Die Frequenz wurde auf 5,9 GHz festgelegt. [ITS International, 2012].

Wie weit fortgeschritten die Technologie des Platoonings schon ist, sieht man an Hand der zahlreichen erfolgreichen Projekte, die zu diesem Thema schon stattfanden und abgeschlossen wurden. So fand von 2005 bis 2009 beispielsweise das deutsche Forschungsprojekt KONVOI statt, an dem unter anderem der deutsche Lkw-Hersteller MAN und die RWTH Aachen beteiligt waren und bei dem schwere Lkw vollautomatisiert in geringem Abstand dem Führungsfahrzeug folgten. Dies wurde durch die bereits erwähnte C2CC ermöglicht und sorgte für eine Einsparung von Verkehrsraum und Verbesserung des Verkehrsflusses [Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 2009]. Wie man in Abbildung 2.3 sehen kann, fanden zuvor noch weitere Projekte statt, um den im Projekt KONVOI getesteten Kolonnenassistenten zu entwickeln. Unter anderem die beiden deutschen Forschungsprojekte PROMOTE CHAUFFEUR I & II, die bereits Ende der 1990er Jahre starteten [Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 2009]. Ferner zeigt die Abbildung 2.3, welche Technologien zuvor entwickelt werden mussten, um den Weg zum Kolonnenassistentensystem zu ebnen.

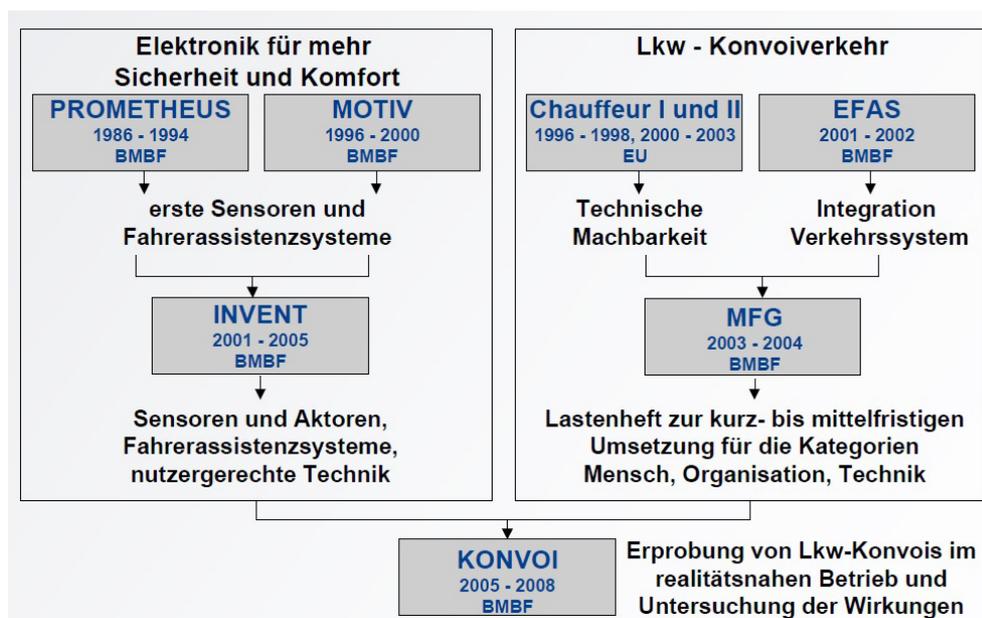


Abbildung 2.3: Der Weg zum Projekt KONVOI

[Verein deutscher Ingenieure e.V.]

Ein weiterer Schritt in Richtung der Etablierung der Kolonnenassistenz im Straßenverkehr war das Forschungsprojekt „Safe Roadtrains for the Environment“, kurz SARTRE, das von 2009 bis 2012 lief und an dem neben Anderen der schwedische Fahrzeughersteller Volvo beteiligt war [Robinson et al., 2010, S. 11]. Im Rahmen dieses Projekts beschränkte man sich nicht auf homogene Lkw-Kolonnen, womit Konvois gemeint sind, deren Mitglieder ausschließlich Lkw sind, sondern bildete inhomogene Mischplatoons, die sowohl aus Lkw als auch Pkw bestanden (siehe Abbildung 2.4).



Abbildung 2.4: Inhomogenes Mischplatoon des Projekts SARTRE  
[Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 2012]

Eines der jüngsten Projekte zum Thema Platooning war die im vergangenen Jahr durchgeführte „European Truck Platooning Challenge“. Die niederländische Regierung initiierte während ihres Vorsitzes des europäischen Parlaments dieses Projekt [The Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment et al., 2016c]. Sechs europäische Lastkraftwagenhersteller nahmen an dieser Herausforderung teil. Neben den zwei deutschen Vertretern Daimler und MAN, nahmen außerdem DAF, IVECO, Scania und Volvo teil und entsandten jeweils ein Platoon von zwei bis drei Lkw von ihren jeweiligen Produktionsstätten nach Rotterdam. Scania legte dabei mit über 2000 Kilometern und dem Überqueren von vier Landesgrenzen die längste Strecke zurück [The Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment et al., 2016a]. Alle sechs Kolonnen fuhren hierfür als Teilnehmer des normalen Straßenverkehrs über das europäische Fernstraßennetz, wobei nur das Führungsfahrzeug von einem Fahrer gesteuert wurde und die Folgefahrzeuge vollautomatisiert folgten und das in Abständen von unter 15 Metern [MAN SE, 2016a].

Dies führt hin zu Fragen über das Verhalten solch eines durch das Kolonnenassistenzsystem gebildeten Lkw-Konvois im Straßenverkehr, sowohl unter den Platoonmitgliedern als auch die Interaktion mit dem restlichen Verkehr und dessen Verhalten gegenüber dem Platoon, vor allem in besonderen Situationen wie Autobahneinfahrten und –ausfahrten (siehe Kapitel 3).

## 2.3 Die Technik hinter dem Kolonnenassistenten

Die in Kapitel 2.1 und 2.2 beschriebenen Assistenzfunktionen erfordern, dass die entsprechend ausgerüsteten Fahrzeuge mit einer umfangreichen Technik zur Umgebungswahrnehmung, Positionsbestimmung und Kommunikation mit ihrem Umfeld ausgestattet sind. Moderne Lkw wie der Mercedes Benz Actros MP4, der MAN TGX D38, der IVECO Stralis E6, der DAF XF oder der Volvo FH 16 sind bereits serienmäßig mit Fahrerassistenzsystemen, wie ACC, Notbremsystemen und Spurhalteassistenten, ausgestattet, die bereits eine Vielzahl von Sensoren und Kameras voraussetzen. Auch die Positionsbestimmung durch das Global Positioning System, kurz GPS, ist im modernen Straßenverkehr eine weitverbreitete Technik [Daimler AG, 2011] [MAN Truck & Bus AG, 2015] [Iveco Magirus AG, 2014] [DAF Trucks Deutschland GmbH] [Volvo Group Trucks Central Europe GmbH]. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass die Fahrzeuge in der Lage sind ihre Längs- und Querführung selbstständig zu übernehmen. Damit die Fahrer ihre Bereitschaft zur Bildung eines Platoons oder die Kolonnenkameraden auf ihr Verlassen des Konvois vorbereiten können, bedarf es außerdem einer Schnittstelle zwischen Fahrer und Kolonnenassistenzsystem. In Abbildung 2.5 erhält man einen guten Überblick über die für die Kolonnenassistenz notwendigen Komponenten.

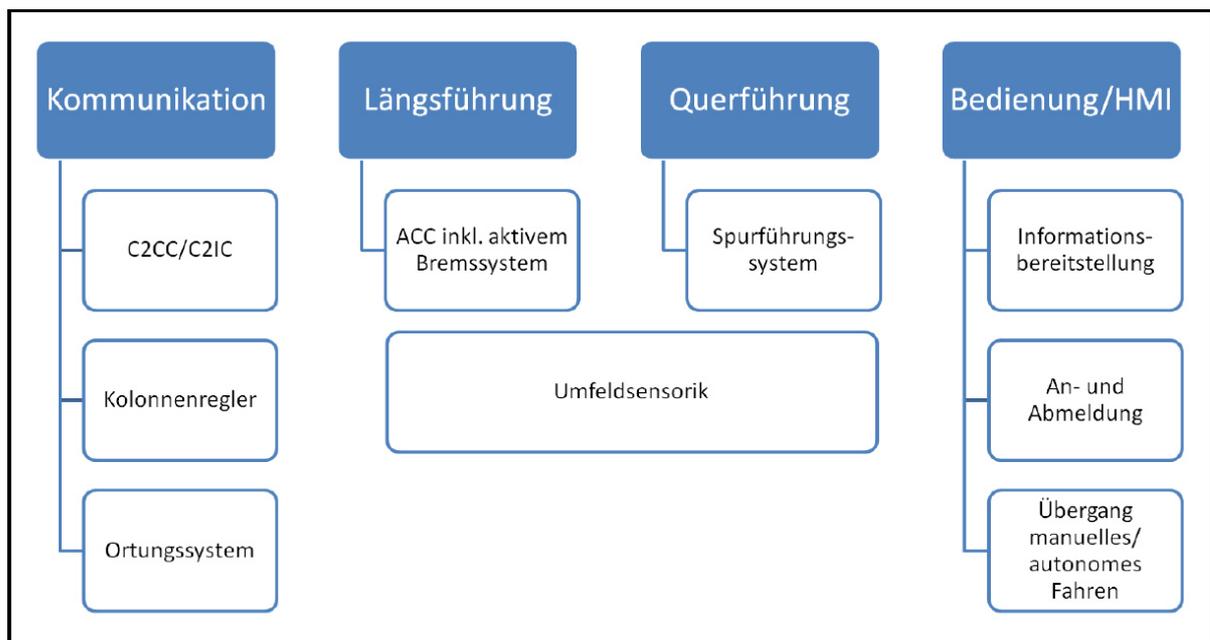


Abbildung 2.5: Komponenten der Kolonnenassistenz

[Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 111]

### 2.3.1 Sensoren zur Umgebungswahrnehmung

Modernste Lkw, die für die autonome Kolonnenfahrt ausgestattet sind, sammeln Daten über ihre Umgebung und verbinden diese zu einer 360° Wahrnehmung des Lkw von seinem direkten Umfeld. In Mercedes Benz Trucks beispielsweise geschieht diese Wahrnehmung auf

Basis von rund 400 Sensoren [Daimler AG, 2016]. Im Bereich der Fahrzeugtechnik kommen hierfür Sensorarten, wie dem „Radio Detection and Ranging“, kurz RADAR, das durch Funkwellen zur Ortung bzw. Erkennung, Entfernungsmessung und Messung von Relativgeschwindigkeit dient, dem „Light Detection and Ranging“, kurz LIDAR, das Infrarotstrahlung aussendet, durch dessen Reflektion auf Hindernissen Objekte wahrgenommen werden können und Kamerasensoren vor [Reif, 2010, S. 109ff].

Wie zuvor erwähnt senden die Radarsensoren Funkwellen aus, diese werden durch Objekte um den Lkw herum reflektiert und werden von den Sensoren wieder empfangen. Durch die Laufzeit zwischen Aussenden und Empfangen der Wellen können die Abstände im longitudinalen als auch lateralen Umfeld bestimmt werden. Darüber hinaus lassen sich durch den Dopplereffekt Relativgeschwindigkeiten bestimmen. Innerhalb der Radartechnik wird außerdem noch zwischen Long Range RADAR (LRR) und Short Range RADAR (SRR) differenziert, je nachdem in welcher Entfernung sich das wahrzunehmende Objekt befindet, wird das Objekt von der entsprechenden Radartechnik wahrgenommen [Reif, 2010, S. 109ff].

Das Prinzip bei der LIDAR-Technik ist ähnlich wie beim RADAR, nur mit dem Unterschied, dass hier keine Funkwellen sondern Infrarotwellen ausgesendet werden. Der Vorteil gegenüber dem RADAR besteht darin, dass die räumliche Auflösung höher ist und dass es auch Informationen über Sichtweite und Sichtverhältnisse sammeln kann, sowie die Möglichkeit des „Trackings“, der Verfolgung von Objekten, besitzt, was zum Beispiel bei in das Platoon einscherenden Fahrzeugen sehr hilfreich ist, damit die Platoonmitglieder rechtzeitig und angemessen auf die einscherenden Fahrzeuge reagieren können. Auf der anderen Seite ist es aber auch stark von äußeren Bedingungen wie zum Beispiel dem Wetter abhängig, starker Regen oder Nebel beeinflussen die Sensoren negativ in ihrer Zuverlässigkeit [Reif, 2010, S. 141].

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Sensoren setzt man bei der Umgebungswahrnehmung in Fahrzeugen auch auf Kamerasensoren. Diese unterstützen beispielsweise den Spurhalteassistenten, der für die laterale Steuerung des Fahrzeugs entscheidend ist, durch die Erkennung von Fahrbahnmarkierungen, wie den gestrichelten Leitlinien zwischen den Autobahnfahrstreifen. Durch die Unterstützung von Nachtsichtgeräten funktioniert dies auch bei Dunkelheit [Reif, 2010, S. 142ff].

Mit dem Hintergrund des Platoonings werden Kameras außerdem dazu verwendet das Verkehrsgeschehen vor dem Führungsfahrzeug aufzuzeichnen und dies in Echtzeit an die Folgefahrzeuge weiterzugeben, sodass auch die Fahrer der Folgefahrzeuge über die Verkehrslage vor dem Platoonführer im Bilde sind (siehe Abbildung 2.6 und Abbildung 2.7) [Daimler AG, 2016].



Abbildung 2.6: Bildübertragung des Verkehrsgeschehens vor dem Führungsfahrzeug  
[Daimler AG]

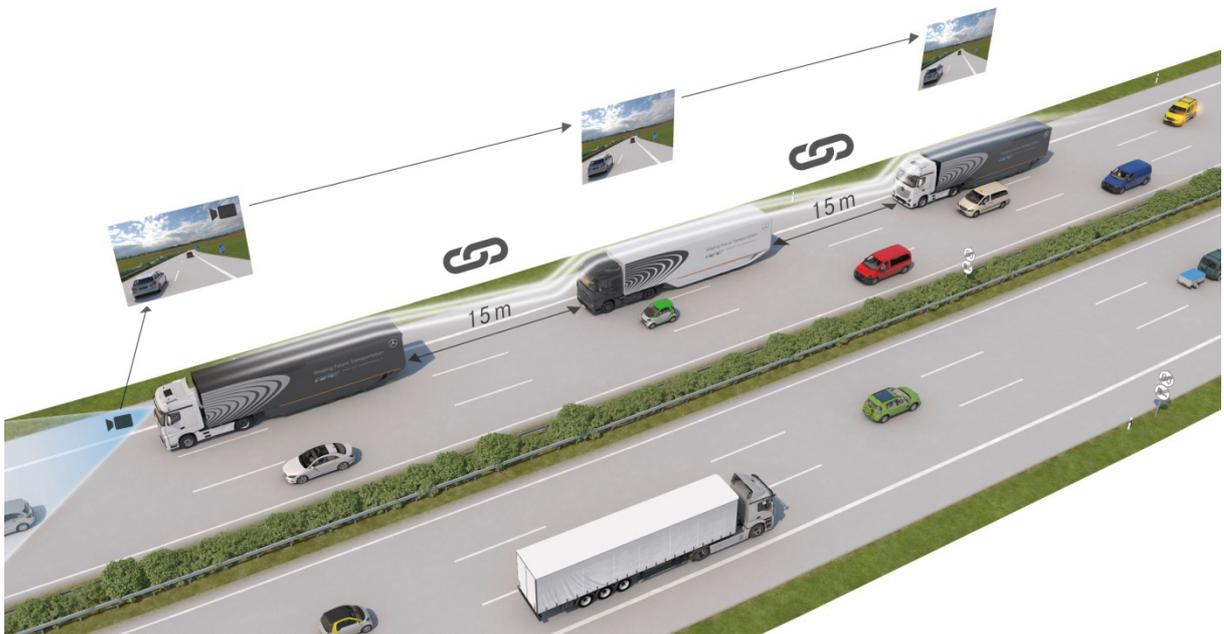


Abbildung 2.7: Bildübertragung und Folgeabstände im Platoon  
[Daimler AG]

### 2.3.2 Die Kombination der Technologien

Jeder der oben beschriebenen Techniken zur Umgebungswahrnehmung haben ihre Vor- und Nachteile. Erst durch die Kombination der Technologien erhält das Fahrzeug ein umfangreiches und zuverlässiges Datenpaket über die Objekte in seinem direkten Umfeld. Al-

lerdings hat diese aufwendige Datenfusion auch einen entscheidenden Nachteil, je detailreicher und umfassender die Messung und Erkennung der Fahrzeugumgebung ausfällt, desto komplexer und fehleranfälliger wird das Gesamtsystem [Winner et al., 2015, S. 439ff]. Nichts desto trotz ist es für die Umsetzung des Platoonings eine unverzichtbare Voraussetzung. In Tabelle 2.1 bekommt man einen Überblick, welche Sensorik für welche Assistenzfunktion verantwortlich ist. Hier wird auch das bisher noch nicht erwähnte Fahrstreifenwechselentscheidungsunterstützungssystem (Englisch: Lane Change Decision Assistance System (LCDAS)) genannt. Des Weiteren wird in der Tabelle auch eine weitere bisher noch nicht erwähnte Sensortechnik aufgeführt, die Ultraschallsensorik für den Ultranahbereich. Wie der Name schon vermuten lässt, arbeiten diese Sensoren mit dem Empfang der von ihnen vorher ausgesandten und vom Objekt reflektierten Ultraschallwellen.

Bereich	Reichweite	verwendete Umfeldsensorik						Anwendungsbeispiele
		LRR	SRR	LIDAR	IR	VB	US	
1	Fernbereich < 200 m	+	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>ACC</li> <li>(LCDAS)</li> </ul>
2	Fern-/Nahbereich < 150 m (ggf. auch im Heckbereich)	+	-	+	+	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>ACC</li> <li>LCDAS</li> <li>(LDW)</li> <li>Nachtsichtsysteme mit Fußgängererkennung usw.</li> </ul>
3	Außenbereich < 80 m	+	+	+	+	+	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>ACC</li> <li>LCDAS</li> <li>LDW/LKS</li> <li>Nachtsichtsysteme</li> <li>Verkehrszeichenerkennung</li> <li>Fußgängererkennung</li> <li>Kreuzungsassistenz</li> </ul>
4	Nahbereich < 20 m	+	+	+	+	+	-	
5	Fahrzeuginnenraum	-	-	-	+	+	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrerbeobachtung</li> <li>Innenraumüberwachung für Sicherheitssysteme</li> </ul>
6	Ultranahbereich < 4,5 m	0	0	+	+	+	+	<ul style="list-style-type: none"> <li>ACC</li> <li>Parkassistenzsysteme</li> </ul>

LRR = Long-Range-Radar / SRR = Short-Range-Radar / LIDAR = Light Detection and ranging / IR = Infrarot und Time-of-Flight-Techniken / VB = Video- und Bildverarbeitung / US = Ultraschall  
 + = geeignet / 0 = bedingt geeignet / - = ungeeignet

Tabelle 2.1: Kombination der Umfeldsensorik  
 [Irtzenkauf & Klaußner, 2013, S. 53]

Für eine detailreichere und umfangreichere Beschreibung der in modernen Fahrzeugen vorkommende Sensor- und Kameratechnik empfehlen sich die Studienarbeit „Autonome Kolonnenfahrt auf der Autobahn“ [Irtzenkauf & Klaußner, 2013, S. 52ff] und das Handbuch Fahrerassistenzsysteme [Winner et al., 2015, S. 223ff]. Welcher Bereich der direkten Fahrzeugumgebung durch welche der in Tabelle 2.1 aufgeführten Sensoren abgedeckt wird ist in Abbildung 2.8 zu sehen.

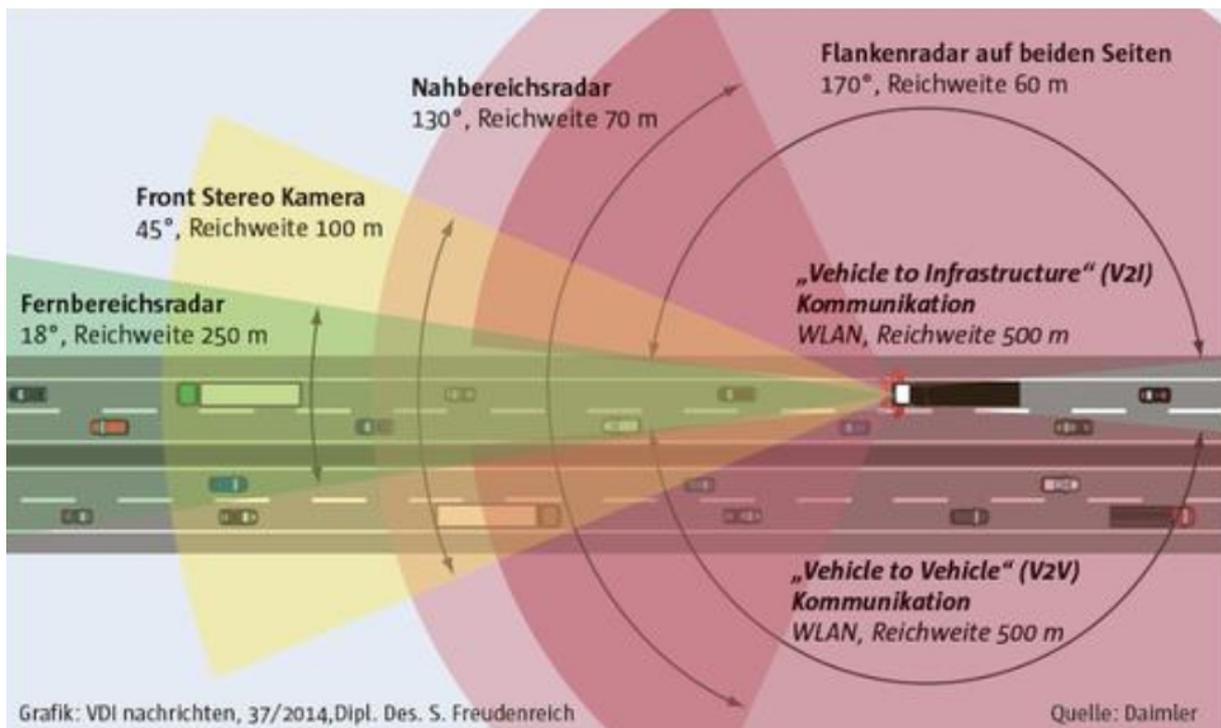


Abbildung 2.8: Umgebungssensoren  
 [Donnerbauer, 2014]

### 2.3.3 Kommunikationssysteme

Die Abbildung 2.8 zeigt auch die, neben der Umgebungswahrnehmungstechnik, zweite große technologische Voraussetzung für das Kolonnenassistenzsystem. Die C2IC und C2CC, zusammengefasst C2XC. In dieser Abbildung sind diese unter den Synonymen „Vehicle to Infrastructure“ und „Vehicle to Vehicle“ Kommunikation (V2IC und V2VC) erwähnt. Sie stellen ein entscheidendes Werkzeug für das Bilden und Aufrechterhalten von, durch den Kolonnenassistenten geformten Konvois, dar.

Während man im Rahmen des Forschungsprojekts KONVOI, das im Jahre 2009, also vor der in Kapitel 2.2 erwähnten Einigung über die C2XC, abgeschlossen wurde, noch Mobil- und Verkehrsfunkverbindungen für die C2XC brauchte (siehe Abbildung 2.9), werden seit der Einigung von 2012 vorwiegend WLAN-Verbindungen für die C2XC benützt (siehe Abbildung 2.8). Verwendet wird die auf sich im Rahmen des Intelligent Transport Systems World Congress 2012 in Wien geeinigte Frequenz von 5,9 GHz (siehe Kapitel 2.2). Speziell für die Fahrzeugkommunikation wurde basierend auf dem normierten Standard von drahtlosen Netzwerken, IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers), im Juli 2010 die Erweiterung IEEE 802.11p entwickelt [Irtenkau & Klaußner, 2013, S. 81]. Im europäischen Raum verwendet man vor allem die Bezeichnung ITS-G5 für das standardisierte Kommunikationssystem in der Fahrzeugtechnik [Wikimedia Foundation Inc., 2016b]. So findet man diese Bezeichnung beispielsweise auch bei der Beschreibung von Platooning von MAN [MAN SE, 2016b] und in Abbildung 2.1.

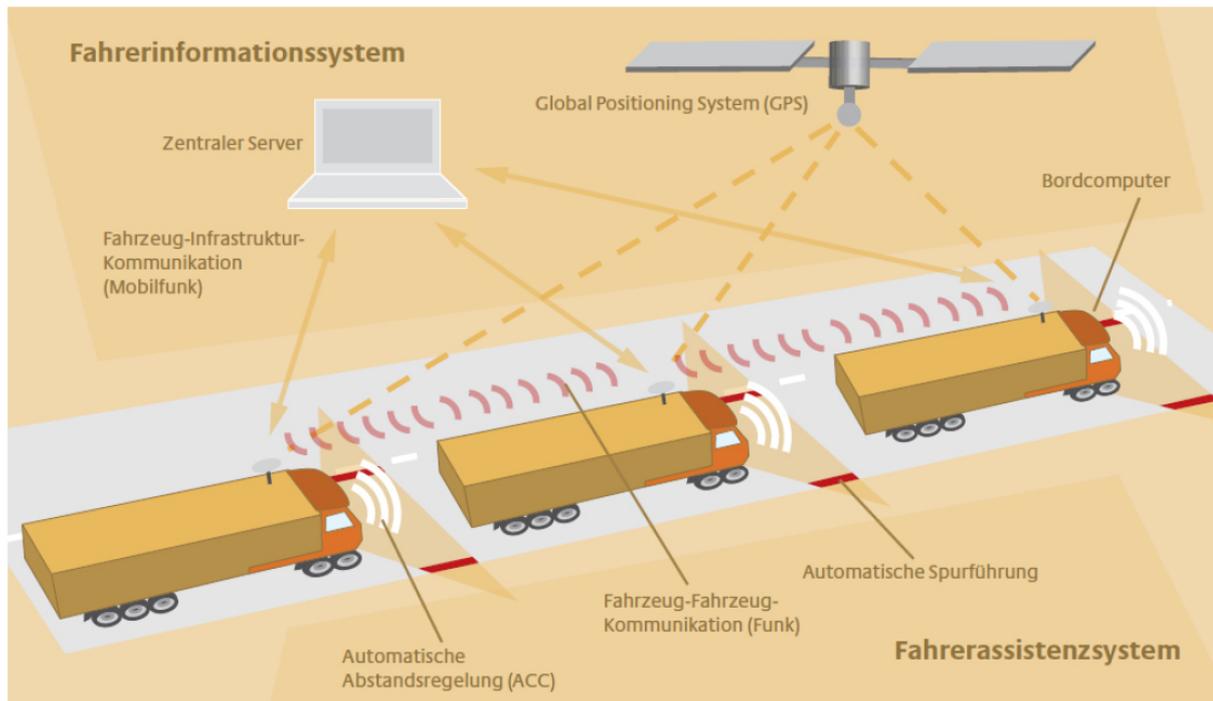


Abbildung 2.9: Aus dem Projekt KONVOI stammende Lkw-Kolonne

[Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 98]

Obwohl eine einheitliche Plattform beziehungsweise ein einheitliches Kommunikations- und Kolonnensystem sinnvoll ist, sind sich die Konkurrenten im europäischen Straßengüterverkehr noch nicht einig. Bereits im vergangenen Jahr wollte die Daimler AG, ihre Kommunikationsplattform FleetBoard auch für andere Firmen zur Verfügung stellen, um unter anderem eine Vorlage für die Vereinheitlichung des Systems zu bieten, was allerdings von Volkswagen abgelehnt wurde. Der Konzern strebt eine eigene Plattform für MAN, Scania und Volkswagen Nutzfahrzeuge an [Steingart, 2016]. Ferner besitzt der Lkw-Hersteller Iveco eine, unter dem Namen IVECONNECT laufende, eigene Kommunikationsplattform [Iveco Magirus AG]. Des Weiteren hat auch die Firma DAF, gemeinsam mit NXP, TNO und Ricardo unter dem Projektnamen EcoTwin, eine eigene C2CC-Lösung namens RoadLINK entwickelt [Vogel Business Media GmbH & Co.KG, 2016]. Über seine Kommunikationsplattform Dynafleet bietet ebenfalls der schwedische Hersteller Volvo eine Möglichkeit der C2XC zur Positions-, Wartungs- und Fahrzeitenüberwachung für seine Fahrzeuge an [Volvo AB].

Trotz der Vielzahl an unterschiedlichen Plattformen und den sich unabhängig entwickelnden Systemen, ist die Kommunikationstechnik doch bei allen sechs Teilnehmern der „EU Truck Platooning Challenge“ gleich. Alle sechs Fahrzeughersteller verwenden den für die Fahrzeugkommunikation entwickelten WLAN-Standard IEEE 802.11p bzw. ITS-G5 mit der auf sich geeinigten Frequenz von 5,9 GHz [ServiceXpert Gesellschaft für Service-Informationssysteme mbH, 2016]. Daher ist davon auszugehen, dass trotz der Konkurrenzsituation und den herstellereigenen Kommunikationsplattformen in Zukunft das Bilden von herstellerübergreifenden Platoons möglich sein wird, das die Häufigkeit des Bildens von Konvois steigern würde, wovon alle Beteiligten profitieren würden. Laut Mercedes Benz ist

eine herstellerübergreifende Bildung von solchen Kolonnen jetzt schon technisch möglich [Jordan, 2016].

Ein entscheidender Faktor bei Kommunikationssystemen von Fahrzeugen ist die Gewährleistung der sicheren Datenübertragung um Missbrauch und externe Einflussnahme zu verhindern, die beispielsweise bei einem Eingriff durch einen Unbefugten zu Unfällen führen könnte. Nach Reif [2010, S. 114] müssen daher die fünf folgenden Punkte hinsichtlich der Datensicherheit erfüllt sein:

- Datenintegrität: Falsche/veränderte Daten dürfen nicht gesendet werden oder müssen zumindest als solche erkannt werden.
- Anonymität: Anforderungen des Datenschutzes hinsichtlich der Privatsphäre.
- Kompatibilität: Verträglichkeit von Security-Verfahren über Jahrzehnte.
- Update/Upgrade-Fähigkeit: Möglichkeit, alte Fahrzeuge auf den neuesten Stand der Security-Verfahren zu bringen.
- Echtzeitfähigkeit: Obige Anforderungen bedingen hohe Rechenleistung für Ver- und Entschlüsselung usw.

### 3 Das Verhalten von Platoons

Wie bei dem Verhalten von teil-, hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen, müssen auch für das Platooning-Verhalten Handlungsstrategien für alle bei der Fahrt eventuell auftretenden Situationen entwickelt werden [Pudenz, 2011, S. 2].

#### 3.1 Bilden eines Platoons

Ausgangssituation ist ein mit einem Kolonnenassistenten ausgestatteter Lkw auf einer Autobahn. Dieser aktiviert nach dem Auffahren auf die Autobahn ein Signal, beispielsweise per WLAN, das neben seiner Bereitschaft zur Platoon-Bildung auch für potentielle Platoonmitglieder interessante Informationen wie Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung und voraussichtliche verbleibende Fahrzeit auf der Autobahn oder sogar die Zielausfahrt sendet. Andere mit einem Kolonnenassistenten ausgerüstete Lkw, die in Empfangsreichweite dieses Signals sind, empfangen diese Informationen und gleichen sie mit ihren ab. Ist für beide Fahrzeuge die Bildung einer Kolonne sinnvoll, so werden die Geschwindigkeiten angepasst, um ein Treffen zu arrangieren. Dies geschieht durch den in Abbildung 2.5 erwähnten Kolonnenregler. Um die gesetzlich vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von Lkw auf Autobahnen von 80 km/h nicht zu überschreiten, reduziert der vorwegfahrende Lkw, der damit das Führungsfahrzeug des sich bildenden Platoons darstellt, seine Geschwindigkeit. Dadurch kann der sich hinter dem Führungsfahrzeug befindliche Lkw langsam aufschließen und ist somit das erste Folgefahrzeug des sich neu bildenden Konvois. Hierbei ist zu beachten, dass die Geschwindigkeitsreduzierung des Führungsfahrzeugs nicht zu stark ausfällt und ungefähr zwischen 5 – 10 km/h liegt, da zu große Geschwindigkeitsschwankungen im Verkehr, den Verkehrsfluss auf der Autobahn stören und somit das Platooning seinen positiven Effekt verringern würde. Hat das Folgefahrzeug das Führungsfahrzeug erreicht, verbinden die Fahrzeuge sich elektronisch über eine C2CC und bilden ein neues Platoon, jetzt ist es dem Fahrer des Folgefahrzeugs möglich seine gesamte Fahrzeugsteuerung an das Kolonnenassistenzsystem zu übergeben. Die Quer- und Längsführung des folgenden Lkw geschieht ab jetzt vollautomatisch. Ähnlich beschreibt auch Daimler sein Platoon-Bildungsverhalten, dessen Kolonnenassistenzsystem Highway Pilot Connect heißt [WeltN24 GmbH, 2016] [Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 131ff] [Daimler AG].

#### 3.2 Beitreten eines Platoons

Fährt ein Platoon über die Autobahn so sendet es, wie das im vorherigen Kapitel beschriebene Fahrzeug mit Kolonnenassistent, Signale aus, die sich im Umkreis befindliche potentielle Kolonnenkameraden über Geschwindigkeiten, Positionen, Fahrtrichtungen und Ausfahrtsziele der im Konvoi befindlichen Fahrzeuge informiert. Ist ein kolonnenfähiger Lkw in

der Nähe, so empfängt er dieses Signal und gleicht es mit seinen Daten ab. Für den Fall, dass ein Beitreten des Platoons sinnvoll ist sendet er ein entsprechendes Signal an die Kolonne zurück. Ab hier läuft das Treffen auf der Autobahn analog zu dem zuvor beschriebenen Prozess der Platoon-Bildung ab. Für den Fall, dass sich der Lkw-Konvoi stromabwärts befindet, reduziert dieser dezent seine Geschwindigkeit, um dem neuen Kolonnenmitglied das Aufschließen zu ermöglichen. Hat dieser die Kolonne erreicht, so verbindet er sich via C2CC mit dem Platoon und kann seine Steuerung komplett an das Kolonnenassistenzsystem abgeben, der Lkw folgt automatisch dem letzten Folgefahrzeug des Platoons. Im umgekehrten Fall, falls sich also der einzelne Lkw vor der Kolonne aufhält, reduziert dieser seine Geschwindigkeit, bis der Konvoi aufgeschlossen hat. An dieser Stelle klinkt sich der Platoonführer der Kolonne samt seiner folgenden Platoonmitglieder an den vorwegfahrenden Lkw, der jetzt der neue Platoonführer ist, der Fahrer des früheren Führungsfahrzeugs gibt seine Kontrolle an das Kolonnenassistenzsystem ab [Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 135ff] [Daimler AG].

### 3.3 Verlassen eines Platoons

Ist ein Platoon kurz vor der Zielausfahrt eines seiner Kolonnenkameraden, so muss es entsprechend reagieren. Im einfachsten Falle ist es das letzte Platoonmitglied, das den Konvoi verlassen will. Der Fahrer kündigt dem System seinen Austritt an und das Fahrzeug lässt sich durch ein automatisches Reduzieren seiner Geschwindigkeit, auf die gesetzliche Mindestdistanz von 50 Metern zurückfallen [FORUM VERLAG HERKERT GMBH, 2015, S. 19]. Jetzt übernimmt der Fahrer die Kontrolle wieder über sein Fahrzeug und klinkt sich aus der C2CC der Kolonne aus. Etwas komplizierter wird es, wenn eines der mittleren Platoonmitglieder oder gar der Platoonführer den Konvoi verlassen möchte. Will eines der mittleren Folgefahrzeuge die Kolonne verlassen, so müssen die Kolonnenkameraden dahinter als separater Konvoi sich auf den gesetzlichen Mindestabstand zu dem verlassenden Fahrzeug zurückfallen lassen. Darüber hinaus muss sich auch das Fahrzeug, das das Platoon verlassen will einen entsprechenden Abstand zum Vorderfahrzeug aufbauen, ist dies geschehen, übernimmt der Fahrer wieder die Kontrolle über sein Fahrzeug, klinkt sich aus der C2CC aus und steuert anschließend den Lkw auf den Bremsstreifen (siehe Abbildung 3.1).

Anschließend rückt der separate Konvoi, der sich zurückfallen lassen hat, wieder auf die noch bestehende Kolonne auf und bildet wieder eine geschlossene Platooneinheit. Da sich der vorwegfahrende Lkw-Konvoi mit der Platoon-Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h bewegt und Lkw, nach §57c der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) auf 90 km/h gedrosselt sein müssen [Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz], ist es der zurückgefallenen Lkw-Kolonne möglich mit einer Geschwindigkeitsdifferenz von 10 km/h aufzurücken. Auch dieses Manöver wird vollautomatisiert über das Kolonnenassistenzsystem gesteuert. Ist es der Platoonführer, der den Konvoi verlassen will, lässt das restliche Platoon seine Geschwindigkeit abfallen um die gesetzliche Mindestentfernung zum

Platoonführer zu erreichen. Ist dies geschehen, übernimmt der Fahrer des ersten Folgefahrzeugs wieder selbst die Kontrolle über sein Fahrzeug. Das erste Folgefahrzeug ist jetzt das neue Führungsfahrzeug und der ehemalige Platoonführer kann sich aus der C2CC und damit aus der Kolonne ausklinken. Hat der ehemalige Platoonführer auf den Bremsstreifen gewechselt, kann die restliche Kolonne wieder auf die Wunschgeschwindigkeit, von 80 km/h, beschleunigen. Besteht ein Konvoi lediglich aus zwei Fahrzeugen und eins davon möchte die Kolonne verlassen, so spricht man von einer Auflösung des Platoons.

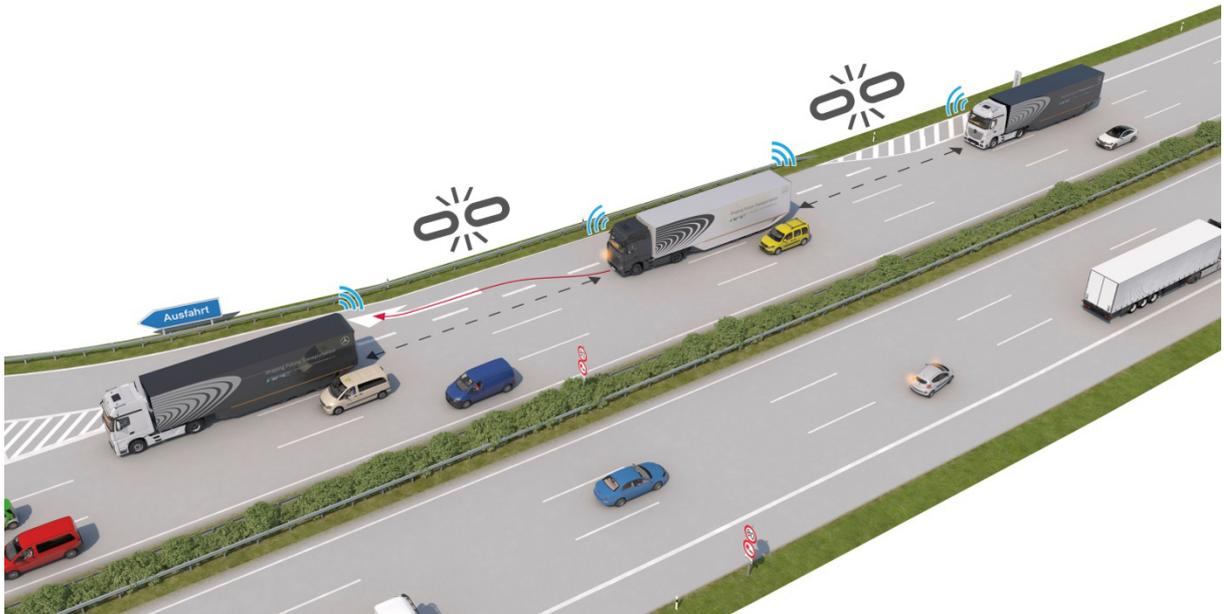


Abbildung 3.1: Mittleres Platoonmitglied verlässt das Platoon  
[Daimler AG]

Diese beschriebenen Manöver sind nur möglich, wenn eine ständige Kommunikation zwischen allen Platoonmitgliedern besteht und die Fahrer in besonderen Situationen rechtzeitig gewarnt werden, wenn es notwendig wird, dass sie wieder die Kontrolle über ihre Fahrzeuge übernehmen. Dies kann nur gewährleistet werden, wenn sämtliche Informationen über die Fahrzeuge, in diesem Fall insbesondere, die über die gewünschte Zielausfahrt der einzelnen Kolonnenkameraden mit dem Rest der Kolonne geteilt werden und die Fahrer über das Kolonnenassistenzsystem des übrigen Platoons rechtzeitig über ihr Verlassen des Konvois informieren [Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 154ff].

### 3.4 Verhalten des Platoons auf freier Strecke

Ist ein Platoon auf der Autobahn unterwegs, so fährt es in Reih und Glied mit einem Abstand von 10 – 15 Metern (siehe Kapitel 3.7), bzw. einer halben Sekunde Fahrzeit Folgeabstand zwischen den Platoonmitgliedern. Ein Einfädeln von anderen Verkehrsteilnehmern innerhalb der Kolonne ist nicht vorgesehen, da es den positiven Effekt des Platooning verringern würde. Die anderen Verkehrsteilnehmer sollten sich also vor dem Überholen einer Kolonne

überlegen, ob sie das gesamte Platoon überholen wollen, oder sich doch lieber im gesetzlichen Mindestabstand hinter der Kolonne einreihen.

Des Weiteren ist bei dem Simulationsexperiment dieser Masterarbeit auch das Überholen des Konvois von anderen Verkehrsteilnehmern nicht vorgesehen, es bewegt sich ausschließlich auf dem rechten Fahrstreifen. Hintergrund hierfür ist insbesondere die Tatsache, dass die bereits entwickelten und getesteten Kolonnenassistenzsysteme noch nicht in der Lage sind, solch ein Manöver durchzuführen [Daimler AG] [Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 161ff].

### **3.5 Verhalten des Platoons an Autobahneinfahrten und -ausfahrten**

Passiert eine Kolonne eine Autobahneinfahrt, so kann dies insbesondere bei längeren Konvois dazu führen, dass ein Einfädeln von gewöhnlichen Verkehrsteilnehmern notwendig wird, damit es nicht zu Stausituationen auf dem Beschleunigungsstreifen der Einfahrt kommt. Nach §18 Absatz 3 der StVO hat zwar der Verkehr auf der Hauptfahrbahn Vorrang gegenüber dem auffahrenden Verkehr [FORUM VERLAG HERKERT GMBH, 2015, S. 61], allerdings ist bei einer Einführung der Kolonnenassistenz auf deutschen Straßen auch mit einer Gesetzesanpassung zu rechnen. Ganz abgesehen davon wird das Platooning entwickelt um den Verkehrsfluss zu verbessern und nicht um ihn zu verschlechtern, was bei einer Staubilddung auf dem Beschleunigungsstreifen der Fall wäre.

Hat das Platoon ein Fahrzeug auf dem Beschleunigungsstreifen erkannt, in dessen Situation es sinnvoller ist sich einzufädeln anstatt die Kolonne passieren zu lassen oder gar den gesamten Konvoi auf dem Beschleunigungsstreifen zu überholen, so muss sich das Platoonmitglied, vor das das fremde Fahrzeug einschert, samt seiner Folgefahrzeuge, zurückfallen lassen. Dabei muss genug Platz für das einscherende Fahrzeug und darüber hinaus die gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstände, zwischen dem einfädelnden Fahrzeug und den beiden Kolonnenkameraden, die sich unmittelbar davor und dahinter befinden, entstehen. Im Idealfall wechselt das sich im Platoon befindende fremde Fahrzeug, sobald es die Möglichkeit hat, auf einen Fahrstreifen weiter links, sodass der Teil des Konvois, der sich hat zurückfallen lassen müssen, wieder zu dem Rest der Lkw-Kolonne aufschließen kann. An dieser Stelle wird auch klar, dass nach Einführung des Platoonings im Straßenverkehr es eine Zeit brauchen wird, bis sich die Verkehrsteilnehmer an das Fahrverhalten von Platoons gewöhnt haben und gelernt haben entsprechend damit umzugehen. Außerdem wird neben dem Straßenverkehrsgesetz und der Straßenverkehrs-Ordnung auch eine Anpassung des Fahrschulunterrichts notwendig sein.

Sollte es dem Fahrzeug, was in die Kolonne eingeschert ist nicht möglich sein, diese wieder zu verlassen, z.B. auf Grund von zu hohem Verkehrsaufkommen oder weil es sich bei dem Fahrzeug selbst um einen mit der Platoon-Geschwindigkeit vergleichbaren Tempo fahrenden Lkw handelt, so gibt es zwei Möglichkeiten: Möglichkeit 1: Das Fahrzeug ist kein Lkw oder ein Lkw ohne Kolonnenassistenten, so ist es am sinnvollsten, den Lkw-Konvoi in zwei neue

Platoons aufzuteilen, dafür muss der Fahrer des ersten Folgefahrzeugs hinter dem eingescherten Fahrzeug wieder die Kontrolle über seinen Lkw übernehmen, um das zweite Platoon anzuführen und dieses von der G2CC des ursprünglichen Konvois zu trennen. Die erste Kolonne vor dem eingescherten Fahrzeug setzt seine Fahrt ungestört fort. Möglichkeit 2: Das sich im Platoon befindende Fahrzeug ist ein Lkw mit Kolonnenassistenten. In diesem Fall kann das Fahrzeug als neues Mitglied der Kolonne aufgenommen werden, schließt zum Vorderfahrzeug auf und übergibt seine Steuerung an das Kolonnenassistenzsystem ab. Die Kolonnenkameraden, die sich für die Einfädelung zurückfallen lassen haben, rücken automatisch zu dem neuen Kolonnenmitglied auf und der Konvoi hat ein neues Mitglied gewonnen.

Bei einer Ausfahrt ist das Verhalten des Platoons ähnlich, allerdings ist es hier für den restlichen Verkehr deutlich einfacher sich auf den Kolonnenverkehr einzustellen, da auf deutschen Autobahnen Ausfahrten frühzeitig angekündigt werden und man somit genug Zeit und Strecke bis zum Abfahren von der Autobahn hat, um zu entscheiden, ob man die Autobahn vor oder hinter der Kolonne verlassen möchte, sofern die ungefähre Länge des Platoons für entsprechende Verkehrsteilnehmer erkennbar ist. Daher wird es voraussichtlich an Ausfahrten seltener zum Einscheren von nicht dem Platoon angehörenden Verkehrsteilnehmern kommen, als bei Einfahrten. Erfordert eine Situation dennoch ein derartiges Fahrmanöver, so läuft es analog zum Einschereprozess bei Einfahrten ab. Der Konvoi zieht sich auf Höhe des fahrstreifenwechselnden Fahrzeugs automatisch auseinander, sodass zwischen ihm genug Platz für das fremde Fahrzeug und die gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstände ist und hält dabei die C2CC aufrecht (siehe Abbildung 3.2). Sobald das fremde Fahrzeug auf den Bremsstreifen der Ausfahrt gewechselt hat, zieht sich die Lkw-Kolonnie wieder automatisch zusammen [Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 166ff] [WeltN24 GmbH, 2016] [Daimler AG].

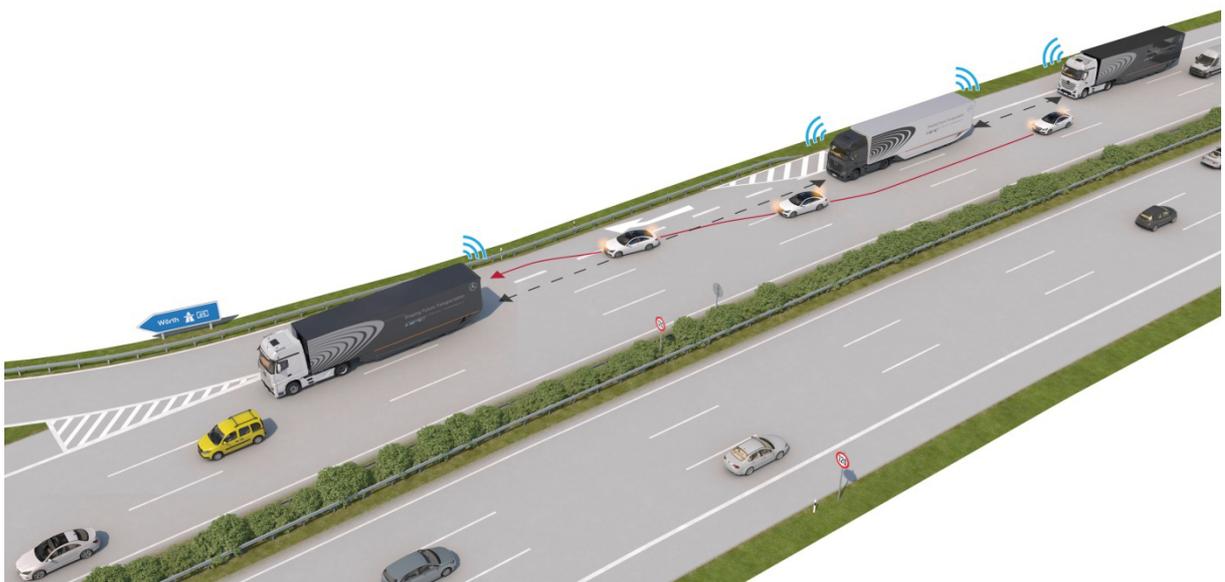


Abbildung 3.2: Fremdes Fahrzeug schert in Platoon ein  
[Daimler AG]

### 3.6 Weitere Handlungsstrategien für Platoons

Da der Fokus der vorliegenden Masterarbeit auf der Implementierung des Platooning-Verhaltens von homogenen Lkw-Kolonnen bei Autobahneinfahrten und –ausfahrten in die Verkehrssimulationssoftware Vissim liegt, wird hier nicht weiter auf das Verhalten von Platoons eingegangen. Eine umfassendere und genauere Beschreibung des Verhaltens von mit Hilfe der Kolonnenassistenzsystems gebildeten Konvois ist im Kapitel neun der Studienarbeit „Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen“ [Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 130ff] zu finden. Dessen beschriebenen Verhaltensweisen von Platoons orientiert sich an dem in Kapitel 2.2 genannten Projekt SARTRE, dass sich ins besondere auch mit inhomogenen Mischplatoons, die aus unterschiedlichen Fahrzeugtypen bestehen, beschäftigt hat [SARTRE-Consortium, 2012].

### 3.7 Fahrzeugabstände im Platoon und maximale Kolonnenlänge

Geht es um den Abstand zwischen den Kolonnenmitgliedern so schwanken die Angaben verschiedener Lkw-Hersteller zwischen 10 und 15 Metern. Die Daimler AG spricht zum Beispiel von 15 Metern (siehe Abbildung 2.7), während bei MAN und DAF von einem Folgeabstand von 10 Metern die Rede ist. Der schwedische Fahrzeughersteller Scania gibt an, seine Platoons mit einem Abstand von 6 – 12 Metern fahren zu lassen. Worüber sich allerdings alle Hersteller einig sind, ist, dass die Fahrzeit für den Folgeabstand eine halbe Sekunde betragen soll [Daimler AG, 2016] [MAN SE, 2016b] [DAF Trucks Deutschland GmbH, 2016] [Scania AB, 2016].

Nach dem Fahrzeugfolgmodell von Wiedemann (1999), worauf auch das Folgeverhalten der Fahrzeuge in dem Simulationsprogramm Vissim basiert, berechnet sich der Abstand zwischen zwei Platoonmitgliedern wie folgt:

$$dx_{safe} = CC0 + CC1 * v \quad (3.1)$$

mit:

$dx_{safe}$  = Mittlerer Sicherheitsabstand zwischen zwei Fahrzeugen [m]

$CC0$  = Durchschnittliche Wunsch-Stillstandsabstand zwischen zwei Fahrzeugen [m]

$CC1$  = Fahrzeit-Folgeabstand zwischen zwei Fahrzeugen, den der Fahrer des folgenden Fahrzeugs bei einer bestimmten Geschwindigkeit beibehalten möchte [s]

$v$  = Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs [m/s]

[PTV AG, 2015, S. 219f].

Da sich auf deutschen Autobahnen die Platoons mit 80 km/h, was 22,22 m/s entspricht, bewegen sollen, kommt man bei einem Wert für  $CC0$  von 1,5 Metern (siehe Kapitel 4.1.1) auf einen Folgeabstand von 12,61 Metern, was ungefähr 12,5 Metern, dem Mittelwert zwischen 10 und 15 Metern, entspricht. Vergleicht man diese Werte mit dem heutigen gesetzlichen Mindestabstand von 50 Metern, so entspricht dies bei einem durchschnittlichen Abstand zwischen den Kolonnenkameraden von 12,5 Metern, eine Einsparung von 37,5 Metern pro Folgefahrzeug in einer Kolonne. Bei vier Folgefahrzeugen, also einem Konvoi bestehend aus insgesamt fünf Fahrzeugen würde das zu einer Einsparung von 150 Metern führen und somit zu mehr Platz für mehr Verkehr auf der Autobahn, dadurch ist in der Theorie der positive Effekt von Platooning auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur bereits belegt.

Es ist technisch möglich Platoons aus bis zu zehn Lkw zu bilden und das sogar herstellerübergreifend [Jordan, 2016]. Allerdings fand man bei einem Probandenversuch im Rahmen des Projekts SARTRE heraus, dass eine Platoonlänge von bis zu 170 Metern von anderen Verkehrsteilnehmern noch akzeptiert wird [Irtenkauf & Klaußner, 2013, S. 116]. Bei einer Kolonne aus Lkw mit einer Länge von beispielsweise 18,75 Metern, was die gewöhnliche Länge eines Lastzugs ist und einem durchschnittlichen Folgeabstand von 12,5 Metern, würden ein Platoon bestehend aus einem Führungsfahrzeug und vier Folgefahrzeugen mit einer Gesamtlänge von 143,75 Metern die Grenze von 170 Metern also gut einhalten. Für den Vergleich: Dieselbe Kolonne würde sich ohne Kolonnenassistenten über eine Gesamtlänge von 293,75 Metern erstrecken und hätte damit mehr als den doppelten Platzbedarf auf der Autobahn. Wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist, ist bereits bei einem Folgeabstand von 15 Metern viel Platz gewonnen, folglich gilt: Je kleiner der Abstand zwischen den Platoonmitgliedern, desto höher die Kapazitätssteigerung der Straße.



Abbildung 3.3: Platzeinsparung durch Platooning  
[Continental AG, 2016]

## 4 Simulationsexperiment zur Kolonnenassistenz

### 4.1 Vorbereitung der Simulationen

Um die Auswirkung des Platoonings von Lkw auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur zu untersuchen, werden im Rahmen dieser Masterarbeit die acht in Tabelle 4.1 aufgelisteten Simulationen durchgeführt.

<b>Simulationsnummer:</b>	<b>Netzelement:</b>	<b>Platoonlänge:</b>	<b>Verkehrsstärkenverhältnis:</b>
Simulation 1	Einfahrt (E1-2)	3 Lkw	Gerade 2
Simulation 2	Einfahrt (E1-2)	6 Lkw	Gerade 2
Simulation 3	Einfahrt (E1-2)	3 Lkw	Gerade 5
Simulation 4	Einfahrt (E1-2)	6 Lkw	Gerade 5
Simulation 5	Ausfahrt (A1-2)	3 Lkw	Gerade 2
Simulation 6	Ausfahrt (A1-2)	6 Lkw	Gerade 2
Simulation 7	Ausfahrt (A1-2)	3 Lkw	Gerade 5
Simulation 8	Ausfahrt (A1-2)	6 Lkw	Gerade 5

Tabelle 4.1: Überblick über die durchgeführten Simulationen

#### 4.1.1 Die Netzelemente

Bei den genannten Simulationen, wird das Platooning auf zwei verschiedenen Netzelementen, Einfahrt (E1-2) und Ausfahrt (A1-2), simuliert. Die Abkürzungen stehen für eine zweispurige Hauptfahrbahn mit einspuriger Einfahrts- bzw. Ausfahrtsrampe (siehe Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2). Um dies zu bewerkstelligen, müssen zunächst die nötigen Netzelemente definiert werden. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2015] enthält bereits solch definierte Elemente. Die Vorteile bei der Verwendung der aus dem HBS stammenden Netzelemente sind zum Einen die auch darin enthaltenen Angaben zu den Kapazitäten der Straßennetze bei heutiger Verkehrslage, ohne Platooning und zum Anderen die Tatsache, dass bereits im Rahmen des Projekts „HBS-konforme Simulation des Straßennetzes“ der Bundesanstalt für Straßenwesen [Geistefeldt et al., 2016, S. 36ff], unter Verwendung von u.a. der genannten Netzelemente, eine Methodik zur Bestimmung der Kapazität aus Verkehrsflusssimulationen erarbeitet wurde und für den heutigen Verkehr bereits kalibrierte Modelle dieser

Netzelemente vorliegen. Aus dieser Kalibrierung stammt auch der Wert von 1,5 Metern für  $CC0$  in Kapitel 3.7.

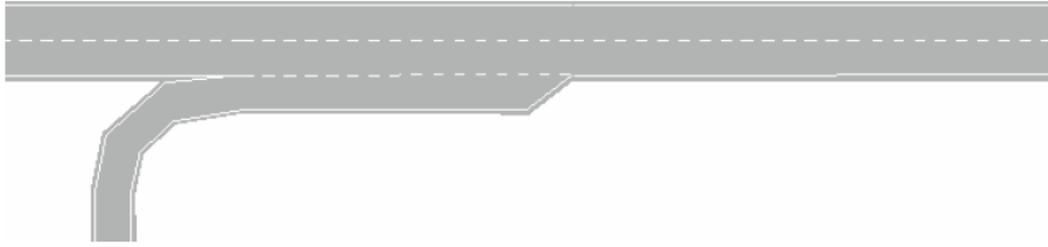


Abbildung 4.1: Autobahneinfahrt

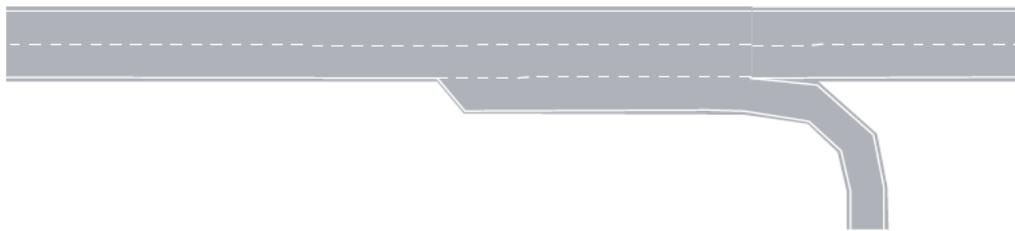


Abbildung 4.2: Autobahnausfahrt

#### 4.1.2 Die Fahrzeugtypen

Für die in Tabelle 4.1 aufgelisteten Simulationen, werden fünf unterschiedliche Fahrzeugtypen verwendet. Die beiden Fahrzeugtypen Pkw- und Lkw-Normalfahrer stammen aus dem oben genannten Projekt der Bundesanstalt für Straßenwesen und wurden dementsprechend kalibriert [Geistefeldt et al., 2016, S. 20f]. Sie vertreten den Hauptteil der sich heute auf den deutschen Autobahnen befindlichen Verkehrsteilnehmer, ohne die Unterstützung durch Fahrerassistenzsysteme.

Die drei übrigen Fahrzeugtypen, Führungsfahrzeuge, Folgefahrzeuge und Abfahrer wurden für dieses Simulationsexperiment neu erstellt. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, setzt das Kolonnenassistentensystem ein gewisses Maß an Fahrzeugtechnik voraus, daher ist davon auszugehen, dass die Lkw, die sich in den Simulationen in Platoons bewegen entsprechend ausgestattet sind und deswegen andere Verhaltensparameter besitzen, als beispielsweise der Fahrzeugtyp Lkw-Normalfahrer. Die Parameter für den Fahrzeugtyp Führungsfahrzeuge, der der Fahrzeugtyp ist, der die Platoonführer vertritt, entstammen dem Forschungsprojekt „Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur“ [Krause et al., 2017, S. 46]. Es wurden die Parameter des in dem genannten Projekt vorkommenden Fahrzeugtyps Lkw-HAF übernommen. HAF steht hier für hochautomatisiertes Fahren, daher spiegelt dieser Fahrzeugtyp das Verhalten von Lkw wieder, die sowohl über ein ACC, als auch einen Spurwechselassistenten verfügen, der es ihnen ermöglicht, den Fahrer bei der Steuerung des Lkw zu unterstützen. Dies führt dazu,

dass diese Fahrzeuge besser auf vor ihnen fahrende Fahrzeuge reagieren können [Krause et al., 2017, S. 46].

Der Typ Folgefahrzeuge ist ein besonderer Fahrzeugtyp, da seine Interaktion mit dem restlichen Verkehr deaktiviert ist und dementsprechend keine Parameter wie Stillstandsabstand oder Folgeabstand voreingestellt sind. Dies hat den Vorteil, dass dieser Fahrzeugtyp unbeeinflusst durch das Netzelement fährt. Auf der anderen Seite bringt dies aber auch den Nachteil mit sich, dass dieser Fahrzeugtyp andere Fahrzeuge in der Simulation nicht wahrnimmt und diese sogar überfährt. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Fahrzeuge dieses Typs vollständig extern gesteuert werden. Im Zuge dieser Arbeit passiert dies über die Vissim-Schnittstelle Component Object Model (COM). Diese ermöglicht es eine Simulation durch ein Programm zu beeinflussen und das sogar während eines Simulationslaufs. Das bedeutet allerdings, dass das Programm für jede denkbare Situation, in die dieser Fahrzeugtyp, während der Simulation, geraten kann, entsprechende Befehle für diese Fahrzeuge enthält, damit deren Verhalten zu jeder Zeit der Simulation an das Verkehrsgeschehen angepasst werden kann (siehe Kapitel 4.2). Darüber hinaus muss das Programm in der Lage sein auch entsprechende Situationen erkennen zu können, um festzustellen, welche Befehle er an die vom Programm gesteuerten Fahrzeuge senden muss.

Ausschließlich in dem Netzelement Ausfahrt kommt zusätzlich zu den vier bereits beschriebenen Fahrzeugtypen, der Fahrzeugtyp Abfahrer vor. Er repräsentiert die Platoonmitglieder, die das Platoon an der Ausfahrt verlassen. Wie auch der Fahrzeugtyp Führungsfahrzeuge besitzt er die aus dem Projekt der Forschungsvereinigung Automobiltechnik [Krause et al., 2017, S. 46] stammenden Parameter des Fahrzeugtyps Lkw-HAF.

### **4.1.3 Die simulierten Platoons**

Die simulierten Platoons werden als fertige Kolonneneinheit in die Netze geschickt. Hintergrund dafür ist zum Einen, dass die Netzabschnitte zu kurz sind, um eine Platoon-Bildung zu ermöglichen (siehe Kapitel 3.1). Dementsprechend sind die für diese Masterarbeit entwickelten Programme nicht darauf ausgelegt. Zum Anderen wird davon ausgegangen, dass die Lkw, bevor sie den simulierten Teilknotenpunkt befahren, genug Zeit und Strecke hatten, um sich vorher zu einem durch den Kolonnenassistenten gestützten Konvoi zusammenzuschließen. Innerhalb dieser Kolonne fahren die Platoonmitglieder mit einem Abstand von 12 – 13 Metern. Bei ihrer Erstellung besteht zwischen ihnen ein Abstand von exakt 12,5 Metern, der sich aus den Überlegungen in Kapitel 3.7 ergibt. Um ein ständiges ändern der Geschwindigkeiten zu vermeiden, wurde den Platoonmitgliedern ein Abstandsspielraum von einem Meter eingeräumt.

Im Zuge dieser Masterarbeit, werden die Hälfte der Simulationen mit Platoons bestehend aus drei Lkw und die andere Hälfte mit Platoons bestehend aus sechs Lkw durchgeführt. Die Platoonlänge von sechs Lkw rührt von der im Rahmen des SARTRE Projekts gewonnenen Maximallänge von 170 Metern für Kolonnen her, die von den anderen Verkehrsteilnehmern

noch akzeptiert wird (siehe Kapitel 3.7). In Vissim werden Fahrzeuge nach dem Zufallsprinzip erstellt. Bei den hier verwendeten kalibrierten Netzen werden für den Schwerverkehr: Lkw, Lkw mit Anhängern und Lastzüge erstellt. Dabei schwanken die Fahrzeuglängen zwischen 10,22 und 16,88 Metern. Geht man also von der Maximallänge von 16,88 Metern für alle Kolonnenkameraden aus, so beträgt die Gesamtlänge eines Platoons, bestehend aus sechs Fahrzeugen mit einem durchschnittlichen Folgeabstand von 12,5 Metern, 163,78 Meter, das knapp unter den oben genannten 170 Metern liegt. Um eine Untersuchung des Einflusses der Platoonlänge auf den positiven Effekt des Platoonings auf die Platzeinsparung zu ermöglichen, wurde als zweite Konvoi-Länge drei Lkw gewählt, um einen, in der Theorie, ausreichend hohen Kapazitätsunterschied zwischen den beiden Platoonlängen zu erhalten.

#### 4.1.4 Verkehrsstärkenverhältnis und Intervalle

Wie in Tabelle 4.1 zu sehen ist werden auch zwei unterschiedliche Verkehrsstärkenverhältnisse, Gerade 2 und Gerade 5, verwendet. Diese Verhältnisgeraden wurden aus dem Projekt „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ der Bundesanstalt für Verkehrswesen [Geistefeldt et al., 2016, S. 34ff] entnommen. In Abbildung 4.3 sieht man das Diagramm, dass bei dem Netzelement Einfahrt, das Verhältnis zwischen der Verkehrsnachfrage auf der Hauptfahrbahn, zu der Verkehrsnachfrage auf der Einfahrt darstellt. Danach erhöht sich mit steigender Nummerierung der Geraden die Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn und reduziert sich der Fahrzeugzufluss auf der Einfahrtsrampe. Auch im Falle des Netzelements Ausfahrt nimmt der Zufluss auf der Hauptfahrbahn mit steigender Nummerierung zu.

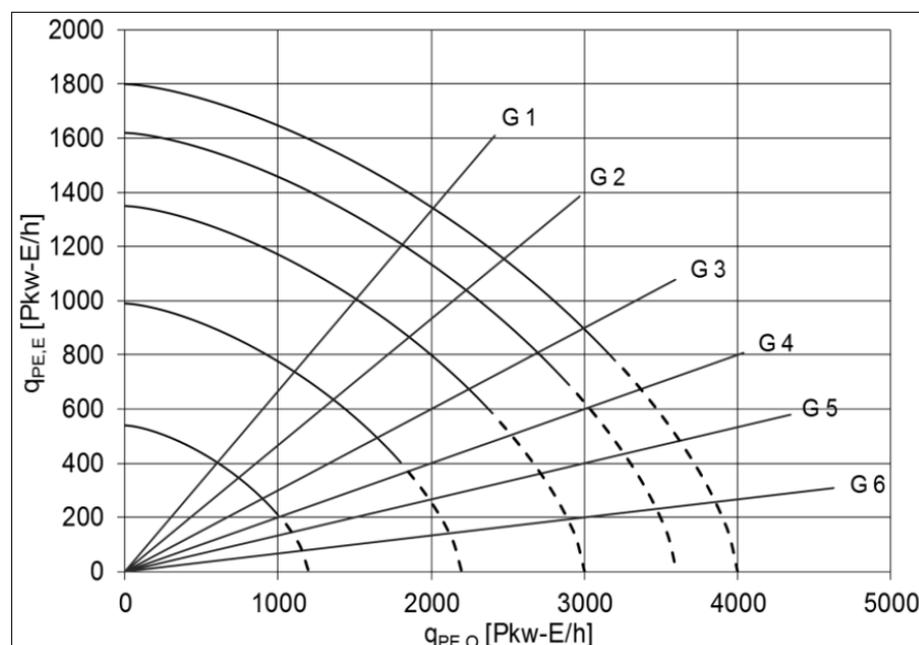


Abbildung 4.3: Verkehrsstärkenverhältnisgeraden des Netzelements Einfahrt

[Geistefeldt et al., 2016, S. 35]

Das Belastungsverhältnis wird nach Geistefeldt et al. [2016, S. 34f] wie folgt berechnet:

$$p_{q,i} = n_{E/A} * \frac{n_{HFB}}{(n_{HFB}-0,5)} * p_i \quad (4.1)$$

mit:

$p_{q,i}$  = Belastungsverhältnis  $q_{PE,E} / q_{PE,O}$  bzw.  $q_{PE,A} / q_{PE,U}$  in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt [-]

$i$  = Index für die Belastungsverhältnisse der Geraden 1 bis 6 in Abbildung 4.3 [-]

$n_{E/A}$  = Anzahl der Fahrstreifen in der Ausfahrt bzw. Einfahrt [-]

$n_{HFB}$  = Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn stromaufwärts von Einfahrten bzw. stromabwärts von Ausfahrten oder Verflechtungsstrecken [-]

$p_i$  = Hilfsgröße: G1: 100 %, G2: 70 %, G3: 45 %, G4: 30 %, G5: 20 %, G6: 10 %

Ferner berechnen sich die Verkehrsstärken auf der Hauptfahrbahn und der Einfahrt nach folgenden Formeln:

$$q_{i,PE,H} = \left[ \frac{C_{PE,E/A}^a * C_{PE,O/U}^a}{(C_{PE,O/U} * p_{q,i})^a + C_{PE,E/A}^a} \right]^{\left(\frac{1}{a}\right)} \quad (4.2)$$

$$q_{i,PE,E/A} = q_{i,PE,H} * p_{q,i} \quad (4.3)$$

mit:

$q_{i,PE,H}$  = Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis  $i$  [Pkw-E/h]

$q_{i,PE,E/A}$  = Verkehrsstärke auf der Rampe des Teilknotenpunkts in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis  $i$  [Pkw-E/h]

$C_{PE,O/U}$  = Kapazität der Hauptfahrbahn oberhalb (Einfahrt, Verflechtung) bzw. der Hauptfahrbahn unterhalb (Ausfahrt) der Trenninselspitze in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt [Pkw-E/h]

$C_{PE,E/A}$  = Kapazität der Einfahrrampe (Einfahrt, Verflechtung) bzw. der Ausfahrrampe in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt [Pkw-E/h]

$a$  = Parameter des betrachteten Teilknotenpunkts nach HBS [Pkw-E/h] [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2015, S. A 4-34]

$p_q$  = Belastungsverhältnis  $q_{PE,E} / q_{PE,O}$  bzw.  $q_{PE,A} / q_{PE,U}$  in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt [-]

$i$  = Index für die Belastungsverhältnisse der Geraden 1 bis 6 in Abbildung 4.3 [-]

Da die Simulationsergebnisse dieser Masterarbeit mit den Ergebnissen des Projekts „Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur“ [Krause et al., 2017, S. 56ff] bei Normalverkehr verglichen wurden, ist der Hintergrund für die Verwendung unterschiedlicher Verkehrsstärkenverhältnisse der Selbe: Die Ermittlung der Kapazität der beiden Netzelemente unter verschiedenen Voraussetzungen, da die Kapazität abhängig von den Belastungsverhältnis zwischen Hauptfahrbahn und Einfahrts- bzw. Ausfahrtsrampen ist. Zusätzlich wird der Schwerverkehrsanteil auf 10% festgelegt.

Für eine, auf Simulationen basierte, Berechnung der Kapazität ist es notwendig, dass der Verkehr ab einem gewissen Punkt zusammenbricht. Um dies zu gewährleisten, wird die Verkehrsnachfrage in 5 Simulationsminuten-Intervallen gesteigert. Die Verkehrsstärke des ersten Intervalls entspricht je nach Verkehrsstärkenverhältnisgeraden ungefähr 5% der nach dem HBS berechneten Kapazität für den jeweiligen Teilknotenpunkt. Nach dem HBS [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2015, S. A 4-12ff] sind für die Netzelemente E1-2 und A1-2 eine Kapazität von 4000 Pkw-E/h für die Hauptfahrbahn und 1800 Pkw-E/h für die Einfahrts- bzw. Ausfahrtsrampe festgelegt. Pkw-Einheiten pro Stunde (Pkw-E/h) ist eine Einheit für den Verkehrsfluss, in die die Messungseinheit, Kraftfahrzeuge pro Stunde (Kfz/h), umgerechnet wird. Dadurch werden beispielsweise die unterschiedlichen Längen der verschiedenen Fahrzeugtypen (Pkw, Lkw, usw.) berücksichtigt, in dem man zur Berechnung des gesamten Verkehrsflusses die pro Stunde erfassten Lkw mit Zwei multipliziert, bevor man sie zu den pro Stunde gezählten Pkw dazu addiert [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2015, S. A 4-10].

Im weiteren Verlauf der Simulation wird dann der Zufluss bis zu einem Auslastungsgrad von 60% in 10% Schritten gesteigert. Ab diesem Punkt wird die Verkehrsnachfrage in 5% Schritten angehoben. Nach 70 Simulationsminuten ist somit der Auslastungsgrad nach HBS von 100% erreicht. Da ein besonders günstiges Verhalten der Verkehrsteilnehmer für eine gesteigerte Kapazität der Autobahn führen kann, werden dennoch die Verkehrsstärken bis auf einen Auslastungsgrad von 130% gesteigert, um einen Zusammenbruch des Verkehrs sicherzustellen. In Abbildung 4.4 ist die Verkehrsnachfranganglinie dargestellt, würde man die Steigerungen über einen Auslastungsgrad von 130% fortführen, so wäre eine Auslastung von 200% bei 170 Simulationsminuten erreicht. Bei den in dieser Masterarbeit durchgeführten Simulationen wurden mit 20 Steigerungen und somit 100 Simulationsminuten gearbeitet. Sollte das Netz durch eine zu hohe Verkehrsnachfrage überfüllt sein, so hat dies keine Auswirkung auf die Simulation, es werden lediglich keine weiteren Fahrzeuge in das Netz geladen [Krause et al., 2017, S. 58].

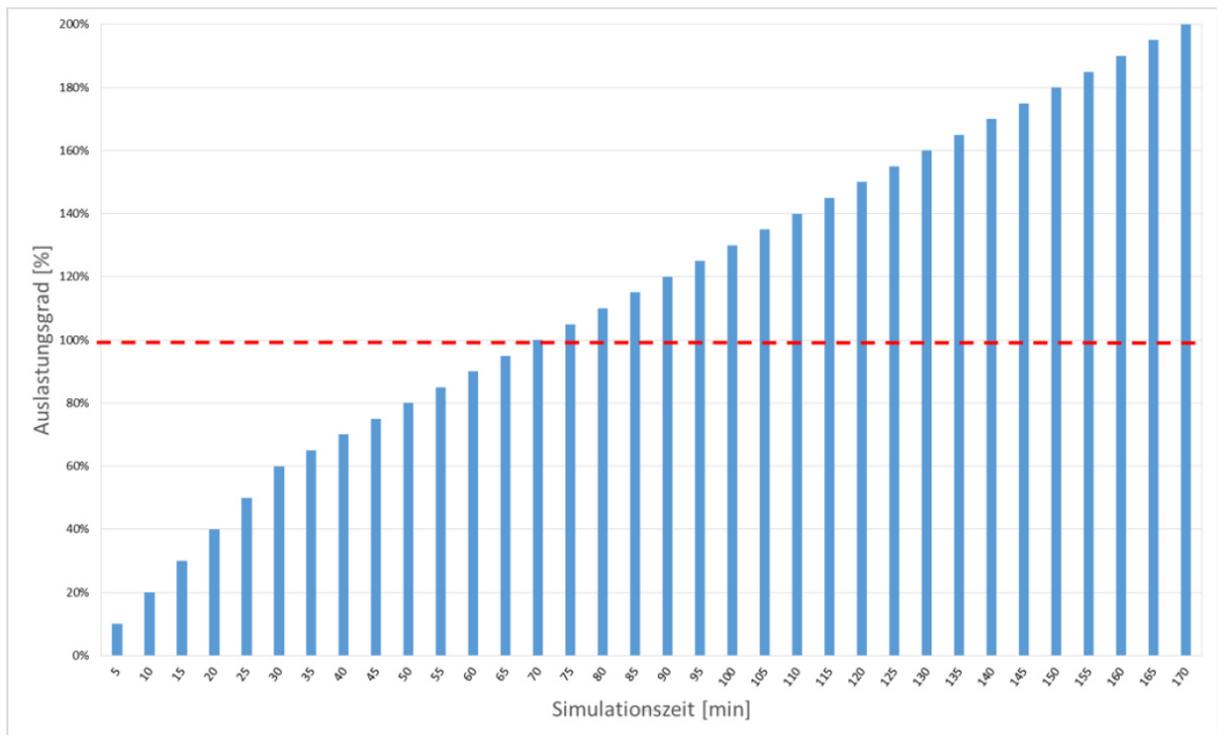


Abbildung 4.4: Verkehrsnachfrageganglinie eines Simulationslaufs (rote Linie = Kapazität laut HBS)  
[Krause et al., 2017, S. 58]

#### 4.1.5 Simulationsparameter

Führt man ein auf Zufallszahlen basiertes Simulationsexperiment durch, so ist es notwendig pro Simulation mehrere Simulationsläufe durchzuführen, damit die gemittelten Ergebniswerte der einzelnen Simulationsläufe eine entsprechende Aussagekraft besitzen. Bei dem Simulationsprogramm Vissim, ist hier der Wert für die Startzufallszahl ein entscheidender Faktor, durch den ein Zufallsgenerator initialisiert wird, der die stochastischen Funktionen in Vissim mit unterschiedlichen Werten belegt. Auf diese Weise wird verhindert, dass zwei Simulationsläufe mit identischen Netzdateien und identischen Einstellungen absolut gleich ablaufen [PTV AG, 2015, S. 609]. Zusätzlich muss die Anzahl der benötigten Simulationsläufe festgelegt werden, dies geschieht auf Basis statistischer Auswertungen. Die nachfolgende Ermittlung der notwendigen Anzahl der Simulationsläufe fußt auf den Berechnungen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [2006, S.23f]. Begonnen wird hier mit der Schätzung der Standardabweichung:

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (4.4)$$

mit:

$s$  = Standardabweichung [-]

$x_i$  = Variable, für die die Standardabweichung zu schätzen ist [-]

$\bar{x}$  = Mittelwert [-]

$n$  = Anzahl der Simulationsläufe [-]

Im Anschluss müssen das Konfidenzniveau  $\alpha$  und das Konfidenzintervall  $C$  festgelegt werden, damit die Anzahl der Simulationsläufe wie folgt berechnet werden kann:

$$n \geq \frac{t(\alpha, n-1)^2 * s^2}{C^2} \quad (4.5)$$

mit:

$n$  = Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe [-]

$t(\alpha, n-1)$  = Wert aus der Student-Verteilung für einen einseitigen Fehler [-]

$s$  = Standardabweichung der untersuchten Kenngröße [-]

$C$  = gewünschtes Konfidenzintervall [-]

Basierend auf den Überlegungen des Projekts „Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur“ [Krause et al., 2017, S. 58f], von dem Teile dessen Ergebnisse, mit den Ergebnissen dieser Wirkungsuntersuchung verglichen wurden, wurde nach dem Vorbild der Berechnungen aus dem Projekt „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [Geistefeldt et al., 2016, S. 12f] die Anzahl der Simulationsläufe pro Simulation für die vorliegende Arbeit auch auf 20 Läufe determiniert.

## 4.2 Implementierung des Kolonnenassistenzsystems in Vissim

Um durch das Kolonnenassistenzsystem gebildete Konvois und dessen Verhalten in der Simulationssoftware Vissim abbilden zu können, ist es notwendig die Simulationen extern durch ein Programm zu beeinflussen, damit sich die simulierten Platoons entsprechend der in Kapitel 3.3, 3.4 und 3.5 näher gebrachten Handlungsstrategien verhalten. Dies ist durch die Vissim-Schnittstelle COM möglich. Im Zuge dieser Masterarbeit wurden hierfür zwei Programme für die beiden verwendeten Netzelemente in der Programmiersprache Python geschrieben. Obwohl diese Programme sehr ähnlich sind, unterscheiden sie sich an markanten Stellen insbesondere durch die unterschiedlichen Parameter und Konditionen, die für die einsicherenden Fahrzeuge verantwortlich sind [Krause et al., 2017, S. 59].

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 beschrieben, muss insbesondere das Verhalten des Fahrzeugtyps Folgefahrzeuge durch die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programme gesteuert werden, da dieser Typ interaktionsfrei agiert und somit weder andere Fahrzeuge erkennt, noch Befehle durch die Simulationssoftware zur Anpassung an den Verkehr erhält. Würde dieser Typ keine Informationen und Befehle über die Programme erhalten, so würde er mit

der voreingestellten Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h gerade durch das Netzelement fahren, ganz gleich, ob er dabei andere Verkehrsteilnehmer überfährt. Damit durch die Programme angemessen Befehle an besagte Fahrzeuge geschickt werden können, ist es zuvor erforderlich, dass durch diese auch sämtliche Verkehrssituationen erkannt werden, in die das Platoon geraten kann. Darüber hinaus liegt es in der Verantwortung der externen Steuerung die Kolonnen in gewünschter Länge zu erstellen und in das Netzelement zu schicken (siehe nachfolgendes Kapitel 4.2.1). Um eine ständige Kontrolle der Verkehrssituation im Netz und eine entsprechende Reaktion der Programme gewährleisten zu können, werden die Simulationläufe Schritt für Schritt durchgeführt, nach jedem Simulationsschritt, wird zunächst das jeweilige Programm für das entsprechende Netzelement durchlaufen, bevor der nächste Simulationsschritt folgt.

### 4.2.1 Erstellen der Platoons

In den durchgeführten Simulationen (siehe Tabelle 4.1) treten die Platoons an die Stelle des gesamten auf der Hauptfahrbahn auftretenden Schwerverkehrs. Aus diesem Grund wird zu Beginn jeden Intervalls, mit dem auch die Verkehrsstärken der Zuflüsse steigen, der Schwerverkehrsanteil des neuen Intervalls berechnet und darüber die Anzahl der Platoons bestimmt, die innerhalb diesen Intervalls in das Netz entsandt werden sollen, um den Schwerverkehr vollständig zu ersetzen. Außerdem werden die Menge der Simulationsschritte zwischen den Konvois für jedes Intervall bestimmt um sicherzustellen, dass die zuvor bestimmte Anzahl der Kolonnen innerhalb des Intervalls umgesetzt werden kann. Diese regelmäßigen Abstände zwischen den Platoons sind zwar sehr unrealistisch, allerdings sind diese Abstände für die Signifikanz der Ergebnisse nicht ausschlaggebend, da für die Auswertung der Simulationen die Geschwindigkeit und die Anzahl der Fahrzeuge aussagekräftig ist. Daher ist es hier entscheidender, dass die Anzahl der Platoonmitglieder dem Schwerverkehrsanteil von 10% (siehe Kapitel 4.1.4) entspricht.

Abbildung 4.5 ist das Flussdiagramm zu dem Programmabschnitt, der für das Erstellen der Platoons verantwortlich ist. Bei den Flussdiagrammen in dieser Arbeit werden sowohl Anfang und Ende eines Programmabschnitts, als auch der Aufruf eines anderen Programmabschnitts durch Ovale symbolisiert. Die Rauten stehen für eine Entscheidung, bei der die in der Raute stehenden Konditionen geprüft werden und je nach dem was für ein Fall eintritt, wird der Programmabschnitt in die ein oder andere Richtung fortgesetzt. Die unterschiedlichen Entscheidungsmöglichkeiten sind an den von der Raute wegführenden Pfeilen zu lesen. Prozesse, wie zum Beispiel das Berechnen eines Werts oder das Belegen einer Variablen mit einem Wert werden durch Rechtecke dargestellt.

Sind die Simulationsschritte bis zur Entstehung des nächsten Platoons berechnet, wird das Ergebnis mit einem Zähler verglichen. Hat der Zähler einen höheren oder den gleichen Wert wie die zuvor berechnete Anzahl der Simulationsschritte bis zur nächsten Lkw-Kolonne, wird der nächste Konvoi erzeugt und der Zähler wird wieder auf null gesetzt. Der Aufbau des Platoons beginnt mit dem Führungsfahrzeug, der zum Fahrzeugtyp Führungsfahrzeuge (sie-

he Kapitel 4.1.2) gehört. Anschließend werden die Kolonnenkameraden, des Fahrzeugtyps Folgefahrzeuge, erschaffen. Bereits bei der Kreierung eines Platoons, werden die Folgefahrzeuge mit dem in Kapitel 3.7 erläuterten Abstand von 12,5 Metern erzeugt. Daraufhin springt das Programm zum nächsten Programmabschnitt.

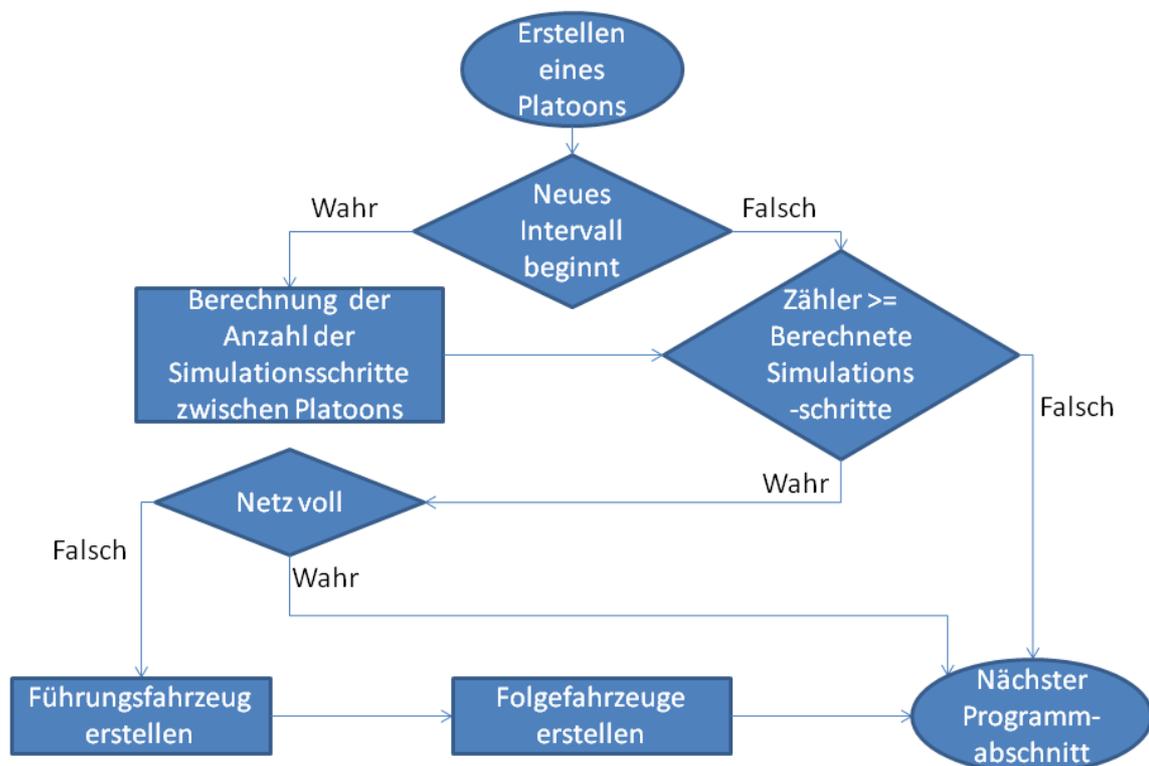


Abbildung 4.5: Erstellen eines Platoons

Da die Lkw-Kolonnen auf einer separaten Strecke vor dem eigentlichen Netzelement erstellt werden und dann in dieses Einfahren, überfahren die Platoons den Querschnitt für die Zuflüsse des Normalverkehrs (siehe Abbildung 4.6). Das Überfahren des Querschnitts kann in manchen Fällen dazu führen, dass ein Pkw innerhalb des Platoons entsteht. Da die Pkw aber deutlich schneller fahren, als die Lkw und die Strecke bis zum ersten Messungsquerschnitt ausreichend lang ist, bleibt den im Platoon befindlichen Pkw ausreichend Zeit aus der Kolonne auszuscheren und den Lkw-Konvoi zu überholen, sobald das der Verkehr auf der Überholspur zulässt. Im späteren Verlauf der Simulationen kann das hohe Verkehrsaufkommen dazu führen, dass die in der Kolonne befindlichen Pkw keine Gelegenheit haben diese zu verlassen. Die Folge ist ein Platoon, dass mit größeren Abständen an der Stelle in der Kolonne fahren muss, an der sich das fremde Fahrzeug befindet, wodurch der positive Effekt von solch einem durch das Kolonnenassistenzsystem gebildeten Konvois verringert wird. Da es erst nach einem Zusammenbruch des Verkehrs zu solchen Situationen am Anfang des Netzes kommt, wird die Signifikanz der Messungsergebnisse nicht gestört.



Abbildung 4.6: Simulationsausschnitt von einem ins Netzelement einfahrenden Platoon

#### 4.2.2 Platoonmitglieder verlassen das Platoon

Nach jedem Simulationsschritt wird die Position des Platoonführers jeden Platoons überprüft. Wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, wird allerdings zuvor kontrolliert, ob sich überhaupt Platoons im Netz befinden, da dies insbesondere zu Beginn eines Simulationslaufes der Fall sein kann. Ist das der Fall, kann nahezu das gesamte Programm übersprungen werden, da seine Hauptaufgabe in der Steuerung und Kontrolle der Platoons liegt. Aus diesem Grund findet diese Prüfung zu Beginn des jeweiligen Programms statt.

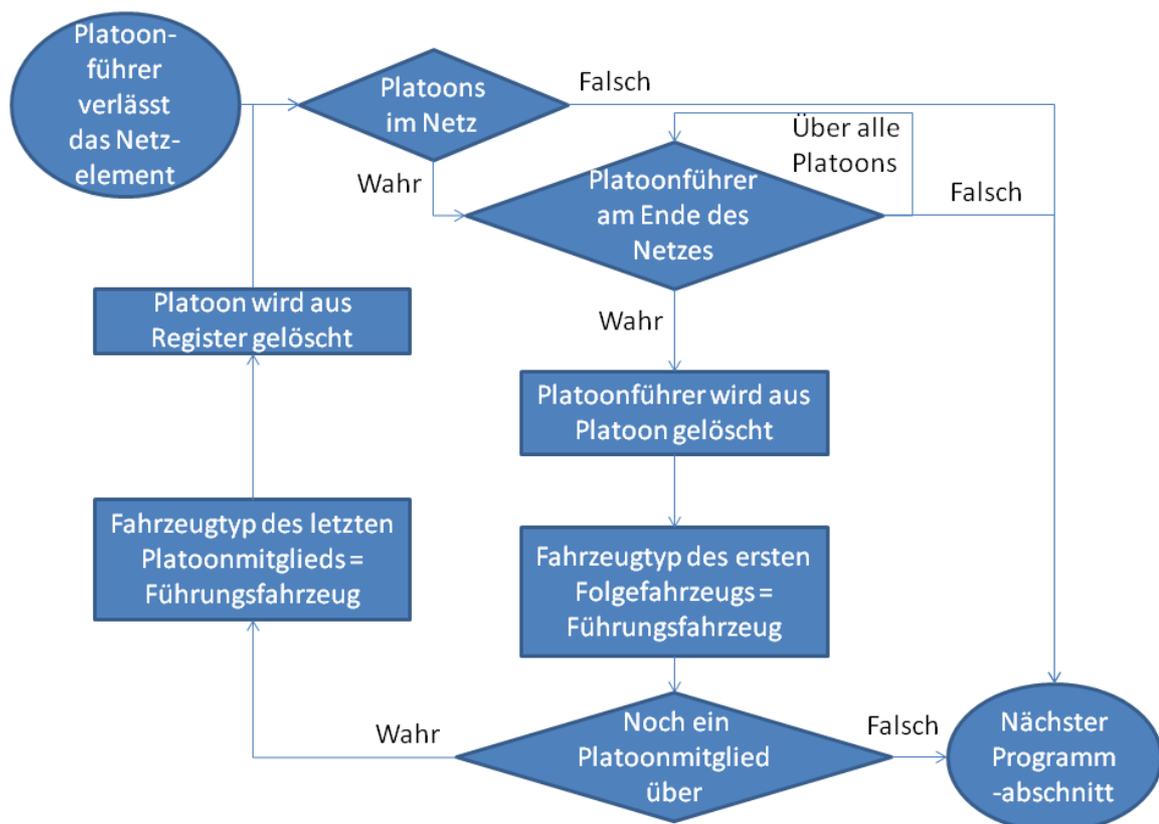


Abbildung 4.7: Ein Platoonführer verlässt das Netzelement

Befindet sich ein Platoonführer am Ende des Netzes, so wird die in Kapitel 3.3 beschriebene Situation simuliert, bei der der Platoonführer einen Konvoi verlässt. Das erste Folgefahrzeug

wird durch den Wechsel seines Fahrzeugtyps zum neuen Platoonführer erkoren. Nach dem Fahrzeugtypwechsel übernimmt die Simulationssoftware die Steuerung dieses Fahrzeugs. Der ehemalige Platoonführer kann das Netz verlassen, ohne dass das Auswirkungen auf die Simulation oder die Kolonne hat. Ist nur noch ein Platoonmitglied eines Konvois übrig, wird dieses auch zum Führungsfahrzeug gemacht und das Platoon wird aus dem Programmregister gelöscht. Auf diese Weise wird verhindert, dass das Programm Kolonnen überprüft oder steuert, die sich gar nicht mehr im Netzelement befinden, dass zu einem Abbruch des Programms und damit der Simulation führen würde.

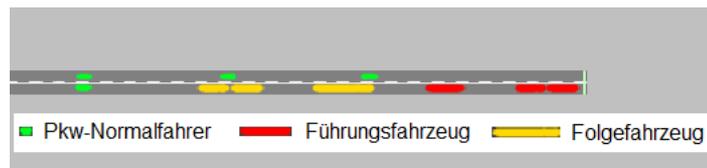


Abbildung 4.8: Simulationsausschnitt von einem Platoonführer, der das Netzelement verlässt

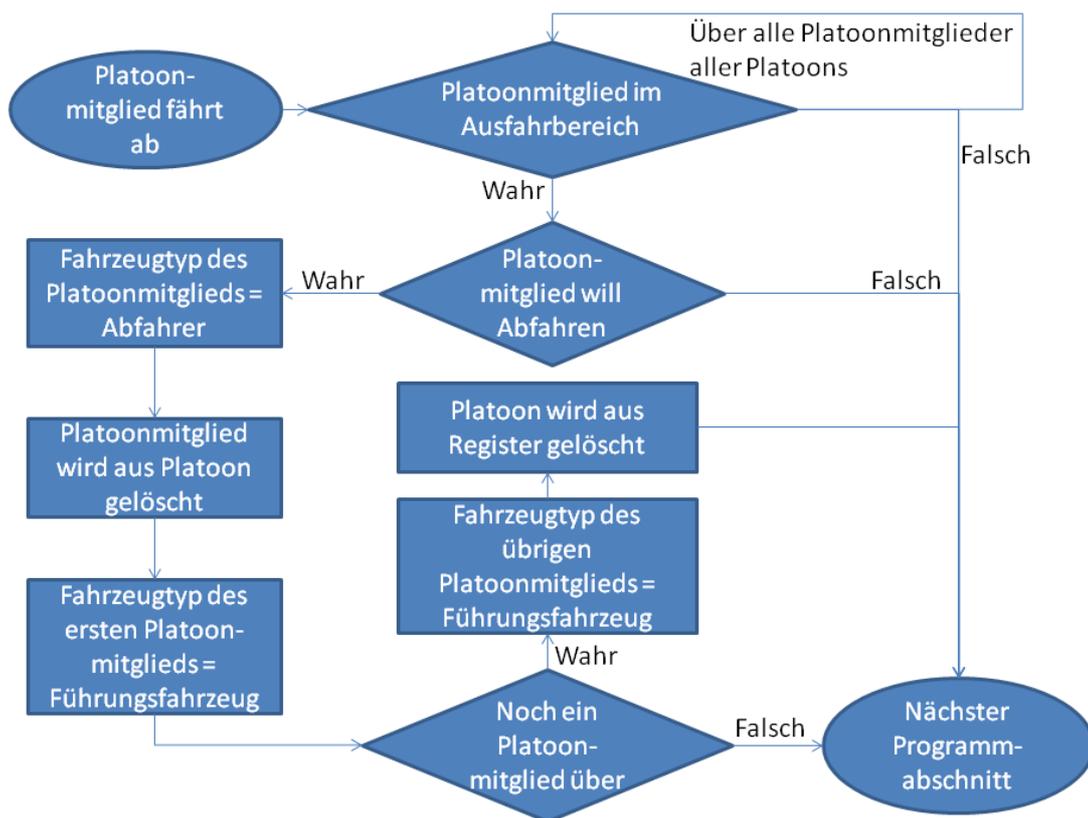


Abbildung 4.9: Ein Platoonmitglied fährt ab

Im Falle des Ausfahrtsszenarios kann es nicht nur zum Verlassen des Platoonführers am Ende des Netzes kommen, sondern auch zum Austritt von jedem beliebigem Kolonnenkameraden aus dem Platoon, wenn dieses die in dem Netzelement befindliche Ausfahrt nimmt. Wie sich im nachfolgenden Flussdiagramm (siehe Abbildung 4.9) erkennen lässt, wird auch

in diesem Fall mit einem Fahrzeugtypwechsel gearbeitet. Dafür wurde für das Netzelement Ausfahrt der Fahrzeugtyp Abfahrer erstellt (siehe Kapitel 4.1.2 und Abbildung 4.10). Sobald ein Platoonmitglied den Ausfahrbereich erreicht, wird durch das Programm geprüft, ob dieser Kolonnenkamerad Abfahren wird, ist dies der Fall wird dessen Fahrzeugtyp zu Abfahrer geändert und besagtes Platoonmitglied wird aus dem Platoon gelöscht. Bereits ab jetzt nimmt der restliche Konvoi den ehemaligen Kolonnenkameraden als Fremdfahrzeug wahr und vergrößert seinen Abstand zu diesem (siehe Kapitel 3.3 und 4.2.4). Um sicher zu stellen, dass das Platoon immer noch einen Platoonführer hat, wird der Fahrzeugtyp des ersten Fahrzeugs in der Kolonne als Führungsfahrzeug determiniert, für den Fall, dass sich der ursprüngliche Platoonführer unter den abfahrenden Kolonnenkameraden befindet. Für den Fall, dass durch das Abfahren der Platoonmitglieder nur noch ein oder gar kein Kolonnenkamerad mehr übrig ist, wird das Platoon aus dem Programmregister gelöscht.

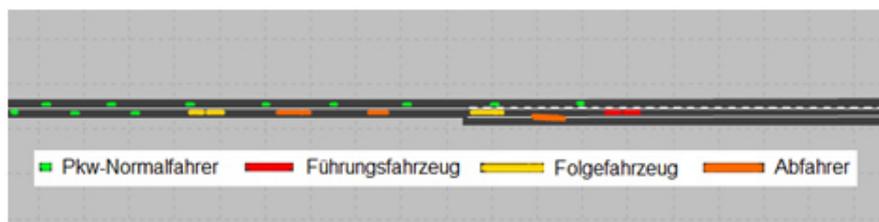


Abbildung 4.10: Simulationsausschnitt von einem abfahrenden Platoonmitglied

#### 4.2.3 Geschwindigkeitsanpassung innerhalb des Platoons

Damit die Platoonmitglieder den für die gewünschte Platzeinsparung erforderlichen Abstand von 12,5 Metern (siehe Kapitel 3.7) einhalten, wird bei jedem Programmdurchlauf die Abstände zwischen den Kolonnenkameraden jeden Konvois berechnet und die Geschwindigkeit der Folgefahrzeuge entsprechend angepasst. Hierfür läuft eine Schleife über alle Platoonmitglieder. Um zu verhindern, dass dies unnötig oft geschieht, was zu einer Verlangsamung des Programms und somit der Simulation führen würde, darf der Abstand zwischen 12 und 13 Metern schwanken, ist dies der Fall, übernimmt der aktuelle Kolonnenkamerad die Geschwindigkeit von seinem Vordermann. In Abbildung 4.11 ist das sich anpassende Platoonmitglied als PM2 und sein Vordermann als PM1 benannt. Liegt die Distanz zwischen PM1 und PM2 unter 12 Metern, reduziert das PM2 sein Tempo. Da man über die Schnittstelle COM nur Einfluss auf die Geschwindigkeit von Fahrzeugen nehmen kann aber nicht auf die Beschleunigung, passiert die Anpassung relativ ruckartig. Ist der Abstand kleiner als 12 Meter, wird die Geschwindigkeit des Platoonmitglieds auf 5 km/h weniger als die Geschwindigkeit des Vordermanns gesetzt. Bei einer Entfernung von weniger als 6 Metern liegt die definierte Geschwindigkeit des folgenden Kolonnenkameraden sogar 10 km/h unterhalb der des Vorderfahrzeugs. Bei einem Abstand größer 13 Meter wird das Tempo des PM2 erhöht, auch dies passiert in zwei Klassen. Ist die Entfernung größer 13 Meter wird die Geschwindigkeit des PM2 auf 5 km/h höher als die des vor ihm fahrenden Platoonmitglieds gesetzt, bei einer Entfernung größer 20 Meter wird die Geschwindigkeit des Vordermanns zusätzlich 10 km/h determiniert (siehe Abbildung 4.11). Nach zahlreichen Testläufen, in denen

die Werte für die Distanzen und Geschwindigkeitsdifferenzen iterativ bestimmt wurden, sind die oben genannten Zahlen als sinnvoll erachtet und entsprechend festgelegt wurden. Da nach §57c der StVZO Lkw auf 90 km/h gedrosselt sein müssen [Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz], wird nach Festlegen der Geschwindigkeit des PM2 geprüft, ob dies eingehalten ist, falls nicht, wird die Geschwindigkeit auf 90 km/h reduziert.

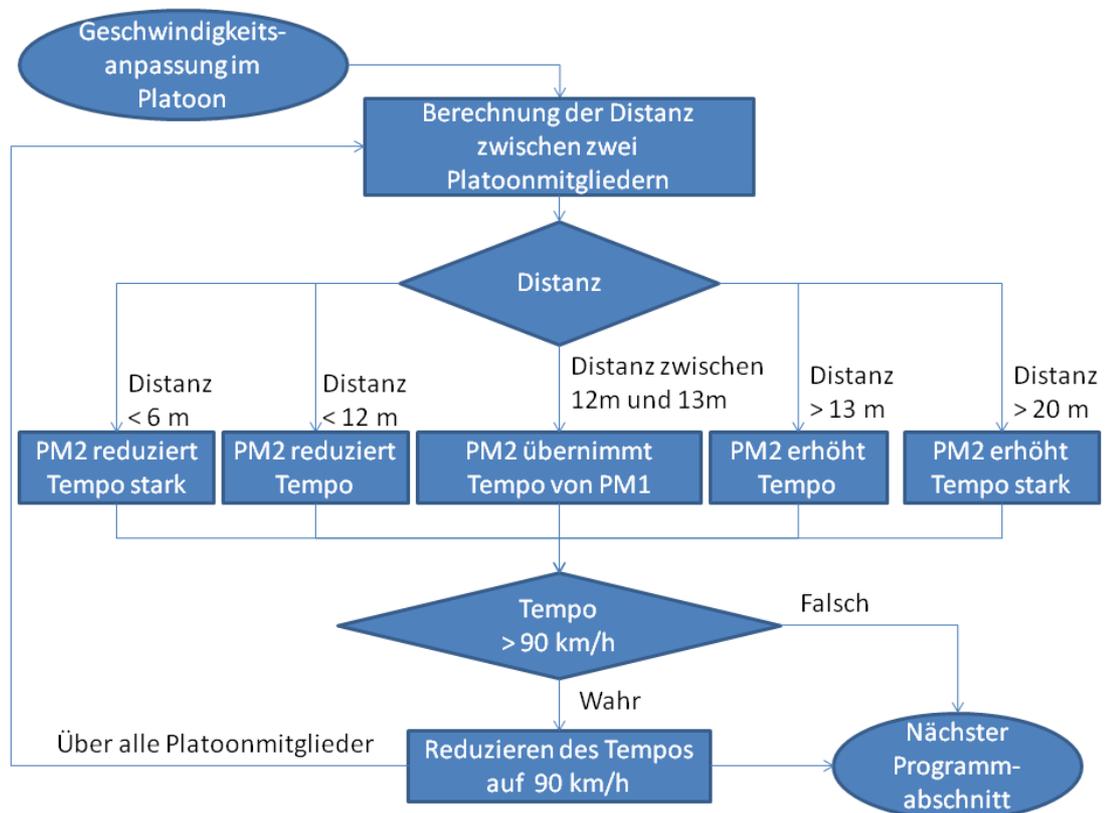


Abbildung 4.11: Geschwindigkeitsanpassung im Platoon

#### 4.2.4 Interaktion des Platoons mit anderen Verkehrsteilnehmern

Im Laufe einer Simulation kommt es immer wieder auch zu Situationen in denen nicht einem Platoon angehörende Fahrzeuge sich zwischen zwei Platoonmitgliedern eines Konvois befinden. Dies geschieht z.B. durch Fahrzeuge, die in die Lkw-Kolonnen einscheren um auf die Autobahn aufzufahren oder von dieser abzufahren, aber wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben auch auf Grund der Tatsache, dass ein Platoon nach seiner Kreierung den Querschnitt des Normalverkehrszuflusses überfährt. Tritt einer dieser Fälle ein, so muss das entsprechende Platoonmitglied reagieren. Zur Prüfung, ob eine derartige Situation besteht, gleicht das Programm die Spuren und Positionen aller Fahrzeuge, die sich auf denselben Strecken wie das entsprechende Platoon befinden, mit den Spuren und Positionen der Kolonnenkameraden dieser Kolonne ab, dies geschieht für jeden Lkw-Konvoi im Netz. Hat das Programm das Platoonmitglieder-Paar, bestehend aus dem vorwegfahrenden PM1 und dem folgenden PM2, ausfindig gemacht zwischen dem sich das fremde Fahrzeug befindet, wird die Ge-

geschwindigkeit von PM2 angemessen angepasst. Hierfür wird zunächst analog zu der Geschwindigkeitsanpassung innerhalb des Platoons die Distanz zwischen PM2 und dem fremden Fahrzeug berechnet (siehe Abbildung 4.12). Da das fremde Fahrzeug kein Kolonnenkamerad ist und somit nicht elektronisch mit den Fahrzeugen der Kolonne verbunden ist, ist es erforderlich, dass das PM2 einen größeren Abstand zu dem vor ihm fahrenden Fahrzeug aufbaut, als zu den anderen Platoonmitgliedern (siehe Abbildung 4.13). Bei einer Geschwindigkeit von über 50 km/h ist für Lkw der gesetzliche Mindestabstand von 50 Metern vorgeschrieben [FORUM VERLAG HERKERT GMBH, 2015, S. 19].

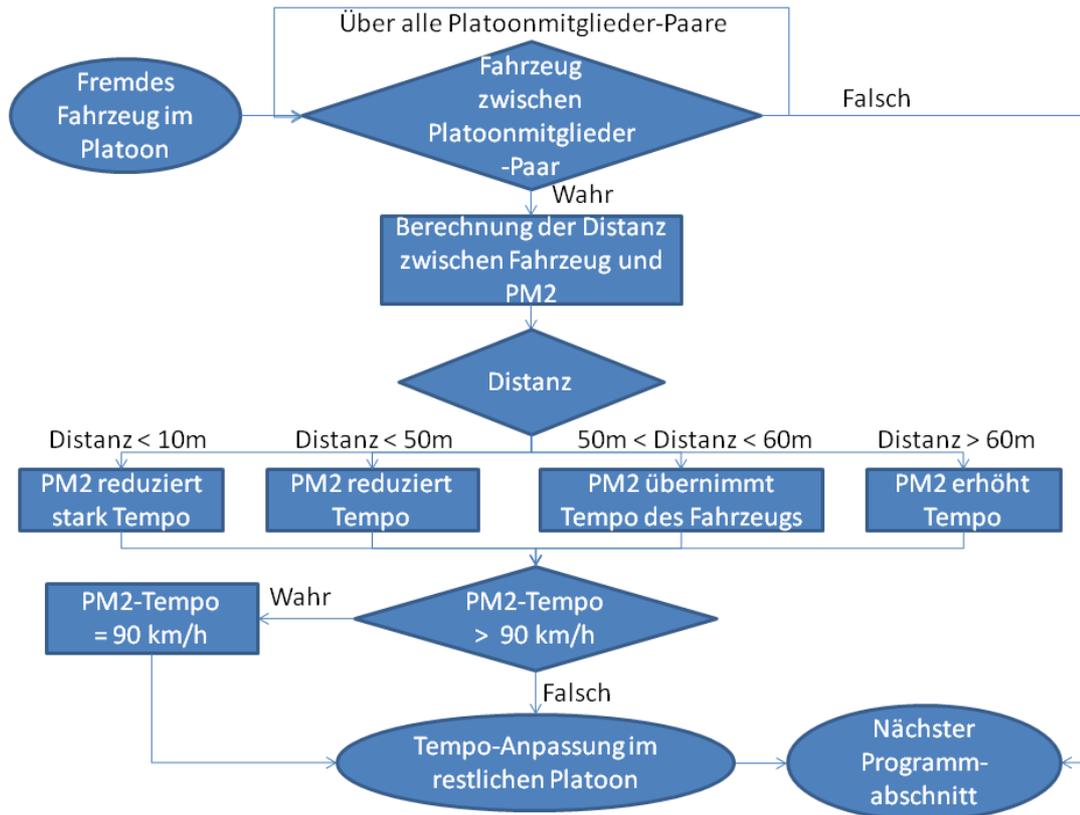


Abbildung 4.12: Fremdes Fahrzeug im Platoon

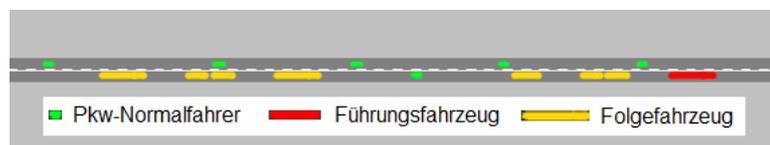


Abbildung 4.13: Simulationsausschnitt eines Fahrzeugs zwischen zwei Platoonmitgliedern

Entsprechend der Geschwindigkeitsanpassung innerhalb eines Platoons (siehe Kapitel 4.2.3) wird die Geschwindigkeit des PM2 je nach Distanz zum Vorderfahrzeug angeglichen. Liegt die Entfernung zwischen den beiden Fahrzeugen zwischen 50 und 60 Metern, so übernimmt PM2 die Geschwindigkeit des fremden Fahrzeugs vor ihm, ist sie darunter oder darüber wird die Geschwindigkeit dementsprechend reduziert oder erhöht. Auch hier geschieht

das wieder mit der Festlegung von Geschwindigkeitsdifferenzen von 5 km/h bzw. 10 km/h zum Tempo des Vordermanns. Bei einer Distanz unterhalb von 10 Metern, beträgt der gesetzte Geschwindigkeitsunterschied zwischen fremden Fahrzeug und PM2 10 km/h. Hat die Entfernung einen Wert zwischen 10 und 50 Metern liegt die determinierte Tempodifferenz bei 5 km/h. Im Gegensatz zu der Geschwindigkeitsanpassung in Kolonnen wird hier bei einer positiven Geschwindigkeitsdifferenz nur geprüft, ob der Abstand größer 60 Meter ist und die Differenz auf 5 km/h definiert, da es keinen positiven Effekt hat zügig zu fremden Fahrzeugen aufzuschließen und eine große Entfernung unwahrscheinlich ist, da das fremde Fahrzeug ja zwischen zwei Kolonnenkameraden eingeschert ist.

Fährt das PM2 mit weniger als 50 km/h, so reduziert sich auch der notwendige Abstand zum fremden Fahrzeug. In diesem Fall werden die Grenzen für die unterschiedlichen Geschwindigkeitsdifferenzen dynamisch nach der Formel (3.1) aus Kapitel 3.7 berechnet, bei der sich der benötigte Abstand aus dem voreingestellten Stillstandsabstand ( $CC0$ ) und dem gewünschten Folgeabstand ( $CC1$ ) zusammensetzt. Für den Folgeabstand in Sekunden wurden hier folgende Werte für die unterschiedlichen Geschwindigkeitsdifferenzen verwendet: Bei einem Folgeabstand kleiner einer halben Sekunde, dass dem Folgeabständen innerhalb eines Platoons entspricht, wird die Geschwindigkeit des PM2 auf das Tempo des fremden Fahrzeugs abzüglich 10 km/h gesetzt. Ist der Folgeabstand geringer 1,05 Sekunden, dass den Folgemodelparametern des Fahrzeugtyps Lkw-Normalfahrer (siehe Kapitel 4.1.2) entspricht, setzt das Programm die Geschwindigkeit des PM2 auf 5 km/h weniger, als die des fremden Fahrzeugs. Sollte das fremde Fahrzeug einen so großen Abstand zum PM2 aufbauen, dass der Folgeabstand größer als 3 Sekunden ist, so werden für das Tempo des PM2 5 km/h auf die Geschwindigkeit des vorwegfahrendes Fahrzeugs aufaddiert. Damit liegt der Bereich in dem das PM2 die Geschwindigkeit des Vordermanns übernimmt zwischen 1,05 und 3 Sekunden für den Folgeabstand. Dieser determinierte Bereich orientiert sich an der weitverbreiteten Faustregel, des halben Tachowerts in Metern, für den minimalen Abstand, der umgerechnet einer Zeitlücke von ungefähr 1,8 Sekunden entspricht [Filzek, 2002, S. 12]. Bei einer Geschwindigkeit von beispielsweise 30 km/h einem Stillstandsabstand ( $CC0$ ) von 1,5 Metern (siehe Kapitel 4.1.1) und einem Folgeabstand ( $CC1$ ) von 1,7 Sekunden erlangt man somit eine Distanz zwischen den Fahrzeugen von ca. 15 Metern, die zum einen dem berechneten Abstand bei einer Zeitlücke von 1,8 Sekunden, als auch dem halben Tachoabstand in Metern entspricht.

Muss sich ein Kolonnenkamerad an ein vorwegfahrendes fremdes Fahrzeug anpassen, so wird seine, durch den in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Programmabschnitt definierte Geschwindigkeit, überschrieben. Anschließend wird die Funktion zur Tempoanpassung innerhalb des Platoons für die hinter dem PM2 fahrenden Folgefahrzeuge aufgerufen, damit diese sich an die veränderte Geschwindigkeit ihres Vordermanns anpassen und somit ein Überfahren des PM2 durch die hinter ihm fahrenden Platoonmitglieder verhindert wird.

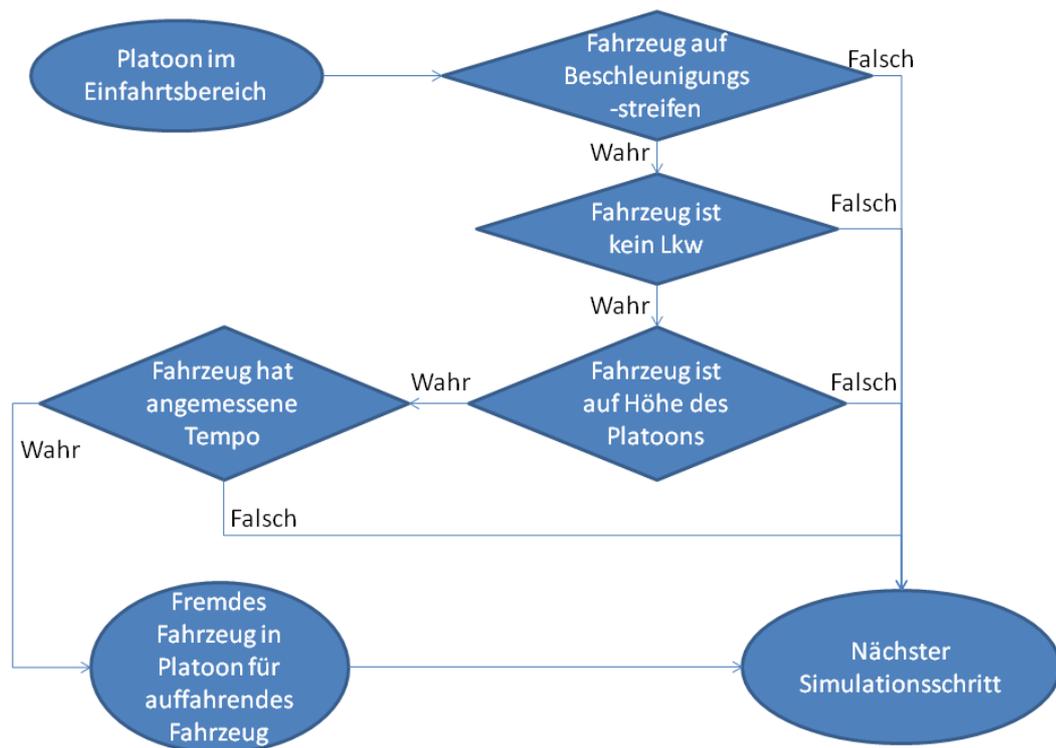


Abbildung 4.14: Platoon im Einfahrtsbereich

Befindet sich ein Lkw-Konvoi im Einfahrtsbereich der Autobahn, so muss er eventuell sich auf dem Beschleunigungsstreifen befindliche Fahrzeuge Rücksicht nehmen. Tritt dieser Fall ein, so wird, wie in Abbildung 4.14 zu sehen ist zuerst überprüft, ob besagtes Fahrzeug kein Lkw ist, da in den hier durchgeführten Simulationen die Lkw, die über die Einfahrtsrampe in das Netzelement einfahren, ausschließlich Lkw repräsentieren, die kein Kolonnenassistentensystem an Bord haben. Da diese Lkw sich mit einer ähnlichen Geschwindigkeit fortbewegen, wie die Platoonmitglieder, ist ein Ausscheren des fremden Lkw aus der Kolonne nach Auffahren auf die Autobahn unwahrscheinlich, somit müsste sich das Platoon aufziehen, um den gesetzlichen Mindestabstand gewährleisten zu können und müsste diesen bis zum Ende des Netzelements beibehalten. Dies führt zu einer Reduzierung des gewünschten Effekts der Platzeinsparung durch Platooning und soll daher vermieden werden. Ist das fremde Fahrzeug ein Pkw, so wird anschließend seine Position kontrolliert, befindet sich das fremde Fahrzeug auf der Höhe zweier Kolonnenkameraden des Platoons, so wird daraufhin geprüft, ob das Fahrzeug bis zum Ende des Beschleunigungsstreifens noch eine so hohe Geschwindigkeit erreichen kann, damit ein Einscheren in das Platoon überhaupt sinnvoll ist. In diesem Falle wird für dieses Fahrzeug die oben beschriebene Funktion für ein fremdes Fahrzeug im Platoon aufgerufen, allerdings mit der Zusatzinformation, dass es sich um ein auffahrendes Fahrzeug handelt, da somit selbst bei einer Distanz von weniger als 10 Metern keine prekäre Situation entsteht, weil sich die beiden Fahrzeuge auf unterschiedlichen Spuren befinden, ignoriert die Funktion diese Überprüfung und beschränkt sich auf einen maximalen Tempounterschied von 5 km/h. Darüber hinaus unterbindet die Funktion in diesem

Falle eine Steigerung der Geschwindigkeit des PM2, damit dieses nicht auf seinen Vordermann im Platoon auffährt. Solch eine Situation könnte beispielsweise entstehen, wenn ein auffahrendes Fahrzeug so schnell ist, dass es noch weitere Platoonmitglieder des Konvois überholt, bevor es auf die rechte Spur der Hauptfahrbahn wechselt. Zuvor definierte Geschwindigkeiten für das besagte PM2 werden mit der neuen Geschwindigkeitsdefinition überschrieben und anschließend werden die Tempos der folgenden Kolonnenkameraden wieder angepasst. Dadurch zieht sich das Platoon an passender Stelle auseinander, und das fremde Fahrzeug kann einscheren (siehe Abbildung 4.15). Verlässt das fremde Fahrzeug wieder das Platoon in dem es auf die Überholspur wechselt, zieht sich der Konvoi anschließend wieder zusammen, in dem die vorher zurückgefallenen Platoonmitglieder ihre Geschwindigkeit durch die in Kapitel 4.2.3 beschriebene Funktion erhöhen. Bei den Simulationen des Netzelements Einfahrt, ist das die letzte Überprüfung von Verkehrssituationen, bevor der nächste Simulationsschritt initiiert wird und das Programm von Neuem durchlaufen wird.

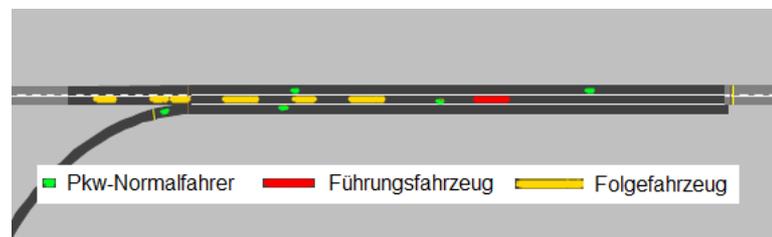


Abbildung 4.15: Simulationsausschnitt eines einscherenden Fahrzeugs

Analog zu der oben beschriebenen Funktion für einfahrende Fahrzeuge, verhält sich das Platoon bei Simulationen im Netzelement Ausfahrt gegenüber Fahrzeugen auf der Überholspur, falls diese Abfahren möchten und der Lkw-Konvoi sich im Ausfahrtsbereich befindet (siehe Abbildung 4.16). Da in diesem Szenario der Fahrzeugtyp Lkw-Normalfahrer nicht auftritt, weil der Schwerverkehr auf der Hauptfahrbahn vollständig durch Platoons vertreten wird und es keine weiteren Netzzuflüsse gibt, wird hier nicht geprüft, ob es sich bei dem fremden Fahrzeug um einen Lkw handelt. Tritt eine Situation ein, in der ein Pkw auf der Überholspur des Ausfahrtsbereich fährt, während sich auf selber Höhe ein Platoon auf der rechten Spur des Bereichs befindet, so wird die Funktion zur Geschwindigkeitsanpassung für fremde Fahrzeuge im Platoon, für da entsprechende Platoonmitglied aufgerufen. Wie im Falle von auffahrenden Fahrzeugen wird auch hier die Information weitergegeben, dass es sich um ein Fahrzeug auf der benachbarten Spur handelt. So wird verhindert, dass der Kolonnenkamerad zum Einen auf Grund einer sehr geringen Distanz zu stark abbremst und zum Anderen beschleunigt und so eventuell auf seinen Vordermann im Platoon auffahren würde, im Falle das das fremde Fahrzeug noch weitere Platoonmitglieder überholt, bevor es schließlich die Spur nach rechts wechselt. War das Manöver erfolgreich, konnte das fremde Fahrzeug, entsprechend einem auffahrenden Fahrzeug durch das Platoon durchkreuzen und anschließend sich die Lkw-Kolonne wieder wie oben erläutert zusammenziehen. Für das Netzelement Ausfahrt ist dies die letzte Funktion, weshalb anschließend der nächste Simulationsschritt folgt.

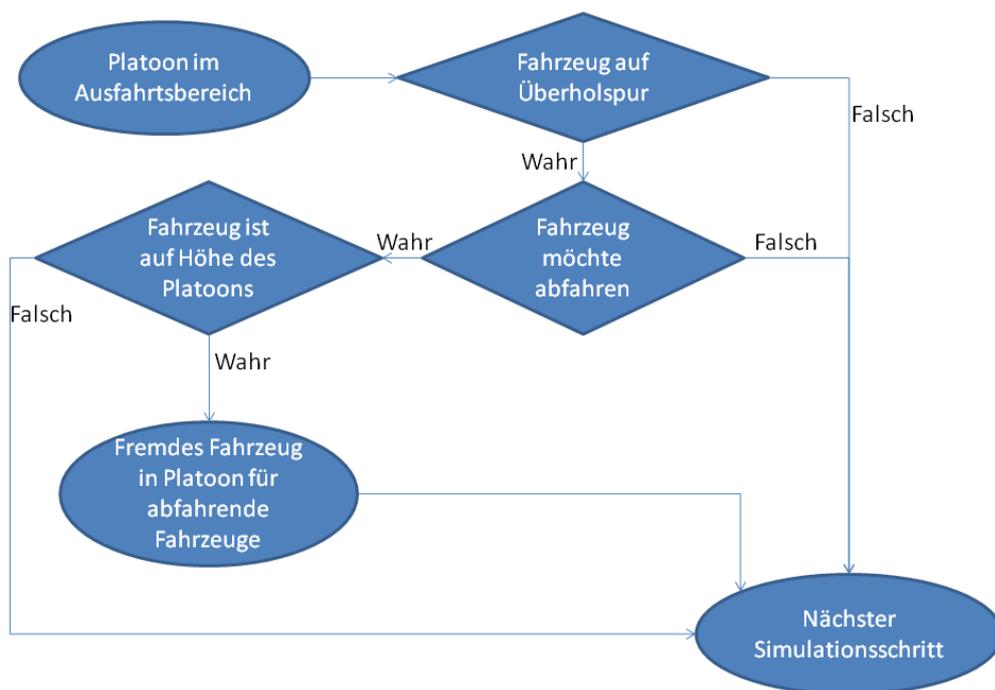


Abbildung 4.16: Platoon im Ausfahrtsbereich

## 5 Auswertung des Simulationsexperiments

### 5.1 Berechnung der Kapazität

Zur Berechnung der Kapazität, der in diesem Simulationsexperiment verwendeten Teilknotenpunkte, wird die im Rahmen des Projekts „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [Geistefeldt et al., 2016, S. 36ff] entwickelte Methodik verwendet. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Nach jeder durchgeführten Simulation werden Daten über die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn vor dem Teilknotenpunkt als auch die Verkehrsstärken nach dem Teilknotenpunkt gespeichert. Dies geschieht in derselben Frequenz, in der auch die Verkehrsstärken der Zuflüsse angehoben werden: Alle fünf Simulationsminuten. Bei 20 Läufen pro Simulation und 20 Steigerungen pro Lauf erhält man somit 400 Werte für die Geschwindigkeiten und die Verkehrsstärken. Die Verkehrsstärken werden hierfür von Kfz/h in Pkw-E/h umgerechnet (siehe Kapitel 4.1.4).

Basierend auf diesen Daten werden die zwei in Abbildung 5.1 dargestellten Grafiken erstellt aus denen die kritische Geschwindigkeit  $v_{krit}$  und darüber hinaus die Kapazität des Teilknotenpunktes ermittelt werden können.

Unter der kritischen Geschwindigkeit, versteht man das Tempo mit der geringsten Häufigkeit im Bereich der Geschwindigkeitsklassen von 60 bis 80 km/h.

Bei dem in Abbildung 5.1 (rechte Grafik) dargestellten Histogramm der Auswertung der ersten Simulation befindet sich die kritische Geschwindigkeit bei 60 km/h. Ist diese ermittelt, ist es möglich aus dem Verkehrsstärken-Geschwindigkeits-Diagramm (Abbildung 5.1, linke Grafik), die relevanten Verkehrsstärkenwerte zu gewinnen. Hierfür werden Werte der Durchschnittsgeschwindigkeit zwei aufeinander folgender Intervalle gesucht, bei denen erstens der Wert des früheren Intervalls oberhalb der kritischen Geschwindigkeit liegt und zweitens der Wert des nachfolgenden Intervalls unterhalb der kritischen Geschwindigkeit liegt und mindestens 15 km/h geringer ist als der Wert des vorherigen Intervalls. Bei der Auswertung in Abbildung 5.1 sind die ersten Werte der entscheidenden Wertepaare bestehend aus der Durchschnittsgeschwindigkeit und dem dazu gehörenden Wert für die Verkehrsstärke durch rote Sterne dargestellt. In den seltenen Fällen, in denen mehr als eine Geschwindigkeitsklasse zwischen 60 und 80 km/h mit der geringsten Häufigkeit existiert, wird der niedrigste Wert für die kritische Geschwindigkeit verwendet. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass es sich bei den entscheidenden Werten der Durchschnittsgeschwindigkeit tatsächlich um Einbrüche des Verkehrs handelt. Die Kapazität ergibt sich dann aus dem Mittel der Verkehrsstärkenwerte der relevanten, rot markierten Wertepaare (siehe Kapazität in Abbildung 5.1, linke Grafik) [Krause et al., 2017, S. 60].

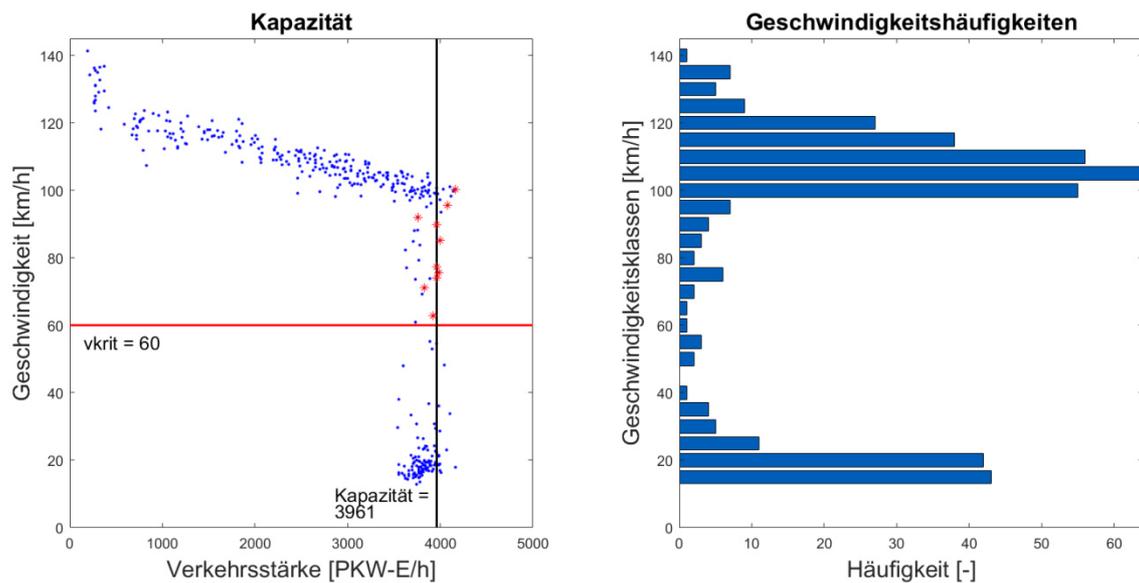


Abbildung 5.1: Auswertungsbeispiel der ersten Simulation

Sollte es bei einer Simulation nicht zu einem Zusammenbruch des Verkehrs kommen, so ist die Verwendung einer abgewandelten Form der oben beschriebenen Methodik notwendig, die in Krause et al. [2017, S.60f] zu finden ist. Da es allerdings bei jeder der im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Simulationen zu einem Zusammenbruch des Verkehrs kam, ist diese abgewandelte Methodik hier nicht relevant.

## 5.2 Ergebnisse des Simulationsexperiments

Zur Auswertung des Simulationsexperiments werden nach der im vorherigen Kapitel 5.1 beschriebenen Methodik, die Kapazitäten der Teilknotenpunkte in den jeweiligen Simulationen berechnet und miteinander verglichen. Darüber hinaus werden die Resultate der Kapazitäten bei Normalverkehr, ohne das Vorkommen von Platoons, diesen gegenübergestellt. Die Kapazitäten für den Normalverkehr stammen aus Krause et al. [2017, S. 124ff]. Wie in Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3, deutlich zu sehen ist, führt das Platooning zu der gewünschten und erwarteten Erhöhung der Kapazitäten. Bei der Betrachtung der beiden Einfahrtsszenarien (E1-2), zum einen mit dem Verkehrsstärkenverhältnis der Geraden 2 und zum anderen mit dem Verhältnis der Geraden 5, lässt sich erkennen, dass in beiden Fällen der positive Effekt der längeren sechs Lkw langen Platoons höher ist, als die der kürzeren drei Lkw langen Platoons. Diese Entwicklung lässt sich über die zunehmende Platzeinsparung pro Platoon mit steigender Anzahl der Folgefahrzeuge erklären. Pro Folgefahrzeug werden ungefähr 37,5 Meter zwischen den Platoonmitgliedern eingespart (siehe Kapitel 3.7). Betrachtet man die Ergebnisse der Simulationen im Verhältnis zu den jeweiligen Kapazitäten bei Normalverkehr, die in Abbildung 5.3 jeweils auf 0% gesetzt sind, so ist festzustellen, dass der Unterschied zwischen Normalverkehr und den 3-Lkw-Platoons größer ist, als die Differenz

zwischen den beiden unterschiedlich langen Platoons. Das bedeutet, dass mit wachsender Platoonlänge der positive Effekt pro Folgefahrzeug abnimmt. Zu erklären ist diese Entwicklung mit dem häufigeren Auftreten von einscherenden Fahrzeugen bei längeren Konvois, wodurch es öfter zu einem Auseinanderziehen des Platoons (siehe Kapitel 3.5) und Fahren von fremden Fahrzeugen in den Kolonnen kommt, dass die Wirkung der Platzeinsparung reduziert. Darüber hinaus ist der Anteil der gewonnenen Kapazität beim Verkehrsstärkenverhältnis der Geraden 2 höher, als bei der der Geraden 5. Je höher die Nummerierung der Geraden, desto stärker das Verkehrsaufkommen auf der Hauptfahrbahn und umso geringer das Aufkommen auf der Einfahrtsrampe. Dies bedeutet, dass die positive Wirkung auf die Kapazität durch das Platooning mit steigender Verkehrsnachfrage sinkt. Vergleicht man den anteiligen Unterschied der Kapazitäten zwischen den beiden Platoonlängen in den Einfahrtszenarien, so liegt er im ersten Szenario bei 1,7% und im zweiten Szenario bei 1,4%. Dieser Unterschied von 0,3% ist zwar sehr gering, zeigt aber, dass die deutlich erhöhte Verkehrsnachfrage auf der Hauptfahrbahn im zweiten Szenario einen größeren Einfluss auf den Platooning-Effekt hat, als die vernehmlich geringe Verkehrsstärke der Einfahrtsrampe.

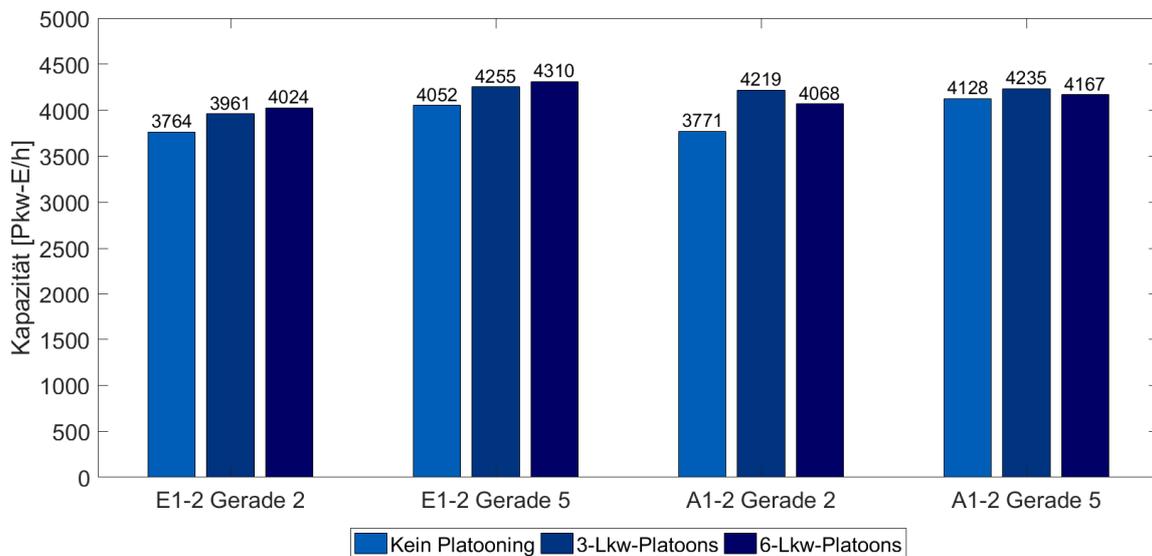


Abbildung 5.2: Kapazitäten im Vergleich

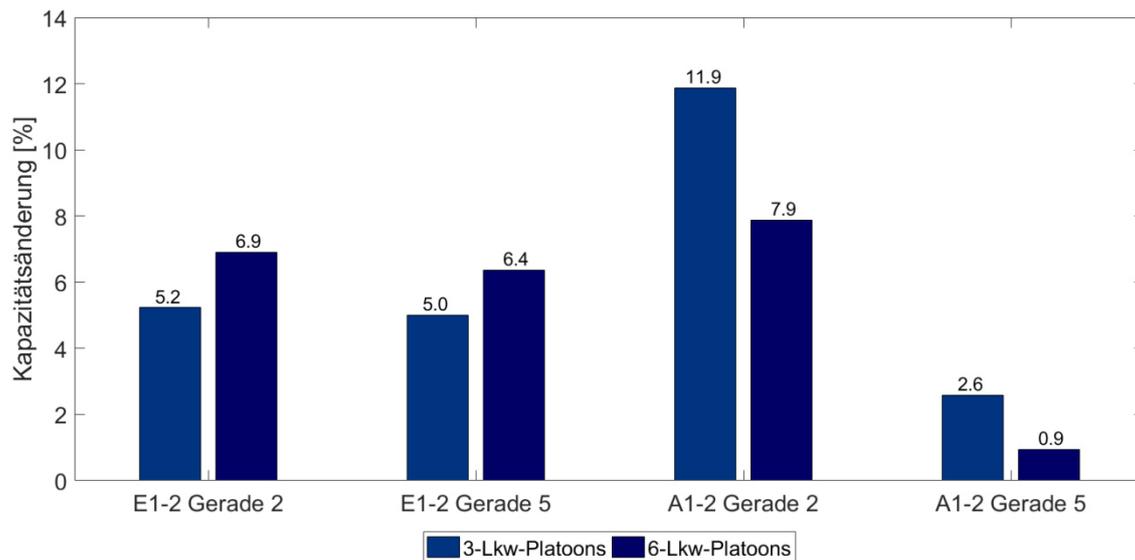


Abbildung 5.3: Kapazitätsverhältnis zum Normalverkehr

Bei der Analyse der beiden Ausfahrtsszenarien (A1-2) ist zu sehen, dass der positive Effekt des Platoonings genau wie bei den Einfahrtsszenarien mit steigender Verkehrsnachfrage abnimmt. Dies passiert hier noch deutlicher, als bei den Einfahrtsszenarien (E1-2) und zeigt eindeutig die Abhängigkeit des positiven Effekts des Platoonings zum Verkehrsaufkommen. Darüber hinaus fällt die Geschwindigkeit bei den Einfahrtsszenarien wesentlich abrupter als bei den Ausfahrtsszenarien, bei denen das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsstärke nahezu linear abnimmt (siehe Anhang A). Des Weiteren fällt auf, dass hier in beiden Szenarien die positive Auswirkung der 6-Lkw-Platoons auf die Kapazität geringer ist, als die der 3-Lkw-Platoons. Diese Entwicklung lässt sich durch folgenden Situationsunterschied zwischen Einfahrts- und Ausfahrtsszenarien erklären:

Im Falle der Einfahrt kommen die in die Lkw-Kolonnie einscherenden Fahrzeuge von der Einfahrtsrampe. Dies bedeutet, dass wenn ein Einscheren nicht möglich ist, weil das fremde Fahrzeug ein Lkw oder zu langsam ist (siehe Kapitel 4.2.4), so kommt es lediglich auf dem Beschleunigungsstreifen zu einem Rückstau, aber der Verkehr auf der Hauptfahrbahn kann ungestört weiterfließen. Im Gegensatz zu den Ausfahrtsszenarien, hier kommt es, für den Fall, dass ein Fahrzeug beim Einscheren zu zögerlich ist und seine Lücke im Platoon verpasst, zu einer Staubildung auf der Überholspur, was den Verkehrsfluss auf der Hauptfahrbahn verschlechtert (siehe Abbildung 5.4). Je länger das Platoon, desto länger die Wartezeit für das sich auf der Überholspur befindliche Fahrzeug. Zusätzlich kommt es in den Ausfahrtsszenarien zum Abfahren von Platoonmitgliedern. Auch die Häufigkeit der abfahrenden Kolonnenkameraden steigt mit wachsender Platoonlänge. Verlässt eines der mittleren Platoonmitglieder die Kolonne, so muss sich diese aufziehen, um ein sicheres Abfahren des Kolonnenkameraden gewährleisten zu können (siehe Kapitel 4.2.2 und Abbildung 4.10). Da ein 6-Lkw-Platoon vier mittlere Platoonmitglieder hat und ein 3-Lkw-Platoon nur eines, ist die

Wahrscheinlichkeit, dass ein Aufziehen des Konvois auf Grund des Abfahrens eines Kolonnenkameraden bei längeren Platoons deutlich höher als bei kürzeren. Somit haben die kürzeren Konvois in den Ausfahrtsszenarien schon zwei entscheidende Vorteile gegenüber den längeren Platoons. Hierdurch lässt sich der Spitzenwert von knapp 12% des Kapazitätswachses im dritten Szenario durch das Platooning mit drei Lkw Kolonnen und die geringere Auswirkung der sechs Lkw Konvois in den Ausfahrtsszenarien auf die Kapazität begründen.

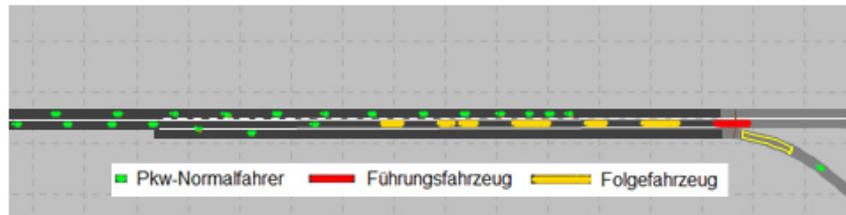


Abbildung 5.4: Simulationsausschnitt eines Platoons, das für einen Stau auf der Überholspur sorgt

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass der im Projekt „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [Geistefeldt et al., 2016, S. 20f] kalibrierte Normalverkehr (siehe Kapitel 4.1.2) mit dem Konzept des Platoonings noch nicht vertraut ist. Die anderen, nicht einem Platoon angehörenden Verkehrsteilnehmer, nehmen die Lkw-Kolonnen nicht als Platooneinheit sondern als einzelne Fahrzeuge wahr. Das führt zu ungünstigen Mustern in deren Fahrverhalten. Zum Beispiel: Ein Fahrzeug, das die Autobahn verlassen möchte, beginnt trotzdem noch kurz vor der Ausfahrt das Platoon zu überholen, obwohl es auf Grund der Kolonnenlänge sinnvoller wäre sich hinter den Konvoi einzureihen. Sie spiegeln somit das zu erwartende Verhalten von Verkehrsteilnehmern während der Umstellungsphase nach der Einführung des Platoonings im Straßenverkehr wieder. Sobald die Verkehrsteilnehmer gelernt haben mit durch das Kolonnenassistenzsystem gebildeten Konvois umzugehen, ist eine zusätzliche Steigerung des positiven Effekts von Platooning auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur zu erwarten. Zusätzlich wurden hier zwei für das Kolonnenassistenzsystem sehr ungünstige Szenarien (Einfahrt und Ausfahrt) simuliert, in denen es häufig zu einem Auf- und Zusammenziehen der Platoons durch einscherende Fahrzeuge kommt. Auf freier Strecke ist davon auszugehen, dass der Kapazitätswachstum durch Platooning noch höher ausfällt, da es vernehmlich seltener zu einem Einscheren von fremden Fahrzeugen kommt. Betrachtet man die Fernstraßeninfrastruktur im Ganzen, so sind daher für diese mit noch höheren Kapazitäten, als die hier präsentierten Ergebnissen zu rechnen.

## 6 Fazit

Das Platooning kommt: Eine Einführung des Kolonnenassistenzsystems in naher Zukunft scheint offensichtlich. Wie die in Kapitel 2.2 genannten Projekte zeigen, ist die Technik weit genug entwickelt und in Deutschland wurden auch schon die ersten Schritte unternommen, um das automatisierte Fahren auf deutschen Straßen zu ermöglichen (siehe Kapitel 7). Neben Einsparungen von Kraftstoff und Emissionen und einer verbesserten Verkehrssicherheit soll das Platooning auch für eine geringere Platzinanspruchnahme durch kleine Folgeabstände zwischen den Platoonmitgliedern sorgen.

Auf der Platzeinsparung durch das Kolonnenassistenzsystem bei Schwerverkehr liegt der Fokus der vorliegenden Masterarbeit. Deren Ergebnisse unterstützen die Theorie, dass durch Platooning Straßenkapazität gewonnen werden kann. Hierbei wurde außerdem festgestellt, dass der positive Effekt der Platoons von der Verkehrsnachfrage, der Art des Streckenabschnitts, der Platoonlänge und zudem vom Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer abhängig ist. Führt ein längeres Platoon zu mehr Kapazität bei Einfahrten, so sorgt es in Ausfahrtsszenarien für eine weniger positive Auswirkung als kürzere Platoons. Darüber hinaus stört das Verlassen von insbesondere sich in der Mitte der Kolonne befindlichen Kolonnenkameraden die Platzeinsparung. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, dass die gemeinsame Strecke der Platoonmitglieder so lang wie möglich ist. Nichts desto trotz ist die positive Wirkung in allen getesteten Szenarien gegeben und schwankt zwischen einem Kapazitätszuwachs zwischen knapp 1 bis 12%.

## 7 Ausblick

„Platooning ist ein gutes Beispiel für die Symbiose aus Automatisierung und Vernetzung. Das Zusammenspiel von Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation mit innovativen Funktionen, wie der automatischen Abstandsregelung wird die Verkehrssicherheit erhöhen, den Verkehrsfluss deutlich verbessern und gleichzeitig die Kapazitäten steigern“, an dieser Aussage des Bundesverkehrsministers Alexander Dobrindt aus dem vergangenen Jahr, zeigt die Aktualität des Platoonings [Brüggmann, 2016]. Es scheint nur noch eine Frage der Zeit, bis das Kolonnenassistenzsystem Einzug auf deutschen Straßen erhält. Der Geschäftsführer der Volkswagen Truck & Bus GmbH hält eine Einführung des Platoonings bis 2020 für technisch machbar [Brüggmann, 2016]. Die in Kapitel 2.2 erwähnten bereits durchgeführten Projekte unterstützen diese Aussage.

Bisher unterbindet der Gesetzgeber das vollautomatisierte Fahren auf deutschen Straßen. Dies stellt die größte Hürde, auch für das Platooning dar, da das Straßenverkehrsgesetz bisher nur einen menschlichen Fahrer hinter dem Steuer eines Fahrzeugs vorsieht [Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015, S 16f]. Allerdings hat das Bundeskabinett einen vom Bundesminister für Verkehr vorgelegten Gesetzesentwurf zum automatisierten Fahren beschlossen, der die rechtliche Gleichstellung von Fahrer und Computer vorsieht. „Das automatisierte Fahren ist die größte Mobilitätsrevolution seit der Erfindung des Automobils. Dafür schaffen wir jetzt das modernste Straßenverkehrsrecht der Welt. Wir stellen Fahrer und Computer rechtlich gleich. Das heißt: Automatisierte Systeme im Auto dürfen die Fahraufgabe komplett übernehmen. Wir ermöglichen damit, dass der Fahrer während der hochautomatisierten Fahrt die Hände vom Lenker nehmen darf, um etwa im Internet zu surfen oder E-Mails zu checken.“, so Verkehrsminister Dobrindt [Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017]. Hierdurch würde der Beruf des Fernkraftfahrers auch deutlich attraktiver werden, da es dem Fahrer so in Zukunft in seinem Büro auf Rädern möglich wäre, während der Fahrt bereits die Formalitäten für seine Lieferung zu bearbeiten oder gar einem Zweitjob oder anderen Nebentätigkeiten nachzugehen.

Um die Effizienz von Kolonnenassistenten nach ihrer Einführung im Straßenverkehr zu steigern, wäre es sinnvoll die Bildung von Platoons nicht dem Zufall zu überlassen, sondern eine Plattform zu entwickeln auf der sich Speditionen und Fahrer bereits im Vorfeld absprechen können, um Kolonnenfahrten anzubieten, anzufragen und anzunehmen. Lastkraftwagenhersteller wie u.a. die Daimler AG oder Iveco besitzen bereits Plattformen über die ihre Lkw miteinander verbunden sind und somit Informationen austauschen können (siehe Kapitel 2.3.3). Da in Zukunft auch hersteller- und speditionenübergreifende Kolonnen möglich sein sollen, um die Bildung von Konvois zu vereinfachen und die Anzahl der so gebildeten Lkw-Konvois zu erhöhen, wäre es somit zweckmäßig, die Plattformen der verschiedenen Lkw-Hersteller zu verknüpfen.

Des Weiteren sollte außerdem ein Vergütungssystem entwickelt werden, da die Folgefahrzeuge eines Platoons einen größeren Vorteil durch das Windschattenfahren, insbesondere beim Kraftstoffverbrauch, haben, als das Führungsfahrzeug. In Abbildung 7.1 sieht man die prozentuale Kraftstoffeinsparung bei den unterschiedlichen Platoonmitgliedern. Wie deutlich zu sehen ist, spart zwar auch das Führungsfahrzeug, aber signifikant weniger als seine Kolonnenkameraden. Hierdurch könnte sich ein völlig neues Geschäftsfeld im internationalen Straßengüterverkehr etablieren.

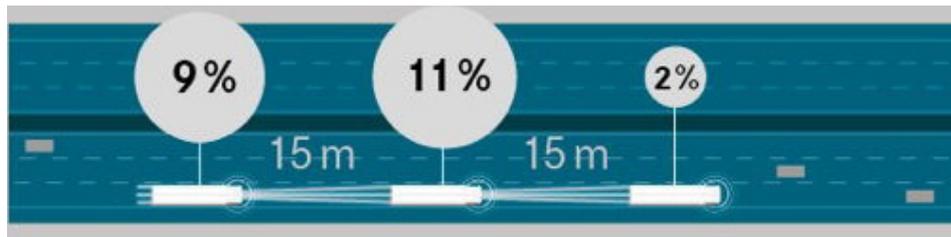


Abbildung 7.1: Kraftstoffeinsparung im Platoon

[Daimler AG, 2016]

Aber auch die durch den Kolonnenassistenten verbundenen Konvois, in der das Führungsfahrzeug noch durch einen Menschen gesteuert wird, ist nur ein Zwischenschritt. Beispielsweise stellte die Daimler AG bereits 2014 ihren Future Truck 2025 vor, der sich auch ohne Platoon vollautomatisch und fahrerlos im Verkehr sicher bewegen kann [Daimler AG]. Somit wären in Zukunft auch vollautomatische Platoons denkbar, bei denen selbst das Führungsfahrzeug nicht mehr der ständigen Präsenz eines Fahrers bedarf.

## Literaturverzeichnis

- ADAC e.V. [2017] Staubilanz 2016, [https://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/staubilanz\\_2016.aspx?ComponentId=286830&SourcePageId=6729](https://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/staubilanz_2016.aspx?ComponentId=286830&SourcePageId=6729); Zugriff am 02.02.2017.
- Brüggmann [2016] Vernetzte Lkw: MAN nimmt an Platooning-Demonstrationsfahrt teil. LOGISTRA. HUSS-VERLAG GmbH, 2016, <http://www.logistra.de/news-nachrichten/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik/7329/maerkte-amp-trends/vernetzte-lkw-man-nimmt-platooning-demonstrati>; Zugriff am 08.03.2017.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO: § 57c Ausrüstung von Kraftfahrzeugen mit Geschwindigkeitsbegrenzern und ihre Benutzung, [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/\\_\\_57c.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/__57c.html); Zugriff am 24.02.2017.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [2014] Verkehrsverflechtungsprognose 2030: Zusammenfassung, [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile); Zugriff am 02.02.2017.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [2015] Strategie automatisiertes vernetztes Fahren, 2015, [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StB/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile); Zugriff am 09.03.2017.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [2017] Bundeskabinett verabschiedet Gesetzentwurf zum automatisierten Fahren, 2017, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/011-dobrindt-gesetz-automatisiertes-fahren.html>; Zugriff am 08.03.2017.
- Continental AG [2016] Up to 15 Percent Less Consumption – Continental Focuses on Automated Truck Convoys, [http://www.continental-corporation.com/www/pressportal\\_com\\_en/themes/press\\_releases/1\\_topics/automated-driving/pr-2016-09-02-platooning-en.html](http://www.continental-corporation.com/www/pressportal_com_en/themes/press_releases/1_topics/automated-driving/pr-2016-09-02-platooning-en.html); Zugriff am 08.02.2017.
- DAF Trucks Deutschland GmbH Komfort- und Sicherheitssysteme, <http://www.daftrucks.de/de-de/trucks/comfort-and-safety-systems-euro-6>; Zugriff am 11.02.2017.
- DAF Trucks Deutschland GmbH [2016] „EcoTwin“ nimmt an EU Truck Platooning Challenge teil, <http://www.daftrucks.de/de-de/news-and-media/news-archive/articles/global/2016/q1/22032016-ecotwin-participating-in-the-european-truck-platooning-challenge#>; Zugriff am 07.02.2017.

- Daimler AG Autonomer Pionier: Mercedes-Benz Future Truck 2025,  
[http://pdfmage.org/dl/61c2d738-3d7e-478e-a7fd-d9d5c61f654d.pdf/Mercedes-Benz%20Future%20Truck%202025%20\\_%20Daimler%20\\_%20Innovation%20\\_%20Autonomes%20Fahren.pdf?srv=az-wr](http://pdfmage.org/dl/61c2d738-3d7e-478e-a7fd-d9d5c61f654d.pdf/Mercedes-Benz%20Future%20Truck%202025%20_%20Daimler%20_%20Innovation%20_%20Autonomes%20Fahren.pdf?srv=az-wr); Zugriff am 09.03.2017.
- Daimler AG Der Autopilot für Lkw: Highway Pilot,  
<https://www.daimler.com/innovation/autonomes-fahren/special/technologie-lkw.html>; Zugriff am 22.02.2017.
- Daimler AG Highway Pilot Connect: Vernetzte Lkw fahren im Verbund mit mehr Sicherheit und weniger Verbrauch,  
<http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Highway-Pilot-Connect-Vernetzte-Lkw-fahren-im-Verbund-mit-me.xhtml?oid=9905211>; Zugriff am 07.02.2017.
- Daimler AG [2011] Der neue Actros,  
[https://www.fleetboard.de/fileadmin/content/germany/Broschueren/ActrosMB\\_Launch\\_Broschuere\\_D\\_Online.pdf](https://www.fleetboard.de/fileadmin/content/germany/Broschueren/ActrosMB_Launch_Broschuere_D_Online.pdf); Zugriff am 03.02.2017.
- Daimler AG [2016] Vernetzte Lkw: Mithilfe des Internets zum Warentransport der Zukunft,  
<https://www.daimler.com/innovation/vernetzung/vernetzte-lkw.html>; Zugriff am 05.02.2017.
- Donnerbauer [2014] Der Lkw der Zukunft ist „always on“ und autonom, <http://www.vdinachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Der-Lkw-Zukunft-always-on-autonom>; Zugriff am 09.02.2017.
- Filzek [2002] *Filzek, B.*: Abstandsverhalten auf Autobahnen: Fahrer und ACC im Vergleich. Dissertation, 2002.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [2006] Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, 2006.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [2015] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS. FGSV-Verl., Köln, 2015.
- FORUM VERLAG HERKERT GMBH [2015] Straßenverkehrs-Ordnung (StVO): mit Anlagen, Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung,  
<http://www.stvo.de/strassenverkehrsordnung>.
- Geistefeldt et al. [2016] HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik (2016), V 279.
- Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen [2009] Forschungsprojekte - Fahrerassistenz und Fahrzeugführung: KONVOI, <https://www.ika.rwth->

*aachen.de/de/forschung/projekte/fahrerassistenz-und-fahrzeugf%C3%BChrung/1635-konvoi.html*; Zugriff am 05.02.2017.

Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen [2012] Forschungsprojekte - Energie- und Antriebsmanagement: SARTRE, *https://www.ika.rwth-aachen.de/de/forschung/projekte/energie-und-antriebsmanagement/1263-sartre.html*; Zugriff am 06.02.2017.

Irtzenkauf & Klaußner [2013] *Irtzenkauf, P.; Klaußner, S.*: Autonome Kolonnenfahrt auf Autobahnen: Stand der Technik, Umsetzung, Auswirkungen auf den Verkehrsfluss, 2013.

ITS International [2012] Car to car communications a step closer, *http://www.itsinternational.com/categories/location-based-systems/features/car-to-car-communications-a-step-closer/*; Zugriff am 09.02.2017.

Iveco Magirus AG Iveconnect, *http://www.iveco.com/Germany/collections/catalogues/Documents/Neue\_Materialien\_DE/Flyer\_Iveconnect.pdf*; Zugriff am 11.02.2017.

Iveco Magirus AG [2014] IVECO Range 2014, *http://www.iveco.com/Germany/collections/catalogues/Documents/Neue\_Materialien\_DE/IVECO%20Range%202014.pdf*; Zugriff am 08.02.2017.

Jordan [2016] Vor Ort bei der European Truck Platooning Challenge 2016 dabei, *http://blog.mercedes-benz-passion.com/2016/04/vor-ort-dabei-european-truck-platooning-challenge-2016-rollt-richtung-rotterdam/*; Zugriff am 06.02.2017.

Krause et al. [2017] Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. FAT 296, 2017.

MAN SE [2016a] European Truck Platooning Challenge 2016, *http://www.man-truckers-world.de/de/2016/04/04/european-truck-platooning-challenge-2016/*; Zugriff am 05.02.2017.

MAN SE [2016b] Platooning by MAN Truck & Bus, *http://www.man-truckers-world.de/de/2016/04/04/platooning-by-man-truck-bus/*; Zugriff am 03.02.2017.

MAN Truck & Bus AG [2015] Update des Flaggschiffs: zum Modelljahr 2016 wird der TGX D38 noch interessanter, *http://www.truck.man.eu/de/de/man-welt/man-in-deutschland/presse-und-medien/Update-des-Flaggschiffs\_-zum-Modelljahr-2016-wird-der-TGX-D38-noch-interessanter-229121.html*; Zugriff am 08.02.2017.

Maurer et al. [2015] *Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H.* (Hrsg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2015.

- Menzel [2016] Rückenwind für die Lastwagen-Branche: Das Platooning kommt. Handelsblatt (2016).
- Nowakowski et al. [2015] Operational Concepts for Truck Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) Maneuvers (2015).
- PTV AG [2015] PTV Vissim 7 Benutzerhandbuch.
- Pudenz [2011] Versuchsträger fährt hochautomatisiert auf der Autobahn, <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/automatisiertes-fahren/versuchstraeger-faehrt-hochautomatisiert-auf-der-autobahn/6566374?searchBackButton=true&abEvent=detailLink>; Zugriff am 06.02.2017.
- Reif [2010] Reif, K. (Hrsg.): Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2010.
- Robinson et al. [2010] Operating Platoons On Public Motorways: An Introduction To The SARTRE Platooning Programme, [http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE\\_Overview\\_Final\\_Paper\\_ITS\\_World\\_Congress\\_2010.pdf](http://www.sartre-project.eu/en/publications/Documents/SARTRE_Overview_Final_Paper_ITS_World_Congress_2010.pdf).
- SARTRE-Consortium [2012] Project Final Report, <http://www.sartre-project.eu/en/publications/Sidor/default.aspx>.
- Scania AB [2016] Important next step for autonomous vehicles, <https://www.scania.com/group/en/important-next-step-for-autonomous-vehicles/>; Zugriff am 07.02.2017.
- ServiceXpert Gesellschaft für Service-Informationssysteme mbH [2016] Platooning: Networked as a group and automated on the road to the future, <http://www.servicexpert.de/en/press/press-releases/press-release/platooning-202/>; Zugriff am 11.02.2017.
- simTD-Konsortium [2009] simTD - Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland, <http://www.simtd.de/index.dhtml/deDE/index.html>; Zugriff am 03.02.2017.
- Steingart [2016] VW will bei vernetzten Lastwagen nicht mit Daimler kooperieren, <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/man-und-scania-vw-will-bei-vernetzten-lastwagen-nicht-mit-daimler-kooperieren/13456956.html>; Zugriff am 11.02.2017.
- The Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment et al. [2016a] EU Truck Platoon Challenge: Corridors to drive, <https://www.eutruckplatooning.com/About/Corridors+to+drive+MAP/default.aspx>; Zugriff am 06.02.2017.

- The Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment et al. [2016b] EU Truck Platoon Challenge: What is Truck Platooning?, <https://www.eutruckplatooning.com/About/default.aspx>; Zugriff am 03.02.2017.
- The Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment et al. [2016c] European Truck Platooning Challenge, <https://www.eutruckplatooning.com/default.aspx>; Zugriff am 06.02.2017.
- Verband der Automobilindustrie [2015] Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/automatisierung.html>; Zugriff am 03.02.2017.
- Verein deutscher Ingenieure e.V. KONVOI: Entwicklung und Untersuchung des Einsatzes von elektronisch gekoppelten Lkw-Konvois, [https://www.vdi.de/fileadmin/media/content/k/vdi-vw-tagung2006/Poster\\_Friedrichs\\_1.pdf](https://www.vdi.de/fileadmin/media/content/k/vdi-vw-tagung2006/Poster_Friedrichs_1.pdf); Zugriff am 08.02.2017.
- Vogel Business Media GmbH & Co.KG [2016] NXP und DAF Trucks automatisieren LKW, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/nxp-und-daf-trucks-automatisieren-lkw-a-529573/>; Zugriff am 11.02.2017.
- Volvo AB Beschreibung des Dynafleet - Services, [http://www.volvotrucks.com/trucks/dynafleet-help/de-de/Documents/Dynafleet-Service-Description\\_de-de.pdf](http://www.volvotrucks.com/trucks/dynafleet-help/de-de/Documents/Dynafleet-Service-Description_de-de.pdf); Zugriff am 11.02.2017.
- Volvo Group Trucks Central Europe GmbH Ausstattungspakete für den Volvo FH, <http://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/volvo-fh-series/specifications/equipment-packages.html>; Zugriff am 08.02.2017.
- WeltN24 GmbH [2016] Daimler Trucks Highway Pilot Connect, <https://www.welt.de/motor/news/article153535549/Daimler-Trucks-Highway-Pilot-Connect.html>; Zugriff am 06.02.2017.
- Wikimedia Foundation Inc. [2016a] Car2Car Communication, [https://de.wikipedia.org/wiki/Car2Car\\_Communication](https://de.wikipedia.org/wiki/Car2Car_Communication); Zugriff am 03.02.2017.
- Wikimedia Foundation Inc. [2016b] IEEE 802.11p, [https://de.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11p](https://de.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11p); Zugriff am 09.02.2017.
- Wikimedia Foundation Inc. [2016c] Platooning, <https://de.wikipedia.org/wiki/Platooning>; Zugriff am 03.02.2016.
- Winner et al. [2015] *Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.* (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015.

## Abkürzungsverzeichnis

A 1-2	Teilknotenpunkt mit einspuriger Ausfahrt und zweispuriger Hauptfahrbahn
ACC	Abstandsregelautomat (Englisch: Adapted Cruise Control)
CACC	Kooperativer Abstandsregelautomat (Englisch: Cooperative Adapted Cruise Control)
C2CC	Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation (Englisch: Car to Car Communication)
C2IC	Fahrzeug zu Infrastruktur Kommunikation (Englisch: Car to Infrastructure Communication)
C2XC	Fahrzeug zu X Kommunikation (Englisch: Car to X Communication), Überbegriff für C2CC und C2IC
COM	Component Object Model
E 1-2	Teilknotenpunkt mit einspuriger Einfahrt und zweispuriger Hauptfahrbahn
Kfz/h	Kraftfahrzeuge pro Stunde
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HMI	Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (Englisch: Human Machine Interface)
IEEE	Weltweiter Verbund von Ingenieuren aus den Bereichen Elektrotechnik und Informatik (Englisch: Institute of Electrical and Electronic Engineers)
LCDAS	Fahrstreifenwechselentscheidungsunterstützungssystem (Englisch: Lane Change Decision Aid System)
LDW	Fahrstreifenverlasswarnung (Englisch: Lane Departure Warning)
LIDAR	Optische Abstands- und Geschwindigkeitsmessung (Light Detection and Ranging)
LKS	Spurhalteassistent (Englisch: Lane Keeping Support)

Lkw	Lastkraftwagen
LRR	Fernradar (Englisch: Long Range RADAR)
Mrd.	Milliarden
Pkw	Personenkraftwagen
Pkw-E/h	Pkw-Einheiten pro Stunde
PM1	Vorwegfahrendes Platoonmitglied
PM2	Dem PM1 folgenden Platoonmitglied
RADAR	Funkortung und –abstandsmessung (Radio Detection and Ranging)
SRR	Kurzstreckenradar (Englisch: Short Range RADAR)
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
V2IC	Fahrzeug zu Infrastruktur Kommunikation (Englisch: Vehicle to Infrastructure Communication), Synonym für C2IC
V2VC	Fahrzeug zu Fahrzeug Kommunikation (Englisch: Vehicle to Vehicle Communication), Synonym für C2CC
WLAN	Drahtloses Netzwerk (Englisch: Wireless Local Area Network)

## Glossarium

Die folgenden Begriffserklärungen sind nicht allgemein gültig, sondern dienen lediglich dem besseren Verständnis dieser Masterarbeit

Elektronische Deichsel	Unter einer elektronischen Deichsel versteht man die elektronische und kommunikative Verbindung zwischen von in einer Kolonne fahrenden Fahrzeugen.
Folgefahrzeug	Ein Folgefahrzeug ist ein Fahrzeug innerhalb eines Platoons, das nicht das erste Fahrzeug ist. Dieses Fahrzeug wird vollautomatisch gesteuert.
Fremdes Fahrzeug	Ein Fahrzeug, das nicht ein Mitglied eines Platoons ist.
Führungsfahrzeug	Ein Führungsfahrzeug ist das erste Fahrzeug eines Platoons, das nicht vollautomatisch, sondern durch den Fahrer gesteuert wird.
Homogenes Platoon	Ein homogenes Platoon besteht ausschließlich aus Fahrzeugen des gleichen Typs wie zum Beispiel eine reine Pkw- oder Lkw-Kolonne.
Inhomogenes Mischplatoon	Im Gegensatz zum homogenen Platoon, besteht ein inhomogenes Mischplatoon aus unterschiedlichen Fahrzeugtypen, wie zum Beispiel ein Platoon, das sowohl Pkw-Platoonmitglieder als auch Lkw-Platoonmitglieder enthält.
Platoon	Ein Platoon ist eine Kolonne, bestehend aus mehreren Fahrzeugen, die durch das Kolonnenassistenzsystem miteinander elektronisch verbunden sind. Synonyme für diesen Begriff sind: (Lkw-)Kolonne und (Lkw-)Konvoi.
Platooning	Das Fahren in einer durch das Kolonnenassistenzsystem unterstützten Kolonne.
Platoonführer	Mit dem Begriff Platoonführer ist das Führungsfahrzeug eines Platoons samt seinem Fahrer gemeint.
Platoonmitglied	Ein Platoonmitglied ist ein Fahrzeug samt seinem Fahrer, das durch den Kolonnenassistenten mit anderen Fahrzeugen in einem Platoon verbunden ist. Ein Synonym ist Kolonnenkamerad.
Windschattenfahren	Unter Windschattenfahren versteht man das Fahren in einem Konvoi mit kleinen Abständen, um so die negative Wirkung des Fahrtwinds zu reduzieren.

## Symbolverzeichnis

$a$	$\left[ P_{kw} - \frac{E}{h} \right]$	Parameter des betrachteten Teilknotenpunkts nach HBS [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2015, S. A 4-34]
$C$	$[-]$	Gewünschtes Konfidenzintervall
$CC0$	$[m]$	Stillstandsabstand: Durchschnittlicher Stillstandsabstand zweier Fahrzeuge. (Es gibt keine Variationen) [PTV AG, 2015, S. 219]
$CC1$	$[s]$	Folgeabstand: Abstand in Sekunden, den ein Fahrer bei einer bestimmten Geschwindigkeit beibehalten möchte. [PTV AG, 2015, S. 219]
$C_{PE,E/A}$	$\left[ P_{kw} - \frac{E}{h} \right]$	Kapazität der Einfahrrampe (Einfahrt, Verflechtung) bzw. der Ausfahrrampe in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt
$C_{PE,O/U}$	$\left[ P_{kw} - \frac{E}{h} \right]$	Kapazität der Hauptfahrbahn oberhalb (Einfahrt, Verflechtung) bzw. der Hauptfahrbahn unterhalb (Ausfahrt) der Trennselbstspitze in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt
$d$	$[m]$	Distanz
$dx_{safe}$	$[m]$	Mittlerer Sicherheitsabstand zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen [PTV AG, 2015, S. 219]
$i$	$[-]$	Index für die Belastungsverhältnisse der Geraden 1 bis 6 in Abbildung 4.3
$n$	$[-]$	Anzahl der Simulationsläufe
$n_{E/A}$	$[-]$	Anzahl der Fahrstreifen in der Ausfahrt bzw. Einfahrt
$n_{HFB}$	$[-]$	Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn stromaufwärts von Einfahrten bzw. stromabwärts von Ausfahrten oder Verflechtungsstrecken
$p_i$	$[\%]$	Hilfsgröße: G1: 100 %, G2: 70 %, G3: 45 %, G4: 30 %, G5: 20 %, G6: 10 %
$p_{q,i}$	$[-]$	Belastungsverhältnis $q_{PE,E} / q_{PE,O}$ bzw. $q_{PE,A} / q_{PE,U}$ in Abhängigkeit vom betrachteten Teilknotenpunkt

$q_{i,PE,E/A}$	$\left[ P_{kw} - \frac{E}{h} \right]$	Verkehrsstärke auf der Rampe des Teilknotenpunkts in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis $i$
$q_{i,PE,H}$	$\left[ P_{kw} - \frac{E}{h} \right]$	Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis $i$
$s$	$[-]$	Standardabweichung
$t(\alpha, n - 1)$	$[-]$	Wert aus der Student-Verteilung für einen einseitigen Fehler
$v$	$\left[ \frac{m}{s} \right]$	Geschwindigkeit
$v_{krit}$	$\left[ \frac{km}{h} \right]$	Kritische Geschwindigkeit
$x$	$[-]$	Mittelwert
$x_i$	$[-]$	Variable, für die die Standardabweichung zu schätzen ist

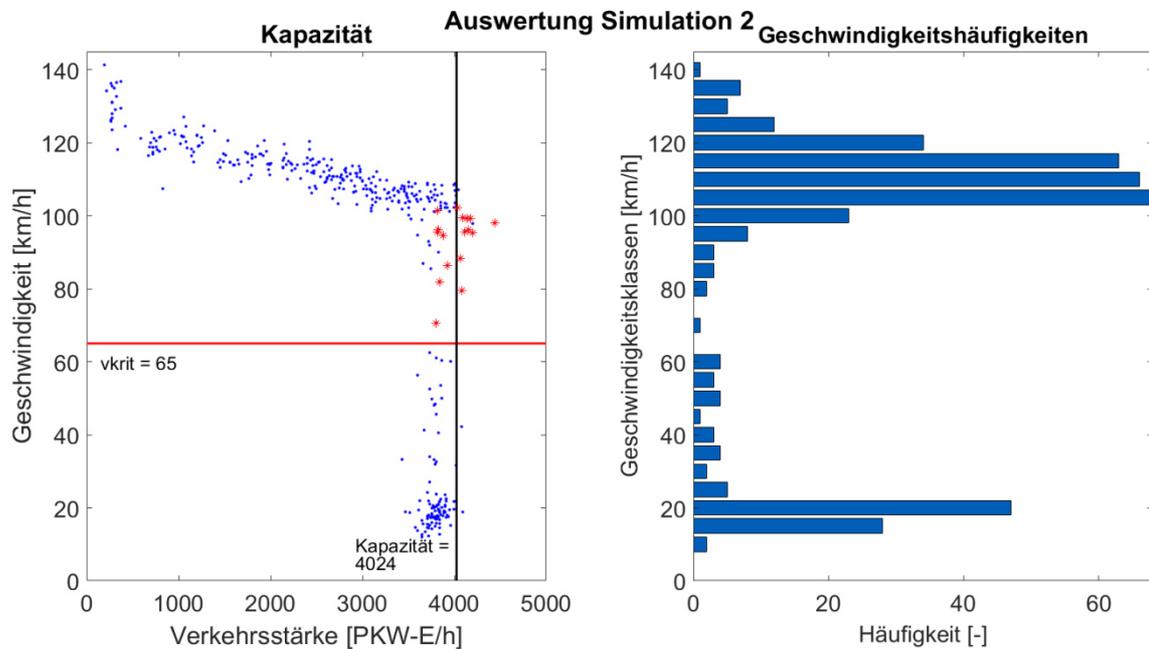
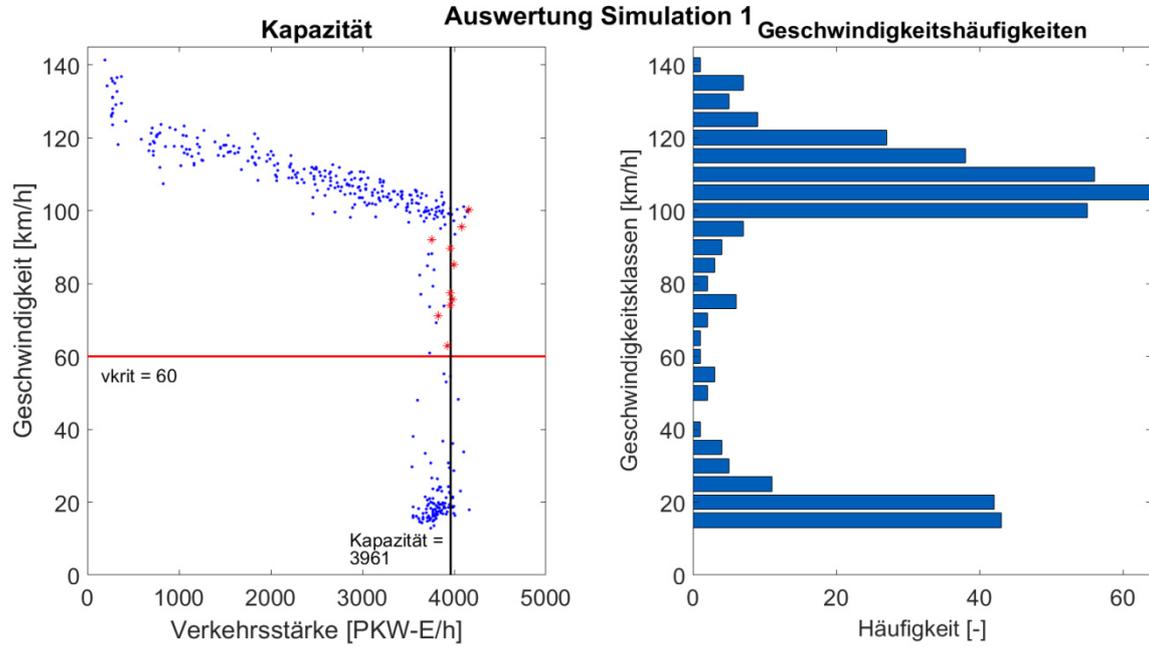
## Abbildungsverzeichnis

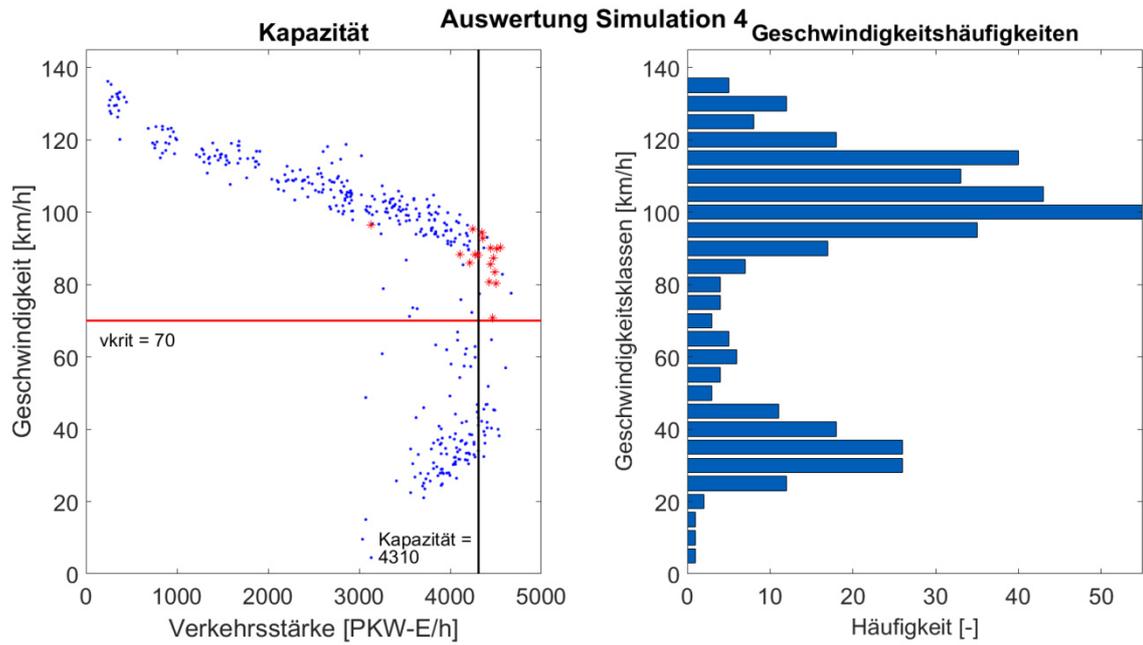
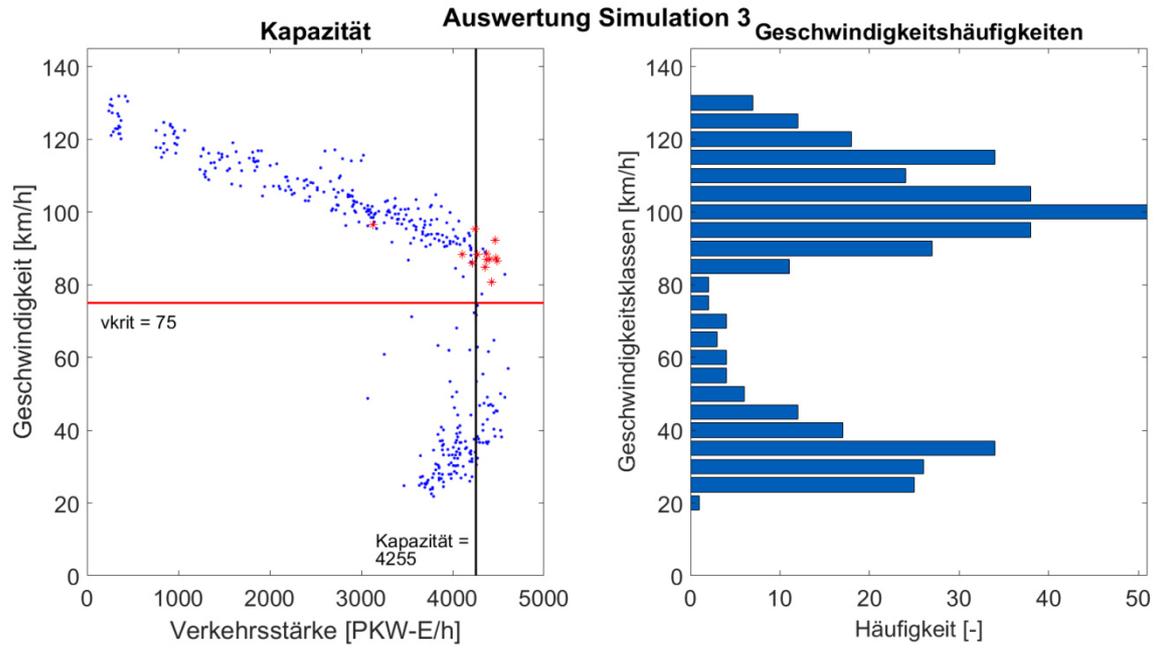
Abbildung 2.1: Evolution der Automatisierung und Vernetzung .....	5
Abbildung 2.2: Reaktionszeit im Platoon .....	6
Abbildung 2.3: Der Weg zum Projekt KONVOI .....	7
Abbildung 2.4: Inhomogenes Mischplatoon des Projekts SARTRE .....	8
Abbildung 2.5: Komponenten der Kolonnenassistenz.....	9
Abbildung 2.6: Bildübertragung des Verkehrsgeschehens vor dem Führungsfahrzeug .....	11
Abbildung 2.7: Bildübertragung und Folgeabstände im Platoon .....	11
Abbildung 2.8: Umgebungssensorik.....	13
Abbildung 2.9: Aus dem Projekt KONVOI stammende Lkw-Kolonne .....	14
Abbildung 3.1: Mittleres Platoonmitglied verlässt das Platoon .....	18
Abbildung 3.2: Fremdes Fahrzeug schert in Platoon ein.....	20
Abbildung 3.3: Platzeinsparung durch Platooning .....	22
Abbildung 4.1: Autobahneinfahrt .....	24
Abbildung 4.2: Autobahnausfahrt .....	24
Abbildung 4.3: Verkehrsstärkenverhältnisgeraden des Netzelements Einfahrt.....	26
Abbildung 4.4: Verkehrsnachfrageganglinie eines Simulationslaufs (rote Linie = Kapazität laut HBS)	29
Abbildung 4.5: Erstellen eines Platoons .....	32
Abbildung 4.6: Simulationsausschnitt von einem ins Netzelement einfahrenden Platoon .....	33
Abbildung 4.7: Ein Platoonführer verlässt das Netzelement.....	33
Abbildung 4.8: Simulationsausschnitt von einem Platoonführer, der das Netzelement verlässt .....	34
Abbildung 4.9: Ein Platoonmitglied fährt ab .....	34
Abbildung 4.10: Simulationsausschnitt von einem abfahrenden Platoonmitglied .....	35
Abbildung 4.11: Geschwindigkeitsanpassung im Platoon .....	36
Abbildung 4.12: Fremdes Fahrzeug im Platoon.....	37
Abbildung 4.13: Simulationsausschnitt eines Fahrzeugs zwischen zwei Platoonmitgliedern.....	37
Abbildung 4.14: Platoon im Einfahrtsbereich.....	39
Abbildung 4.15: Simulationsausschnitt eines einscherenden Fahrzeugs .....	40
Abbildung 4.16: Platoon im Ausfahrtsbereich .....	41
Abbildung 5.1: Auswertungsbeispiel der ersten Simulation .....	43
Abbildung 5.2: Kapazitäten im Vergleich .....	44
Abbildung 5.3: Kapazitätsverhältnis zum Normalverkehr .....	45
Abbildung 5.4: Simulationsausschnitt eines Platoons, das für einen Stau auf der Überholspur sorgt	46
Abbildung 7.1: Kraftstoffeinsparung im Platoon.....	49

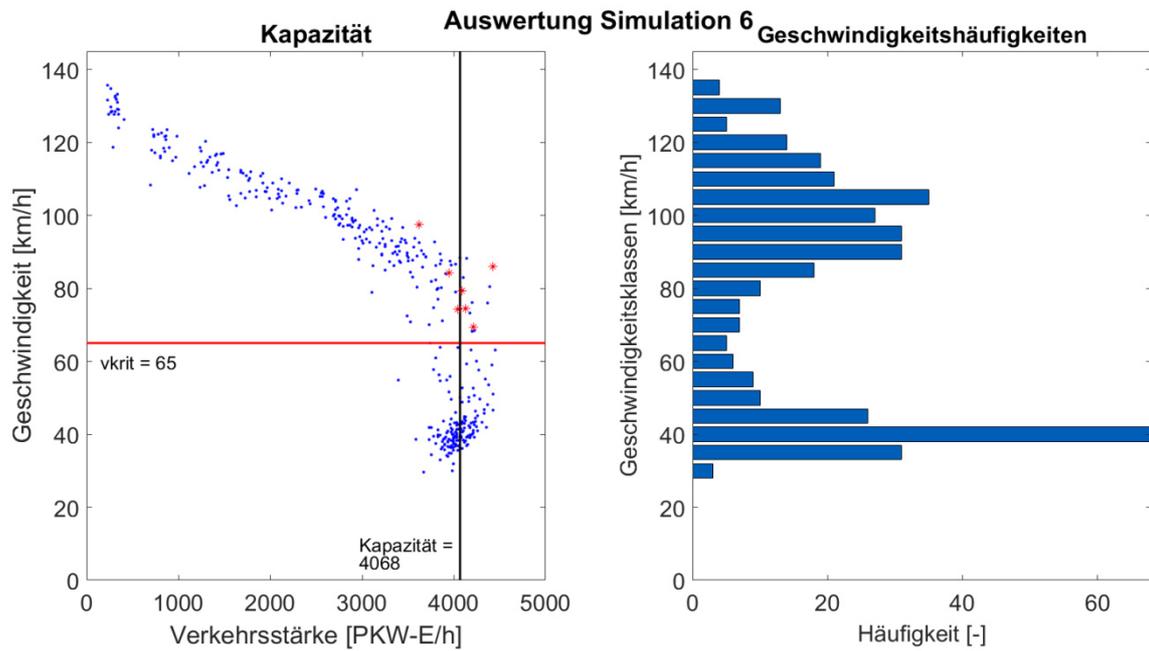
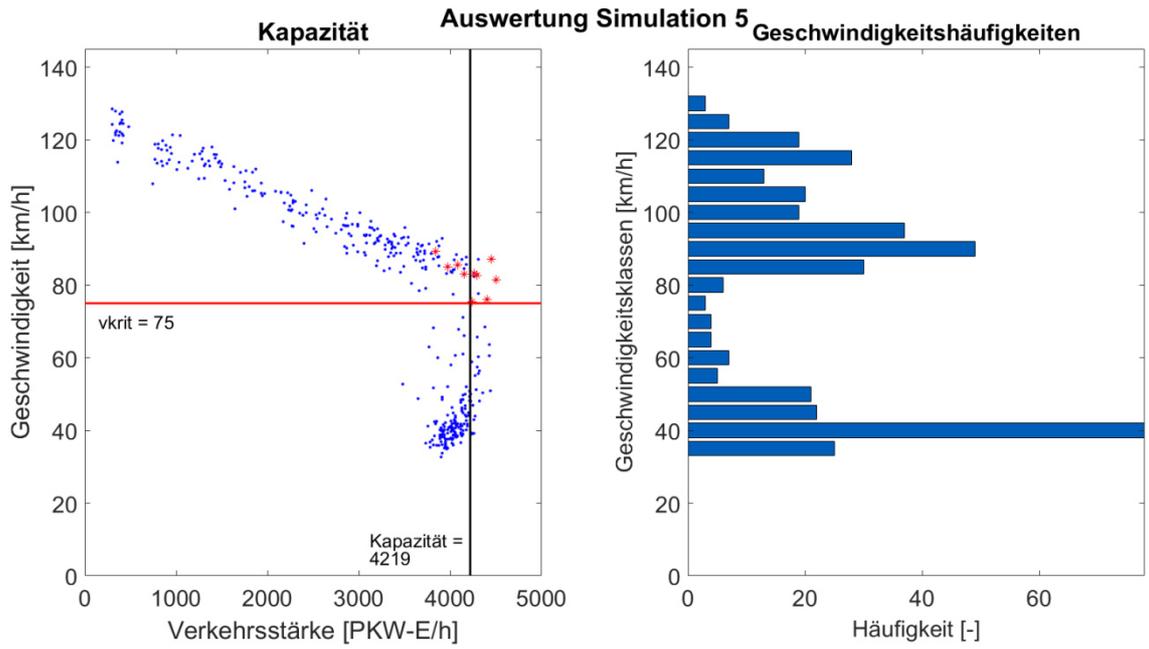
## **Tabellenverzeichnis**

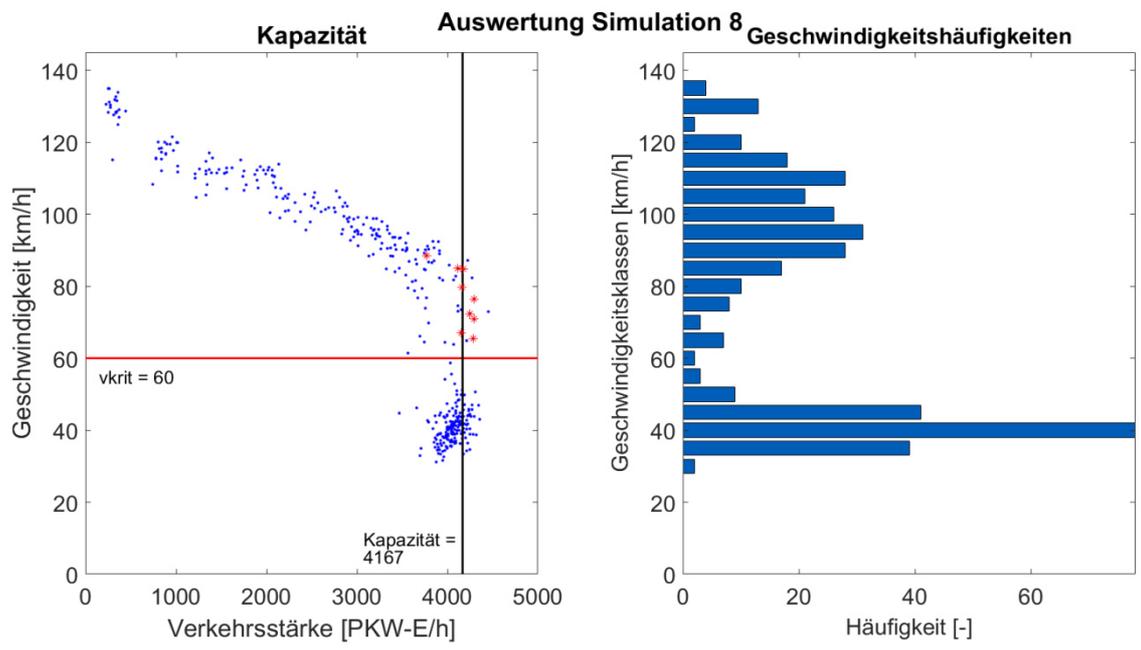
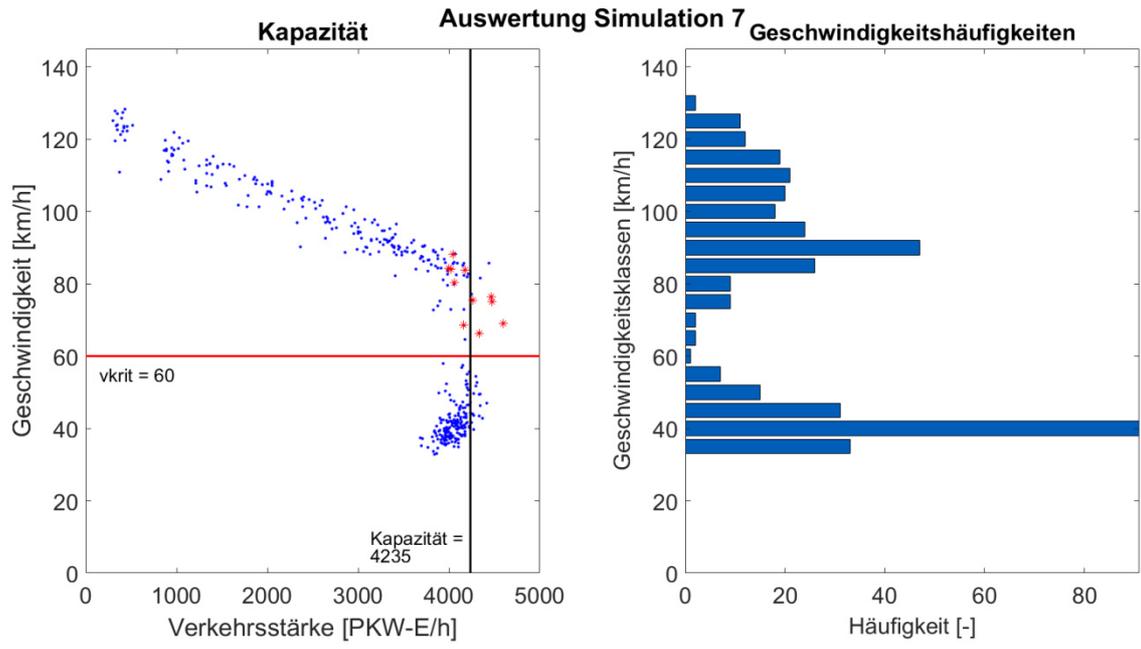
Tabelle 2.1: Kombination der Umfeldsensorik .....	12
Tabelle 4.1: Überblick über die durchgeführten Simulationen .....	23

## Anhang: Auswertungen der Simulationen









## **Erklärung zur Master's Thesis**

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen Quellen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Die Arbeit wurde noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt.

München, 24. März 2017

---

Frederik Reinhard Bachmann