

**Technische Universität München**

TUM School of Engineering and Design

**Kooperative Längsführung für Nutzfahrzeuge**

Jürgen Hauenstein, M.Sc.

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

**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Sonja Berensmeier

Prüfer\*innen der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp  
2. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Die Dissertation wurde am 15.05.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die TUM School of Engineering and Design am 11.10.2023 angenommen.



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand hauptsächlich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in Kooperation mit der MAN Truck & Bus SE in den Jahren 2017 bis 2021. Während dieser Zeit arbeitete ich im Verbund- und Forschungsprojekt Intelligente Manöver Automatisierung - kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit (IMAGinE) mit, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, vor allem für das Vertrauen sowie die Betreuung meiner Arbeit. Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr. phil. Klaus Bengler für das Zweitgutachten und bei Prof. Dr. rer. nat. Sonja Berensmeier für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein großer Dank gilt zudem meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, bei meinen Industriepartner MAN Truck & Bus SE und im Projekt IMAGinE für die gemeinsame Zeit, die Unterstützung und wichtige Anregungen für meine Arbeit. Insbesondere bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Frank Diermeyer, der mich als Mentor während der Dissertation besonders unterstützt hat. Zudem bedanke ich mich ausdrücklich bei Simon Hoffmann, Lasse Schölkopf und Jan Cedric Mertens für das Korrekturlesen meiner Dissertation.

Während meiner Dissertation arbeitete ich sehr eng mit Jan Cedric Mertens zusammen. Gemeinsam hatten wir Höhen und Tiefen auf unserem Weg zur Promotion. Für die moralische und fachliche Unterstützung während dieser gemeinsamen Zeit bedanke ich mich ganz herzlich.

Der letzte Dank geht an meine Familie für die Unterstützung über all die Jahre und somit der Ermöglichung dieser Arbeit.

Petershausen, im Mai 2023

Jürgen Hauenstein



# Inhaltsverzeichnis

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                         | <b>III</b> |
| <b>Formelzeichen.....</b>                                  | <b>V</b>   |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                  | <b>1</b>   |
| <b>1.1 Motivation.....</b>                                 | <b>1</b>   |
| <b>1.2 Aufbau der Arbeit .....</b>                         | <b>2</b>   |
| <b>2 Stand der Wissenschaft.....</b>                       | <b>3</b>   |
| <b>2.1 Energieeffizientes Fahren .....</b>                 | <b>3</b>   |
| 2.1.1 Einflussfaktoren Kraftstoffverbrauch .....           | 3          |
| 2.1.2 Theoretische Betrachtung.....                        | 5          |
| 2.1.3 Methoden.....                                        | 6          |
| <b>2.2 Automatisiertes und autonomes Fahren.....</b>       | <b>9</b>   |
| <b>2.3 Vehicle-to-Everything (V2X) Kommunikation .....</b> | <b>15</b>  |
| 2.3.1 Netzwerke.....                                       | 15         |
| 2.3.2 Nachrichten.....                                     | 16         |
| <b>2.4 Kooperatives Fahren.....</b>                        | <b>17</b>  |
| 2.4.1 Stufen der Kooperation .....                         | 18         |
| 2.4.2 Kooperative Warnsysteme.....                         | 18         |
| 2.4.3 Kooperative Signalanlagen .....                      | 20         |
| 2.4.4 Kollektive Perzeption .....                          | 20         |
| 2.4.5 Platooning.....                                      | 21         |
| 2.4.6 Kooperative Manöverabstimmung .....                  | 25         |
| <b>2.5 Fazit .....</b>                                     | <b>31</b>  |
| <b>3 Methode.....</b>                                      | <b>35</b>  |
| <b>3.1 Konzept .....</b>                                   | <b>35</b>  |
| <b>3.2 Planungsalgorithmus.....</b>                        | <b>38</b>  |
| 3.2.1 Berechnung strategische Trajektorie .....            | 39         |
| 3.2.2 Trajektorienberechnung .....                         | 42         |
| 3.2.3 Kollisionsüberprüfung .....                          | 43         |

|          |                                              |            |
|----------|----------------------------------------------|------------|
| 3.2.4    | Trajektorienbewertung .....                  | 43         |
| <b>4</b> | <b>Validierungsmethoden</b> .....            | <b>45</b>  |
| 4.1      | <b>Simulation</b> .....                      | <b>45</b>  |
| 4.2      | <b>Fahrzeug</b> .....                        | <b>48</b>  |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse</b> .....                      | <b>51</b>  |
| 5.1      | <b>Simulation</b> .....                      | <b>51</b>  |
| 5.1.1    | Kollektive Perzeption .....                  | 51         |
| 5.1.2    | Kooperative Manöverabstimmung .....          | 60         |
| 5.2      | <b>Validierung durch Fahrzeugtests</b> ..... | <b>65</b>  |
| 5.2.1    | Szenarien.....                               | 65         |
| 5.2.2    | Ergebnisse.....                              | 67         |
| 5.3      | <b>Kostenbetrachtung</b> .....               | <b>71</b>  |
| <b>6</b> | <b>Diskussion</b> .....                      | <b>75</b>  |
| 6.1      | <b>Systemausprägung</b> .....                | <b>75</b>  |
| 6.2      | <b>Systemgrenzen</b> .....                   | <b>77</b>  |
| 6.3      | <b>Realverkehr</b> .....                     | <b>79</b>  |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....    | <b>81</b>  |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....           | <b>i</b>   |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b> .....             | <b>v</b>   |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b> .....            | <b>vii</b> |
|          | <b>Vorveröffentlichungsliste</b> .....       | <b>xxv</b> |

# Abkürzungsverzeichnis

|         |                                                                                   |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| ABS     | Antiblockiersystem                                                                |
| ACC     | Adaptive Cruise Control                                                           |
| ADAC    | Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.                                        |
| BHI     | Bridge Height Inform                                                              |
| BSM     | Basic Safety Message                                                              |
| BSW     | Blind Spot Warning                                                                |
| CACC    | Cooperative Adaptive Cruise Control                                               |
| CAM     | Cooperative Awareness Message                                                     |
| CFD     | Computational Fluid Dynamics                                                      |
| CMP     | Collaborative Maneuver Protocol                                                   |
| CPM     | Collective Perception Message                                                     |
| CSW     | Curve Speed Warning                                                               |
| DCC     | Decentralized Congestion Control                                                  |
| DENM    | Decentralized Environmental Notification Message                                  |
| DP      | Dynamic Programming                                                               |
| DSRC    | Dedicated Short Range Communication                                               |
| EEBL    | Emergency Electronic Brake Light                                                  |
| FCW     | Forward Collision Warning                                                         |
| GPS     | Global Positioning System                                                         |
| IMA     | Intersection Movement Assist                                                      |
| IMAGinE | Intelligente Manöver Automatisierung - kooperative Gefahrenvermeidung in Echtzeit |
| IMU     | Inertial Measurement Unit                                                         |
| LCW     | Lane Change Warning                                                               |
| Lkw     | Lastkraftwagen                                                                    |
| MABX    | Microautobox                                                                      |
| MCM     | Maneuver Coordination Message                                                     |
| MPC     | Model Predictive Control                                                          |
| NHTSA   | National Highway Traffic Safety Administration                                    |
| PID     | Proportional Integral Derivative                                                  |

|       |                                          |
|-------|------------------------------------------|
| Pkw   | Personenkraftwagen                       |
| PMP   | Pontryagin's Minimum Principle           |
| PnG   | Puls and Glide                           |
| ROS   | Robot Operating System                   |
| RosIF | ROS Interface                            |
| RSU   | Road Side Unit                           |
| RTK   | Real Time Kinematic                      |
| SPaT  | Signal Phase and Timing                  |
| SQP   | Sequential Quadratic Programming         |
| STRP  | Space-Time Reservation Procedure         |
| StVO  | Straßenverkehrs-Ordnung                  |
| StVZO | Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung       |
| TCO   | Total Cost of Ownership                  |
| VDA   | Verband der Automobilindustrie           |
| V2I   | Vehicle-to-Infrastructure                |
| V2V   | Vehicle-to-Vehicle                       |
| V2X   | Vehicle-to-Everything                    |
| WAVE  | Wireless Access in Vehicular Environment |
| WLAN  | Wireless Local Area Network              |



# Formelzeichen

| Formelzeichen          | Einheit          | Beschreibung                                 |
|------------------------|------------------|----------------------------------------------|
| $a$                    | m/s <sup>2</sup> | Beschleunigung                               |
| $A_f$                  | m <sup>2</sup>   | Stirnfläche des Fahrzeuges                   |
| $Bonus_{cooperation}$  | -                | Bonus bzw. Faktor für Kooperation            |
| $c_d$                  | -                | Luftwiderstandsbeiwert                       |
| $c_r$                  | -                | Rollwiderstandsbeiwert                       |
| $Cost_{compare}$       | -                | Trajektorienkosten für Vergleich             |
| $Cost_{cooperation}$   | -                | Trajektorienkosten mit Kooperation           |
| $Cost_{drivingAction}$ | -                | Kosten für Fahraktion                        |
| $Cost_{efficient}$     | -                | Trajektorienkosten für Effizienz             |
| $Cost_{ego}$           | -                | Trajektorienkosten für Ego-Fahrzeug          |
| $d$                    | m                | Abstand                                      |
| $d_s$                  | m                | Sicherheitsabstand                           |
| $F_a$                  | N                | Luftwiderstandskraft                         |
| $F_{dr}$               | N                | Antriebskraft                                |
| $F_g$                  | N                | Steigungswiderstandskraft                    |
| $F_r$                  | N                | Rollwiderstandskraft                         |
| $g$                    | m/s <sup>2</sup> | Erdbeschleunigung                            |
| $J$                    | -                | Kostenfunktional                             |
| $L$                    | -                | Laufende Kosten                              |
| $m$                    | kg               | Masse des Fahrzeuges                         |
| $n$                    | -                | Anzahl Abtastpunkte Trajektorie              |
| $n_{collisionDesire}$  | -                | Anzahl an Kollisionen mit Wunschtrajektorien |
| $O$                    | -                | Ordnung                                      |
| $t$                    | s                | Zeit                                         |

## Inhaltsverzeichnis

---

| Formelzeichen                  | Einheit           | Beschreibung                                                  |
|--------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------|
| $t_f$                          | s                 | Endzeit                                                       |
| $\mathbf{u}$                   | -                 | Stellgrößen                                                   |
| $v$                            | m/s               | Geschwindigkeit                                               |
| $v_{\max}$                     | m/s               | Maximale Geschwindigkeit, Höchstgeschwindigkeit               |
| $v_{\min}$                     | m/s               | Minimale Geschwindigkeit                                      |
| $v_{\text{strategy}}$          | m/s               | Geschwindigkeit der strategischen Trajektorie                 |
| $v_{\text{trajectory}}$        | m/s               | Geschwindigkeit der Trajektorie                               |
| $w_{\text{compare}}$           | -                 | Gewichtungsfaktor für Vergleichskosten                        |
| $w_{\text{efficient}}$         | -                 | Gewichtungsfaktor für Effizienzkosten                         |
| $x$                            | m                 | Weg x-Richtung, UTM-Koordinate                                |
| $\mathbf{x}$                   | -                 | Fahrzeugzustand                                               |
| $x_f$                          | -                 | Endzustand                                                    |
| $x_i$                          | -                 | Zustand                                                       |
| $x_{\text{offset}}$            | m                 | Offset UTM-Koordinate                                         |
| $\alpha$                       | rad, °            | Steigung der Straße                                           |
| $\Delta v_{\text{compareMax}}$ | m/s               | Maximale Geschwindigkeitsdifferenz beim Trajektorienvergleich |
| $\rho_a$                       | kg/m <sup>3</sup> | Luftdichte                                                    |
| $\Phi$                         | -                 | Endkosten                                                     |

# 1 Einleitung

Nutzfahrzeuge, insbesondere Lastkraftwagen (Lkw), sind ein fester Bestandteil des täglichen Straßenverkehrs. Laut Statistischem Bundesamt [1, S. 92] beträgt zum 01.01.2021 ihr Anteil in Deutschland 9,8 %. Lkw übernehmen wichtige Aufgaben für die Gesellschaft, indem sie Güter wie beispielsweise Lebensmittel transportieren und damit unsere Grundversorgung sicherstellen. In einer vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur beauftragten Studie [2, S. 57] beträgt der Anteil von im Straßenverkehr beförderten Güter in Deutschland, gemessen an der Transportleistung auf dem Land transportierten Güter, im Jahr 2020 72,5 %. Laut Prognose der Studie wird der Anteil bis 2024 auf 72,7 % steigen.

Lkw werden dabei in der Regel von Speditionen bzw. Unternehmen eingesetzt, die nach dem erwerbswirtschaftlichen Prinzip arbeiten. Nach diesem Prinzip ist das oberste Unternehmensziel die Maximierung des Gewinns [3, S. 564-565]. Um den Gewinn zu steigern, ist es wichtig zu verstehen, welche Kosten Speditionsunternehmen belasten und wie diese gesenkt werden können.

## 1.1 Motivation

Abbildung 1.1 zeigt die Kostenanteile an den Total Cost of Ownership (TCO) für Speditionen im Fernverkehr [4]. Die TCO bezeichnet die Gesamtkosten, die während der Produktlebensdauer für den Unternehmer entstehen. Der Anteil der Kraftstoffkosten schwankt jedoch je nach Studie, beispielsweise beziffern Esch und Dahlhaus [5, S. 404] den Anteil der Kraftstoffkosten mit 30 % und Nowak et al. [6] den Kraftstoffkostenanteil mit 41 %. Alle Quellen zeigen jedoch, dass die Kosten für Kraftstoff ein wesentlicher Kostenfaktor im Fernverkehr sind.

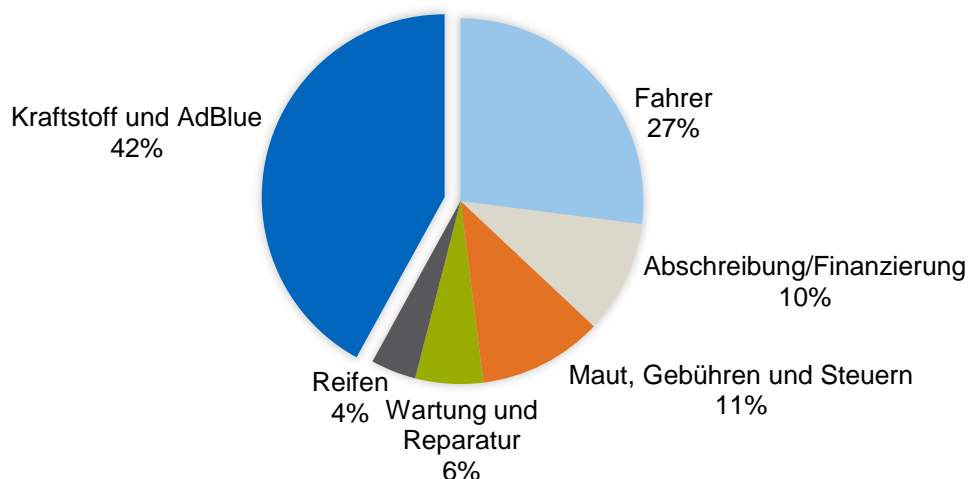


Abbildung 1.1: Total Cost of Ownership von Speditionen im Fernverkehr [4]

Eine Verringerung des Kraftstoffverbrauches erhöht die Wirtschaftlichkeit von Speditionsunternehmen. Nutzfahrzeughersteller sind daher bemüht, energieeffiziente Fahrzeuge zu entwickeln, um den Anforderungen der Speditionen nachzukommen. Um die Kraftstoffkosten zu senken, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ein Ansatz ist das Nutzen von Vehicle-to-Everything (V2X) Kommunikation und damit die Realisierung von Platooning. V2X bezeichnet die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturelementen [7, S. 526]. Platooning hingegen bezeichnet das Fahren in Kolonnen mit verringertem Sicherheitsabstand [8]. Durch die Verringerung des Abstandes wird der Luftwiderstand gesenkt und folglich muss weniger Kraftstoff für die Fortbewegung eingesetzt werden [9]. Um die Sicherheit beim Fahren dennoch zu gewährleisten, werden zusätzliche Informationen über V2X zwischen den beteiligten Fahrzeugen ausgetauscht [10]. Hierdurch ist es u. a. möglich die Reaktionszeit beim Bremsen zu verringern. Beim Platooning müssen mindestens zwei Fahrzeuge miteinander kooperieren, somit stellt Platooning eine Möglichkeit des kooperativen Fahrens dar. In einem Forschungsprojekt zwischen DB Schenker, MAN Truck & Bus SE und der Hochschule Fresenius konnte gezeigt werden, dass diese Technik mit zwei Fahrzeugen im Speditionsalltag praktikabel ist und das beim Folgefahrzeug 3 bis 4 % Kraftstoff eingespart werden kann [11]. Nach Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) §4 [12] müssen Lkw auf deutschen Autobahnen, ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h, mindestens 50 m Abstand halten und dürfen folglich nicht im Platoon fahren. Somit kann die Technik im Speditionsalltag aktuell nicht ohne Sondergenehmigung eingesetzt werden. Zudem sind identische Fahrzeuge mit gleichem System notwendig. Dennoch hat das Projekt gezeigt, dass die Nutzung von V2X im Fernverkehr zur Senkung des Kraftstoffverbrauches beitragen kann. Daher beschäftigt sich diese Arbeit mit weiteren Möglichkeiten, wie V2X bzw. kooperatives Fahren im Fernverkehr eingesetzt werden kann, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 beschäftigt sich mit dem Stand der Wissenschaft. Hier werden zunächst energieeffizientes und automatisiertes Fahren ohne V2X näher betrachtet. Anschließend wird auf V2X und kooperatives Fahren eingegangen. Zudem wird in diesem Kapitel die Forschungslücke und somit die Forschungsfragen erarbeitet. Kapitel 3 stellt die im Rahmen der Dissertation entwickelte Methode und somit das entwickelte Konzept dar. Die Validierungsmethoden für das Konzept und den Forschungsfragen werden in Kapitel 4 vorgestellt. Die Methoden umfassen sowohl Simulationen als auch Untersuchungen mit realen Versuchsträgern. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Forschungsfragen werden in Kapitel 5 dargestellt und im Anschluss in Kapitel 6 diskutiert. Zum Abschluss wird eine Zusammenfassung und ein Ausblick über mögliche weitere Arbeiten in Kapitel 7 gegeben.

## 2 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Wissenschaft, für die in dieser Arbeit relevanten Themenfelder, dargestellt. Die Themenfelder umfassen das energieeffiziente und automatisiertes Fahren, sowie V2X und kooperatives Fahren.

### 2.1 Energieeffizientes Fahren

In diesen Abschnitt werden zunächst die Einflussfaktoren für den Kraftstoffverbrauch vorgestellt und daraus die Möglichkeiten für die Einflussnahme abgeleitet. Im Anschluss erfolgt eine theoretische Betrachtung des energieeffizienten Fahrens. Der Abschnitt wird mit der Vorstellung von relevanten Methoden abgeschlossen.

#### 2.1.1 Einflussfaktoren Kraftstoffverbrauch

Zhou et al. [13] und Fafoutellis et al. [14] geben ein Überblick über verschiedene Faktoren, die den Kraftstoffverbrauch beeinflussen. Die Faktoren können in drei Gruppen eingeteilt werden. Abbildung 2.1 zeigt die Gruppen und die Faktoren.

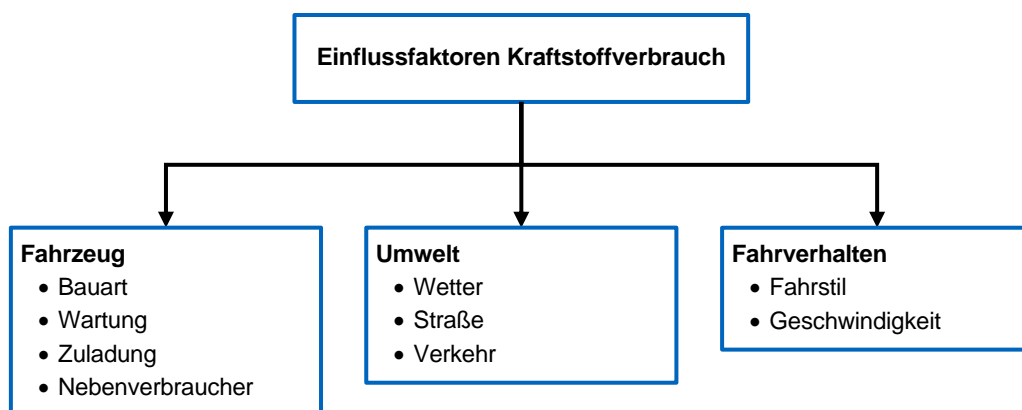


Abbildung 2.1: Einflussfaktoren Kraftstoffverbrauch

Die erste Gruppe umfasst Faktoren, die das Fahrzeug betreffen. Der Grundverbrauch ist durch die Bauart bzw. Konstruktion des Fahrzeuges vorgegeben, z. B. wird der Luftwiderstand durch den Fahrzeugtyp weitgehend bestimmt [15, S. 55]. Lkw haben in der Regel eine schlechtere Aerodynamik als Personenkraftwagen (Pkw), dadurch müssen Lkw mehr Energie aufwenden, um den Luftwiderstand zu überwinden. Der Luftwiderstand ist nur eine Ursache für Energieverluste im Fahrzeug. Süßmann [16, S. 7-11] beschreibt, wie Antriebsstrangverluste entstehen und

dadurch ausgehend von der zugeführten chemischen Energie des Kraftstoffes weniger mechanische Energie zur Fortbewegung des Fahrzeuges zur Verfügung steht. Dabei hat neben dem Motor auch das Getriebe einen wesentlichen Einfluss auf den Verbrauch. Je nach Einsatzzweck werden verschiedene Getriebe mit unterschiedlichen Übersetzungsverhältnissen verwendet [17, S. 549]. Um den Kraftstoffverbrauch zu senken, werden zum Teil Overdrive-Getriebe eingesetzt. Bei Overdrive-Getriebe besitzt der höchste Gang ein Übersetzungsverhältnis kleiner eins, hierdurch ist es möglich die Motordrehzahl abzusenken [18, S. 208]. Ebenfalls hat der Wartungszustand, z. B. der richtige Reifendruck, einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Mit zu geringem Reifendruck nimmt der Rollwiderstand zu [19, S. 58] und folglich auch der Energieverbrauch. Darüber hinaus beeinflusst die Zuladung den Kraftstoffverbrauch [20]. Bei Lkw ist der Transport von Ladung die Kernaufgabe, weshalb die Einflussmöglichkeit hierauf begrenzt ist. Der letzte Einflussfaktor für den Kraftstoffverbrauch, in der Gruppe Fahrzeug, sind die Nebenverbraucher, z. B. Klimaanlage oder die Motorkühlung. Die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher können kurzzeitig großen Schwankungen unterliegen, langfristig haben diese jedoch gegenüber anderen Verlustfaktoren im Antriebsstrang eine untergeordnete Rolle [16, S. 8]. Zudem sind auch hier die Beeinflussungsmöglichkeiten gering. Beispielsweise dient die Klimaanlage dem Wohlbefinden des Fahrers, weshalb auf diese nicht verzichtet werden sollte.

Neben den Faktoren die das Fahrzeug betreffen, hat die Umwelt einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Walnum und Simonsen [20] zeigen, dass im Winter Lkw mehr Kraftstoff verbrauchen. Gründe hierfür können zum einem ein erhöhter Energiebedarf der Nebenverbraucher sein, aber auch, erhöhte Fahrwiderstände, z. B. durch eine schlechtere Straßenbeschaffenheit. Ein weiterer großer Einflussfaktor ist die Topologie der Straße. Auf Grund der hohen Masse von Nutzfahrzeugen hat vor allem das Höhenprofil einen Einfluss, aber auch Kurven können durch die notwendige Verminderung der Geschwindigkeit und des vergrößerten Rollwiderstandes in Kurven den Kraftstoffverbrauch negativ beeinflussen. Zürn [21] beziffert den Einfluss der Topologie auf 30 % gegenüber dem fahrzeugseitigen Grundverbrauch. Darüber hinaus können andere Verkehrsteilnehmer zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauches führen [21]. Die Einflussnahme durch Fahrer oder Assistenzsysteme auf diese Faktoren ist gering. Die Straße kann nur durch eine veränderte Routenwahl beeinflusst werden. In der Literatur wird die Wahl einer energieeffizienten Route auch als Eco-Routing bezeichnet [22, S. 3-5]. Allerdings sind meist die Fahrziele und ggf. Zwischenstationen durch den Fahrauftrag vorgegeben, zudem sind nicht alle Straßen für Lkw geeignet bzw. freigegeben. Auf Verkehr und Wetter kann nur durch veränderte Fahrzeiten Einfluss genommen werden, jedoch sind auch hier durch den Auftrag bzw. die Transportaufgabe Grenzen gesetzt.

Während die Faktoren in den Gruppen Fahrzeug und Umwelt nur beschränkt änderbar sind, kann das Fahrverhalten vom Fahrer aktiv beeinflusst werden. Zum einem kann der Kraftstoffverbrauch durch die gewählte Fahrgeschwindigkeit beeinflusst werden. Lkw müssen laut Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) §57c [23] einen Geschwindigkeitsbegrenzer besitzen. Dieser ist einschließlich Toleranzen auf 90 km/h einzustellen, weshalb diese Geschwindigkeit eine obere Grenze darstellt. Auf der anderen Seite darf nach StVO §3 [12] der Verkehrsfluss nicht unnötig, durch langsames Fahren, behindert werden. Das bedeutet, dass nicht ohne zwingenden Grund unnötig langsam gefahren werden darf, wenn dabei andere Verkehrsteilnehmer behindert werden. Auf Autobahnen gilt nach StVO §18 [12] eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h für Lkw. Eine Auswertung des HighD-Datensatzes [24] von Mertens et al. [25] zeigt aber, dass 89 % der Lkw-Fahrer die erlaubte Höchstgeschwindigkeit, in den aufgezeichneten Straßenabschnitten, überschritten haben. Demzufolge ist eine Reduzierung der Geschwindigkeit auf die erlaubte Höchstgeschwindigkeit möglich, um Kraftstoff

einzusparen. Eine Reduzierung der Geschwindigkeit von 89 auf 80 km/h vermindert den Kraftstoffverbrauch um 10 % [21]. Neben der Geschwindigkeit hat der Fahrstil eine Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch, z. B. kann durch Rollmanöver oder angepasste Beschleunigungsvorgänge der Verbrauch gesenkt werden [20]. Aus diesem Grund werden Fahrerschulungen angeboten, bei denen energieeffizientes Fahren geschult wird. Laut Bericht des International Council on Clean Transportation [26] konnte bei Fahrerschulungen in Peru der Kraftstoffverbrauch im Durchschnitt um 7 % gesenkt werden. Allerdings fallen die Fahrer mit der Zeit wieder in ihre alten Verhaltensmuster zurück und der Effekt der Kraftstoffeinsparung verringert sich [20, 27, 28]. Eine Möglichkeit, um eine langfristige Reduktion des Kraftstoffverbrauches zu erreichen, ist der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen, die die Längsführung übernehmen und eine energieeffiziente Fahrweise umsetzen. Mit Hilfe von Straßenkarten und satellitengestützte Ortungssystemen, z. B. Global Positioning System (GPS), wird energieeffizientes Fahren ermöglicht. Auf Grund des Ortungssystem werden diese Systeme auch als GPS-Tempomaten bezeichnet und unter verschiedene Markennamen vertrieben. Viele Lkw-Hersteller, insbesondere in Europa, bieten solche Systeme an, z. B. EfficientCruise von MAN Truck & Bus [29], Predictive Powertrain Control von Daimler [30], Opticruise von Scania [31], I-See Volvo [32], Optivision von Renault Trucks [33], Predictive Cruise Control von DAF Trucks [34] oder HI-CRUISE von IVECO Magirus [4]. Darüber hinaus werden mittlerweile diese Systeme auch im Pkw eingesetzt, z. B. Route-Ahead Assist von BMW [35] oder Predictive Efficiency Assist von Audi [36]. Nordström [31] beziffert die Kraftstoffeinsparung mit Opticruise von Scania auf 4 bis 5 %. Allerdings, im Gegensatz zu den Fahrerschulungen, ohne den Effekt, dass der Verbrauch über die Zeit wieder steigt.

### 2.1.2 Theoretische Betrachtung

In der Literatur wird energieeffizientes Fahren auch als Eco-Driving oder Look-Ahead Control bezeichnet [22, 37] und kann als ein Optimierungsproblem beschrieben werden [22, 38–40]. Ziel ist, eine vorgegebene Strecke mit möglichst wenig Energieverbrauch und in möglichst geringer Zeit zurückzulegen, oder über einen definierten Zeithorizont möglichst viel Strecke zurückzulegen und dabei möglichst wenig Kraftstoff zu verbrauchen. Daraus folgt die Kostenfunktion  $J$ , welche minimiert werden muss [22]:

$$J = \Phi(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_0^{t_f} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (2.1)$$

$\Phi$  sind die Endkosten,  $L$  die laufenden Kosten,  $\mathbf{x}(t)$  die abzufahrende Trajektorie bzw. der Fahrzeugzustand,  $\mathbf{u}(t)$  die Stellgrößen,  $t_f$  die Endzeit und  $t$  die Zeit. Die Endkosten beinhalten vor allem die zurückgelegte Strecke in der gegebenen Zeit. Die laufenden Kosten beschreiben vor allem die Kraftstoffkosten und somit den Energieeinsatz. Der Energieeinsatz hängt von den Fahrwiderständen ab, die in unterschiedlichem Detailgrad beschrieben werden können. Ausführliche Beschreibungen finden sich in [15, 41, 42]. Ohne die Berücksichtigung von Trägheitskräften durch rotierende Massen, wie beispielsweise Rädern, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$F_{dr} - F_r - F_a - F_g = ma = m\ddot{x} \quad (2.2)$$

mit

$$F_r = c_r mg \cos \alpha \quad (2.3)$$

$$F_a = \frac{1}{2} c_d A_f \rho_a v^2 \quad (2.4)$$

$$F_g = mg \sin \alpha \quad (2.5)$$

$F_{dr}$  bezeichnet die Antriebskraft,  $F_r$  den Rollwiderstand,  $F_a$  den Luftwiderstand,  $F_g$  den Steigungswiderstand,  $m$  die Masse,  $a$  die Beschleunigung,  $x$  die Längskoordinate,  $g$  die Erdbeschleunigung,  $\alpha$  die Steigung der Straße,  $c_r$  den Rollwiderstandsbeiwert,  $c_d$  den Luftwiderstandsbeiwert,  $A_f$  die Stirnfläche des Fahrzeuges,  $\rho_a$  die Luftdichte und  $v$  die Geschwindigkeit.

Bei konstanter Fahrt ergibt sich:

$$F_{dr} = F_r + F_a + F_g = c_r mg \cos \alpha + \frac{1}{2} c_d A_f \rho_a v^2 + mg \sin \alpha \quad (2.6)$$

$F_{dr}$  ist nicht gleichbedeutend mit dem Kraftstoffverbrauch, weil die Verluste von Motor und Getriebe nicht berücksichtigt werden. Allerdings wird aus Gl. (2.6) ersichtlich, dass ohne Berücksichtigung des Endzustandes durch die Endkosten  $\phi$  das Optimierungsproblem eine Geschwindigkeit nahe null ergibt, weil  $F_{dr}$  durch  $F_a$  von der Geschwindigkeit abhängig ist und je niedriger die Geschwindigkeit ist, desto kleiner ist  $F_a$  und somit  $F_{dr}$ . Eine Geschwindigkeit nahe null verstößt bei Verkehr gegen die StVO §1 [12], denn das Gesetz besagt, dass andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr als vermeidbar behindert werden dürfen. Zudem entstehen durch verlängerte Fahrzeiten bei nicht autonomen bzw. automatisierten Fahrzeugen erhöhte Kosten für Speditionen, weil der Fahrer länger bezahlt werden muss. Als obere Grenze für die Geschwindigkeit dient die gesetzlich erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf den Straßenabschnitt. Für Lkw über 3,5 t auf deutschen Autobahnen ist dies 80 km/h [12].

### 2.1.3 Methoden

Das Optimierungsproblem lässt sich mit verschiedenen Methoden lösen. Dabei wird auf Grund der begrenzten Rechenkapazität in der Regel nicht über die gesamte Strecke optimiert, sondern nur über einen bestimmten Horizont. Abbildung 2.2 zeigt die Lösungsmöglichkeiten für das Optimierungsproblem.

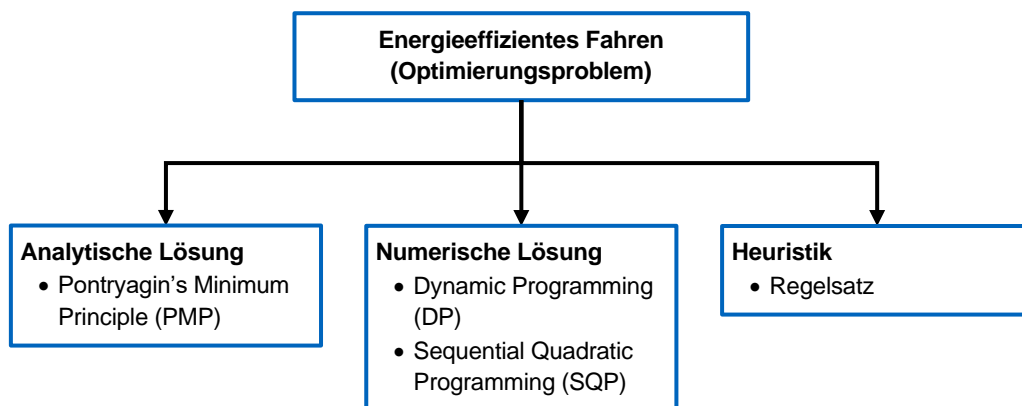


Abbildung 2.2: Übersicht über Lösungsmöglichkeiten für das energieeffiziente Fahren

Für einfache Problemstellungen kann eine analytische Lösung gefunden werden. Häufig wird dabei vorausgesetzt, dass die Topologie der Straße keine Steigungen besitzt. Zudem wird das



Fahrzeugmodell meist stark vereinfacht, z. B. werden Schaltvorgänge vernachlässigt. Bei Anwendung des Pontryagin's Minimum Principle (PMP) für Stecken mit konstanter Steigung und der Antriebsart Verbrennungsmotor ergeben sich zunächst vier mögliche optimale Fahrmanöver: Beschleunigen, Geschwindigkeit halten, Ausrollen und Bremsen. Aus diesen einzelnen Fahrmanövern setzt sich anschließend das optimale Geschwindigkeitsprofil zusammen [38]. Bei einer ebenen Strecke ohne Änderung der maximal zulässigen Geschwindigkeit ist die Lösung ein Sägezahnprofil als Geschwindigkeitsverlauf [22, S. 159-160]. Abbildung 2.3 zeigt schematisch ein Sägezahnprofil. Ein Zyklus beginnt mit einem Ausrollmanöver bei der Maximalgeschwindigkeit  $v_{\max}$ , dies entspricht in der Regel der erlaubten Höchstgeschwindigkeit und endet bei der minimalen Geschwindigkeit  $v_{\min}$ . Die minimale Geschwindigkeit ist eine festgelegte untere Grenze und verhindert u. a. inakzeptables langsames Fahren. Im Anschluss wird im verbrauchsoptimalen Betriebspunkt wieder bis zur maximal zulässigen Geschwindigkeit beschleunigt und schließt damit den Zyklus ab. Der Zyklus startet anschließend mit einem Rollmanöver neu. Dieses Verhalten wird auch als Puls and Glide (PnG) bezeichnet und wird bereits in Serienfahrzeugen eingesetzt. Laut Scania [43] kann bei ebenen Streckenverläufen 0,5 % Kraftstoff eingespart werden.

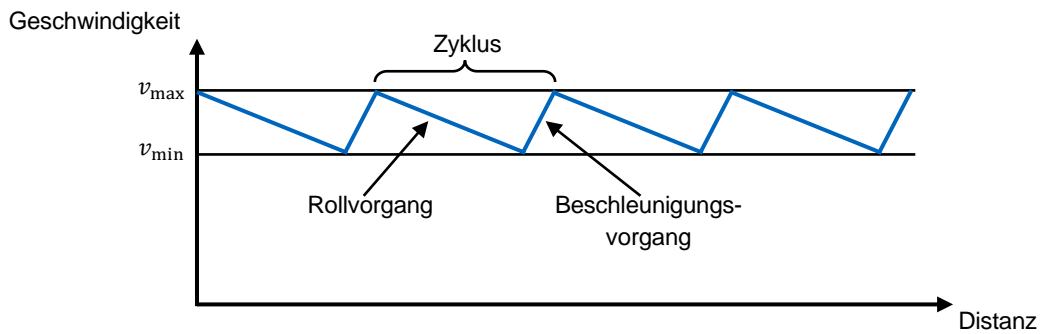


Abbildung 2.3: Veranschaulichung von Puls and Glide anhand eines Geschwindigkeitsprofils

Für reale Streckenverläufe existiert häufig keine analytische Lösung. Um dennoch das Optimierungsproblem zu lösen, können numerische Lösungsverfahren eingesetzt werden. Khalik et al. [44] setzen Sequential Quadratic Programming (SQP) als Lösungsmethode ein. In vielen anderen Arbeiten hingegen wird Dynamic Programming (DP) eingesetzt, z. B. Hellström [37] oder Radke [40]. DP beruht auf dem Bellman'sche Optimalitätsprinzip, dazu wird das Optimierungsproblem in Teilprobleme zerlegt. Aus diesem Grund ist für kontinuierliche Systeme, wie z. B. das energieeffiziente Fahren, zunächst eine Diskretisierung notwendig. Abbildung 2.4 zeigt einen diskretisierten Zustandsraum mit einem festen Anfangs- und Endzustand, an dem die Funktionsweise gezeigt wird. Ziel ist es den günstigsten Pfad zwischen Zustand  $x_0$  und  $x_3$  zu finden. Um von einem Zustand in den nächsten wechseln zu können, müssen Kosten aufgebracht werden. Die Kosten werden entlang eines Pfades aufsummiert. Können Zustände, wie z. B.  $x_{2,1}$ , durch mehrere Pfade erreicht werden, dann wird nur der Pfad mit den minimalen Kosten berücksichtigt. In diesem Fall ist der Pfad über den Zustand  $x_{1,1}$  günstiger als über den Zustand  $x_{1,0}$ . Der günstigste Pfad in diesem Beispiel ist  $x_0, x_{1,1}, x_{2,1}, x_3$ . Das Verfahren ist generisch und leicht umzusetzen, allerdings nimmt der Rechenaufwand mit der Anzahl der Zustände stark zu. DP hat bei einer eindimensionalen Problemstellung eine Ordnung von  $O(n * m^2)$ , wobei  $n$  die zeitliche oder räumliche Diskretisierung und  $m$  die Anzahl diskretisierter Zustände bei jedem Schritt beschreibt. Bei zwei Dimension setzt sich  $m$  aus dem Produkt beider Dimensionen zusammen, weshalb der Rechenaufwand hierdurch deutlich ansteigt. In diesem Zusammenhang

wird auch vom „Fluch der Dimensionen“ gesprochen [40, S. 54, 45, S. 26]. Um dennoch Echtzeitfähigkeit für Fahrzeuganwendungen zu erreichen, wird der Zustandsraum meist stark eingeschränkt, wie z. B. von Roth et al. [46] oder Radke [40, S. 65] durch Beschränkungen des Geschwindigkeitsbereiches. Zudem kann es sein, dass Zustände durch die Diskretisierung nicht exakt erreicht werden und deswegen gerundet werden muss. Die Rundungsfehler heben sich nicht zwingend auf, weshalb die Lösung ebenfalls nicht zwingend optimal sein muss [45, S. 37-40].

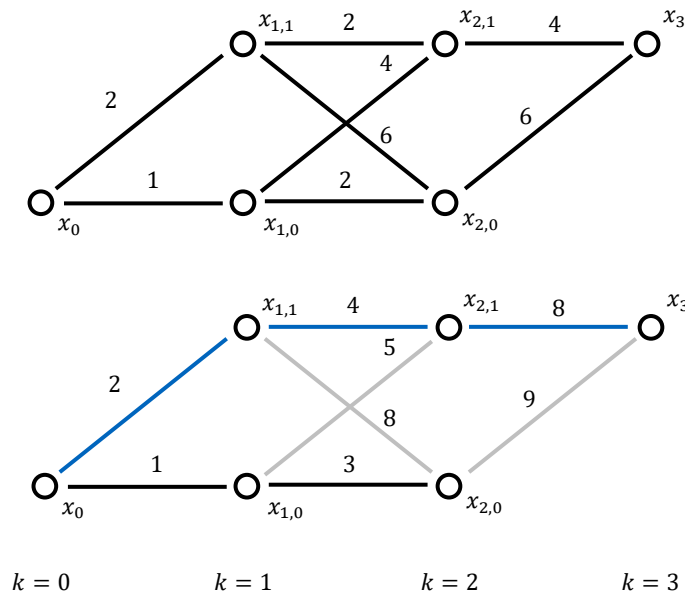


Abbildung 2.4: Veranschaulichung vom Grundprinzip der dynamischen Programmierung

Als Heuristik wird in der Informatik eine Lösungsmethode verstanden, die nicht zwingend eine optimale Lösung liefert [47, S. 388]. Sie basiert häufig auf einfachen Regeln. Der Vorteil ist meist der geringe Rechenaufwand und somit eine schnelle Lösungsfindung. Zudem zeigen die Lösungsmethoden meist eine hohe Robustheit [48, S. 236]. Für das energieeffiziente Fahren existieren Methoden die auf einfachen Regeln basieren und somit als Heuristikverfahren bezeichnet werden können. Als Grundlage können analytische Lösungen für einfache Streckenabschnitte dienen [39, S. 96]. Huber [49] beschreibt ein Verfahren bei dem Rollmanöver für das energieeffiziente Fahren eingesetzt werden. Bei diesem Verfahren wird ausgehend von dem aktuellen Fahrzeugzustand ein Rollmanöver vorwärtssimuliert. Während der Rollmanöver ist der Kraftstoffverbrauch minimal, weil keine Antriebsenergie aufgebracht werden muss. Abbildung 2.5 zeigt beispielhaft ein Höhenprofil und ausgehend von drei Zuständen schematisch die resultierenden Geschwindigkeitsprofile, bei Durchführung von Ausrollmanövern. Bei allen drei Zuständen ist die Geschwindigkeit gleich der Maximalgeschwindigkeit bzw. erlaubten Höchstgeschwindigkeit  $v_{max}$ . Bei Zustand 1 wird das Fahrzeug auf Grund der Fahrwiderstände bis zum Stillstand abgebremst. Ein Stopp stellt einen unnötigen Zeitverlust dar, weshalb dieses Ausrollmanöver nicht sinnvoll ist. Das Ausrollmanöver bei Zustand 2 zeigt ebenfalls anfangs eine Verzögerung, allerdings wird das Fahrzeug im Anschluss durch die Hangabtriebskraft wieder auf die Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt. Jedoch ist die minimale Geschwindigkeit bei der Kuppe sehr gering. Dies verursacht einen hohen Zeitverlust und behindert ggf. andere Verkehrsteilnehmer unverhältnismäßig stark. Aus diesen Gründen stellt ein Rollmanöver bei Zustand 2 kein valides Fahrprofil dar. Bei Zustand 3 ergibt sich das gleiche Verhalten wie bei Zustand 2, jedoch ist die Differenzgeschwindigkeit  $\Delta v$  zwischen der minimalen und maximalen

Geschwindigkeit geringer und unterschreitet einen zulässigen Wert. Dadurch stellt das Ausrollmanöver eine valide Fahraktion dar und kann ausgeführt werden.

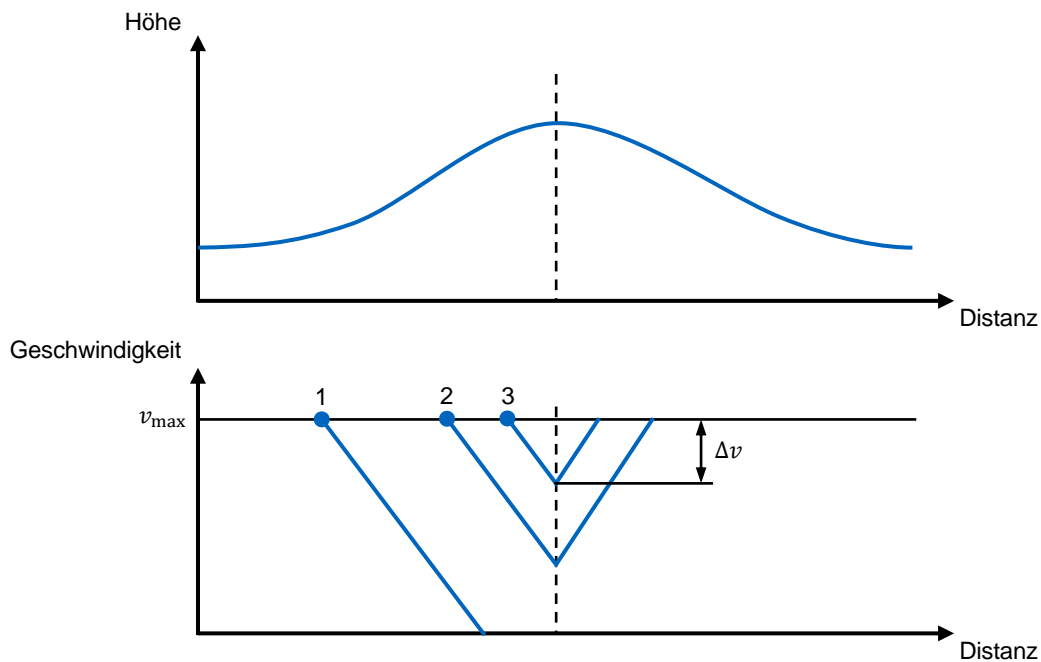


Abbildung 2.5: Veranschaulichung des Verfahrens nach Huber [49] anhand einer Fahrt über eine Kuppe; Geschwindigkeitsprofile zeigen schematisch simulierte Ausrollmanöver zu verschiedenen Zeitpunkten

Nachteilig bei allen Verfahren zum energieeffizienten Fahren ist, dass andere Verkehrsteilnehmer nicht berücksichtigt werden. Samaras et al. [50] zeigen, dass bei hohem bzw. stauähnlichem Verkehrsaufkommen energieeffizientes Fahren, statt zu einer Kraftstoffeinsparung, zu einem Mehrverbrauch führt. Dies bedeutet, dass Fahrzeuge bei ihrer optimalen Fahrstrategie andere Verkehrsteilnehmer behindern können. Unklar ist allerdings, in welchen Situationen dies auftritt. Für Lkw, insbesondere bei Folgefahrten, beschreibt jedoch Alam [51, S. 6], dass Bergfahrten eine kritische Situation darstellen. Durch Ausrollen vor Gefällen kann ein anderer Lkw zu einer Geschwindigkeitsreduktion in der Steigung gebracht werden. Dieser muss möglicherweise dann in der Steigung wieder beschleunigen, um seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen oder in einem energieineffizienten Motorbetriebspunkt fahren und sich über die Kuppe schleppen.

## 2.2 Automatisiertes und autonomes Fahren

Automatisiertes und vor allem autonomes Fahren werden sowohl in der Industrie und Forschung als auch in der Gesellschaft diskutiert. Mit autonomen Fahren sollen u. a. die Unfallzahlen reduziert werden und somit die Sicherheit gesteigert werden [52]. In diesem Abschnitt werden die technischen Aspekte vorgestellt und der Nutzen für energieeffizientes Fahren diskutiert.

Für ein einheitliches Verständnis der Begriffe kann automatisiertes bzw. autonomes Fahren nach dem Grad der Automatisierung eingeteilt werden. Sowohl SAE J3016 [53] als auch der Verband der Automobilindustrie (VDA) [54] unterscheiden zwischen 6 Stufen (Abbildung 2.6). Bei SAE J3016 werden die Stufen Levels genannt. Die Levels beginnen bei 0 und enden bei 5. Die Begriffsdefinition ist allerdings nicht einheitlich, beispielsweise wird bei SAE Level 5 als „Full

Driving Automation“ bezeichnet und bei VDA als „Fahrerloses Fahren“, stattdessen wird die Stufe 4 beim VDA als „Vollautomatisiertes Fahren“ beschrieben. Im folgendem werden die im deutschsprachigen Raum üblichen Begriffe, in Anlehnung an VDA, verwendet.

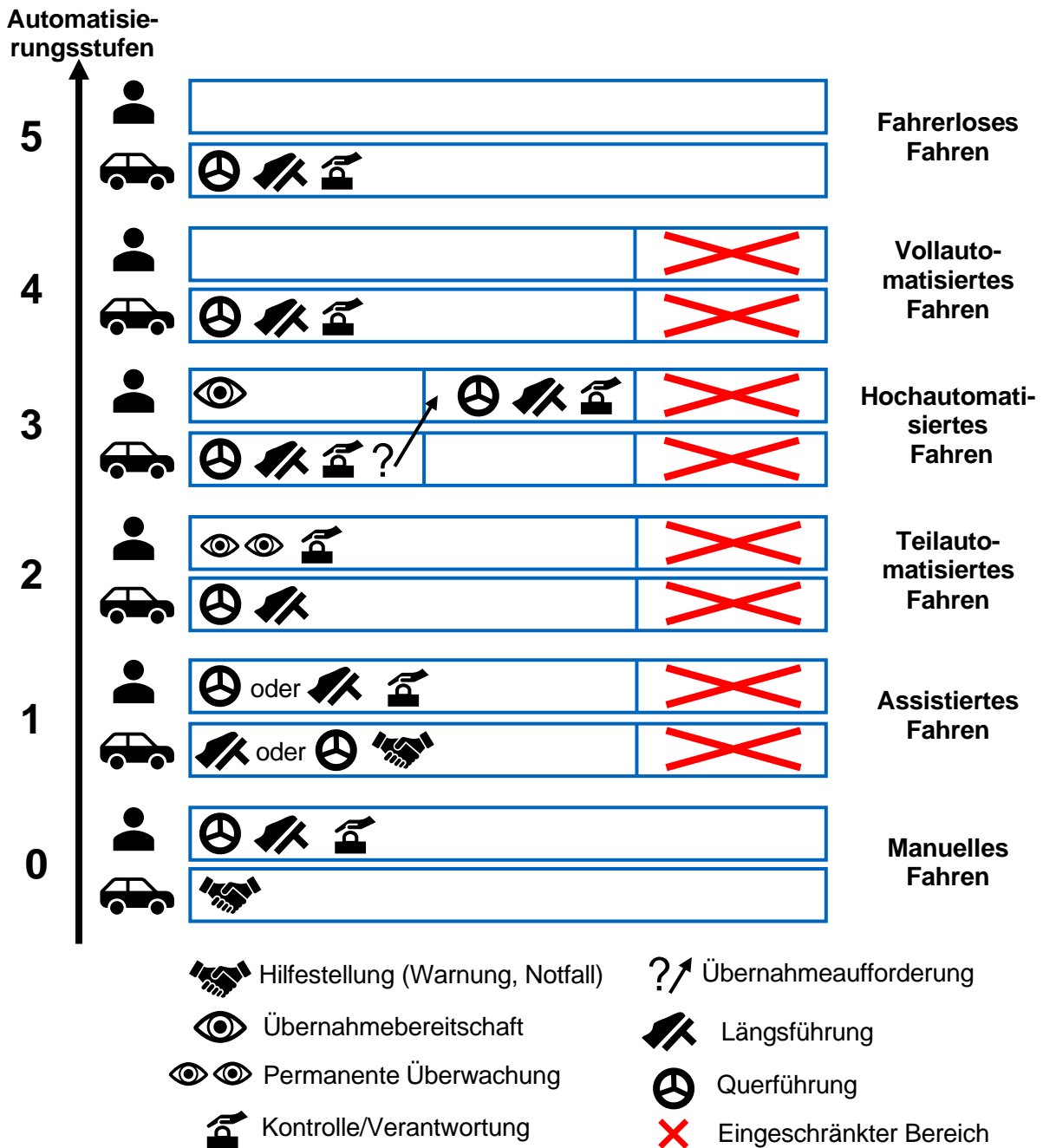


Abbildung 2.6: Übersicht Automatisierungsstufen nach SAE J3016 [53] und VDA [54]

Stufe 0 bezeichnet das manuelle Fahren. Der Fahrer hat die Kontrolle über die Quer- und Längsführung. Während der Fahrt darf das Fahrzeug mit Warnungen, z. B. Anzeigen im Display, unterstützen. Ebenfalls ist es dem System erlaubt kurzfristig bei Notsituationen, z. B. durch ein Notbremsassistenten, einzugreifen. Die Verantwortung über das Fahrzeug in allen Fahrsituationen liegt beim Fahrer.

Beim assistierten Fahren, Automatisierungsstufe 1, übernimmt das Fahrzeug die Quer- oder Längsführung. Die andere Fahraufgabe führt der Fahrer aus. Hilfestellungen durch das System,

auch bei Nichtausführen der Fahraufgabe, sind weiterhin erlaubt. Beispielsweise kann mit dem Adaptive Cruise Control (ACC) die Längsführung auf Autobahnen vom System übernommen werden, ein Totwinkelassistent kann trotzdem aktiv sein und somit bei der Querführung unterstützen. Die Verantwortung, und somit die Kontrolle über alle Fahrsituationen, liegt weiterhin beim Fahrer. Der Einsatzbereich ist in der Regel eingeschränkt, z. B. ist ACC nach ISO 15622:2010 [55] erst ab 5 m/s verfügbar. Der eingeschränkte Einsatzbereich trifft auf alle höheren Automatisierungsstufen mit Ausnahme der letzten Stufe zu.

Beim teilautomatisierten Fahren führt das Fahrzeug die Quer- und Längsführung aus. Der Fahrer muss das System ständig überwachen und ist in der Verantwortung.

Hingegen bei der Automatisierungsstufe 3 muss der Fahrer nur übernahmebereit sein. Bei Übernahmeanforderung des Systems muss der Fahrer fähig sein, die Längs- und Querführung zu übernehmen. Während das Fahrzeug die Längs- und Querführung ausführt, ist dieses in Verantwortung alle Situationen zu bewerkstelligen.

Beim vollautomatisierten Fahren hat der Fahrer keine Aufgabe mehr und dient auch nicht mehr als Rückfallebene. Im Unterschied zum fahrerlosen Fahren existieren noch Einschränkungen, z. B. Verfügbarkeit nur für eine bestimmte Route bzw. ausgewählte Straßen. In der letzten Stufe wird von fahrerlosem Fahren gesprochen, das Fahrzeug hat von Start bis Ziel die komplette Verantwortung über die Fahraufgaben. Die Bundesanstalt für Straßenwesen bezeichnet Fahrten, bei denen der Fahrer keine fahrbezogene Aufgabe hat, als autonomes Fahren [56, 57].

In der Regel wird bei einer Fahrt zwischen verschiedenen Stufen der Automatisierung gewechselt. Abbildung 2.7 zeigt zwei beispielhafte Fahrten. Während beim fahrerlosen Fahren vom Start bis zum Ziel in der gleichen Automatisierungsstufe gefahren wird, wird bei der zweiten Fahrt zwischen verschiedenen Stufen gewechselt.

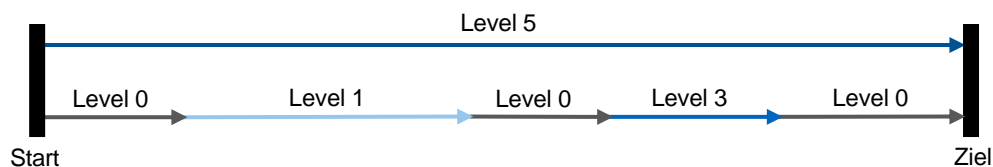


Abbildung 2.7: Beispielfahrten mit unterschiedlichen Automatisierungsstufen

Automatisiertes bzw. autonomes Fahren wird in der Literatur weit diskutiert. Ein umfassenden Überblick geben Pendleton et al. [58] und Yurtsever et al. [59]. Um die Komplexität zu reduzieren, wird für autonome Systeme in der Robotik häufig das Sense-Plan-Act Paradigma eingesetzt. Es gibt verschiedene Varianten, die hierarchische Struktur, bei denen die Blöcke nacheinander durchlaufen werden, stellt die klassische Architektur dar [60]. Das Paradigma wird ebenfalls für automatisierte bzw. autonome Fahrzeuge verwendet [52, 61, 62]. Abbildung 2.8 zeigt das Sense-Plan-Act Paradigma für automatisierte Fahrzeuge.

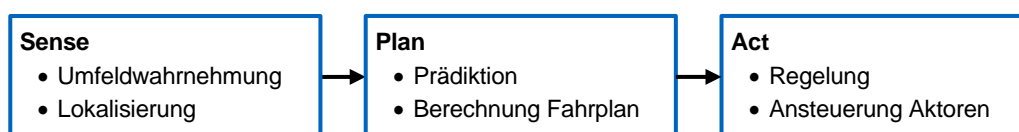


Abbildung 2.8: Einteilung automatisiertes Fahren nach Sense-Plan-Act Paradigma

Sense beinhaltet die Umfeldwahrnehmung und die Lokalisierung des eigenen Fahrzeuges. Hierzu besitzt das Fahrzeug verschiedene Sensoren. Für die Umfeldwahrnehmung werden vor

allem Ultraschall, Radar, Kamera und Lidar Sensoren eingesetzt. Auf Grund der unterschiedlichen physikalischen Erfassung der Umwelt besitzen diese unterschiedliche Eigenschaften und somit verschiedene Vor- und Nachteile. Einen umfassenden Überblick über die Sensoren geben [63, S. 324-339, 64–68], zudem werden die verschiedenen Sensoren in [22, S. 68, 59, 69] verglichen. Tabelle 2.1 fasst die Eigenschaften der Sensoren zusammen. Zu beachten ist, dass die Eigenschaften neben den Sensortyp auch von der Ausführung abhängig sind, z. B. hat der Radarsensor SRR 20X von Continental [70] einen großen Öffnungswinkel von maximal +/- 75°, jedoch nur eine Reichweite von bis zu 50 m, hingegen hat der Radarsensor LRR4 von Bosch [71] einen kleineren Öffnungswinkel von nur maximal +/- 20°, aber eine Reichweite von ca. 250 m. Für autonomes Fahren müssen die Sensoren so angeordnet sein, dass das gesamte Umfeld wahrgenommen wird. Mit Hilfe einer Sensorfusion können die einzelnen Sensordaten jedes Sensors zu einem gesamten Umfeldmodell fusioniert werden. Dadurch ist es möglich, dass sich die Sensoren ergänzen und die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Detailierung der Objekte erhöht wird [63, S. 339, 72]. In der Regel werden durch die Fusion Objektlisten erzeugt, die dem Planer übergeben werden. Neben der Umfeldwahrnehmung muss der eigene Fahrzeugzustand ermittelt werden, vor allem die Position. Die Positionsbestimmung wird auch als Lokalisierung bezeichnet.

Tabelle 2.1: Übersicht der wichtigsten Sensoren für die Umfeldwahrnehmung

| Eigenschaften                                    | Ultraschall | Radar     | Lidar     | Monokamera |
|--------------------------------------------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| Öffnungswinkel                                   | +           | o         | ++        | +          |
| Reichweite                                       | bis 5 m     | bis 250 m | bis 200 m | bis 250 m  |
| Distanzmessung                                   | +           | ++        | ++        | -          |
| Geschwindigkeitsmessung                          | --          | ++        | +         | --         |
| Funktionalität bei Schlechtwetter                | ++          | ++        | o         | --         |
| Funktionalität bei schlechten Lichtverhältnissen | ++          | ++        | o         | --         |
| Sensorkosten                                     | ++          | o         | --        | +          |

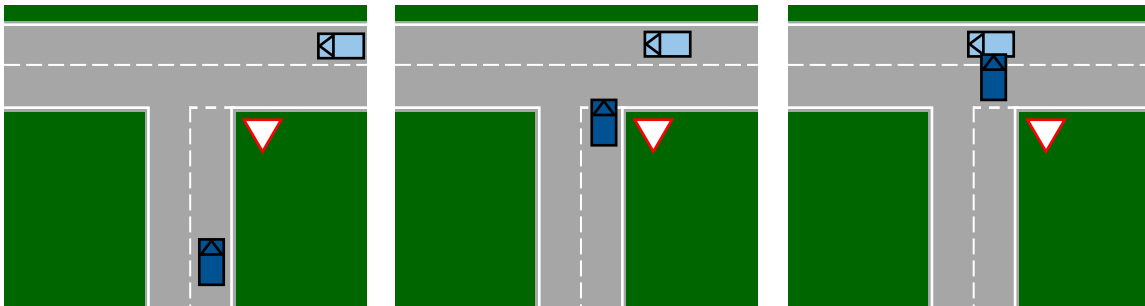
-- sehr schlecht - schlecht o durchschnittlich + gut ++ sehr gut

Plan umfasst im Wesentlichen zwei Aufgaben, zum einem die Bewegung anderer Objekte zu präzisieren und zum anderem darauf folgend einen bestmöglichen Plan für die eigene Bewegung zu berechnen. Die Bewegungen werden in der Regel in Form von Trajektorien ausgedrückt. Eine Trajektorie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Bewegung im Raum und der Zeit [73, S. 1-2].

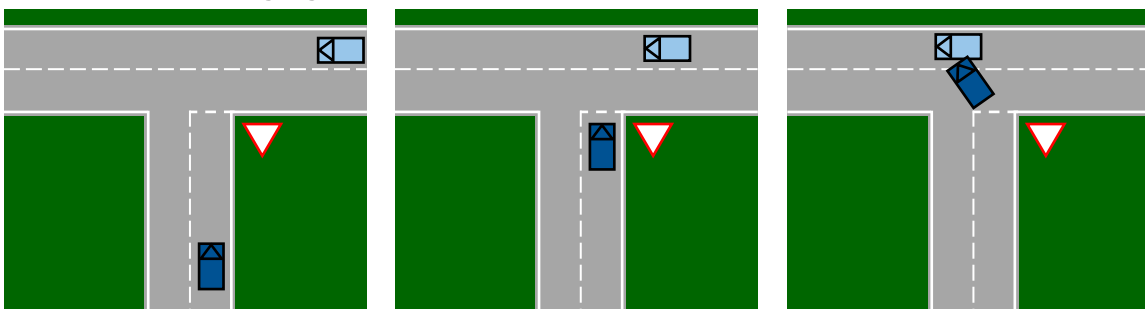
Lefèvre et al. [74] teilen die Prädiktionsmethoden für andere Verkehrsteilnehmer in drei Kategorien ein: physikalisch basierte, manöverbasierte und interaktionsbewusste Bewegungsmodelle. Abbildung 2.9 zeigt anschaulich den Unterschied zwischen den drei Kategorien, anhand eines Kreuzungsszenarios. Ein Verkehrsteilnehmer fährt auf der vorfahrtsberechtigten Straße und ein anderer Verkehrsteilnehmer, der nicht vorfahrtsberechtigt ist, möchte auf die Vorfahrtsstraße.

Für den nicht vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer wird die Prädiktion mit den drei unterschiedlichen Klassen von Prädiktionsmodellen durchgeführt.

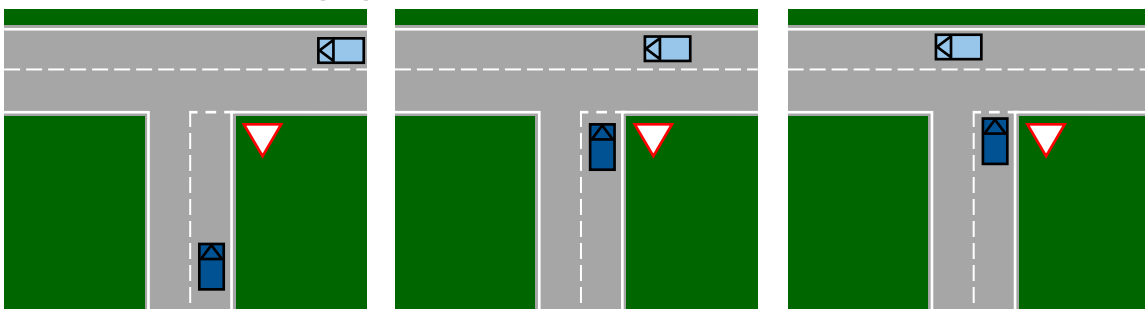
#### Physikalisch basiertes Bewegungsmodell



#### Manöverbasiertes Bewegungsmodell



#### Interaktionsbewusstes Bewegungsmodell



Zeit →

 Prädiziertes Objekt       Weiteres Verkehrsobjekt

Abbildung 2.9: Beispiel für Bewegungsprädiktion mit unterschiedlichen Methoden nach [74]

Beim physikalisch basierten Bewegungsmodell wird die Weiterführung der aktuellen Bewegung angenommen, z. B. das Fahrzeug bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Straßenverläufe oder Verkehrsregeln werden nicht berücksichtigt. Im gezeigten Beispielszenario fährt das prädizierte Objekt durch den vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer hindurch und zeigt somit ein unrealistisches Verhalten. Die Bewegungsmodelle sind nur für kurze Prädiktionshorizonte valide. Bei manöverbasierten Bewegungsmodellen können Straßenverläufe und Verkehrsregeln mitberücksichtigt werden. Ist der Straßenverlauf nicht eindeutig, müssen Annahmen getroffen werden, z. B. im Beispielszenario, dass das Fahrzeug links abbiegt. Ebenfalls erfolgt im Beispielszenario eine Geschwindigkeitsverringerung vor dem Einfahren in die Vorfahrtsstraße. Nicht berücksichtigt werden andere Verkehrsteilnehmer, weshalb es trotzdem zu einer Kollision zwischen beiden Fahrzeugen im Beispielszenario kommt. Mit manöverbasierten Bewegungsmodellen können längere Prädiktionshorizonte erreicht werden; allerdings werden

weiterhin andere Verkehrsteilnehmer nicht berücksichtigt und dadurch kann es zu invaliden Prädiktionen kommen. Eine Berücksichtigung anderer Verkehrsteilnehmer findet in den interaktionsbewussten Bewegungsmodellen statt. Damit liefern diese die höchste Güte, allerdings sind diese rechenintensiv und dadurch in der Regel nicht in Echtzeitanwendungen im Fahrzeug anwendbar. Bei allen Prädiktionen müssen Annahmen getroffen werden, weshalb keine vollständige zuverlässige Vorhersage möglich ist und folglich eine regelmäßige Überprüfung der Prädiktion notwendig ist. Dies ist meist dadurch gegeben, dass im jedem ausgeführten Zyklus im Planungsmodul eine erneute Prädiktion, auf Grundlage der neuesten Messungen, durchgeführt wird. In der Regel werden bisher meist nur physikalisch basierte Prädiktionen eingesetzt. Schubert et al. [75] verglichen physikalisch basierte Prädiktionsmodelle und führten Validierungen mit einem Realfahrzeug durch. Zudem geben Karle et al. [76] einen umfassenden Überblick über Prädiktionsmodelle.

Für die Planung der eigenen Fahrstrategie werden in der Regel Trajektorien berechnet. Damit wird u. a. festgelegt, wie schnell und energieeffizient sich ein Fahrzeug fortbewegt. Eine Trajektorie, die kollisionsfrei mit anderen Objekten ist, wird anschließend dem Regler übergeben. Für die Trajektorienberechnung existieren verschiedene Methoden. Einen umfassenden Überblick über die Methoden geben Conzalez et al. [77], Paden et al. [78] und Claussmann et al. [79]. Yurtsever et al. [59] teilen die Methoden in fünf Kategorien ein. Tabelle 2.2 gibt ein Überblick über die Kategorien und die wichtigsten Methoden. Die einzelnen Methoden haben verschiedene Vor- und Nachteile, beispielsweise ist der A\* im Vergleich zum Dijkstra Algorithmus schnell, allerdings ist mit A\* keine Optimalität garantiert. Generell sind Deep Learning und numerische Optimierung meist rechenaufwendig. Zudem ist bei Deep Learning keine Optimalität garantiert. Die Kategorien Graphen, Inkrementalsuche und Interpolation sind in der Regel weniger rechenintensiv, liefern aber nicht zwingend eine optimale Lösung. Eine Kombination von Methoden oder mehrstufige Planer sind möglich. Beispielsweise berechnen Stahl et al. [80], im vorgestellten mehrstufigen Planer, zuerst mögliche fahrbare Pfade. Im Anschluss wird durch den Geschwindigkeitsplaner die zeitliche Eigenschaft hinzugefügt und dadurch die Bewegung im Raum vollständig festgelegt.

Tabelle 2.2: Übersicht über Berechnungsmethoden für Trajektorien

| Kategorie                                 | Methoden                                                                               |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Graphen                                   | Dijkstra, A*, Static Lattice                                                           |
| Inkrementalsuche                          | Rapidly-exploring Random Tree, Probabilistic Roadmap Method                            |
| Interpolation                             | Geraden und Kreise, Polynome, Klothoide, Bézier, Splines                               |
| Numerische Optimierung/Variationsrechnung | Potential Field Method, Linear Programming, Quadratic Programming, Dynamic Programming |
| Deep Learning                             | Neuronale Netze                                                                        |

Im letzten Schritt des Sense-Plan-Act Paradigmas muss der berechnete Fahrplan umgesetzt werden. Act beinhaltet die Regelung und letztendlich die Ansteuerung der Aktorik. Die Ansteuersignale sind abhängig von der verbauten Hardware und den zur Verfügung stehenden Schnittstellen. Beispielsweise kann für die Längsführung eine Beschleunigung teilweise direkt über eine zur Verfügung stehende Schnittstelle vorgegeben werden, die dann im Fahrzeugsteuergerät zu dem gewünschten Motormoment umgerechnet wird oder es ist eine direkte



Schnittstelle für das Motormoment vorhanden. Das Motormoment muss wiederum bei beispielsweise Dieselmotoren in Einspritzmenge des Kraftstoffes umgerechnet werden. Unabhängig von den konkreten Ansteuergrößen, im Allgemeinen ist es notwendig, die Trajektorien durch eine Regelung in diese zu übersetzen und ggf. Störungen, wie z. B. Seitenwind, auszugleichen. Einen Überblick über eingesetzte Regler für autonome Fahrzeuge geben Pendleton et al. [58]. In der Regel wird die Längs- und Querführung getrennt. Für die Längsführung werden klassische Regler wie Proportional Integral Derivative (PID) Regler mit Vorsteuerung oder Model Predictive Control (MPC) eingesetzt. Ebenfalls werden für die Querregelung verschiedene Regler verwendet. Einer der am meist eingesetzten Regler ist der Pure Pursuit Regler. Bei diesem wird auf einen auf der Trajektorie vorausliegenden Punkt geregelt. Der Vorteil ist seine einfache Implementierung und meist hinreichende Genauigkeit. Nachteilig ist beispielsweise, dass Kurven geschnitten werden. Dies kann bei engen Kurven im Extremfall zum Verlassen der Fahrbahn führen.

Neben dem klassischen Vorgehen nach Sense-Plan-Act existieren auch Konzepte die auf Neuronale Netze beruhen. Lee und Ha [81] zeigten beispielsweise ein End-to-End-Learning Verfahren, bei denen Kamerabilder als Eingang dienen. Das Verfahren wurde mit Hilfe eines Fahrsimulators untersucht. Die Absicherung von Algorithmen, die maschinelles Lernen nutzen, stellt aktuell noch eine Herausforderung dar [82, S. 81].

Nicht abgebildet wird bei den Methoden für das autonome Fahren derzeit das energieeffiziente Fahren. Hauptgrund hierfür sind, wegen der begrenzten Rechenkapazität und der gleichzeitigen Echtzeitanforderung, die geringen Planungshorizonte. Claussmann et al. [79] geht beispielsweise von ein Planungshorizont, für die Generierung von Trajektorien für Autobahnanwendungen, von bis zu 100 m aus. Zum Vergleich, der GPS-Tempomat von MAN Truck & Bus, EfficientCruise, hat einen Planungshorizont von bis zu drei Kilometern [29].

## 2.3 Vehicle-to-Everything (V2X) Kommunikation

V2X ist in der Regel die Voraussetzung für kooperatives Fahren. Kooperative Methoden werden im nächsten Abschnitt vorgestellt. In diesem Abschnitt werden die Grundlagen für die V2X Kommunikation erklärt, insbesondere werden wichtige Begriffe und deren Abkürzungen aufgeführt. Zunächst wird auf unterschiedliche Netzwerkarten eingegangen und im Anschluss auf, zum größten Teil, standardisierte Nachrichten für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und ggf. Infrastrukturelementen.

### 2.3.1 Netzwerke

Im Wesentlichen gibt es zwei Arten V2X zu realisieren, einmal über Ad-hoc-Netzwerke und einmal über zellulare Netzwerke (Abbildung 2.10). Ad-hoc-Netzwerk, die z. B. auf IEEE 802.11p basieren, benötigen keine weitere Infrastruktur und senden Nachrichten per Broadcast an alle umliegenden Teilnehmer. In Europa wird die Übertragung mit IEEE 802.11p auch als ITS-G5 bezeichnet und in der USA als Dedicated Short Range Communication (DSRC). Mit dieser Technik werden Wireless Local Area Network (WLAN) erzeugt und arbeiten im Fall von IEEE 802.11p im 5,9 GHz Frequenzspektrum. Der Frequenzbereich ist für Fahrzeuganwendung vorbehalten. Der Zugriff auf den Kommunikationskanal wird mit IEEE 1609 festgelegt. IEEE 802.11p und IEEE 1609 werden zusammen auch als Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE)

bezeichnet [83–87]. Je mehr Nachrichten versendet werden bzw. je größer die Nachrichtenpakete sind, desto mehr Daten pro Sekunde müssen versendet werden. Eine höhere Datenrate ist gleichbedeutend mit einer höheren Kanallast und die Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten nimmt zu [88]. Um den Kanal nicht zu überfordern, wurde in Europa Decentralized Congestion Control (DCC) [89] eingeführt, bei dem Zugriffe auf den Kanal dynamisch geregelt werden [90].

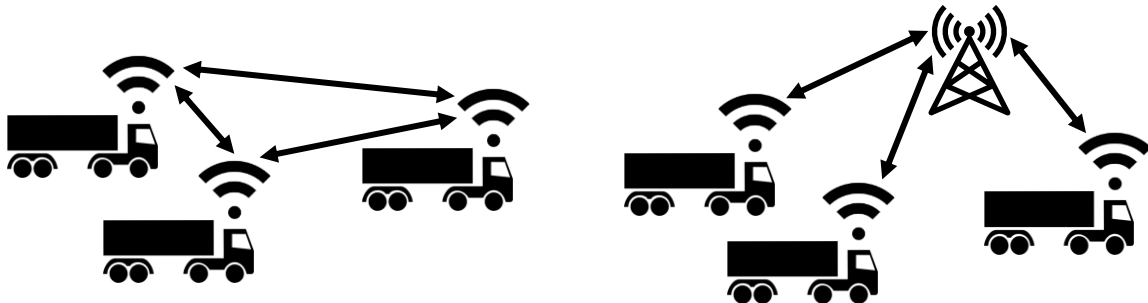


Abbildung 2.10: Arten von Netzwerken für V2X. Links: Ad-hoc-Netzwerk; Rechts: Zelluläres Netzwerk

Bei zellularen Netzwerken, wie z. B. V2X-LTE oder 5G NR mode 1, werden Nachrichten entweder über Mobilfunkmasten versendet oder zumindest die Kanalressourcen für die Kommunikation über das Mobilfunknetz gesteuert. Zellulare Netzwerke haben den Vorteil der theoretisch unendlichen Reichweite und einer besseren Kanallaststeuerung durch die Infrastruktur, allerdings wird Netzabdeckung benötigt [84–86, 91].

Neben Paketverlusten bei der Nachrichtenübermittlung treten in echten Anwendungen auch Latenzen auf. In einem Realversuch betrug die Latenz bei IEEE 802.11p zwischen 88 und 125 ms und bei V2X-LTE immer über 2500 ms. Die Latenz hat bei beiden Übertragungstechniken bei zunehmender Geschwindigkeit zugenommen [92]. Der Einsatz von 5G, bei zellularen Netzwerken, soll allerdings deutliche Verbesserungen gegenüber der LTE-Technik bringen und Latenzen von ca. 1 bis 4 ms ermöglichen [93]. Im Folgenden wird von einem Ad-hoc-Netzwerk, wie z. B. IEEE 802.11p, ausgegangen. Zum einem ist bei dieser Netzwerkart keine weitere Infrastruktur notwendig und zum anderen wird diese Technik, z. B. im VW Golf 8, bereits in Serie eingesetzt [94].

Ad-hoc Netzwerke senden die Nachrichten per Broadcast an alle umliegenden Teilnehmer, dadurch ist dies ein offenes Netzwerk. Um bewusste Störungen durch Dritte auszuschließen, wird in Europa ein Zertifizierungsverfahren nach IEEE 1609.2 angewendet [95]. Nur authentifizierte Teilnehmer können somit dem Netzwerk beitreten.

In der Regel findet die Kommunikation zwischen Fahrzeugen statt, jedoch könnten auch Fußgänger oder Radfahrer mit geeigneter Ausrüstung über IEEE 802.11p kommunizieren oder fest installierte Stationen in Straßennähe. Eine fest installierte Station wird auch als Road Side Unit (RSU) bezeichnet [84, 96, 97].

### 2.3.2 Nachrichten

In Europa sind bereits zwei Nachrichten standardisiert. Zum einem die Cooperative Awareness Message (CAM) [98] und zum anderem die Decentralized Environmental Notification Message (DENM) [99]. Die CAM beinhaltet Informationen über den aktuellen Fahrzeugzustand, z. B. die aktuelle Position oder die aktuelle Geschwindigkeit. Diese Nachricht wird zyklisch versendet. Im Gegensatz dazu ist die DENM ereignis- und positionsbezogen und wird nur bei Eintritt eines

Ereignisses, z. B. einer Notbremsung, versendet. Dabei kann die Nachricht durch den Multi-Hop-Mechanismus von einem Fahrzeug zu weiter entfernten Fahrzeugen weitergeleitet werden [83]. Durch Multi-Hop wird die Reichweite gegenüber dem üblichen Broadcastverfahren deutlich erhöht.

Ähnlich zu den in Europa definierten Standards gibt es in der USA die Basic Safety Message (BSM) [100]. Hier wird zwischen Part 1 und 2 unterschieden. In Part 1 wird, ähnlich zu der CAM, der aktuelle Fahrzeugzustand versendet, während Part 2 ähnliche Informationen, wie die DENM enthält. Im Gegensatz zum europäischen Standard gibt es keinen Multi-Hop-Algorithmus. Die Nachrichten werden nur per Broadcast an umliegende Fahrzeuge verteilt.

Darüber hinaus sind in der ISO/TS 19091:2017 [101] und in SAE J2735 [102] die Signal Phase and Timing (SPaT) und die MAP Nachrichten spezifiziert. Die Nachrichten sind für das realisieren von Ampelanlagen mit V2X entworfen. Mit der SPaT-Definition können einzelne Phasen der Ampeln übertragen werden und mit der MAP wird die statische Topologie der Kreuzung übermittelt. Die MAP Botschaft enthält Informationen über einzelne Fahrspuren, aber auch deren Verbindungen zu weiterführenden Straßenelementen [103].

Aktuell werden in Europa noch zwei weitere Nachrichten spezifiziert. Zum einem die Collective Perception Message (CPM) [104], mit der Objektlisten ausgetauscht werden können, und zum anderen die Maneuver Coordination Message (MCM) [105], mit der der Austausch von Plänen und die Koordination von gemeinsamen Manövern ermöglicht wird.

Tabelle 2.3 gibt ein Überblick über alle vorgestellten Nachrichten.

Tabelle 2.3: Übersicht über V2X-Nachrichten

| Abkürzung | Bedeutung                                        | Botschaftsinhalt                                         |
|-----------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| CAM       | Cooperative Awareness Message                    | Ego-Zustand, z. B. Position oder Geschwindigkeit         |
| DENM      | Decentralized Environmental Notification Message | Ereignis und positionsbezogene Warnungen, z. B. Glatteis |
| BSM       | Basic Safety Message                             | CAM + DENM in der USA (kein Multi-Hop-Mechanismus)       |
| MAP       | Map                                              | Straßenkarte                                             |
| SPaT      | Signal Phase and Timing                          | Ampelsignale                                             |
| CPM       | Collective Perception Message                    | Umfeldinformationen, z. B. wahrgenommene Objekte         |
| MCM       | Maneuver Coordination Message                    | Informationen für Manöverabstimmung                      |

## 2.4 Kooperatives Fahren

Kooperatives Fahren existiert in verschiedenen Ausprägungen. In diesem Unterkapitel wird zunächst geklärt, wie Kooperation im Straßenverkehr definiert ist und welche Stufen die Kooperation hat. Im Anschluss werden unterschiedliche kooperative Systeme mit expliziter Kommunikation vorgestellt.

## 2.4.1 Stufen der Kooperation

Düring und Pascheka [106] beschreiben kooperatives Verhalten auf folgende Weise: “We call an agent  $A_1$ 's behavior  $b_1$  cooperative behavior with respect to agent  $A_2$  and with respect to a total utility function  $u(u_1, u_2)$ , if by choosing this behavior agent  $A_1$  knowingly and willingly increases the total utility  $u(u_1, u_2)$  in a coupled situation, compared to a reference utility.“ Kooperatives Fahren hat demnach das Ziel, den Gesamtnutzen für alle Verkehrsteilnehmer zu maximieren. Dabei ist wichtig, dass über lange Zeit alle Teilnehmer profitieren, d. h. falls in einer Situation ein Teilnehmer durch kooperatives Verhalten ein Nachteil hat, profitiert dieser in anderen Situationen durch kooperatives Verhalten. Die möglichen kurzfristigen Nachteile sind auf lange Sicht geringer als die Vorteile. In der Definition wird nicht dargelegt, wie Kooperation erfolgt. Burger et al. [107] zeigen, dass Kooperation in unterschiedlichen Ausprägungen stattfinden kann (Abbildung 2.11). Zunächst wird zwischen expliziter und impliziter Kommunikation unterschieden. Bei expliziter Kommunikation werden Botschaften zwischen Fahrzeugen oder Infrastrukturen über V2X ausgetauscht. Bei impliziter Kommunikation wird durch kooperatives Verhalten indirekt kommuniziert, z. B. kann durch eine leichte Verzögerung eines Fahrzeuges eine Lücke geöffnet werden und damit ein Spurwechsel eines anderen Verkehrsteilnehmers implizit zugestimmt werden. Für die meisten Arten von kooperativem Fahren ist jedoch eine explizite Kommunikation notwendig. Im einfachsten Fall kann durch Mitteilen von Informationen, z. B. der eigenen Umfelddaten, ein vergrößertes Umfeldmodell aufgebaut werden. Dies wird auch als kooperatives Umfeldmodell bezeichnet. Zudem kann mit kooperativer Prädiktion der eigene Fahrplan anderen Verkehrsteilnehmern mitgeteilt werden. Dies hat den Vorteil, dass dadurch keine Prädiktion anderer Verkehrsteilnehmer notwendig ist, was Unsicherheiten minimiert. Der höchste Nutzen durch kooperatives Fahren wird durch Abstimmung eines gemeinsamen Fahrmanövers durch Verhandlung oder kollaborativer Planung erreicht. Bei der kollaborativen Planung wird der global beste Plan umgesetzt. Dies bedeutet, dass über alle Fahrzeuge das Optimierungsproblem aus Kapitel 2.1 gelöst werden muss.

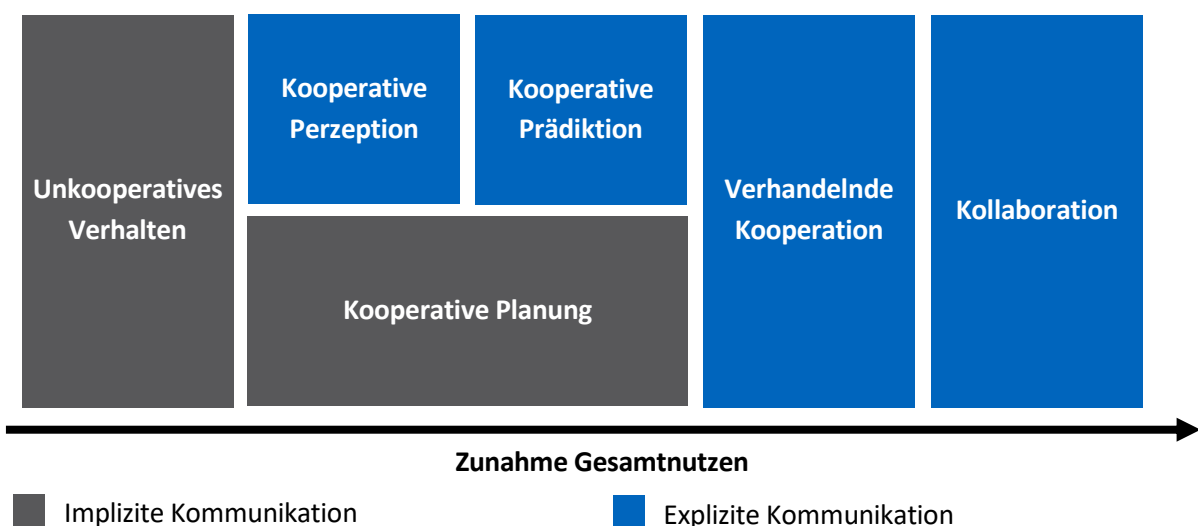


Abbildung 2.11: Arten von Kooperation nach [107]

## 2.4.2 Kooperative Warnsysteme

Mit Hilfe von V2X kann die Wahrnehmung verbessert werden, beispielsweise durch das Mitteilen des eigenen Fahrzeugzustandes über die CAM bzw. BSM. Hierdurch kann die Reichweite, aber

auch die Genauigkeit von wahrgenommenen Verkehrsobjekten verbessert werden. Des Weiteren kann mit Hilfe der DENM bzw. BSM vor Gefahrensituationen gewarnt werden. Die zusätzlichen Informationen können zur Vergrößerung des eigenen Umfeldmodelles genutzt werden. Dadurch soll gegenüber der Wahrnehmung mit der eigenen Bordsensorik eine frühere Erkennung von kritischen Situationen möglich sein. Letztendlich sollen durch die verbesserte Wahrnehmung die Unfallzahlen reduziert werden. In einem groß angelegten Forschungsprojekt vom National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) der USA wurden verschiedene Warnsysteme mit V2X für Nutzfahrzeuge untersucht. Chang [108] veröffentlichte eine Zusammenfassung der Studien. Für die Untersuchungen wurden u. a. mehrere Fahrzeuge ausgerüstet und Tests sowohl auf dem Testgelände als auch im Realverkehr durchgeführt. Insgesamt wurden vier Systeme mit Vehicle-to-Vehicle (V2V) Kommunikation umgesetzt:

- Forward Collision Warning (FCW) [109]
- Emergency Electronic Brake Light (EEBL) [110]
- Blind Spot Warning (BSW) bzw. Lane Change Warning (LCW) [111]
- Intersection Movement Assist (IMA) [112]

Beim FCW System wird vor potentiellen Auffahrunfällen gewarnt. Hingegen wird beim EEBL bei einer Verzögerung, die mindestens  $-0,4\text{ g}$  entspricht, eine Warnung an umliegende Fahrzeuge gesendet. Das System zeigt auch an, in welcher Spur sich das Fahrzeug mit der Verzögerung befindet. BSW warnt vor Fahrzeugen im Totenwinkel. LCW ist eine Erweiterung und warnt vor potentiellen Kollisionen, wenn der Blinker gesetzt wird. Das letzte System, IMA, warnt bei Kreuzungen und Einmündungen vor vorfahrtsberechtigten Fahrzeugen. Neben den V2V Systemen wurden zusätzlich noch zwei Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Systeme umgesetzt, bei denen Warnung durch eine ortsgebundene RSU ausgesendet werden. Das Curve Speed Warning (CSW) System warnt bei Erkennen von zu hoher Geschwindigkeit für eine Kurve und das Bridge Height Inform (BHI) System warnt Fahrzeug mit zu großer Höhe für eine Brückendurchfahrt. Die Untersuchungen kommen zum Schluss, dass mit den vorgeschlagenen Systemen mit V2V bis zu 49 % der erfassten Unfälle mit Nutzfahrzeugen gesenkt und 55 % der Schadenskosten reduziert werden können.

Warnsysteme mit V2X sind nicht nur für Lkw relevant. Eine Umfrage des Allgemeinen Deutschen Automobil-Club e. V. (ADAC) [113] hat ergeben, dass inzwischen viele Pkw-Hersteller auf V2X setzen und auch bereits Serienfahrzeugen mit V2X anbieten. Allerdings werden unterschiedliche technische Lösungen verwendet, z. B. zellulare Kommunikation mit eigenem Backend, weshalb häufig keine herstellerübergreifende Kommunikation möglich ist. Von den in der Umfrage beteiligten Firmen hat einzig VW angegeben, auf Ad-hoc-Netzwerk mit IEEE 802.11p zu setzen. Als erstes Serienfahrzeug wurde der Golf 8 damit standardmäßig ausgerüstet. Durchgeführte Tests vom ADAC auf einem Testgelände zeigten die Wirksamkeit des kooperativen Warnsystems von VW [94].

Die kooperativen Warnsysteme eignen sich zum Vermeiden von Unfällen, jedoch werden nur mit V2X ausgerüstete Fahrzeug erfasst. Darüber hinaus werden durch die Systeme keine täglichen Konfliktsituationen gelöst, wie beispielsweise das Einfädeln auf eine dicht befahrene Spur, bei den ein Verkehrsteilnehmer für ein anderen Verkehrsteilnehmer eine Lücke öffnet. Des Weiteren sind die Systeme nicht für energieeffizientes Fahren entworfen, beispielsweise werden V2X Informationen nicht für eine bessere Fahrtregelung mit geringerem Kraftstoffverbrauch eingesetzt.

### 2.4.3 Kooperative Signalanlagen

Um den Verkehr aktiv zu steuern, werden Signalanlagen eingesetzt. Ampeln regeln beispielsweise den Verkehr an Kreuzungen und stellen sicher, dass alle Verkehrsteilnehmer in einer angemessenen Zeit ihr Ziel erreichen und es nicht zu einer Blockade kommt. In gewisser Weise übernehmen sie eine globale Planung, führen allerdings keine Optimierung über alle Fahrzeuge durch. Zudem können Ampeln mit Kommunikationseinheiten ausgestattet werden, damit kann beispielsweise der Ampelstatus mit der SPaT Nachricht übertragen werden und somit eine kooperative Perzeption dargestellt werden. Themann et al. [114] entwickelten ein Verfahren das Informationen von Ampelanlagen in einer automatisierten Längsführung mit berücksichtigten. Die kooperativen Ampeln verteilen über V2X den Status, die Umschaltzeitpunkte und die Warteschlange. Für die Berechnung der optimalen Fahrstrategie wird der Zustandsraum diskretisiert und mit dem Dijkstra-Algorithmus die beste Trajektorie ermittelt. Der Algorithmus wurde sowohl in der Simulation als auch in Realversuchen mit einem VW Passat getestet. Dabei konnte ein positiver Effekt auf den Kraftstoffverbrauch nachgewiesen werden, auch in Szenarien, bei denen beispielsweise die Fahrzeuge in der Warteschlange, beim Losfahren, langsamer beschleunigen als angenommen. Im Durchschnitt konnte eine Kraftstoffersparnis von ca. 6 % erzielt werden, wenn das Ampelsignal mindestens 500 m vor der Ampel von den Fahrzeugen erfasst wurde. Jin et al. [115] entwickelten ein ähnliches Vorgehen. Zunächst formulierten sie das Optimierungsproblem für energieeffizientes Fahren. Die Signalphasen werden mit der SPaT Nachricht übertragen und stellen Randwerte für das Optimierungsproblem dar. Das Optimierungsproblem wird mit einem konventionellen Solver gelöst. Simulativ konnte gezeigt werden, dass mit ihrem Verfahren bis zu 14 % Kraftstoff gegenüber einem konventionellen Fahrer eingespart werden kann. Wei et al. [116] stellten ein Verfahren vor, das zusätzlich für die Optimierung der Fahrstrategie die Unsicherheit der Warteschlangenlänge vor Ampeln berücksichtigt. In Simulationen konnte im Durchschnitt eine Kraftstoffersparnis von ca. 9 % nachgewiesen werden.

Die Forschungsarbeiten zeigen, dass kooperative Signalanlagen einen positiven Effekt auf den Kraftstoffverbrauch haben können, wenn Informationen von Ampelanlagen in die automatisierte Längsführung integriert werden. Die Verfahren stellen damit eine Verbesserung der Methoden für das energieeffiziente Fahren dar, haben jedoch weiterhin den Nachteil, dass diese nicht mit anderen Verkehrsteilnehmern aktiv kooperieren. Zudem ist der Nutzen auf Situationen mit Signalanlagen beschränkt.

### 2.4.4 Kollektive Perzeption

Eine weitere Methode der kooperativen Perzeption ist die kollektive Perzeption. Bei diesen Verfahren werden Objekt- bzw. Sensordaten ausgetauscht. Mit den zusätzlichen Informationen von anderen Fahrzeugen kann das eigene Umfeld erweitert werden. Abbildung 2.12 zeigt das Grundprinzip. Der vordere Lkw nimmt mit seiner Bordsensorik einen Pkw wahr. Die Detektion wird in einer Objektliste gespeichert und über die CPM an andere Verkehrsteilnehmer verteilt. Werden die Objekte in Fahrzeugkoordinaten gemessen, dann ist neben der Objektliste auch ein Referenzobjekt, mit u. a. absoluten Positionen, notwendig. Der hintere Lkw integriert die über die CPM enthaltenen Objekte in sein Umfeldmodell. Hierdurch kann, in diesem Beispiel, der hintere Lkw statt nur den direkt vor ihm fahrenden Lkw noch zusätzlich den Pkw wahrnehmen [117, S. 3-5]. Neben der Übermittlung von Objekten ist es ebenfalls möglich Sensorspezifikationen über die CPM zu übertragen, z. B. Position und Öffnungswinkel eines Sensors oder Freiräume [118]. Die zusätzlichen Informationen können für fahrstrategische Entscheidungen

genutzt werden, z. B. ist die Durchführung eines Überholmanövers nur bei übermitteltem Freiraum möglich.

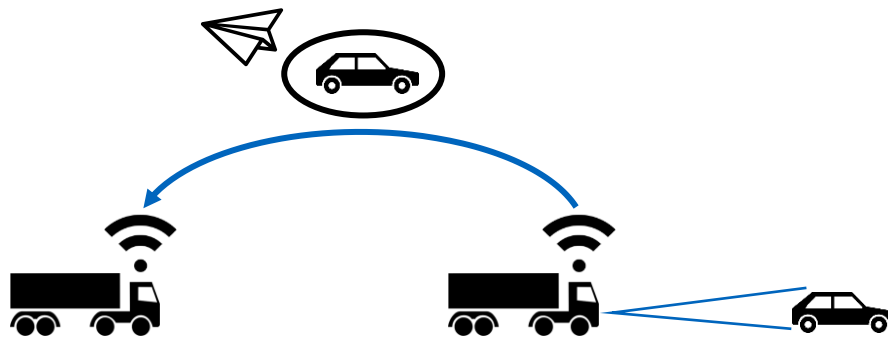


Abbildung 2.12: Grundprinzip kollektive Perzeption

In Simulationen wurde gezeigt, dass mit der kollektiven Perzeption die Anzahl der wahrgenommenen Objekte gesteigert werden kann und somit das Umfeld erweitert wird [119]. Schiegg et al. [118] konnten zeigen, dass bereits bei 3 % Marktdurchdringung eine erhöhte Wahrnehmung stattfindet. Dies bestätigt die Ergebnisse von Günther [117, S. 101-104], der jedoch erst ab 5 % Marktdurchdringung seine simulativen Untersuchungen durchführte. Zudem wurde in verschiedenen Szenarien gezeigt, dass mit Hilfe der kollektiven Perzeption die Time-to-Collision gegenüber der Wahrnehmung mit der eigenen Bordsensorik erhöht wird [117, S. 136, 120]. Eine höhere Time-to-Collision verringert die Unfallgefahr. Folglich resultiert daraus eine erhöhte Sicherheit durch Einsatz der kollektiven Perzeption. Nachteilig ist die erhöhte Kommunikationslast durch die Übertragung der CPM und daraus resultierenden möglichen Paketverlusten. Aus diesem Grund haben sich Allig und Wanielik [121], Delooz und Festag [122] sowie Thandavarayan et al. [123] mit Möglichkeiten zur Reduzierung der Kanallast beschäftigt und Verfahren hierfür vorgestellt, damit auch bei hohen Verkehrsaufkommen zuverlässig Daten übertragen werden können.

In den vorgestellten Arbeiten wurden bisher nur simulative Untersuchungen durchgeführt. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit mit Realfahrzeugen wurde bisher noch nicht erbracht. Des Weiteren wurde nur die Auswirkung auf die Sicherheit untersucht. Unklar ist, in welcher Weise das vergrößerte Umfeldmodell einen Nutzen für energieeffizientes Fahren hat.

## 2.4.5 Platooning

Platooning wird seit vielen Jahren in der Wissenschaft diskutiert. Ein Überblick über wesentliche Projekte und Techniken geben Tsugawa et al. [8], Bergenhem et al. [10] und Fleury et al. [124]. Platooning wird in einigen Arbeiten auch als Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) bezeichnet und beschreibt das Fahren in einer Kolonne mit verringertem Sicherheitsabstand. Hauptziel ist, durch den verringerten Abstand und daraus folgenden verringerten Luftwiderstand Kraftstoff zu sparen. Abbildung 2.13 zeigt das Grundprinzip für das Fahren im Platoon. Beim Fahren ohne Platoon muss der Sicherheitsabstand  $d_s$  eingehalten werden, damit es bei einer plötzlichen Bremsung des vorderen Fahrzeuges zu keiner Kollision kommt. Beim Platooning wird der Abstand  $d$  reduziert. Damit trotzdem ein sicheres Fahren möglich ist, ist es erforderlich, eine automatisierte Längsführung bei Folgefahrzeugen einzusetzen. Die Längsführung muss die Sicherheit bei einer plötzlichen Verzögerung des Vorderfahrzeuges gewährleisten. Für die Umsetzung einer sicheren Regelung wird in der Regel eine direkte Kommunikation mit IEEE

802.11p eingesetzt. Über Funk werden Daten ausgetauscht, z. B. die aktuelle Beschleunigung oder Position, hierdurch ist eine schnelle Reaktion auf eine Bremsung des Vorderfahrzeugs möglich. Durch den verringerten Abstand zwischen den Fahrzeugen wird der Luftwiderstand reduziert. Folgefahrzeuge profitieren vom Windschatten der vorausfahrenden Fahrzeuge. Durch die veränderte Luftströmung reduziert sich allerdings auch der Luftwiderstandsbeiwert des Führungsfahrzeuges [9, 125, S. 783, 126].

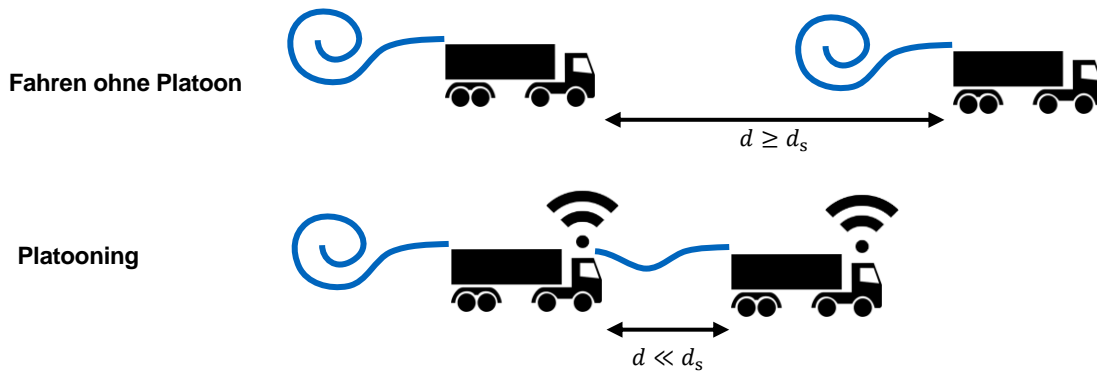


Abbildung 2.13: Grundprinzip Platooning

Abbildung 2.14 zeigt die Abhängigkeit des Luftwiderstandsbeiwertes  $c_d$  vom Abstand  $d$  und der Position in einem Platoon mit drei Lkw [127]. Bis auf kleine Abstände führt bei allen Platoonteilnehmern ein geringerer Abstand zu einem geringen Luftwiderstandsbeiwert und folglich zu einem geringeren Luftwiderstand. Zusätzlich ist zu erkennen, dass das Fahrzeug in der Mitte den geringsten Luftwiderstand hat.

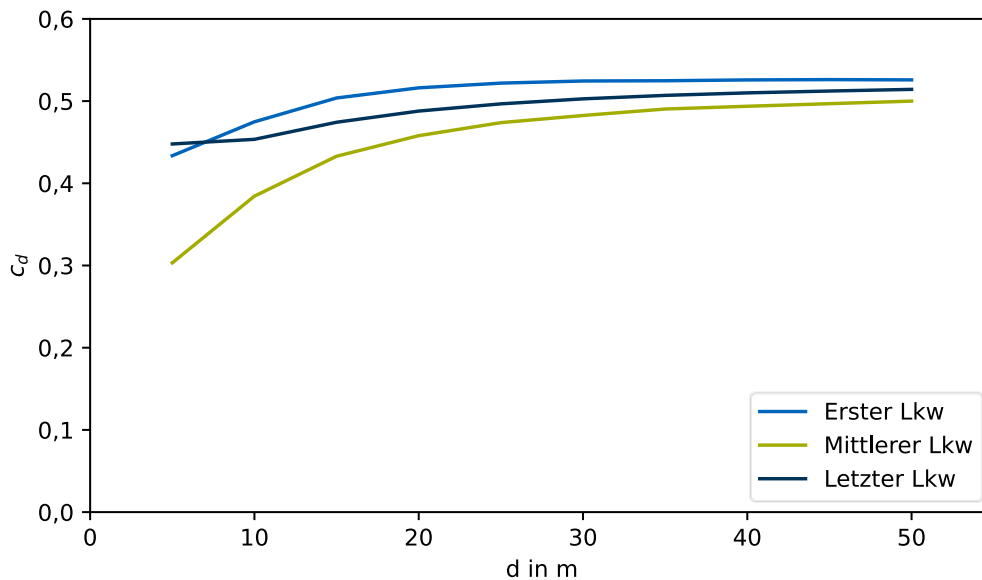


Abbildung 2.14: Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit des Abstandes beim Fahren im Platoon [127]

Der Luftwiderstandsbeiwert für eine Sattelzugmaschine liegt ungefähr im Bereich zwischen 0,49 und 0,78 [15, S. 55]. Hingegen lag der Mittelwert bei Pkw im Jahr 2010 bei 0,33 [42, S. 66]. Wie bei allen Fahrzeugklassen unterliegt der  $c_d$ -Wert auch bei Pkw großen Schwankungen; dennoch ist dieser in der Regel geringer als bei Lkw [15, S. 55, 42, S. 66, 128, S. 284]. Zudem haben Lkw im Allgemeinen eine größere Frontfläche, weshalb der Luftwiderstand gemäß Gl. (2.4) zusätzlich erhöht wird. Bei Lkw für den Fernverkehr beträgt der Energieverlust durch den Luftwiderstand 13,6 % und ist nach dem Rollwiderstand 15,6 % und den Motorverlusten mit 55,8 % der



drittgrößte Faktor für den Kraftstoffverbrauch [125, S. 716]. Bei einem zu geringen Abstand ist es jedoch möglich, dass die Kühlung durch den Fahrtwind nicht mehr ausreichend ist, und die Motorlüftung zugeschaltet werden muss. Lammert et al. [129] untersuchten die Auswirkungen im Realversuch. Mit zumindest zeitweise aktivem Lüfter wurden Kraftstoffeinsparungen des Folgefahrzeuges, in einem zweier Lkw-Platoon, von 2,8 bis 9,7 % gemessen. Ohne Lüfter lagen die Werte für die Kraftstoffeinsparung zwischen 8,4 und 9,7 %.

Im Laufe der Jahre wurden eine Vielzahl von Regelstrategien für das Platooning entworfen und untersucht. Je nach Konzept wird der gewünschte Abstand zwischen den Fahrzeugen konstant oder variabel ausgelegt. Bei der variablen Auslegung wird der Abstand beispielsweise in Abhängigkeit der Geschwindigkeit gewählt. Für das Regeln des Abstandes existieren verschiedene lineare und nichtlineare Regelungskonzepte, z. B. MPC, Sliding Mode Control oder  $H_\infty$ -Regelung [124]. Die Sicherheit muss dabei stets gewährleistet sein, mit Hilfe der Spieltheorie kann dies überprüft werden. Hierfür können bei einem Zweier-Platoon beide Fahrzeuge als Spieler aufgefasst werden. Das vordere Fahrzeug gewinnt das Spiel, wenn es zu einem Unfall kommt und das Folgefahrzeug gewinnt, wenn es zu keinem Unfall kommt [51, S. 74]. Folglich muss das Führungsfahrzeug mit seinem Verhalten versuchen, einen Unfall zu provozieren, z. B. erst beschleunigen und anschließend eine plötzliche Vollbremsung durchführen und das Folgefahrzeug muss versuchen, den Unfall zu vermeiden, indem dieses frühzeitig eine Bremsung einleitet. Wenn das System so ausgelegt ist, dass das Folgefahrzeug immer gewinnt, dann ist das System sicher. Wenn das zusätzliche Ziel, den Abstand so gering wie möglich zu wählen, mitberücksichtigt wird, dann kann daraus der minimale Abstand abgeleitet werden.

Bevor im Platoon gefahren werden kann, muss ein Platoon gebildet werden. Ebenso ist es notwendig, ein Platoon irgendwann wieder aufzulösen. Saeednia und Menendez [130] haben verschiedene Strategien für das Bilden von Platoons untersucht. Beim Bilden des Platoons mit zwei Fahrzeugen gibt es drei Möglichkeiten, um den Abstand zu verringern. Das erste Fahrzeug wird langsamer, das zweite Fahrzeug fährt schneller oder eine Mischstrategie aus den beiden ersten Möglichkeiten. Analog zu dem Bilden von Platoons können diese Strategien für das Auflösen genutzt werden, jedoch mit vertauschten Rollen, damit der Abstand vergrößert statt verkleinert wird. Das Bilden und Auflösen des Platoons kann zu einem kurzfristigen Mehrverbrauch führen, was wiederum den Kraftstoffverbrauch negativ beeinflusst. Realtests in der USA zeigten, dass das Bilden und Auflösen im Realverkehr relativ häufig stattfindet und dadurch kaum Kraftstoffersparnisse erzielt worden sind [131]. Die Umsetzung der Regelstrategie für das Auflösen und Bilden im Realtest ist jedoch nicht bekannt.

Damit es bei den Manövern keine Missverständnisse gibt, ist ein geeignetes Protokoll notwendig. Farag et al. [132] entwickelten hierfür ein Algorithmus mit definierten Nachrichten für die Anfragen zum Platoon beitreten und verlassen. Renzler et al. [133] entwickelten hingegen für die Ausführung verschiedener Platooningmanöver, wie z. B. Platoon beitreten, ein Zustandsautomaten. Mit dem Zustandsautomat wird die Kommunikation geregelt und damit die auszutauschenden Informationen. Unabhängig vom verwendeten Konzept ist die Voraussetzung für die korrekte Arbeitsweise, dass alle Teilnehmer das gleiche System verwenden, damit Nachrichten richtig interpretiert werden und es keine Missverständnisse in den Aktionen gibt.

Um in einem Platoon zu fahren, ist neben der technischen Umsetzbarkeit auch die Koordination eine wesentliche Voraussetzung. Nur wenn mindestens zwei potentielle Platoonteilnehmer mindestens abschnittsweise die gleiche Route zur gleichen Zeit nehmen, ist ein Platoon möglich. Um gemeinsam im Platoon zu fahren, kann es sein, dass ein Verkehrsteilnehmer einen anderen einholen muss. Liang et al. [134] untersuchten simulativ, ab welchem Verhältnis zwischen

Einholdistanz und Fahrt zum gemeinsamen Zielpunkt ein Bilden des Platoons zu einer Kraftstoffersparnis für einen Lkw führt. Dabei wird angenommen, dass der zurückliegende Lkw während des Einholens die Geschwindigkeit erhöht und dadurch ein Mehrverbrauch hat und anschließend im Platoon, durch den verringerten Luftwiderstand, eine Kraftstoffersparnis erzielt. In einer weiteren Arbeit wird mit einer Graphensuche nach geeigneten Platooningpartnern gesucht [135]. Kokkinogenis et al. [136] gehen ein Schritt weiter und schlagen ein Auktionsprotokoll vor. Damit im Platoon gefahren werden kann, muss evtl. eine andere Route verfolgt werden. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Kosten, wenn ein anderer Verkehrsteilnehmer durch Folgefahrt im Platoon profitiert, sollen dann ausgeglichen werden. Die Bildung der Platoons wird über eine Auktion ermittelt.

Platooning, insbesondere die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch, wurde bereits in vielen Forschungsprojekten untersucht. Dabei wurden sowohl simulative Untersuchungen z. B. mit Computational Fluid Dynamics (CFD) durchgeführt, als auch Realfahrttests. Tabelle 2.4 fasst die Ergebnisse verschiedener Forschungsarbeiten zu Lkw-Platooning zusammen [124].

Tabelle 2.4: Ergebnisse von Lkw-Platooningprojekten [124]

| Jahr | Erstautor  | Fahrzeuge                  | Methode                   | Ergebnis (Höchste Einsparung im Gesamtplatoon)           |
|------|------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------|
| 2000 | Bonnet     | 2 Actros 1853 LS           | Realversuch - Testgelände | Kraftstoff: 15 %<br>(80 km/h & 6.7 m)                    |
| 2004 | Browand    | 2 Freightliners            | Realversuch - Landebahn   | Kraftstoff: 11 %<br>(89 km/h & 4 m)                      |
| 2013 | Davila     | 2 Volvo FH12               | Realversuch - Testgelände | Kraftstoff: 10 %<br>(85 km/h & 5 m)                      |
| 2014 | Lammert    | 2 Peterbilt 386            | Realversuch - Testgelände | Kraftstoff: 6 %<br>(89 km/h & 9.1 m)                     |
| 2014 | Tsugawa    | 3 Schwere + 1 leichter Lkw | Realversuch - Testgelände | Kraftstoff: 18 %<br>(80 km/h & 4.7 m)                    |
| 2015 | Vegendla   | 2 Mittelschwere Lkw        | CFD - STAR-CCM            | Kraftstoff: 12 %<br>(89 km/h & 9.1 m)                    |
| 2015 | Mihelic    | 2 Peterbilt 579            | CFD - PowerFLOW           | Luftwiderstand: 12.8 %<br>(105 km/h & 9.1 m)             |
| 2015 | Ellis      | 3 Volvo VNL 670            | CFD - PowerFLOW           | Luftwiderstand <sup>(1)</sup> : 21 %<br>(105 km/h & 5 m) |
| 2017 | Bishop     | 2 Peterbilt 579            | Realversuch - Testgelände | Kraftstoff: 7 %<br>(105 km/h & 9.1 m)                    |
| 2017 | Nuszkowski | 2 Freightliners            | Realversuch - Autobahn    | Kraftstoff <sup>(2)</sup> : 8 %<br>(100 km/h & 67.4 m)   |

<sup>(1)</sup> Lkw ohne Aerodynamikpaket

<sup>(2)</sup> Nur Folgefahrzeug

Sowohl in Simulationen als auch in Realversuchen konnte eine erhebliche Reduktion des Kraftstoffverbrauches von bis zu 18 % festgestellt werden. Darüber hinaus wurden im Forschungsprojekt „Elektronische Deichsel - Digitale Innovation“ [137] erstmals zweier Platoons

im Speditionsalltag getestet. Das Führungsfahrzeug konnte eine Einsparung von ca. 1,3 % im Kraftstoffverbrauch gegenüber einem Referenzsystem erzielen. Als Referenz wurde ein identischer Lkw mit marktüblichen Effizienzsystem verwendet. Das Folgefahrzeug wies eine Reduktion im Kraftstoffverbrauch von 3 bis 4 % auf.

Trotz der positiven Ergebnisse der Forschungsarbeiten über viele Jahrzehnte ist Platooning bisher nicht in Serienfahrzeugen umgesetzt. Zum einen ist die gesetzliche Voraussetzung nicht gegeben. In Deutschland müssen beispielsweise Lkw einen Mindestabstand von 50 m auf Autobahnen ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h laut StVO §4 [12] einhalten. Zum anderen existieren Sicherheitsbedenken. Bremstests bei Pkw mit unterschiedlichen Herstellern auf verschiedene Teststrecken haben keine eindeutige Reihenfolge der Leistungsfähigkeit des Verzögerungsvermögens ergeben [138]. Dies bedeutet, dass keine eindeutige maximale Verzögerung für ein Fahrzeug angenommen werden kann, weil diese u. a. mit der Straßenbeschaffenheit schwankt. Kallenbach [139] führt zudem Faktoren für Unsicherheiten auf, die den Bremsweg von Lkw beeinflussen. In einer Monte-Carlo-Simulation betrachtet er die zufälligen Streuungen einzelner Komponenten in ihrer Leistungsfähigkeit und die Auswirkung auf die Vermeidung eines Unfalles im Platoon. Dabei können erst bei einer Zeitlücke von 2 s Unfälle ganz ausgeschlossen werden. Bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit von 80 km/h entspricht dies einem Abstand von 44,44 m und liegt damit im Bereich des gesetzlichen Sicherheitsabstandes. Platooning mit verringertem Sicherheitsabstand ist aus diesem Grund nur mit erhöhtem technischem Aufwand, z. B. erhöhter Wartungsaufwand, um die Streuung zu minimieren, möglich. Des Weiteren ist Platooning nur für die Situation Folgefahrt konzipiert. Der Straßenverkehr beinhaltet jedoch viele weitere Situationen, die durch Kooperation verbessert werden bzw. notwendig machen [140]. Zudem benötigt jeder Teilnehmer die gleiche technische Ausstattung.

## 2.4.6 Kooperative Manöverabstimmung

Mit kooperativer Manöverabstimmung können verschiedenartige Konfliktsituationen im Straßenverkehr gelöst werden. Hyldmar et al. [141] zeigten mit Hilfe von Miniaturautos auf einem Rundkurs, dass durch kooperatives Verhalten der Durchsatz an Fahrzeugen erhöht wird. In der Arbeit wird kein genereller Ansatz für die Abstimmung und somit die Realisierung von kooperativen Fahren vorgestellt, jedoch haben sich andere Arbeiten mit der Umsetzung von kooperativen Verhalten bei automatisierten Fahrzeugen beschäftigt. Dabei wurden vor allem Verfahren für Kreuzungen [142–146] und kooperative Spurwechsel [147–151] entwickelt. Die vorgeschlagenen Methoden adressieren immer nur einen bestimmten Spezialfall. Im Folgenden soll daher auf Konzepte eingegangen werden, die nicht auf eine bestimmte Situation beschränkt sind.

Die Methoden können zwischen lokal und global optimal unterschieden werden. Ein globales Optimum, bei dem der Gesamtnutzen unter allen Teilnehmer am größten ist, stellt den Wunschzustand dar. Allerdings ist eine globale Optimierung oftmals nicht durchführbar, beispielsweise zeigen Okoso et al. [152] das bei der Pfadfindung für Fahrzeuge bei optimaler Parkplatzsuche, auch als Automated Valet Parking bezeichnet, keine Lösung mit einem Optimal Solver ab 25 Fahrzeugen, innerhalb 300 s, gefunden wird. Knies et al. [153] haben eine globale Optimierung für nur drei Fahrzeuge bei einem Autobahnscenario durchgeführt. Trotz der geringen Anzahl von Fahrzeugen wurde auf Grund der Vielzahl von möglichen Fahraktionen angeführt, dass eine Durchführung in vertretbarer Zeit nicht realisierbar ist. Dies bedeutet, der Lösungsalgorithmus ist nicht echtzeitfähig und womöglich kann keine optimale Lösung bei vielen Fahrzeugen

gefunden werden. Aus diesem Grund ist der Einsatz von nicht oder lokal optimalen Lösungsverfahren für Realanwendungen notwendig.

Manzinger et al. [154] entwickelten ein kooperatives Verfahren, das mit offline berechneten Templates arbeitet. Situationen werden mit den vorhandenen Templates verglichen. Abbildung 2.15 veranschaulicht beispielhafte Situationen. Liegt beispielsweise eine Situation mit einer endenden Spur vor, dann können Templates, die dieses Kriterium nicht erfüllen, z. B.  $T_1$ , ausgeschlossen werden. Anhand der Anzahl der Fahrzeuge und ihrer Zustände, z. B. Geschwindigkeit und Abstände, können weitere Templates ausgeschlossen werden. Sind beispielsweise die Templates  $T_{i+1}$  und  $T_{i+2}$  valide, dann wird das Template mit den geringsten Allgemeinkosten gewählt, z. B.  $T_{i+2}$ . Anschließend führt jedes Fahrzeug seine Bewegungsplanung aus und folgt möglichst dem durch das Template beschriebenen Plan. Wird kein Template gefunden, dann wird die Bewegungsplanung ohne Template nach gültigen Verkehrsregeln ohne Kooperation durchgeführt. Der Algorithmus wurde in MATLAB umgesetzt und mit drei Fahrzeugen simulativ getestet. Im Median wurde für die Überprüfung der Templates auf Umsetzbarkeit weniger als 10 ms benötigt, allerdings konnte im Einzelfall die Zeit auch auf über 0,4 s steigen. Unklar ist, wie viele Templates für den allgemeinen Straßenverkehr notwendig sind und ob die Echtzeitfähigkeit bei mehr als drei Fahrzeugen gegeben ist. In der Arbeit wurden zudem keine Aspekte der Kommunikation betrachtet, z. B. welche Daten an Fahrzeuge übertragen werden müssen und welche Datenraten hierfür notwendig sind. Die Berücksichtigung der Kommunikationsaspekte ist für die Umsetzbarkeit in realen Fahrzeugen notwendig. Prinzipiell könnten mit den Templates auch energieeffiziente Trajektorien abgebildet werden, allerdings wird hierdurch der Rechenaufwand gesteigert, weil ein deutlich längerer Planungshorizont notwendig ist als für kurzfristige Abstimmung.

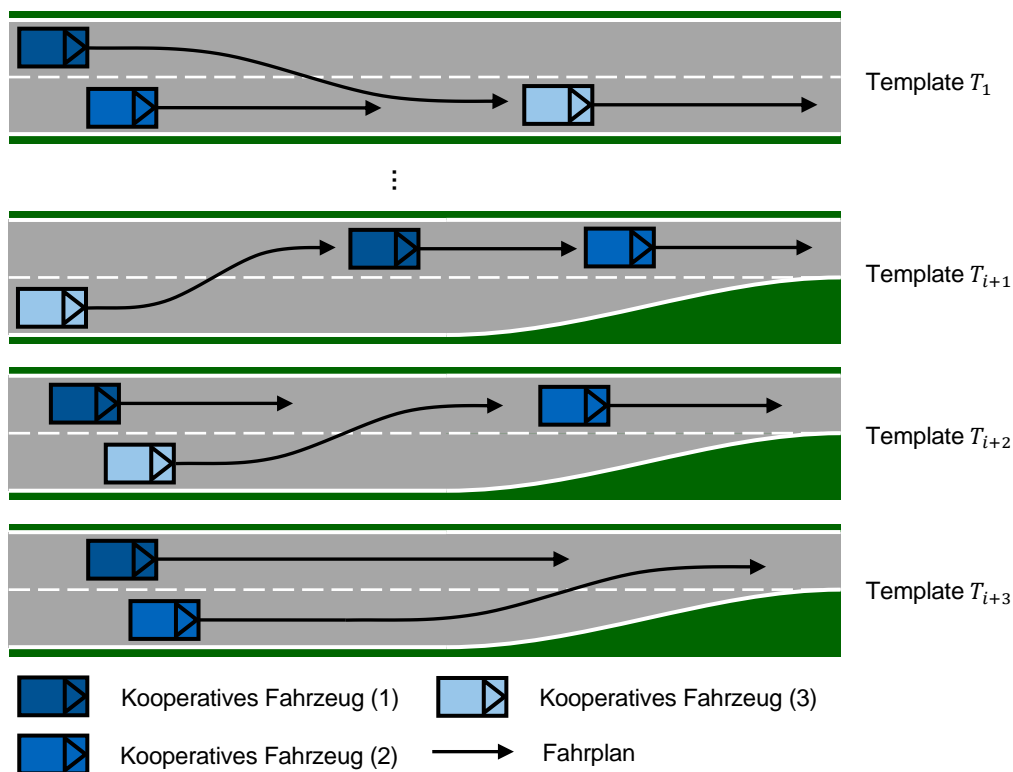


Abbildung 2.15: Beispiele für Maneuvertemplates

Sawade et al. [155] entwickelten das Collaborative Maneuver Protocol (CMP), das in [156] nochmals erweitert wurde. Abbildung 2.16 zeigt das Prinzip anhand eines Einfädelszenarios mit der minimalen Fahrzeuganzahl von zwei Fahrzeugen.

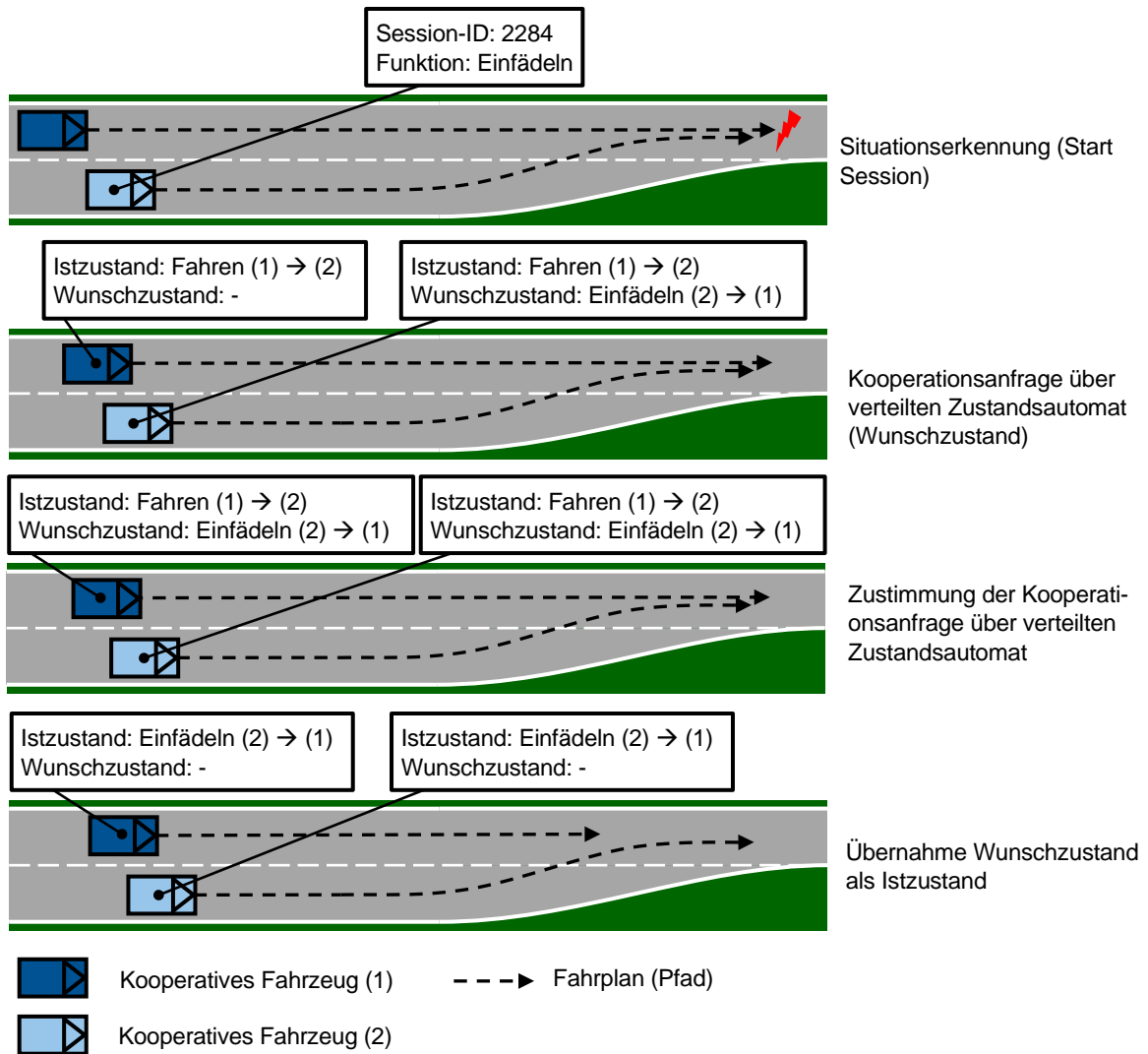


Abbildung 2.16: Abstimmungskonzept CMP

Erkennt ein Teilnehmer eine bestimmte Situation, dann eröffnet dieser eine Session mit eindeutiger ID und der dazugehörigen Funktion. Alle anderen umliegenden Verkehrsteilnehmer erkennen dadurch den Kooperationsbedarf und können der Session beitreten. Kern des Konzeptes ist ein verteilter Zustandsautomat. Der Zustandsautomat ist funktionspezifisch, weshalb bei der Eröffnung der Session die Funktion eindeutig beschrieben wird. Ein Wechsel des Zustandes erfolgt nur, wenn alle Teilnehmer der Session den Zustandswechsel zustimmen. Im Beispiel ist zunächst der aktuelle Zustand, dass die Teilnehmer nach StVO fahren und folglich hat Fahrzeug 1 Vorfahrt und Fahrzeug 2 kann erst nach Fahrzeug 1 die Spur wechseln. Das kooperationsbedürftige Fahrzeug 2 sendet eine Kooperationsanfrage mit dem Wunsch den Zustand im Zustandsautomat zu ändern. Neben dem Zustand wird auch die eindeutige Reihenfolge der Fahrzeuge festgelegt. Dies ist insbesondere von Bedeutung, wenn mehr als zwei Fahrzeuge involviert sind. Wenn alle Teilnehmer der Session den neuen Zustand zustimmen, dann wird dieser als Istzustand übernommen. Ist dies nicht der Fall, kann ein neuer Wunschzustand mit beispielsweise anderer Fahrzeugreihenfolge gesendet werden. Nach der Übernahme des

neuen Zustandes kann die Aktion ausgeführt werden. Die Ausführung der Aktion wird, u. a. mit einer Heartbeat Nachricht, überwacht. Mit der Überwachung kann beispielsweise festgestellt werden, ob ein Teilnehmer aufgrund eines Kommunikationsausfall der Session nicht mehr teilnimmt. Das Konzept dient der Abstimmung von Manövern auf einer taktischen Ebene, für einen Zeithorizont, der mehr als eine Minute betragen kann. Die genaue Planung bzw. Durchführung der Manöver ist nicht Bestandteil des Vorgehens. Jedoch zeigten Eiermann et al. [157] eine Kombination des Verfahrens mit einer Trajektorienplanung für Autobahnauffahrtsszenarien. Zudem wurde gezeigt, wie sich das Verfahren mit einer kollektiven Perzeption verbinden lässt und das hierdurch die Sicherheit gesteigert werden kann [120].

Durch das Vorgehen können Missverständnisse über die Situation und den Ablauf ausgeschlossen werden. Allerdings ist für jede Situation ein eigener Zustandsautomat notwendig. Unklar ist zudem, wie viele Zustandsautomaten für die Abbildung aller kooperativen Szenarien im Realverkehr notwendig sind. Darüber hinaus kann es dazu kommen, dass mehr als eine Funktion aktiv werden muss, z. B. wenn gerade ein Überholmanöver durchgeführt wird und gleichzeitig an einer Autobahnauffahrt vorbeigefahren wird. Die Auswirkung und Absicherung mehrerer gleichzeitiger Sessions wurde noch nicht untersucht. Des Weiteren ist für jede Funktion eine Situationsanalyse notwendig, die nicht genauer definiert ist. Unterschiedliche Implementierungen könnten zu unterschiedlichen Bewertungen der Situation führen und dadurch eine Kooperation verhindern. Zudem ist die Entscheidung über eine Zustimmung zur Kooperation, ohne weitere Daten, mit großen Unsicherheiten verbunden. Im beschriebenen Szenario weiß Fahrzeug 1 nicht, wie weit es seine Geschwindigkeit reduzieren muss, ohne den genauen Bewegungsablauf von Fahrzeug 2 zu kennen. Eine zusätzliche Datenübermittlung der Trajektorie könnte diese Unsicherheit vermeiden, belastet aber zusätzlich den Kommunikationskanal. Des Weiteren wird mit dem Verfahren zwar Kooperation ermöglicht; es stellt aber keine Methode für das energieeffiziente Fahren dar.

Manzinger and Althoff [158] stellen ein Verfahren vor, bei dem Kooperation über fahrbare Räume verhandelt wird. Ein ähnliches Vorgehen schlagen Heß et al. [159] mit dem Space-Time Reservation Procedure (STRP) vor. Im Gegensatz zu Manzinger und Althoff wurde dieses nicht nur in der Simulation, sondern auch in Tests mit Realfahrzeugen untersucht und beinhaltet daher auch Aspekte der Kommunikation [160]. Abbildung 2.17 zeigt wiederum anhand einer Einfädelsituation die Funktionsweise von STRP.

Fahrzeug 2 muss ein Spurwechsel vornehmen, der bei Verfolgung des egoistischen Planes eine Kollision mit einem vorfahrtsberechtigten Fahrzeug verursachen würde. Daher kann Fahrzeug 2 diesen nicht wie gewünscht durchführen und sendet stattdessen eine Kooperationsanfragen an die anderen Verkehrsteilnehmer, indem es einen benötigten Raum mit zugehörigen Zeitintervall versendet. In diesem Fall, ist dies der Raum, der für den Spurwechsel benötigt wird. Fahrzeug 1 kann diesen Raum Fahrzeug 2 zugestehen, indem dieser den Raum bestätigt. Hierdurch haben alle Teilnehmer der Kooperationsanfrage zugestimmt und Fahrzeug 2 kann den kooperativen Spurwechsel durchführen.

Das Konzept benötigt, je nach Beschreibung des Raumes, wenig Daten, die über V2X übertragen werden müssen. Zudem ist, bei fehlerfreier Kommunikationsübertragung, das Konzept eindeutig und robust gegenüber kleinen Abweichungen des Fahrzeugzustandes, die beispielsweise durch Ungenauigkeiten in der Lokalisierung entstehen. Nachteilig ist jedoch, dass eine Situationsanalyse notwendig ist und der Ansatz somit nicht generisch ist. Zudem wird damit nicht das energieeffiziente Fahren abgebildet.

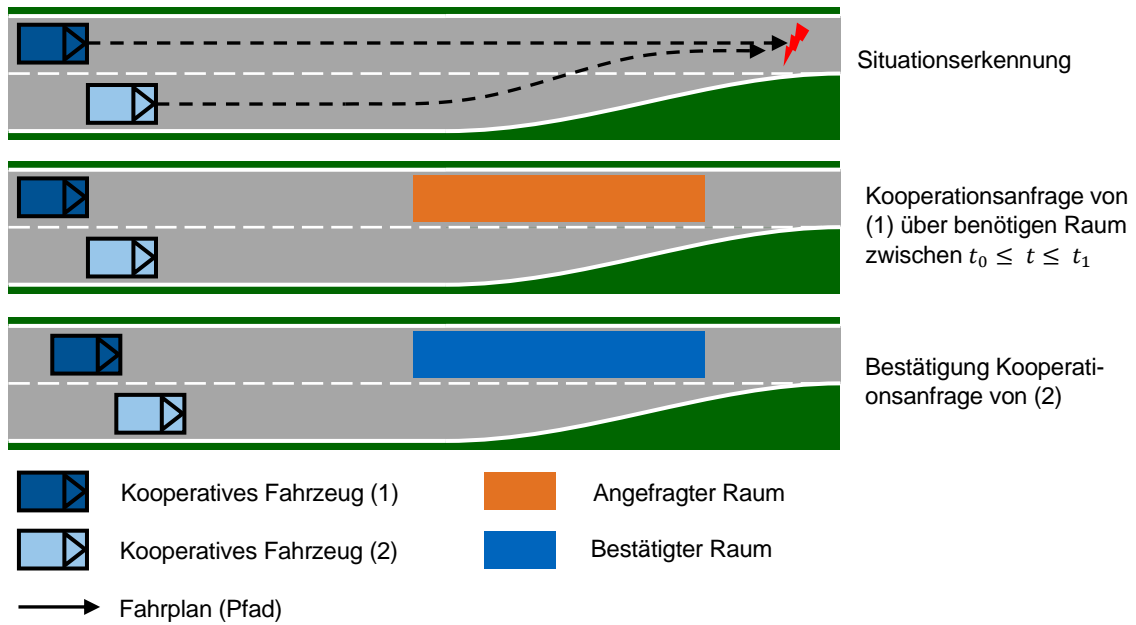


Abbildung 2.17: Abstimmungskonzept STRP

Lehmann et al. [161] schlagen ein generisches Verfahren durch Austausch von Plan- und Wunschtrajektorien vor. Die Plantrajektorie ist der aktuelle Fahrplan, der nach den gültigen Verkehrsregeln durchgeführt werden kann. Dieser wird zyklisch anderen Fahrzeugen über V2X mitgeteilt. Ist eine Trajektorie aufgrund anderer Plantrajektorien nicht durchführbar, dann kann als Kooperationsanfrage zusätzlich eine Wunschtrajektorie versendet werden. Abbildung 2.18 veranschaulicht das Konzept wiederum anhand eines Einfädelmanövers.

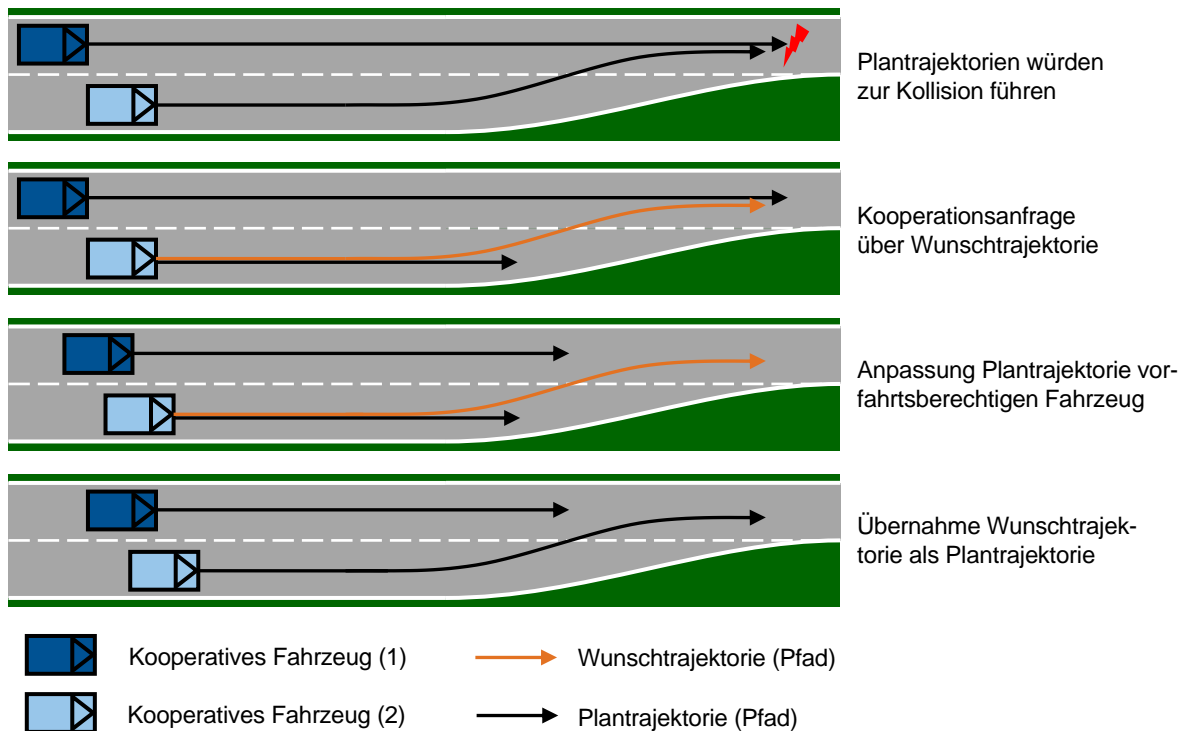


Abbildung 2.18: Abstimmungskonzept Plan- und Wunschtrajektorie

Fahrzeug 1 ist vorfahrtsberechtigt gegenüber Fahrzeug 2. Der bestmögliche Fahrplan von Fahrzeug 2 würde mit der Plantrajektorie von Fahrzeug 1 kollidieren. Plantrajektorien müssen straßenverkehrskonform sein und somit kollisionsfrei. Aus diesem Grund ist der aktuelle Plan von Fahrzeug 2 ein Stillstand am Ende der Spur, weil kein straßenverkehrskonformer Spurwechsel geplant werden kann. Fahrzeug 2 kann allerdings seinen bestmöglichen Fahrplan als Wunschtrajektorie versenden. Wunschtrajektorien sind immer kollisionsbehaftet mit mindestens einer anderen Plantrajektorie, ansonsten könnte diese als Plantrajektorie ausgesendet werden. Durch die Wunschtrajektorie erkennt Fahrzeug 1 den Kooperationswunsch von Fahrzeug 2. Fahrzeug 1 kann jetzt prüfen, ob dieses der Kooperationsanfrage zustimmt. Indem Fahrzeug 1 seine Plantrajektorie derartig anpasst, dass diese kollisionsfrei mit der Wunschtrajektorie von Fahrzeug 2 ist, wird der Kooperation zugestimmt. Im nächsten Schritt kann Fahrzeug 2 seine Wunschtrajektorie als Plantrajektorie übernehmen, weil diese jetzt kollisionsfrei mit allen anderen Plantrajektorien ist und den Spurwechsel durchführen.

Das Konzept sieht vor, dass Trajektorien durch Polynome in Frenetkoordinaten der Straße ausgedrückt werden. Damit diese richtig interpretiert werden, müssen alle Teilnehmer das gleiche Straßenmodell besitzen.

Von diesem Konzept existieren diverse Erweiterungen. Llatser et al. [162] haben es beispielsweise um Alternativtrajektorien und explizite Kosten zu den Trajektorien erweitert. Alternativtrajektorien sind Trajektorien, die ein Fahrzeug potentiell bereit ist zu fahren, jedoch nicht die optimale Fahrstrategie darstellen. Hierdurch soll eine schnellere Manöverabstimmung möglich sein.

Xu et al. [163] schlagen eine Erweiterung des Protokolls um Request, Promise und Confirm Nachrichten vor. In der Request Nachricht können mehrere Wunschtrajektorien enthalten sein und dadurch verschiedenartige Kooperationen angefragt werden. In der Promise Nachricht können die angefragten Fahrzeuge Trajektorien versenden, die sie bereit sind zu fahren. Das anfragende Fahrzeug wählt im Anschluss die bestmöglichen Trajektorien aus und versendet den Plan über die Confirm Nachricht an alle Teilnehmer. Wiederum soll hierdurch eine schnellere Manöverabstimmung stattfinden, nachteilig ist die erhöhte Belegung des Kommunikationskanals. In einer Verkehrssimulation mit V2X wurde das Konzept getestet und einer Verbesserung gegenüber unkooperativem Fahren gezeigt. Ein Vergleich zwischen den kooperativen Konzepten wurde nicht durchgeführt.

Des Weiteren haben Lehmann und Wolf [164] eine Erweiterung ihres ursprünglichen Konzeptes vorgeschlagen. Wunschtrajektorien sollen mit einer eindeutigen ID versehen werden und Fahrzeuge die ihren Plan auf Grund einer Wunschtrajektorie anpassen, sollen durch Übermittlung der eindeutigen ID für die Wunschtrajektorie dies kenntlich machen. Abbildung 2.19 zeigt ein beispielhaftes Szenario, bei dem dieses Vorgehen sinnvoll sein kann. Fahrzeug 2 und 3 möchten die Spur wechseln und senden gleichzeitig eine Wunschtrajektorie, die mit der Plantrajektorie von Fahrzeug 1 kollidiert. Fahrzeug 1 geht beispielsweise auf den Wunsch von Fahrzeug 3 ein und passt seine Plantrajektorie an. Ohne weitere Informationen geht Fahrzeug 2 davon aus, dass Fahrzeug 1 auf seine Wunschtrajektorie reagiert hat und setzt seinen Wunsch als Plan um. Dies ist insbesondere ein Problem, wenn beispielsweise durch Abschirmung Fahrzeug 2 und 3 nicht untereinander kommunizieren können. Das Hauptproblem sind allerdings die nicht eindeutigen Verkehrsregeln. Beispielsweise könnte Fahrzeug 1 weiter hinten fahren und somit wäre die Lücke ausreichend groß, dass Fahrzeug 2 und 3 eine Plantrajektorie auf die Spur von Fahrzeug 1 planen könnten. Hierdurch entsteht wiederum eine Konfliktsituation. Folglich sind für das Konzept der Plan- und Wunschtrajektorie eindeutige Verkehrsregeln oder festgelegte



Regelerweiterungen, die jeder kooperative Teilnehmer kennt, notwendig. Eine Regelerweiterung könnte beispielsweise lauten, Fahrzeuge auf der rechten Spur haben bei nicht eindeutigen Situationen Vorrang.

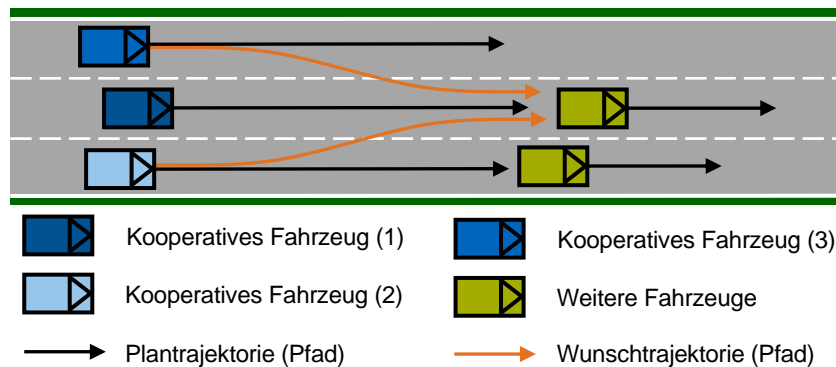


Abbildung 2.19: Beispielszenario für Uneindeutigkeit Plan- und Wunschtrajektorie nach [164]

Der Vorteil des Konzeptes, Plan- und Wunschtrajektorie, ist der generische Ansatz, der keine spezifische Situationsanalyse benötigt. Nachteilig ist, dass jedes Fahrzeug das gleiche Straßenmodell benötigt, damit die in Frenetkoordinaten beschriebenen Trajektorien richtig interpretiert werden. Des Weiteren gibt es keine Informationen, wie weit Fahrzeuge von Trajektorien abweichen dürfen, ohne die Robustheit und Sicherheit negativ zu beeinflussen. Wegen der begrenzten Rechenkapazität in Fahrzeugen und der Anforderung an Echtzeit, können nur relativ kurze Trajektorien berechnet werden, welche somit kein energieeffizientes Fahren mit langen Ausrollmanövern unterstützen.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass die vorgestellten Methoden für kooperative Manöverabstimmung nicht das energieeffiziente Fahren für Lkw abbilden. Jedes Verfahren hat zudem Schwächen, wie z. B. kein generisches Verfahren oder keine Berücksichtigung von Abweichungen in der Lokalisierung. Des Weiteren wurde bis auf STRP die Verfahren bisher nur simulativ getestet und somit fehlt der Nachweis der Umsetzbarkeit in der Realität.

## 2.5 Fazit

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist der Kraftstoffverbrauch ein Hauptkostenfaktor für Speditionen im Fernverkehr. Verschiedene Faktoren beeinflussen den Kraftstoffverbrauch. Ohne konstruktive Änderungen des Antriebstranges kann der Verbrauch durch eine energieeffiziente Fahrweise positiv beeinflusst werden. Hierfür existieren verschiedene Verfahren, die eine energieeffiziente Fahrweise automatisiert umsetzen und die bereits in Serienfahrzeugen Anwendung finden. Nachteilig ist, dass es durch die egoistische Fahrweise mit einer energieeffizienten Längsführung zu einem Mehrverbrauch kommt, wenn sich die Fahrzeuge in Folge des Systemeinsatzes gegenseitig behindern.

Die zukünftigen Fahrzeuge sollen autonom bzw. fahrerlos fahren. Die in der Wissenschaft und Industrie diskutierten Verfahren sind ausgelegt für einen sicheren Betrieb. Die Vorausschau beträgt ca. 10 Sekunden. Für energieeffizientes Fahren ist dies jedoch nicht ausreichend, weil dadurch für den Fernverkehr übliche lange Rollmanöver, für die Reduzierung des Kraftstoffverbrauches, nicht eingesetzt werden können.

Ein weiteres großes Forschungsgebiet in der Fahrzeugtechnik ist V2X. Der Nutzen für die Sicherheit, durch kooperative Warnsysteme, wurde in vielen Arbeiten bereits gezeigt. Zudem wurde bereits V2X eingesetzt, um Platooning zu realisieren. Trotz des positiven Effekts auf den Kraftstoffverbrauch gibt es auch Nachteile. Zum einen ist es bisher gesetzlich nicht erlaubt, den Sicherheitsabstand für Platooning zu unterschreiten, zum anderen ist die Sicherstellung eines sicheren Fahrzustands, mit geringem Abstand zwischen den Fahrzeugen, mit hohem technischem Aufwand verbunden. Darüber hinaus ist Platooning nur eine Einzelsituation im Straßenverkehr, bei der sich wenige Fahrzeuge auf ein kooperatives Manöver verständigen und somit von der Technik profitieren.

Zwei neue Forschungsschwerpunkte im Bereich V2X sind die kollektive Perzeption und die kooperative Manöverabstimmung. Die kollektive Perzeption dient der Vergrößerung der Wahrnehmung durch ein kooperatives Umfeld. Der Einsatz dieser Technik kann die Sicherheit erhöhen, die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch ist jedoch unklar. Kooperative Manöverabstimmungen dienen hauptsächlich der Lösung von Konfliktsituationen im Straßenverkehr, z. B. bei Autobahnauffahrten. Die Verfahren sind in der Regel nicht für eine weite Vorausschau ausgelegt und adressieren nicht das energieeffiziente Fahren.

Bei Betrachtung der Bereiche energieeffizientes Fahren, kollektive Perzeption und kooperative Manöverabstimmung gibt es Forschungslücken bei den Schnittmengen. Abbildung 2.20 veranschaulicht die Themenfelder und die Forschungslücken. Die kollektive Perzeption und die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch wurde bisher nicht betrachtet. Mit Platooning existiert zwar ein Bereich, der energieeffizientes und kooperatives Fahren verbindet, allerdings wird hierdurch nur der Spezialfall Kolonnenfahrt abgedeckt. Ein generisches Konzept, das beide Bereiche verbindet, existiert nicht. Werden beide erwähnten Forschungslücken gefüllt, dann wird indirekt auch die Forschungslücke bei der Kombination aller drei Bereiche adressiert.

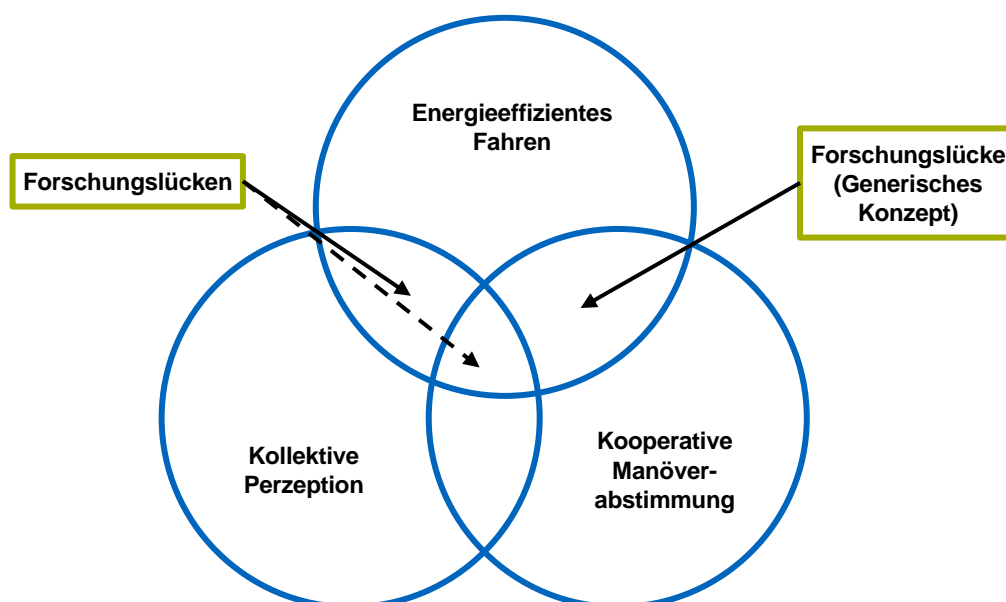


Abbildung 2.20: Einordnung des Neugigkeitswerts der Dissertation in Themenfelder

Darüber hinaus wurden bisher die meisten Konzepte mit V2X nur in Simulationen untersucht. Für die Abbildung in der Simulation werden Annahmen und Vereinfachungen der realen Welt getroffen. Die Validität der Konzepte in Realversuchen zu prüfen, ist daher eine weitere

Forschungslücke. Nur so kann ausgeschlossen werden, dass keine unzulässigen Vereinfachungen in der Simulation getroffen wurden.

Aus diesen Gründen soll in der vorliegenden Arbeit beantwortet werden, wie kollektive Perzeption und kooperative Manöverabstimmung für eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches bei Lkw helfen kann. Dazu ist es zunächst notwendig, eine Methode zu entwickeln, welche die verschiedenen Bereiche kombiniert. Die Methode muss zudem verschiedene Eigenschaften erfüllen, damit diese potentiell in Serienfahrzeugen eingesetzt werden kann:

- Generisches Verfahren
- Robustheit
- Abbildung von Mischverkehr
- Weite Vorausschau

Das System sollte ständig verfügbar sein und nicht nur in einzelnen Situationen, z. B. bei einer Autobahnauffahrt, funktionieren. Dies ist wichtig, um einen hohen Nutzen zu erzielen. Reale Messungen sind immer mit Ungenauigkeiten behaftet. Für den Einsatz in Realfahrzeugen ist deswegen eine Robustheit gegenüber beispielsweise Positionierungsungenauigkeiten erforderlich. Bei Einführung neuer Techniken im Straßenverkehr ist zunächst die Marktdurchdringung gering und steigt dann über die Jahre an. Aus diesem Grund muss von Mischverkehr ausgegangen werden, bei dem ausgestattete und nicht ausgestattete Fahrzeuge am Verkehr teilnehmen. Das Verfahren soll fähig sein, auch in Situationen mit nicht kooperativen Fahrzeugen, eine Lösung für die Fahrplanung zu liefern. Für das energieeffiziente Fahren von Lkw sind Rollvorgänge ein wesentlicher Bestandteil, bei denen ohne Kraftstoffeinsatz für den Antrieb des Fahrzeuges weite Strecken zurückgelegt werden. Darum muss die Methode eine weite Vorausschau besitzen, um diese potentiell langen Rollmanöver zu erkennen und letztendlich auszuführen.



## 3 Methode

*Die Grundidee, inklusive der Trajektorienberechnung, wurde bereits in [165] und das Konzept, ohne Beschreibung der kollektiven Perzeption, in [166] veröffentlicht. Zudem wurde die Möglichkeit der Einbindung der kollektiven Perzeption in die Manöverplanung in [167] vorgestellt und die Umsetzung der kollektiven Perzeption in [168] beschrieben.*

In diesem Kapitel wird zuerst das Konzept vorgestellt und dessen Bestandteile erklärt. Der Kern des Algorithmus ist die Manöverplanung, die im Unterkapitel 3.2 genauer beschrieben wird.

### 3.1 Konzept

Um kurzfristige kooperative Manöverabstimmung zu ermöglichen, gibt es verschiedene Verfahren, die bereits in Kapitel 2.4.6 beschrieben wurden. Das Verfahren von Lehmann et al. [161] hat den Vorteil, dass es sich um ein generisches Verfahren handelt, das ohne Situationsanalyse auskommt. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Abstimmung mit nur zwei Trajektorien, nämlich Plan- und Wunschtrajektorie, erfolgt. Durch die geringe Trajektorienanzahl und somit geringes Datenvolumen soll die Kanallast möglichst gering gehalten werden und dadurch beispielsweise Paketverluste bei der Kommunikation minimiert werden. Das Konzept wurde zudem von Ostermeier [169] in einer Fahrzeugsimulation mit Lkw umgesetzt und in verschiedenen Szenarien getestet. Es konnte gezeigt werden, dass kooperative Situationen, wie z. B. das Einfädeln auf Autobahnen, damit kooperativ gelöst werden können. Aus diesen Gründen wird das Konzept für kurzfristige Abstimmungen hier übernommen. Abweichend vom ursprünglichen Konzept werden allerdings Trajektorien statt in Frenet- in UTM-Koordinaten übermittelt, um eine Unabhängigkeit von einer fest definierten Straßenkarte zu erreichen. Abbildung 3.1 zeigt die Definition von der in dieser Arbeit verwendeten MCM. Als Notation wurde Protocol Buffers [170] gewählt, weil diese plattform- und sprachenunabhängig Datenstrukturen beschreibt und damit besonders geeignet für Definitionen von Nachrichten ist, die über Systemgrenzen ausgetauscht werden.

```
syntax = "proto3";

message MCM {
  uint32 v2xId = 1; // V2X station ID
  int64 timestamp = 2; // time in us
  Trajectory planTra = 3; // planned trajectory
  optional Trajectory desireTra = 4; // desired trajectory

  message Trajectory {
    repeated PolySection longPos = 1; // UTM-easting
    repeated PolySection latPos = 2; // UTM-northing

    message PolySection {
```

```

repeated float coefficients = 1; // coefficients of polynomial a_0, a_1, ...
float start = 2; // start time in s, first section starts always with zero
float end = 3; // end time in s
float xOffset = 4; // UTM-offset, whole number (accuracy float32)
}
}
}

```

Abbildung 3.1: Definition der MCM in der Protocol Buffers Notation

Die Berechnung von UTM-Positionen aus der MCM erfolgt nach Gl. (3.1):

$$x(t) = a_0 + x_{\text{offset}} + a_1 * t + a_2 * t^2 + a_3 * t^3 + \dots \quad (3.1)$$

Mit  $t = [start, end]$  und der entsprechenden UTM-Koordinate  $x$ . Zu beachten ist, dass die Genauigkeit von Float32 nur sieben Dezimalstellen entspricht [171, S. 39] und damit für UTM-Koordinaten nicht ausreichend ist. Um die notwendige Genauigkeit von Float64 zu erreichen, müssen daher in Gl. (3.1) die Float32-Werte in Float64 konvertiert werden. Zudem wird davon ausgegangen, dass sich Fahrzeuge in der gleichen UTM-Zone befinden. Ggf. wird das Heading und die Geschwindigkeit, z. B. für Kollisionsprüfungen, benötigt. Diese können durch Ableitungen von der Position bestimmt werden. Bei stillstehenden Fahrzeugen kann das Heading aus der CAM entnommen werden. Ebenso kann die aktuelle Höhe aus der Referenz Position [172] der CAM ermittelt werden, dies kann beispielsweise bei Brücken mit stehenden Objekten eine notwendige Information sein.

Um energieeffizient zu fahren, ist jedoch der Planungshorizont für Plan- und Wunschtrajektorie nicht ausreichend. Abbildung 3.2 zeigt schematisch die Reichweite der kooperativen Manöverplanung und der notwendigen Reichweite für energieeffizientes Fahren. Bei einer Fahrt mit 80 km/h und 10 s Planungshorizont wird mit einer maximalen Reichweite von 222,2 m geplant. Dies ist nicht ausreichend, um z. B. energieeffiziente Rollmanöver vor Geschwindigkeitsbegrenzungen durchzuführen. Zum Vergleich: Der GPS-Tempomat von MAN, EfficientCurise, berechnet Rollmanöver bis zu einer Länge von drei Kilometern [29]. Aus diesem Grund wird zusätzlich eine strategische Trajektorie für das energieeffiziente Fahren berechnet und im Planungsmodul bei der Generierung von Plan- und Wunschtrajektorien berücksichtigt.

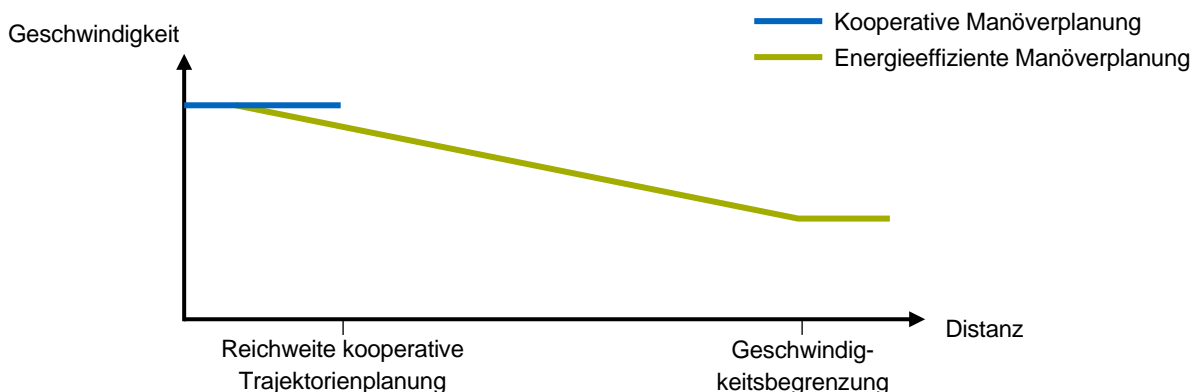


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Reichweiten für die Manöverplanung anhand einer ebenen Strecke mit Geschwindigkeitsbegrenzung

Die Komponenten für die kooperative Längsführung und deren Beziehungen sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

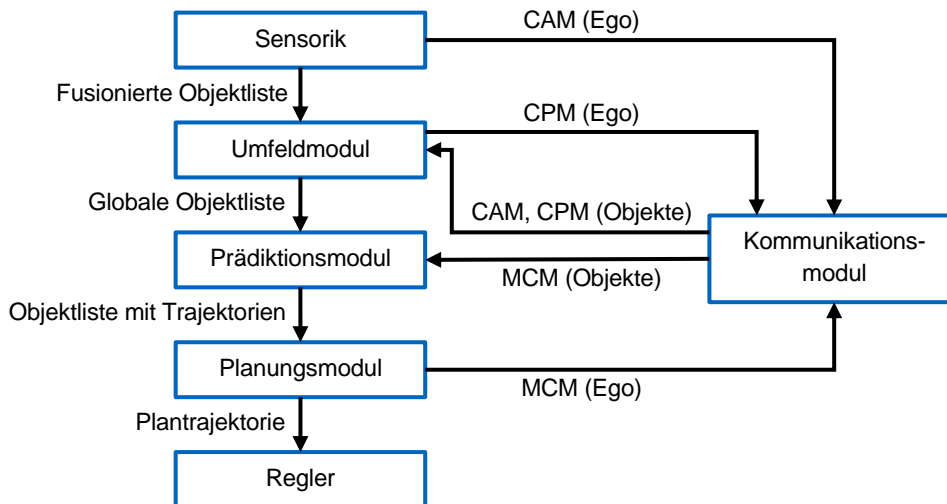


Abbildung 3.3: Vereinfachte Darstellung der Komponenten für den kooperativen Funktionsalgorithmus

Die Sensorik nimmt das Umfeld wahr und liefert mit dem dazugehörigen Framework eine fusionierte Objektliste. Zudem werden alle relevanten Daten für die CAM bereitgestellt und an das Kommunikationsmodul weitergeleitet. Die CAM-Daten werden vom Kommunikationsmodul an alle anderen Verkehrsteilnehmer in Übertragungsbereichweite übermittelt.

Die fusionierte Objektliste wird an das Umfeldmodul übergeben. Das Umfeldmodul wurde vom IMAGinE-Projekt übernommen und ist ausführlich in Deliverable D3.1 [168] beschrieben. In diesem Modul wird aus der fusionierten Objektliste eine lokale Objektliste erzeugt. Objekte, die kurzfristig nicht von der Sensorik erkannt werden, werden kurzzeitig weiter prädiert und in der lokalen Objektliste gehalten. Dies wird auch als lokales Umfeldmodell bezeichnet. Die lokale Objektliste wird über die CPM an andere Verkehrsteilnehmer durch das Kommunikationsmodul verteilt. Für das globale Umfeldmodell werden zusätzlich die V2X-Daten von kooperativen Fahrzeugen genutzt. Dies sind zum einen die CAM und zum anderen die CPM. Hierdurch wird das lokale Umfeldmodell deutlich erweitert. Das Prinzip der kollektiven Perzeption wird in Abbildung 3.4 veranschaulicht.

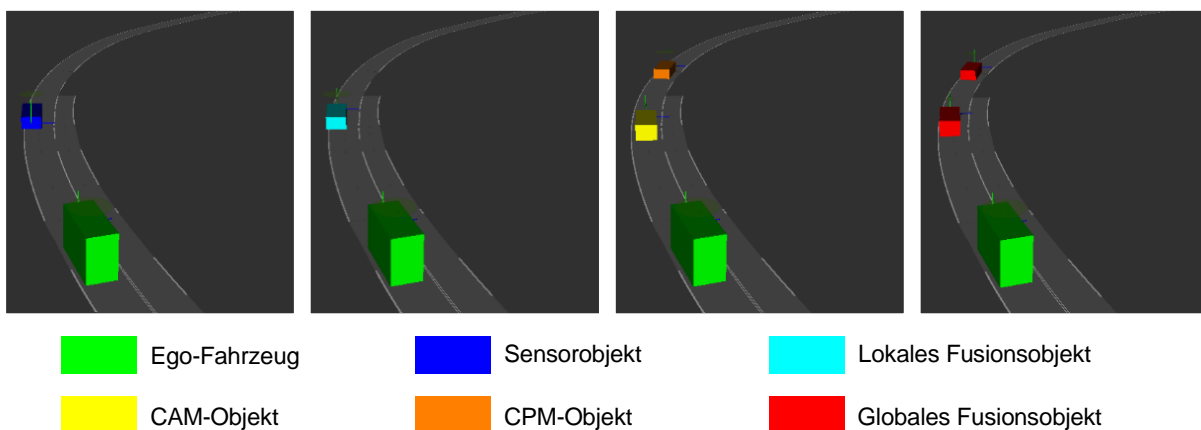


Abbildung 3.4: Veranschaulichung des Prinzips der kollektiven Perzeption und des globalen Umfeldmodelles

In der Abbildung sind vier Bilder vom gleichen Szenario dargestellt. Es handelt sich hierbei um Realdaten von dem in IMAGinE entwickelten Umfeldmodell. Im Szenario folgen zwei

kooperative Lkw einen nicht kooperativem Fahrzeug. Die Abbildung zeigt die Sicht des zweiten bzw. letzten Lkw. Mit der eigenen Bordsensorik wird nur der vorausfahrende Lkw erkannt, ersichtlich am einzigen Sensorobjekt im linken Bild. Im zweiten Bild dargestellt ist die lokale Objektliste, weil nur ein einziges Sensorobjekt erkannt wird, enthält auch die lokale Objektliste nur ein Objekt. Über V2X teilt der erkannte kooperative Lkw zudem seinen eigenen Fahrzeugzustand über die CAM mit. Des Weiteren übermittelt der vordere Lkw das von ihm erkannte Objekt über die CPM an den hinteren Lkw. Sowohl die empfangene CAM als auch CPM sind im dritten Bild von links abgebildet. Mit diesen zusätzlichen Informationen und der lokalen Objektliste erstellt der hintere Lkw ein globales Umfeldmodell, bei dem zwei Objekte enthalten sind. Dargestellt im letzten bzw. rechten Bild, ist die globale Objektliste, die für die interne Planung verwendet wird.

Die globale Objektliste wird zunächst dem Prädiktionsmodul übergeben. V2X-fähigen Fahrzeugen in dieser Objektliste werden die Plan- und ggf. Wunschtrajektorie von der MCM zugeordnet. Für diese sind keine Prädiktionen notwendig. Für nicht kooperative Fahrzeuge wird die Plantrajektorie prädiziert. Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, eignen sich physikalisch basierte Bewegungsmodelle nur für einen kurzen Zeithorizont. Für den Manöverplaner wird allerdings ein längerer Planungshorizonte benötigt, z. B. 10 s. Aus diesem Grund wird ein manöverbasiertes Bewegungsmodell eingesetzt. Es wird die Annahme getroffen, dass sich Objekte entlang der aktuellen Fahrspur mit konstanter Geschwindigkeit bewegen. Dies bedeutet, dass eine hochgenaue Karte mit Spurinformatoren bereitgestellt werden muss. Bei Kreuzungen oder Einmündungen wird angenommen, dass sich die Fahrzeuge auf die nächstliegende Anschlussspur in der Karte weiterbewegen. Die Objektinformationen mit den Trajektorien werden anschließend dem Planungsmodul übergeben.

Im Planungsmodul erfolgt die Trajektorienberechnung des Ego-Fahrzeuges. Dieses Modul stellt den Kern der kooperativen Längsführung dar, weshalb die Funktionslogik ausführlich im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird. Das Modul bestimmt die Plan- und ggf. Wunschtrajektorie des Ego-Fahrzeuges. Diese Trajektorien werden anschließend über die MCM und das Kommunikationsmodul an andere Verkehrsteilnehmer übermittelt. Zudem wird die Plantrajektorie mit Informationen über die geplanten Fahraktionen an den Regler übergeben. Bei den Fahraktionen ist nur relevant, ob ein Rollmanöver geplant wurde. Wird ein Rollmanöver geplant, dann wird der Neutralgang vom Regler gesetzt, ansonsten wird der Gang von der Getriebelegik des Automatikgetriebes gesetzt. Des Weiteren berechnet der Regler die Steuersignale für die Aktorik, um die Trajektorie abzufahren.

## 3.2 Planungsalgorithmus

Abbildung 3.5 zeigt eine Übersicht über das Planungsmodul. Ausgehend vom aktuellen Zustand werden zuerst eine Schar von Trajektorien für die Manöverabstimmung und eine strategische Trajektorie berechnet. Im Anschluss werden die berechneten Trajektorien mit den Trajektorien von anderen Verkehrsteilnehmern auf Kollisionen geprüft und anschließend mit Kostenfunktionen bewertet. Mit Hilfe dieser Bewertung werden die Plan- und Wunschtrajektorien ausgewählt.



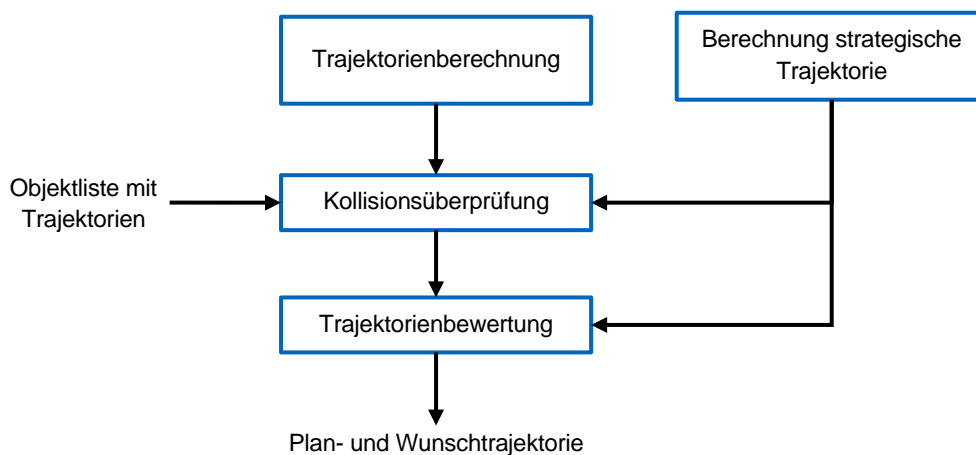


Abbildung 3.5: Übersicht über Komponenten des Planungsalgorithmus

### 3.2.1 Berechnung strategische Trajektorie

In Kapitel 2.1 wurden verschiedene Verfahren für die Berechnung von energieeffizienten Trajektorien vorgestellt. Für das Gesamtverfahren ist es nicht entscheidend, welche Methode gewählt wird, solange zu jedem Berechnungszyklus eine kontinuierliche Trajektorie, über den vorgegebenen Horizont, berechnet werden kann. Aufgrund der geringen Rechenkapazität und der Robustheit wird ein Heuristik-Verfahren eingesetzt. Abbildung 3.6 zeigt das Grundprinzip der strategischen Trajektorienberechnung. Ein vorliegender Streckenabschnitt wird anhand seiner Geschwindigkeitsbegrenzungen unterteilt. Für die einzelnen Abschnitte werden lokal optimale Trajektorien berechnet, z. B. ein energieeffizientes Ausrollmanöver vor einer Geschwindigkeitsbegrenzung oder Fahrt mit maximaler Geschwindigkeit zwischen zwei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen. Die Trajektorien werden mit Hilfe von Fahrwiderständen berechnet, damit sichergestellt wird, dass diese fahrbar sind. Die lokalen optimalen Trajektorien werden im letzten Schritt zu einer Trajektorie verbunden, diese stellt die strategische Trajektorie dar. Beim Vorgehen wird angenommen, dass sich das Fahrzeug entlang einer vorgegebenen Route auf der rechten Fahrspur bewegt.

In Abbildung 3.7 ist ein vereinfachtes Ablaufdiagramm für die Berechnung der strategischen Trajektorie dargestellt, um die konkrete Umsetzung zu beschreiben. Im ersten Schritt wird ausgehend vom aktuellen Zustand eine Rolltrajektorie berechnet. Wird durch das Ausrollmanöver eine Geschwindigkeitsbegrenzung erreicht, dann ist die Rolltrajektorie als Starttrajektorie valide. Bei einer invaliden Trajektorie wird geprüft, ob eine Bremsung notwendig ist, z. B. wenn bei einem Gefälle eine Geschwindigkeitsbegrenzung nicht durch Ausrollen erreicht werden kann. Bei der Notwendigkeit einer Bremsung wird eine Bremstrajektorie berechnet, ansonsten wird eine Beschleunigungstrajektorie berechnet. Ist die aktuelle Geschwindigkeit gleich der maximal erlaubten Geschwindigkeit, dann ist die Beschleunigungstrajektorie nur ein Startpunkt. Im Anschluss wird eine Verbindungstrajektorie bis zur nächsten Geschwindigkeitsbegrenzung berechnet. Verbindungstrajektorien werden ab dem Startpunkt oder der vorliegenden Geschwindigkeitsbegrenzung mit der maximal erlaubten Geschwindigkeit berechnet. Solange bei Steigungen der Steigungswiderstand mit den weiteren Fahrwiderständen die Antriebskraft nicht übersteigen, wird die Strecke mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren. Ist dies nicht der Fall, wird mit maximal möglicher Geschwindigkeit gefahren und ggf. nach der Steigung wieder bis zur erlaubten Höchstgeschwindigkeit beschleunigt. Ist in diesem Abschnitt eine

Gefällestrecke enthalten, dann wird eine Rolltrajektorie beim Übergang berechnet, damit vor dem Gefälle zunächst durch die Fahrwiderstände die Geschwindigkeit reduziert wird und im Gefälle durch die Hangabtriebskraft wieder, bis zur erlaubten Höchstgeschwindigkeit, beschleunigt wird. Während des Rollmanövers wird kein Kraftstoff verbraucht, weswegen dieses Verhalten als optimal angesehen wird. Die Rolltrajektorie wird in die Verbindungstrajektorie integriert.

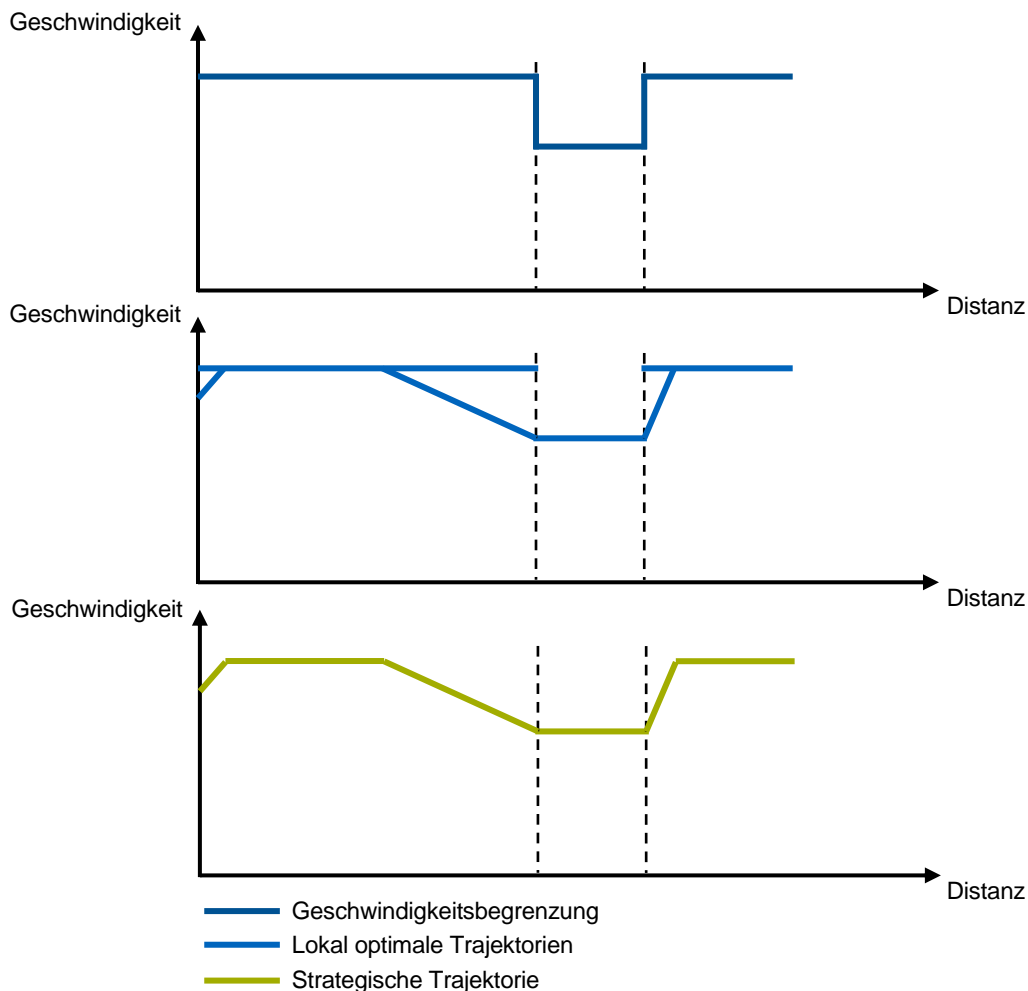


Abbildung 3.6: Veranschaulichung der strategischen Trajektorienberechnung anhand von Geschwindigkeitsprofilen

Es folgt eine Berechnungsschleife, solange der Planungshorizont nicht erreicht ist. Aus diesem Grund wird zunächst geprüft, ob der Planungshorizont erreicht ist. Ist dieser nicht erreicht, dann wird anhand der Endgeschwindigkeit der Verbindungstrajektorie und der im nächsten Abschnitt maximal erlaubten Geschwindigkeit entschieden, ob eine Beschleunigungs- oder Rolltrajektorie notwendig ist. Ist die maximal erlaubte Geschwindigkeit größer als die Endgeschwindigkeit, dann wird eine Beschleunigungstrajektorie bis zur maximal erlaubten Geschwindigkeit berechnet. Ist die Endgeschwindigkeit größer als die maximal erlaubte Geschwindigkeit, dann wird von der Geschwindigkeitsbegrenzung ausgehend rückwärts eine Rolltrajektorie berechnet, bis die im davor liegenden Abschnitt maximal erlaubte Geschwindigkeit erreicht wird. Anschließend wird nach dem bereits beschriebenen Vorgehen eine Verbindungstrajektorie berechnet.

Ist der Planungshorizont erreicht, werden die lokalen Trajektorien verbunden. Anhand der Geschwindigkeiten und der Wegstrecke werden Schnittpunkte ermittelt. Die daraus resultierenden obsoleten Bereiche werden von den Trajektorien entfernt. Im Anschluss werden die Trajektorien zusammengefügt. Um eine zusammenhängende Trajektorie zu erreichen, wird die Zeit der

einzelnen Trajektorie verworfen und vom Startpunkt ausgehend eine neue Zeitberechnung durchgeführt.

Im beschriebenen Ablauf wurden keine Sonderfälle aufgezählt, beispielsweise das Überspringen von Abschnitten, wenn Geschwindigkeitsbegrenzung dicht hintereinander liegen oder das bei Geschwindigkeitsbegrenzungen in Gefällen ggf. keine Rolltrajektorie für das Erreichen der Geschwindigkeitsbegrenzung existiert. Die genannten Sonderfälle sind jedoch in der Implementierung umgesetzt.

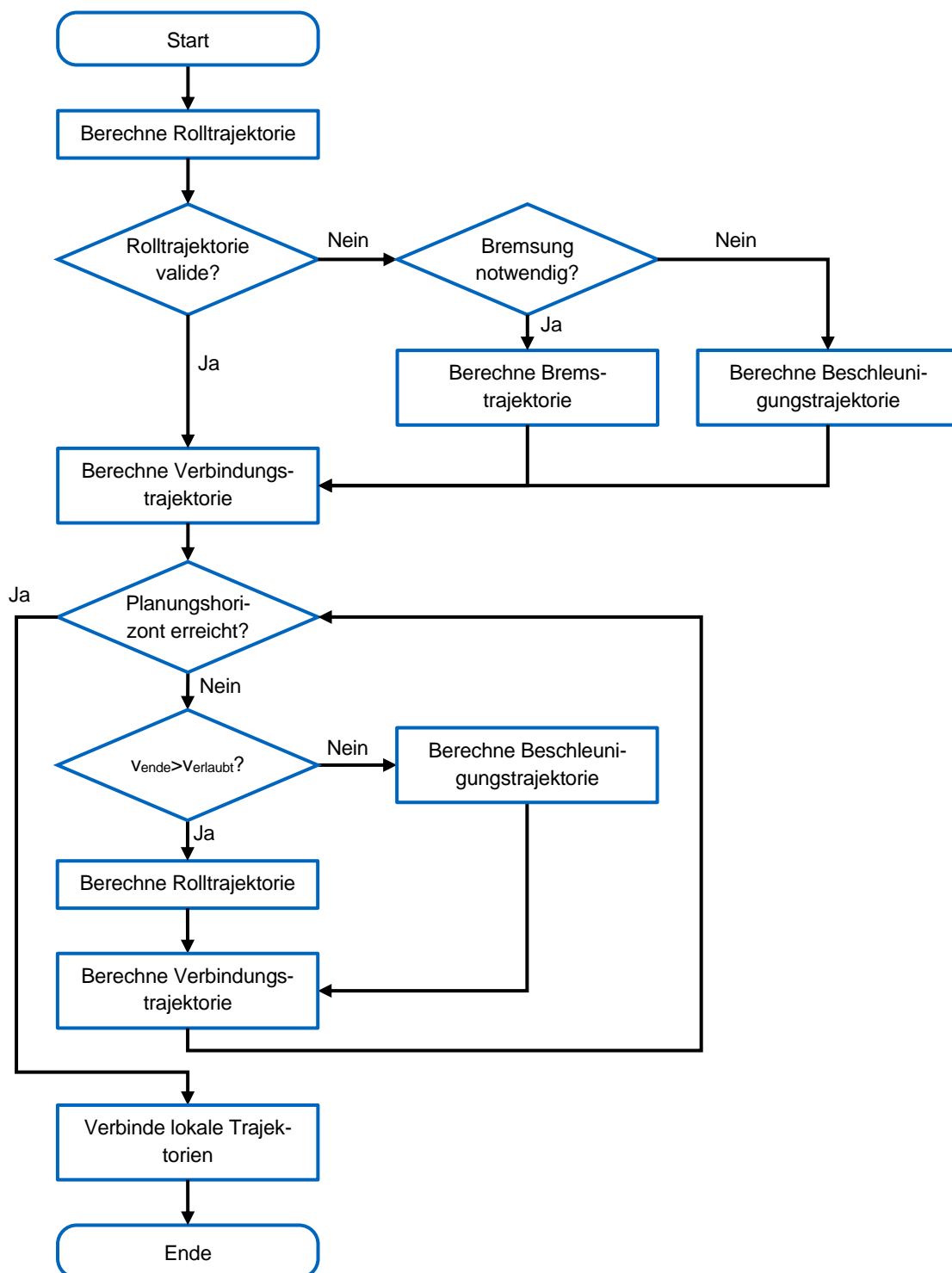


Abbildung 3.7: Vereinfachtes Ablaufdiagramm der strategischen Trajektorienberechnung

### 3.2.2 Trajektorienberechnung

Bei der Trajektorienberechnung wird ebenfalls angenommen, dass sich das Ego-Fahrzeug entlang einer Route auf der rechten Fahrspur bewegt. Diese ist die meistgenutzte Spur von Lkw bei mehrspurigen Autobahnen und häufig auch die einzig erlaubte Spur. Überhol- oder Ausweichmanöver werden nicht berechnet, weil diese für die Untersuchungsziele der kooperativen Längsführung in dieser Arbeit nicht notwendig sind. In Kapitel 2.2 wurden verschiedene Methoden für die Trajektorienberechnung vorgestellt. Für das Konzept ist es nicht entscheidend, welches Verfahren für die Trajektorienberechnung eingesetzt wird. Wichtig ist jedoch, dass verschiedene Trajektorien berechnet werden, die möglichst gut den Manöverraum abdecken und fahrbar sind. Aus diesem Grund wurde ein Graphenverfahren ausgewählt. Abbildung 3.8 zeigt das Prinzip der Trajektorienberechnung anhand von angedeuteten Geschwindigkeitsprofilen. Ausgehend vom Ausgangszustand wird mit Hilfe der Fahrwiderstände und möglicher Fahraktionen eine Teiltrajektorie berechnet. Die möglichen Fahraktionen sind Beschleunigen, Geschwindigkeit halten, Rollen, leichtes Bremsen und Bremsen. Die Endpunkte stellen die nächsten Knoten dar. Von jedem einzelnen Knoten werden wiederum die Trajektorie mit den Fahraktionen erweitert, bis der geplante Zeithorizont bzw. Endknoten erreicht wird. Durch die Berechnung der Trajektorien mit Fahrwiderständen wird die Fahrbarkeit gewährleistet, weil unrealistische Beschleunigungen ausgeschlossen werden. Kann eine Fahraktion nicht durchgeführt werden, z. B. wegen Überschreitung der zulässigen Geschwindigkeit, dann wird diese Trajektorie verworfen. Aus Abbildung 3.8 ist ebenfalls ersichtlich, dass die Knoten abhängig von der Reihenfolge der Fahraktionen sind, beispielsweise wird durch eine Bremsung und anschließender Beschleunigung eine geringere Wegstrecke zurückgelegt, als durch eine Beschleunigung und anschließender Bremsung. Grund hierfür ist die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit bei der Reihenfolge Beschleunigung und anschließender Bremsung.

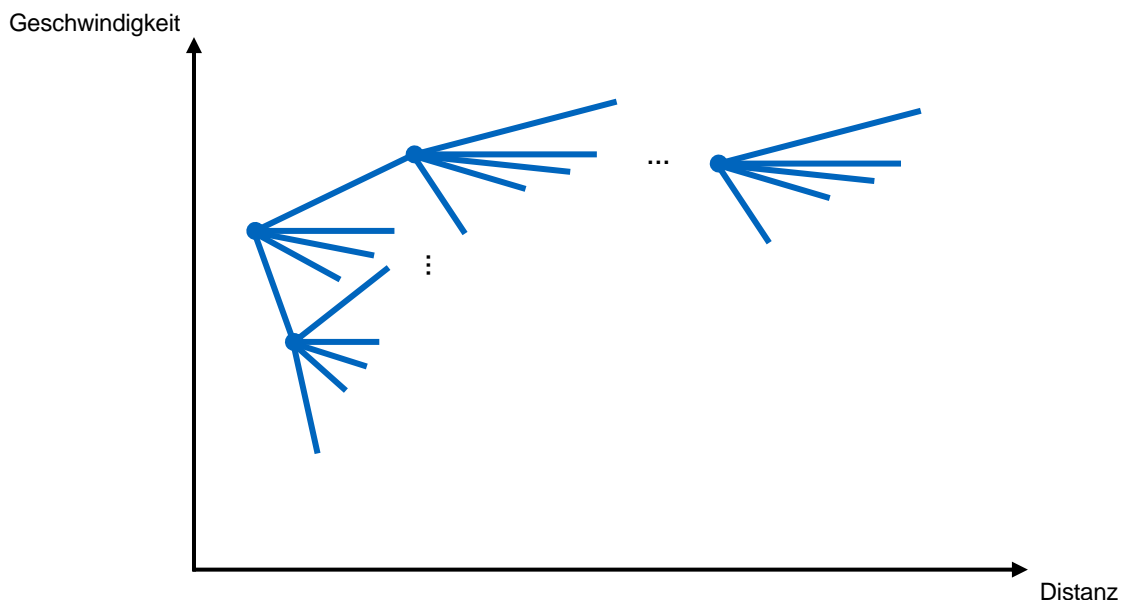


Abbildung 3.8: Veranschaulichung der Trajektorienberechnung anhand von angedeuteten Geschwindigkeitsprofilen

### 3.2.3 Kollisionsüberprüfung

Der Kollisionscheck wird mit den berechneten Trajektorien des Ego-Fahrzeuges und den Plan- und Wunschtrajektorien der anderen Verkehrsteilnehmer durchgeführt. Ego-Trajektorien sind die berechneten Trajektorien aus dem Graphenverfahren und bis zum gleichem Zeithorizont die strategische Trajektorie. Hierdurch wird sichergestellt, dass immer die bestmögliche energieeffiziente Trajektorie mitberücksichtigt wird. Als Kollision wird zunächst das Nichteinhalten des Sicherheitsabstandes nach StVO verstanden. Auf Grund von Ungenauigkeiten, z. B. durch Messdatenerfassung bzw. Ermittlung der Position oder des Abfahrens der Trajektorie, wird ein mehrstufiger Kollisionscheck durchgeführt. Die Trajektorien werden mit Toleranzen belegt. Zu jedem Zeitpunkt der Trajektorie darf die Position um einen vorher definierten Wert abweichen. Der Wert ist dabei geschwindigkeitsabhängig und nimmt linear von 0 bis 50 km/h zu. Der maximale Toleranzwert wird somit bei Geschwindigkeiten ab 50 km/h gesetzt. Die Geschwindigkeitsgrenze leitet sich von der StVO §4 [12] ab. Der Paragraph schreibt ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h einen Abstand von mindestens 50 m auf Autobahnen für Lkw vor, weshalb ab dieser Geschwindigkeit der Sicherheitsabstand konstant ist. Wird der Toleranzwert beim Abfahren der Trajektorie überschritten, erfolgt eine Rücksetzung auf die aktuelle Position bzw. Fahrzeugzustand, ansonsten werden Trajektorien immer vom geplanten Punkt bzw. Zustand der letzten Plantrajektorie, zum gegebenen Zeitpunkt, weiter berechnet. Dies bedeutet, dass der tatsächliche Abstand um das Zweifache der Toleranz bei Trajektorien abweichen kann und bei einer Rücksetzung der Abstand sich sprunghaft verändert. Zudem kann es durch numerische Ungenauigkeiten in der Berechnung von einem Berechnungszyklus zum nächsten zu einem veränderten Abstandsmaß kommen, d. h. bei einem Sicherheitsabstand von z. B. 50 m ändert sich der berechnete Abstand von beispielsweise 50,000 000 000 1 m auf 49,999 999 999 8 m. Ist dies der Anfangsabstand, dann ist in diesem Beispiel keine Berechnung von kollisionsfreien Trajektorien möglich. Aus diesen Gründen gibt es drei Kollisionsprüfungen mit verschiedenen Abständen:

- Stufe 1: Sicherheitsabstand nach StVO + zweifache Toleranz der Trajektorie
- Stufe 2: Sicherheitsabstand nach StVO in ersten Sekunden (z. B. ersten 3 s), ansonsten wie Stufe 1
- Stufe 3: Sicherheitsabstand nach StVO

### 3.2.4 Trajektorienbewertung

Im letzten Schritt der Planung werden die Trajektorien bewertet. Hierzu werden die Kosten einer Trajektorie anhand von Kostenfunktionen ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Trajektorien in abgetasteter Form mit festen Zeitschritten und  $n$  Punkten vorliegen. Zunächst werden die Kosten für das eigene Fahrzeug  $Cost_{ego}$  ermittelt:

$$Cost_{ego} = w_{efficient} * Cost_{efficient} + w_{compare} * Cost_{compare} \quad (3.2)$$

mit

$$Cost_{efficient} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Cost_{drivingAction}(i) \quad (3.3)$$

$$Cost_{compare} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \min \left( \frac{|v_{strategy}(i) - v_{trajectory}(i)|}{\Delta v_{compareMax}}, 1 \right) \quad (3.4)$$

$w_{\text{efficient}}$  und  $w_{\text{compare}}$  sind Gewichtungsfaktoren.  $Cost_{\text{efficient}}$  beschreibt wie energieeffizient eine Trajektorie abgefahren werden kann. Hierzu werden die Kosten für das Ausführen einzelner Fahraktionen aufaddiert und der Durchschnitt gebildet.  $Cost_{\text{compare}}$  vergleicht die Geschwindigkeitsprofile der Trajektorie mit der strategischen Trajektorie. Dazu wird der Betrag der Geschwindigkeitsdifferenzen der beiden Trajektorien, am gegebenen Zeitpunkt, ermittelt und mit  $\Delta v_{\text{compareMax}}$  normiert. Der maximale Wert beträgt hierbei eins. Mit dieser Kostenfunktion wird zum einen eine angemessene Geschwindigkeit sichergestellt und zum anderen das Erkennen von weit vorausliegenden Rollmanövern ermöglicht. Im Anschluss werden die Kooperationskosten  $Cost_{\text{cooperation}}$  berechnet:

$$Cost_{\text{cooperation}} = Cost_{\text{ego}} + n_{\text{collisionDesire}} * Bonus_{\text{cooperation}} \quad (3.5)$$

$n_{\text{collisionDesire}}$  sind die Anzahl der erkannten Kollisionen der Stufe 1 mit Wunschtrajektorien anderer Verkehrsteilnehmer.  $Bonus_{\text{cooperation}}$  ist ein Faktor, um kooperative Trajektorien zu bevorzugen.

In der Regel wird für die Plantrajektorie die Trajektorie mit den besten kooperativen Kosten ausgewählt, welche kollisionsfrei mit anderen Plantrajektorien ist. Dabei werden zuerst nur Trajektorien betrachtet, die dem Kollisionscheck der Stufe 1 entsprechen. Sind keine Trajektorien vorhanden, die Stufe 1 erfüllen, wird Stufe 2 betrachtet. Hierdurch wird angestrebt, dass gegen Ende der Trajektorie wieder der Abstand für Stufe 1 erreicht wird. Sind ebenfalls keine Trajektorien vorhanden die Stufe 2 erfüllen, werden Trajektorien der Stufe 3 betrachtet. Im nächsten Berechnungszyklus wird wieder versucht Trajektorien der Stufe 1 oder 2 zu finden. Existiert keine kollisionsfreie Trajektorie, wird eine Notfalltrajektorie berechnet, die eine Bremsung ausführt.

Wird dem Wunsch von anderen Verkehrsteilnehmern entsprochen, wird die Wunschtrajektorie gespeichert und bei den nächsten Berechnungszyklen wie eine vorfahrtsberechtigzte Plantrajektorie behandelt.

Ist eine Trajektorie vorhanden deren  $Cost_{\text{ego}}$  deutlich unter den kooperativen Kosten liegt, wird diese als Wunschtrajektorie gesetzt.

Die Plan- und Wunschtrajektorie werden anschließend an das Kommunikationsmodul weitergeleitet und per MCM an andere Verkehrsteilnehmer übermittelt. Mit der vorliegenden Trajektorienberechnung ist es notwendig die Trajektorien zuvor in Polynome umzuwandeln. Dies erfolgt mit Hilfe der Methode für kleinste Quadrate [173]. Die Plantrajektorie wird zusätzlich dem Regler übergeben. Die Plantrajektorie für den Regler beinhaltet zusätzlich Informationen über die Fahraktionen, wie z. B. Geschwindigkeit halten oder ein Rollmanöver ausführen.

## 4 Validierungsmethoden

Um die Forschungsfragen zu beantworten, muss das Konzept validiert werden. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Nachfolgenden werden die hier gewählten Methoden Simulation und Realfahrzeug erörtert, dabei wird u. a. auf die verwendete Software und Hardware näher eingegangen.

### 4.1 Simulation

Der Einsatz von Simulationen für die Entwicklung und Forschung in der Fahrzeugtechnik ist weit verbreitet, weshalb viele verschiedene Simulationsprogramme existieren. Tong et al. [62] und Rosique et al. [69] geben einen Überblick über Simulationsprogramme, die in der Fahrzeugtechnik eingesetzt werden. Grundsätzlich kann bei den Anwendungen zwischen Verkehrs- und Fahrzeugsimulation unterschieden werden. Verkehrssimulationen werden wiederum in nano-, mikro- meso- und makroskopische Verkehrsflussmodelle eingeteilt. Der Detailgrad nimmt dabei von nanoskopisch bis makroskopisch ab. Bei der makroskopischen Betrachtung werden keine einzelnen Fahrzeuge betrachtet, während bei den nanoskopischen Verkehrsmodellen Fahrermodelle verwendet werden, die z. B. Gas- und Bremspedal ansteuern [174, S. 9-11]. Ziel der Verkehrssimulationen ist es, die verkehrlichen Auswirkungen von Systemen und Straßennetzen zu untersuchen, z. B. den Durchsatz von Fahrzeugen bei veränderter Ampelschaltung.

Die Fahrzeugsimulation hingegen beschreibt Fahrzeuge in einem höheren Detailgrad und wird für die Entwicklung von Fahrzeugen und deren Systemen eingesetzt, z. B. für die Auslegung eines Fahrdynamikreglers. Das Fahrzeug kann dabei in unterschiedlichen Detailgraden beschrieben werden. Angefangen von einer makroskopischen Beschreibung des Fahrzeuges mit beispielsweise Fahrwiderständen, über die Modellierung einzelner Komponenten mit Kennfeldern bis hin zu einer physikalischen Beschreibung aller Komponenten. Der Übergang zwischen den einzelnen Darstellungsformen ist fließend, beispielsweise können einzelnen Komponenten mit Kennfeldern beschrieben werden, während andere Komponenten physikalisch modelliert werden. In der Regel nimmt jedoch mit der detailgetreuen Simulation eines Fahrzeuges die Rechenzeit zu.

Werden einzelne bewegliche Komponenten modelliert, dann wird dies als Mehrkörpersystem bzw. -simulation bezeichnet [175, S. 257, 176, S. 21]. Voraussetzung für das Modellieren eines Fahrzeuges mit ein Mehrkörpermodell ist die Kenntnis über den genauen Aufbau des Fahrzeuges. Allerdings werden oftmals nicht alle benötigten Fahrzeugdaten von den Herstellern bereitgestellt, weshalb teilweise Komponenten durch Kennfelder vereinfacht werden müssen. Zudem sind nicht immer alle physikalischen Zusammenhänge und Parameter hinreichend bekannt. Ein Beispiel hierfür ist der Rollwiderstand des Reifens, der sich aus verschiedenen Faktoren zusammensetzt. Für die Beschreibung existieren verschiedene Methoden, die jedoch alle nur eine Näherung zur Realität darstellen [19, S. 55-65, 41, S. 137-150].

Der notwendige Detailgrad der Simulation hängt vor allem vom Untersuchungsziel ab und ist eine Abwägung zwischen verfügbaren Informationen, Rechenzeit und Genauigkeit bzw. Güte der Simulation. Um eine angemessene Entwicklungs- und Testzeit zu gewährleisten, sollte die Simulation möglichst echtzeitfähig sein. Des Weiteren stehen nicht alle Fahrzeugdaten, z. B.

genaue Abmessungen der Bauteile, zur Verfügung. Aus diesen Gründen ist der Einsatz einer reinen Mehrkörpersimulation nicht möglich. Für die vorliegende Arbeit ist es notwendig, den Antriebsstrang und Verbrauch hinreichend genau abzubilden. Hierfür kann beispielsweise der Motor, der physikalisch mit dem Getriebe gekoppelt ist, mit einem Kennfeld beschrieben werden. Eine Mehrkörpersimulation mit Kennfeldern, für ausgewählte Komponenten, ist somit am besten für den gegebenen Anwendungsfall geeignet.

Fahrzeugsimulationen wurden häufig für die Auslegung und Entwicklung des eigenen Fahrzeuges, auch Ego-Fahrzeug genannt, eingesetzt. Weitere Fahrzeuge die z. B. für die Entwicklung eines ACC-System benötigt wurden, wurden als Verkehrsobjekte zwar dargestellt, jedoch nicht mit einem hohen Detailgrad beschrieben. Für die Entwicklung von kooperativen Systemen ist es hingegen notwendig, mehrere detailgetreue Fahrzeuge zu simulieren, welche über eine Luft-schnittstelle (V2X) interagieren können.

Des Weiteren wird für die Entwicklung und Evaluation kooperativer Fahrsysteme eine Anbindung oder Integration zur Funktionslogik benötigt. Eine Möglichkeit hierfür ist die Verwendung eines Frameworks für die Entwicklung der Funktionslogik und die Anbindung des Frameworks über eine definierte Schnittstelle zur Simulationsumgebung. Über definierte Schnittstellen ist es zudem möglich, die Funktionslogik sowohl in der Simulation als auch im realen Fahrzeug zu verwenden, ohne dass Programmänderungen notwendig sind. Des Weiteren bieten Frameworks den Vorteil von vordefinierten Funktionen, wie z. B. das Visualisieren von Signalen und sind in der Regel unabhängig von einer bestimmten Hardware. Ein vielverwendetes Framework ist das Robot Operating System (ROS) [177]. Bei diesem können Funktionslogiken in Nodes integriert werden. Nodes stellen Softwarekomponenten dar. Die Nodes können wiederum Nachrichten über Topics austauschen und dadurch miteinander interagieren.

Es existieren verschiedene Simulationsumgebungen für die Funktionsentwicklung im automobilen Umfeld. Eines davon ist das kommerzielle Programm TruckMaker von IPG [178]. TruckMaker ist eine Erweiterung von CarMaker, um Fahrzeuge mit mehreren Achsen darzustellen. Damit ist es möglich, Sattelzugmaschinen mit Aufliegern abzubilden, die häufig im Fernverkehr eingesetzt werden. Zudem bietet TruckMaker Demo-Modelle mit realistischen Daten für Lkw an. Im Rahmen des IMAGinE-Projektes wurde der TruckMaker erweitert [179, 180]. Zum einen wurde die SimNet-Erweiterung implementiert, die in der Version 9 im Produkt integriert ist [181]. Damit ist es möglich, mehrere Fahrzeuge detailliert zu simulieren. Zum anderen wurde TruckMaker um das ROS Interface (RosIF) erweitert. RosIF stellt eine Schnittstelle und somit eine Anbindung für das Framework ROS dar. Mit dem Einsatz von ROS wird eine Unabhängigkeit des Codes von einer bestimmten Umgebung ermöglicht und damit die Wiederverwendbarkeit der Funktionslogik im Fahrzeug gewährleistet. Nachteilig ist, dass dadurch zwei unabhängige Systeme existieren, die miteinander agieren. Je nach Hardware und Implementierung kann die Simulationsumgebung oder der Funktionscode in ROS schneller berechnet werden. Damit ein deterministisches Verhalten gewährleistet wird, wurde eine Topic-basierte Synchronisation von IPG implementiert. Dabei werden zyklische ROS-Messages vom Funktionsalgorithmus versendet und mit der TruckMaker Zeit verglichen. Angemerkt sei hierbei, dass z. B. bei einer festen Frequenz von 10 Hz des Funktionsalgorithmus nur alle 100 ms ein Synchronisationsabgleich stattfindet, obwohl der TruckMaker eine Zykluszeit von 1 ms hat. Damit kann es zu kleinen Abweichungen bei Simulationsdurchläufen kommen. Voraussetzung für die Synchronisation ist zudem, dass eine gemeinsame Zeitbasis verwendet wird. Als Taktgeber für die Zeit wurde der TruckMaker verwendet.



Die Interaktion zwischen verschiedenen Fahrzeugen über V2X kann durch die Verwendung von ROS-Topics realisiert werden. Damit erfüllt TruckMaker, mit den Erweiterungen, alle Anforderungen für das Entwickeln und Testen von kooperativen Funktionen, weshalb diese Simulationsumgebung ausgewählt worden ist. Für die Untersuchungen wurde Version 9.1.1 eingesetzt. Als Betriebssystem wurde Ubuntu 16.04 LTS [182] eingesetzt und die dazugehörige ROS Version Kinetic Kame [183], für den Funktionscode.

Abbildung 4.1 zeigt die Simulationsarchitektur mit ihren Hauptkomponenten. Jedes Fahrzeug besitzt die gleichen Komponenten bzw. ROS-Nodes.

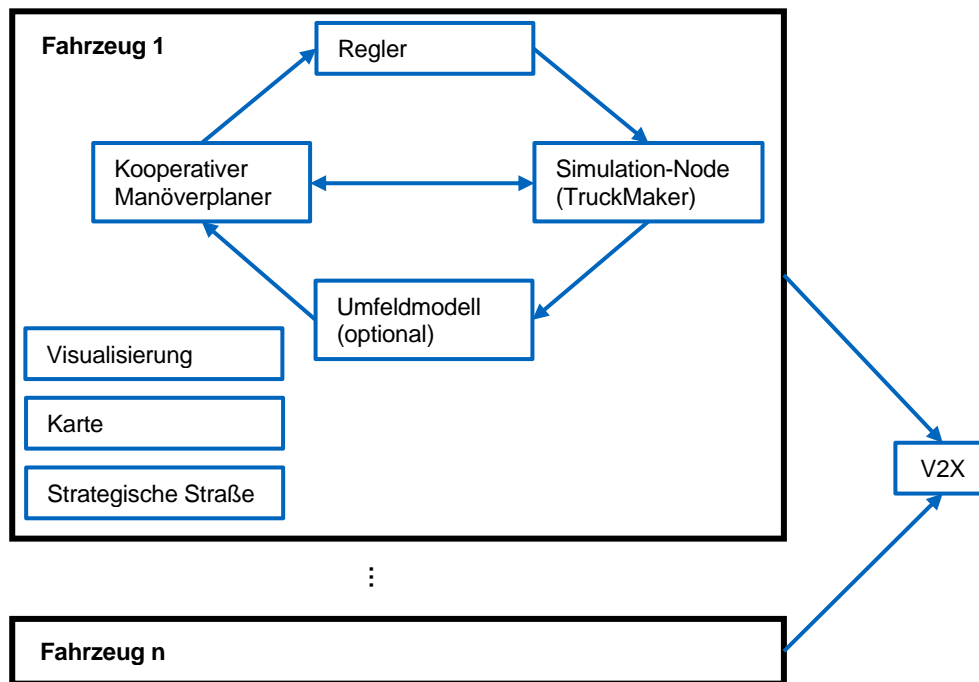


Abbildung 4.1: Überblick über die Simulationsarchitektur

Abhängig vom Untersuchungsziel kann das entwickelte Umfeldmodell des IMAGinE-Projekts oder ein ideales Umfeldmodell der Simulation verwendet werden. Der kooperative Manöverplaner berechnet eine Trajektorie, die vom Regler in Steuersignale umgewandelt wird und letztendlich das Fahrzeug in TruckMaker ansteuert. Der Regler übernimmt auch die Getriebelogik und gibt explizit Gänge vor. Damit ist u. a. das für Lkw übliche Überspringen von Gängen bei Automatikgetrieben möglich, aber auch das Schalten in den Neutralgang, um ein Rollmanöver durchzuführen. Die Querregelung erfolgt durch ein Fahrermodell von TruckMaker, d. h. es wird einer vorgegebenen Route gefolgt, in der Regel der rechten Spur. Der Manöverplaner benötigt die längste Rechenzeit, weshalb dieser ein Synchronisations-Topic zum Simulation-Node sendet. Auf der anderen Seite bekommt der Manöverplaner Informationen vom Simulation-Node des TruckMakers, z. B. die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Alle Komponenten können auf die allgemeinen Komponenten Karte und strategische Straße zugreifen. Die Karte stellt das Straßennetz dar und die strategische Straße gibt die für das Fahrzeug relevante Straße und somit die zu fahrende Route vor. Zudem existiert eine Visualisierung, diese dient der qualitativen Überprüfung. Die Fahrzeuge untereinander können nur über V2X kommunizieren, es besteht keine direkte Kopplung zwischen den Fahrzeugen.

Wie bereits erwähnt, bietet TruckMaker realistische Demo-Modelle für Fahrzeuge an. Aus diesem Grund wurde als Basis für die Auswertungen ein Demo-Fahrzeug verwendet. Das Demo-Fahrzeug ist eine für den Fernverkehr typische Sattelzugmaschine mit einer Motorleistung von

353 kW und einem maximalen Motormoment von 2250 Nm. Da für den Fernverkehr meist Automatikgetriebe verwendet werden, wurde das 8-Gang Getriebe durch ein 12-Gang Getriebe nach Fries [184] und Wolf [185] ersetzt.

### 4.2 Fahrzeug

Simulationen stellen immer eine Vereinfachung der Wirklichkeit dar. Aus diesem Grund soll die Funktionslogik zusätzlich mit realen Fahrzeugen validiert werden. Hierzu wurden zwei MAN TGX 18.500 4x2 BLS für das automatisierte und kooperative Fahren ausgerüstet (Abbildung 4.2). Es handelt sich hierbei um Sattelzugmaschinen mit einer Motorleistung von 368 kW und einem 12-Gang Automatik-Getriebe.



Abbildung 4.2: Versuchsträger für das automatisierte und kooperative Fahren

Abbildung 4.3 zeigt die Erweiterungen der E/E-Architektur. Mit Ausnahme des Hauptrechners und des Displays, sind die Komponenten über Ethernet oder CAN-Bus miteinander verbunden. Eine der wichtigsten Komponenten ist die Kommunikationseinheit. In den Versuchsträgern wurde eine WaveBEE plus von der Firma Nordsys eingesetzt, mit der über IEEE 802.11p zu anderen Fahrzeugen kommuniziert werden kann. Für eine zuverlässige Kommunikation ist die richtige Wahl der Antennenposition erforderlich. Mertens et al. [186] haben verschiedene Positionen untersucht, dabei haben sich Antennen links und rechts über den Türen vom Fahrerhaus am geeignetsten gezeigt. Aus diesem Grund wurden deswegen Halterungen über den Türen mit Antennen für die Kommunikation angebracht, die mit der Kommunikationseinheit verbunden sind.

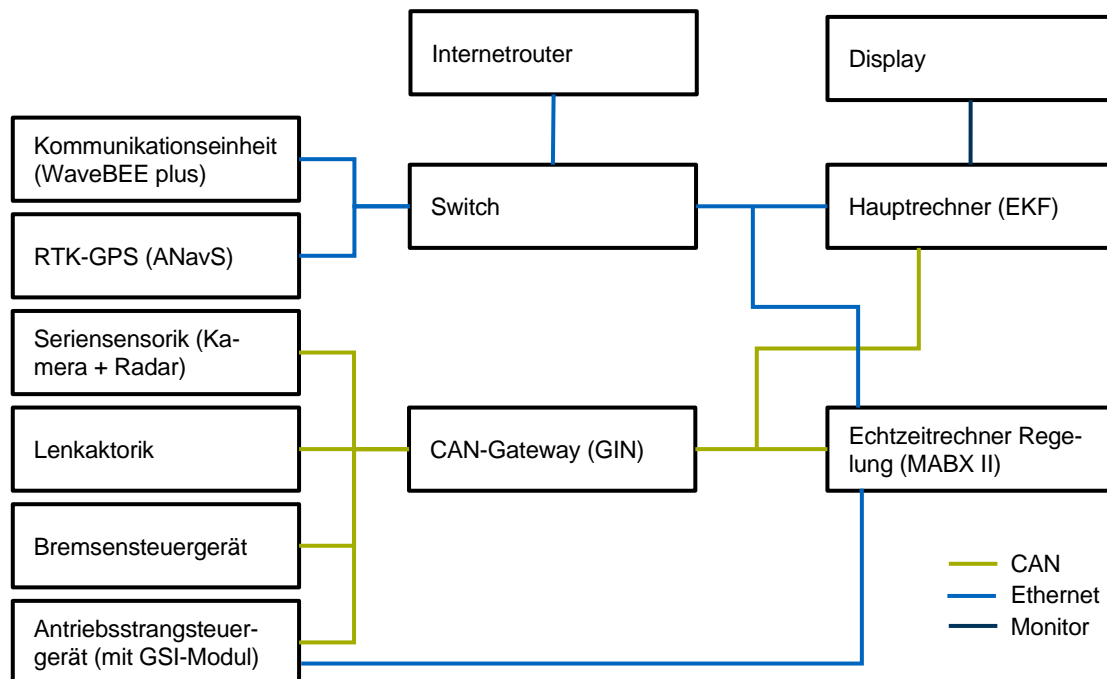


Abbildung 4.3: Übersicht über die relevanten Erweiterungen der E/E-Architektur der Realfahrzeuge

Eine Voraussetzung für die richtige Funktionsweise der Fahrfunktion ist eine genaue Lokalisierung, die mit einem Real Time Kinematic (RTK) System realisiert wird. Mit Hilfe einer Basisstation, die Korrekturdaten sendet, kann die Genauigkeit deutlich gegenüber GPS erhöht werden [187, 188]. Neben dem amerikanischen GPS, gibt es weitere Satellitensysteme für die Ortung, wie z. B. das europäische System Galileo [189], die Funktionsweise bzw. das Grundprinzip ist jedoch gleich. Als Komponente wurde ein System von der Firma ANavS verwendet, dieses kann GPS, Galileo, GLONAS und Beidou Satellitendaten empfangen. Neben der Position benötigt die Funktion auch die Orientierung des Fahrzeuges, die auch als Heading bezeichnet wird. Gade [190] zeigt sieben verschiedene Möglichkeiten auf, das Heading zu bestimmen. Das System von ANavS kann mit zwei angeschlossenen Antennen und deren relativen Position das Heading bestimmen, was eine Möglichkeit zur Bestimmung der Orientierung darstellt. Zudem erfolgt eine Bewegungsschätzung durch eine Inertial Measurement Unit (IMU), um kurzzeitige Empfangsunterbrechungen zu überbrücken. Die Bewegungsschätzung der IMU erfolgt in der Regel mit internen Beschleunigungs- und Kreiselsensoren [191, S. 484]. Im Gegensatz zu der neueren Version, die in Abbildung 4.3 eingezeichnet ist, senden ältere Versionen die verarbeiteten Daten nicht über Ethernet. In einem Lkw ist eine ältere Version verbaut. Dort werden die Daten von den Antennen zunächst über USB an einen Rechner gesendet, in unserem Fall den Hauptrechner und dort zu den Ausgangsdaten mit der dazugehörigen Software verarbeitet.

Die für die Fahrfunktion wichtige Seriensensorik für die Umfeldwahrnehmung, bestehend aus Serienkamera und -radar, liefert Objektdaten. Die Daten von Radar- und Kamera sind bereits fusioniert. Zudem liefert die Kamera eine Beschreibung der erkannten Fahrbahnmarkierungen in Form von Polynomen. Mit Hilfe einer hochgenauen Karte können diese Informationen zur Bestimmung des Headings verwendet werden. Das System erkennt allerdings nicht immer zuverlässig Fahrbahnmarkierungen, sodass diese Methode nicht zuverlässig ist. Allerdings ist die Bestimmung des Headings mit Satellitensystemen ebenfalls nicht zuverlässig, weil Empfangsunterbrechungen durch Abschirmung nicht ausgeschlossen werden können. Aus diesem

Grund wurde für die Bestimmung vom Heading ein Algorithmus von Gromer [192] entworfen, der beide Möglichkeiten verbindet. Dieser wurde für die Realversuche eingesetzt.

Um automatisiertes Fahren zu ermöglichen, können für die Querführung Steuersignale über CAN an die Lenkaktorik gesendet werden. Für die Längsführung können Steuersignale an das Bremsen- und Antriebsstrangsteuergerät gesendet werden. Allerdings können nicht alle Steuersignale, wie z. B. die Gangvorgabe, um Rollmanöver darzustellen, über den CAN-Bus vorgegeben werden. Aus diesem Grund wurde das Antriebsstrangsteuergerät um ein GSI-Modul von der Firma dSPACE erweitert. Mit einem speziellen Softwarestand ist es möglich, über RTI-Bypassing Signale direkt an das Steuergerät zu übermitteln.

Die Ethernetverbindungen laufen über einen Switch, der zusätzlich mit einem Internetrouter mit SIM-Karte verbunden ist. Dadurch können einzelne Komponenten auf das Internet zugreifen. Die CAN-Busse werden über das Gateway geführt. Neben den reinen Gateway-Aufgaben, z. B. CAN-Bussignale von einem CAN zu einem anderen zu mappen, sind auch Sicherheitsfunktionen hinterlegt, wenn z. B. ein Timeout von einem CAN-Bussignale vorliegt. Als Gateway wurde darum ein System von der Firma GIN eingesetzt, das frei programmierbar ist und somit an die Anforderungen für das kooperative und automatisierte Fahren angepasst werden kann.

Die Algorithmen für das kooperative Fahren werden auf den Hauptrechner ausgeführt. Hierbei handelt es sich um ein EKF-Rack mit Prozessor- und Speicherkarten. Bei dem Prozessor handelt es sich um ein i7-Prozessor mit 2,7 GHz Taktfrequenz, 4 Kernen und 6 MB Cache. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, wird als Betriebssystem Ubuntu 16.04 LTS und ROS Kinetic Kame für die Implementierung der Funktion verwendet. Um die Bedienung des Rechners zu ermöglichen, ist dieser an ein Display angeschlossen. Das Display dient ebenfalls der Anzeige vom Umfeldmodell und den Trajektorien während der Fahrt und somit der Kontrolle der Fahrfunktion. Die Trajektorien und der Fahrzeugzustand werden über Ethernet an den Echtzeitrechner Microautobox (MABX) II von der Firma dSPACE gesendet. Hierauf läuft der von MAN Truck & Bus SE bereitgestellte Regler für die Längs- und Querführung. Der Regler ist in MATLAB/Simulink R2018a [193], mit den für MABX II notwendigen dSPACE-Bibliotheken in der Version 2018-B [194], implementiert. Für die Querführung wird ein Pure Pursuit-Regler und für die Längsführung ein PID-Regler mit Vorsteuerung eingesetzt. Der Regler wurde noch um die Vorgabe von Gängen erweitert. In der Regel erfolgt die Gangvorgabe durch das Automatikgetriebe, nur bei Vorgabe eines Rollmanövers wird eine explizite Gangvorgabe gemacht, um in den Neutralgang zu schalten.

# 5 Ergebnisse

Ziel dieses Kapitels ist, das Konzept zu validieren und einen möglichen Nutzen für den Kraftstoffverbrauch nachzuweisen. Dazu wird zuerst das Vorgehen simulativ evaluiert. Im Anschluss werden die Ergebnisse aus den Realversuchen vorgestellt. Abschließend wird eine Kostenbetrachtung durchgeführt.

## 5.1 Simulation

Das Kapitel unterteilt sich in zwei Bereiche. Zuerst wird die Auswirkung der kollektiven Perzeption auf den Kraftstoffverbrauch untersucht. Im zweiten Teil wird hingegen die Manöverabstimmung und deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch evaluiert.

### 5.1.1 Kollektive Perzeption

*Dieses Kapitel beruht auf der Studienarbeit von Gromer [192] und der Veröffentlichung [167].*

Die beschriebene Methode in Kapitel 3 wurde erst nach den in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen finalisiert, weshalb leichte Abweichungen zum beschriebenen Vorgehen existieren. Im Wesentlichen betrifft dies den Trajektorienplaner. Statt einer dynamischen Berechnung von Trajektorien wurde ein fester Satz von Trajektorien in Polynombeschreibung vorgegeben. Aus diesen wurde die kostengünstigste Trajektorie im jeweiligen Szenario dynamisch ausgewählt. Wie im Vorgehen erwähnt, hat der Trajektorienplaner die Aufgabe fahrbare Trajektorien zu generieren, weshalb generelle Aussagen zum Nutzen der kollektiven Perzeption weitgehend unabhängig von der konkreten Umsetzung der Trajektoriengenerierung sind. Zudem wurde statt TruckMaker 9.1.1 die damals aktuelle Simulationsumgebung TruckMaker 7.1.2 verwendet, die jedoch mit den Erweiterungen von IPG im IMAGinE-Projekt [179, 180] die gleiche Funktionalität geboten hat.

### Szenarien

Ulbrich et al. [140] haben verschiedene kooperative Szenarien klassifiziert und vorgestellt. Die meisten der Szenarien beinhalten mindestens einen Spurwechsel oder befinden sich auf Kreuzungen. Zusätzlich zu den vorgestellten Szenarien wird im Bericht von Rudschies [94] das kooperative Stoppen erwähnt, das ein weiteres kooperatives Szenario darstellt. Für die Untersuchung der Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch sind nur Szenarien relevant, bei denen eine Verbesserung durch das globale Umfeldmodell erwartet wird. Verbesserungen bzgl. Kraftstoffverbrauch sind vor allem durch ein Vermeiden von unnötigen Bremsungen oder durch Realisierung von Rollmanövern, statt Fahrt mit einspritzendem Motor, zu erwarten. Häufig sind

die Szenarien gleichbedeutend mit der Verbesserung durch ein frühzeitiges Erkennen von Hindernissen oder Konfliktsituationen. Ausgehend davon wurden fünf Szenarien abgeleitet, die in Abbildung 5.1 dargestellt sind. Bei allen Szenarien leiten kooperative Fahrzeuge ihre erkannten Objekte über die CPM weiter und teilen ihr Fahrverhalten über die MCM anderen Fahrzeugen mit.

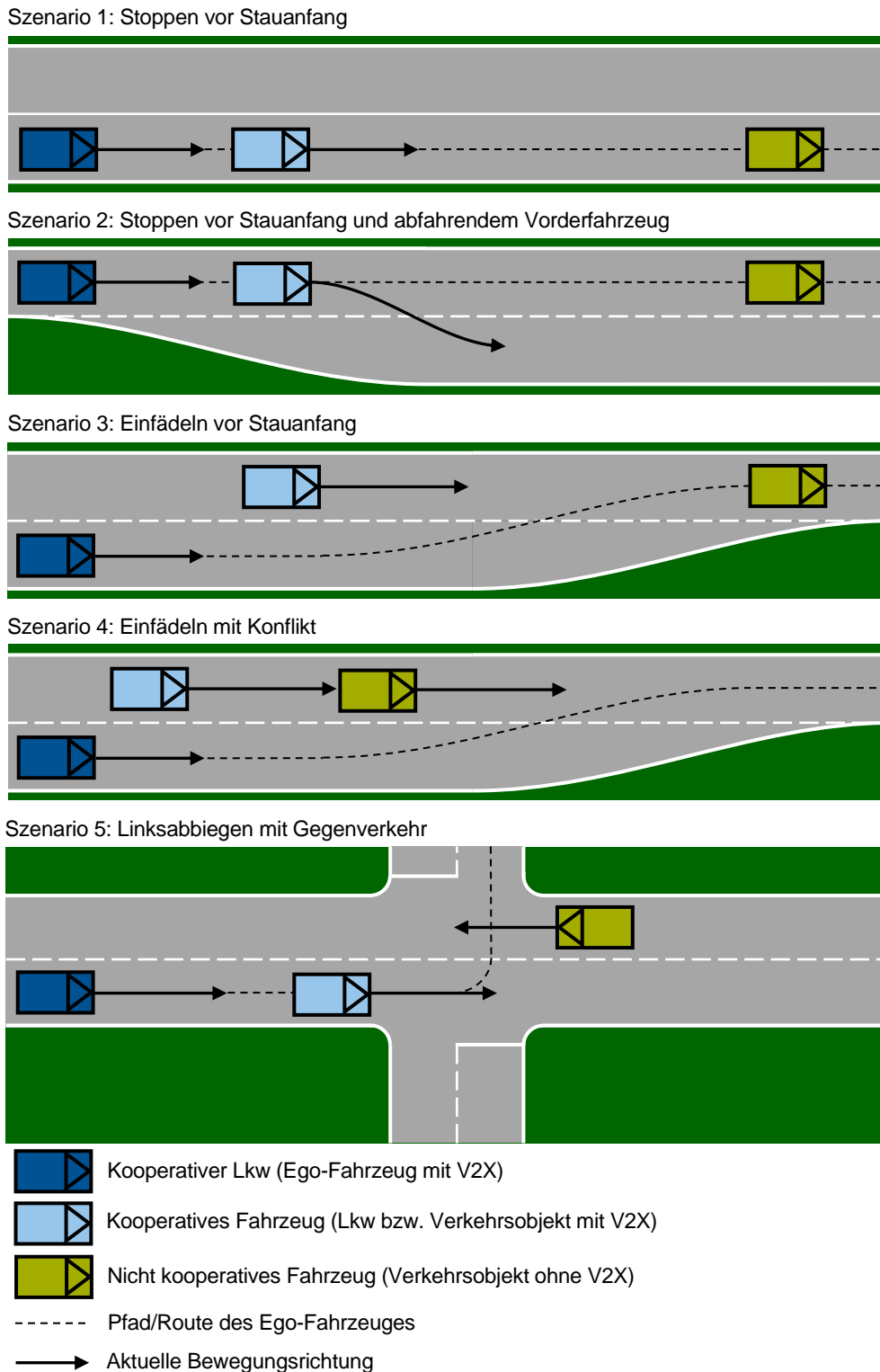


Abbildung 5.1: Übersicht über Szenarien für die simulative Evaluation der kollektiven Perzeption

Beim ersten Szenario, Stoppen vor Stauanfang, steht ein nicht kooperatives Fahrzeug auf der Fahrbahn. Zwei kooperative Lkw fahren auf das Fahrzeug auf. Das erste kooperative Fahrzeug nimmt das stehende Fahrzeug durch seine eigene Sensorik wahr, hingegen kann das zweite kooperative Fahrzeug sowohl die Informationen von der CPM als auch von der MCM für seine Manöverplanung nutzen.

Szenario 2, Stoppen vor Stauanfang und abfahrendem Vorderfahrzeug, ist ähnlich zu Szenario 1. Im Gegensatz zu Szenario 1 fährt das erste kooperative Fahrzeug an dem stehenden Fahrzeug vorbei und nimmt eine andere Route als das letzte Fahrzeug. Darum ist im Unterschied zu Szenario 1, bei dem das letzte Fahrzeug nur auf das erste kooperative Fahrzeug reagieren könnte, hier vor allem das nicht kommunizierende stehende Fahrzeug relevant.

Im dritten Szenario, Einfädeln vor Stauanfang, will ein kooperativer Lkw auf eine Spur einfädeln. Am Ende der Einfädelspur befindet sich ein stehendes Fahrzeug. Ein weiterer kooperativer Lkw fährt auf derselben Spur wie das stehende Fahrzeug und kann dieses mit seiner Sensorik früher wahrnehmen, als das einfädelnde Fahrzeug. Durch Übermittlung des stehenden Fahrzeuges über die CPM an das einzufädelnde Fahrzeug, kann dieses mit dem globalen Umfeldmodell ebenfalls das Objekt früher wahrnehmen, als mit dem lokalen Umfeld bzw. seiner eigenen Sensorik.

Das vierte Szenario, Einfädeln mit Konflikt, ist ähnlich dem dritten Szenario. Statt eines stehenden Fahrzeuges fährt ein nicht kooperatives Fahrzeug vor dem kooperativen Lkw auf der durchgängigen Fahrspur. Ein weiterer kooperativer Lkw möchte auf diese Spur wechseln. Der Fahrspurwechsel ist konfliktbehaftet, d. h. das einfädelnde Fahrzeug kann die Spur nicht unter Einhaltung der StVO wechseln. Durch das kooperative Umfeldmodell kann dieser Konflikt früher erkannt werden.

Im letzten Szenario, Linksabbiegen mit Gegenverkehr, möchte ein kooperativer Lkw bei einer Kreuzung links abbiegen, während der vorausfahrende kooperative Lkw geradeaus weiterfährt. Dem kooperativen Lkw kommt ein nicht kooperatives Fahrzeug entgegen, sodass dieses Fahrzeug erst durchgelassen werden muss. Durch das Umfeldmodell kann früher erkannt werden, dass ein sofortiges Abbiegen nicht möglich ist.

Für die Szenarien sind verschiedene Variationen denkbar, Tabelle 5.1 zeigt die untersuchten Varianten. Es wird die Sensorkonfiguration, der Anfangsabstand zwischen den V2X-Fahrzeugen und die Gesamtmasse variiert.

Tabelle 5.1: Übersicht der Varianten für die simulativen Untersuchungen der kollektiven Perzeption

| Szenario | Sensorkonfiguration             | Anfangsabstand zwischen kooperativen Fahrzeugen | Sattelaufliieger |
|----------|---------------------------------|-------------------------------------------------|------------------|
| 1        | Nur Frontsensoren               | 200 m / 400 m / 700 m                           | Ohne / Mit       |
| 2        | Nur Frontsensoren               | 200 m / 400 m / 700 m                           | Ohne / Mit       |
| 3        | Nur Frontsensoren               | -                                               | Ohne / Mit       |
| 4        | Nur Frontsensoren / Rundumsicht | -                                               | Ohne / Mit       |
| 5        | Nur Frontsensoren               | 200 m / 400 m / 700 m                           | Ohne / Mit       |

Abbildung 5.2 zeigt die Sensorkonfigurationen. Die Reichweiten und Öffnungswinkel orientieren sich für den Fernbereich an den von Baek et al. [195] beschriebenen Radarsensoren. Der Radarsensor für den Nahbereich ist nach A.D.C. GmbH [70] spezifiziert. Der Ausgangsabstand

zwischen den beiden kooperativen Fahrzeugen orientiert sich an den Reichweiten für die Kommunikation. Realtests haben bei Verwendung von IEEE 802.11p eine maximale Reichweite von 700 m ergeben [88]. Mertens et al. [186] ermittelten 400 m Reichweite für Lkw mit IEEE 802.11p bei direkter Sicht. Ist die Reichweite kleiner als 200 m, ist bereits die Erfassung mit marktüblichen Radarsensoren möglich, weshalb diese als minimale Distanz für die Variationen gewählt wird. Die Gesamtmasse wird durch Vorhandensein des Sattelauflegers variiert, was zu Gesamtmassen von 7 bzw. 40 t führt. 40 t entspricht nach StVZO §34 [23] der maximal zulässigen Gesamtmasse in Deutschland. Als Referenz wird statt des kooperativen Umfeldmodelles und der daraus entstehenden globalen Objektliste die lokale Objektliste für die Manöverplanung verwendet.

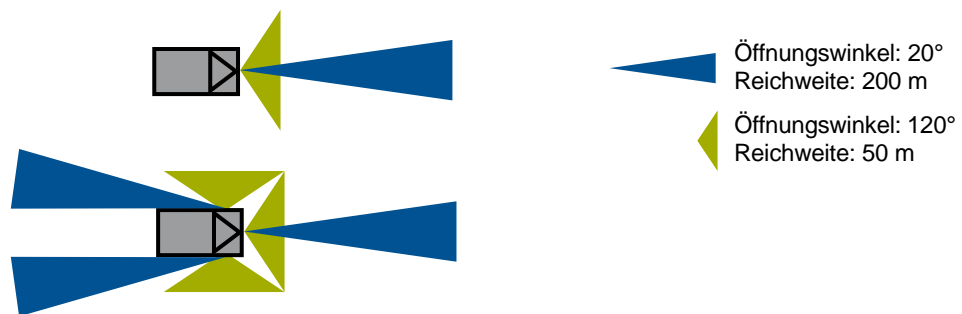


Abbildung 5.2: Sensoranordnungen für die simulativen Untersuchungen der kollektiven Perzeption in der Draufsicht. Oben: Nur Frontsensoren; Unten: Rundumsicht

## Auswertung

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind die Kraftstoff- und Fahrerkosten die zwei größten Anteile bei den Gesamtkosten für Speditionen. Davon ausgehend sind absoluter Kraftstoffverbrauch und die benötigte Zeit die zwei wichtigsten Auswerteparameter. Die Zeit ist allerdings nur relevant, wenn der Endzustand nicht Stillstand ist, weshalb dieser Faktor nur für Szenario 4 und 5 relevant ist. Bei allen Szenarien wird nur das Ego-Fahrzeug bzw. der kooperative Lkw ausgewertet, bei dem sich durch V2X und der kollektiven Perzeption sein Fahrverhalten ändert. Das weitere kooperative Fahrzeug dient in den Szenarien nur der Übermittlung der V2X-Nachrichten, weil es selbst nicht von V2X-Nachrichten profitiert, ändert sich sein Fahrverhalten durch Kooperation nicht.

Abbildung 5.3 zeigt die Geschwindigkeitsprofile des ersten Szenarios mit kollektiver Perzeption in Abhängigkeit des Abstandes. Zudem ist das Geschwindigkeitsprofil der Referenz dargestellt, bei der nur die lokalen Umfelddaten für die Manöverplanung verwendet werden. Beim Referenzprofil findet nur eine Bremsung vor dem Objekt statt, hingegen findet bei der Nutzung von V2X vorab ein Rollmanöver statt. Dabei ist zu erkennen, je weiter der Anfangsabstand bzw. die Kommunikationsreichweite ist, desto früher kann ein Rollmanöver eingeleitet werden und desto länger ist das Rollmanöver. Ein längeres Rollmanöver hat einen positiven Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. In Abbildung 5.4 sind die Kraftstoffverbräuche für das erste Szenario dargestellt. Mit höherer Kommunikationsreichweite bzw. längeren Rollmanöver ist der Kraftstoffverbrauch geringer und somit der Nutzen des Umfeldmodelles größer. Ebenfalls ist zu erkennen, dass je größer die Masse ist, desto größer ist die Reduktion des Kraftstoffverbrauches. Dies bedeutet, dass vor allem schwere Lkw vom gemeinsamen Umfeldmodell profitieren.



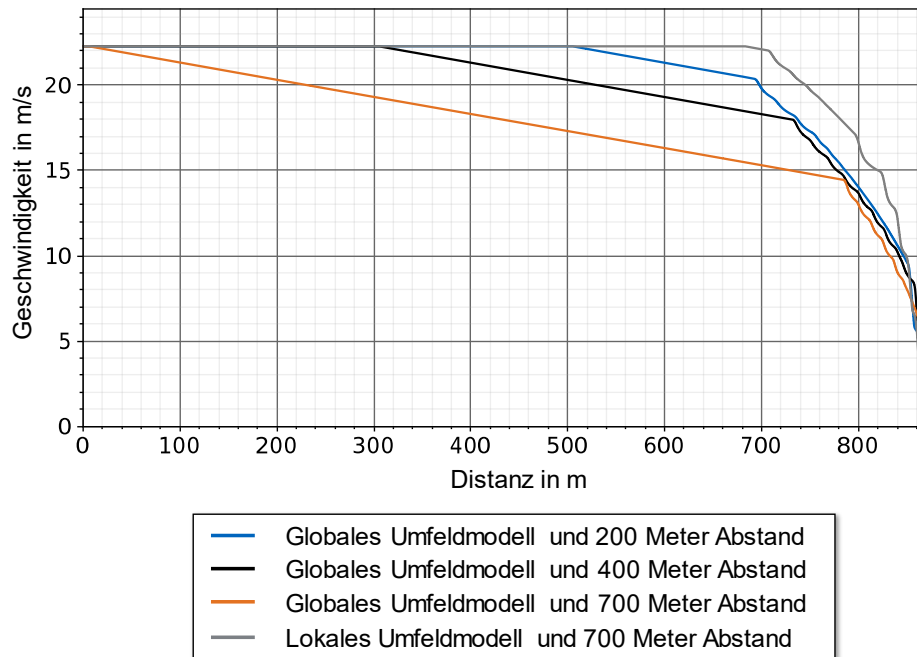


Abbildung 5.3: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges ohne Sattelaufleger beim ersten Szenario, Stoppen vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption

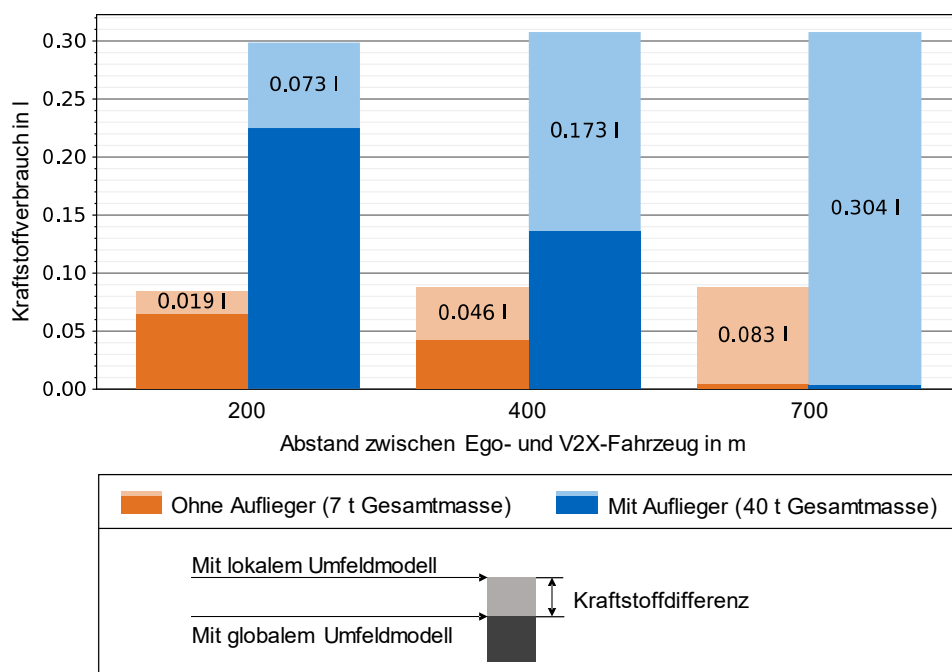


Abbildung 5.4: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim ersten Szenario, Stoppen vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption

Im zweiten Szenario zeigen die Geschwindigkeitsverläufe (Abbildung 5.5) ein anderes Verhalten, obwohl der Grund für die notwendige Verzögerung, ein stehendes Fahrzeug, identisch ist. Das vordere kooperative Fahrzeug verlässt die Spur und somit ist für den Kollisionscheck nur noch das stehende Fahrzeug relevant. Das kooperative Fahrzeug übermittelt das stehende Fahrzeug per CPM, solange dieses mit der eigenen Sensorik erfasst wird. Nach dem Spurwechsel ist das Objekt nicht mehr im Sichtbereich der Sensorik und wird somit nicht mehr erkannt. Objekte werden über einen Horizont von 2 s, nachdem die letzte CPM empfangen wurde, weiter

prädiert. Bei weiten Abständen wird folglich erst ein Rollmanöver eingeleitet und solange durchgeführt bis das Objekt wegen fehlender neuer Informationen aus dem globalen Umfeldmodell entfernt wird. Anschließend beschleunigt das Fahrzeug wieder auf die Wunschgeschwindigkeit und bremst erst, wenn das stehende Fahrzeug durch die eigene Sensorik erkannt wird. Folglich ist der Kraftstoffverbrauch bei den Abständen 400 und 700 m deutlich größer als bei 200 m, weil ein Beschleunigen auf die Wunschgeschwindigkeit entfällt (Abbildung 5.6).

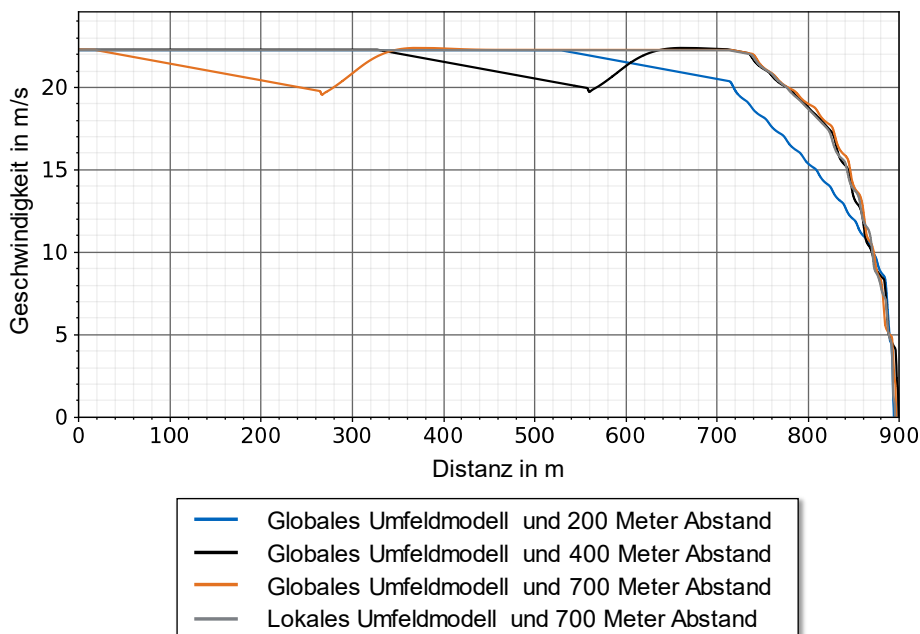


Abbildung 5.5: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges ohne Sattelauflieger beim zweiten Szenario, Stoppen vor Stauanfang und abfahrendem Vorderfahrzeug, für die kollektive Perzeption

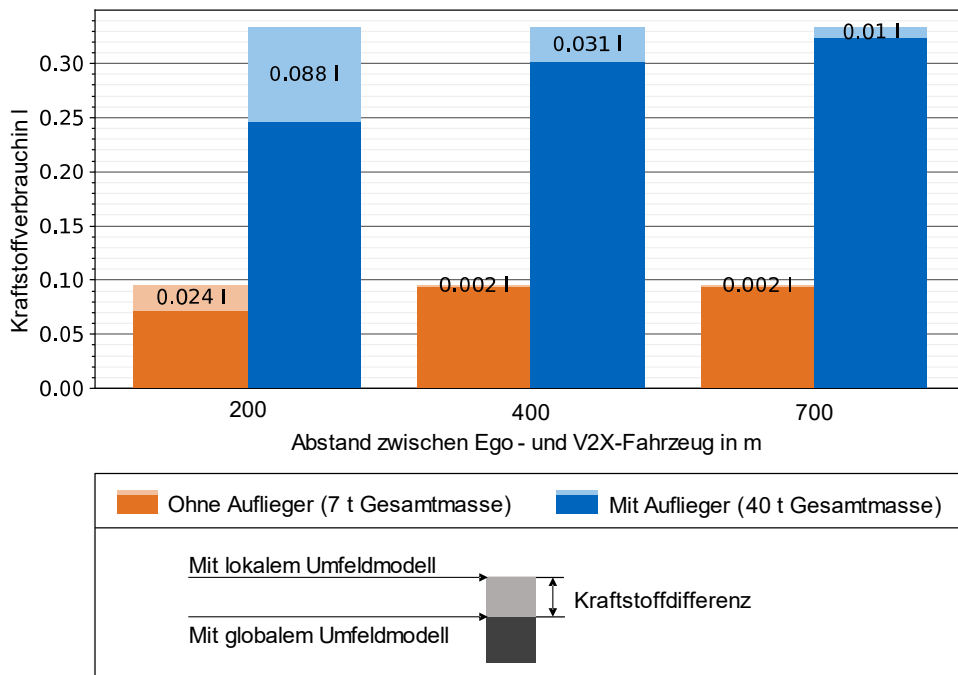


Abbildung 5.6: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim zweiten Szenario, Stoppen vor Stauanfang und abfahrendem Vorderfahrzeug, für die kollektive Perzeption

Beim Szenario Einfädeln vor Stauanfang zeigen die Geschwindigkeitsprofile (Abbildung 5.7), dass mit der kollektiven Perzeption, vor der notwendigen Bremsung, ein Rollmanöver durchgeführt wird. Grund hierfür ist die frühere Wahrnehmung des stehenden Fahrzeuges. Die Durchführung des Rollmanövers führt zu einem verringerten Kraftstoffverbrauch. Die Reduktion des Kraftstoffverbrauches ist wiederum von der Gesamtmasse abhängig. Bei einer Gesamtmasse von 40 t ist der Nutzen der kollektiven Perzeption gegenüber 7 t Gesamtmasse größer (Abbildung 5.8).

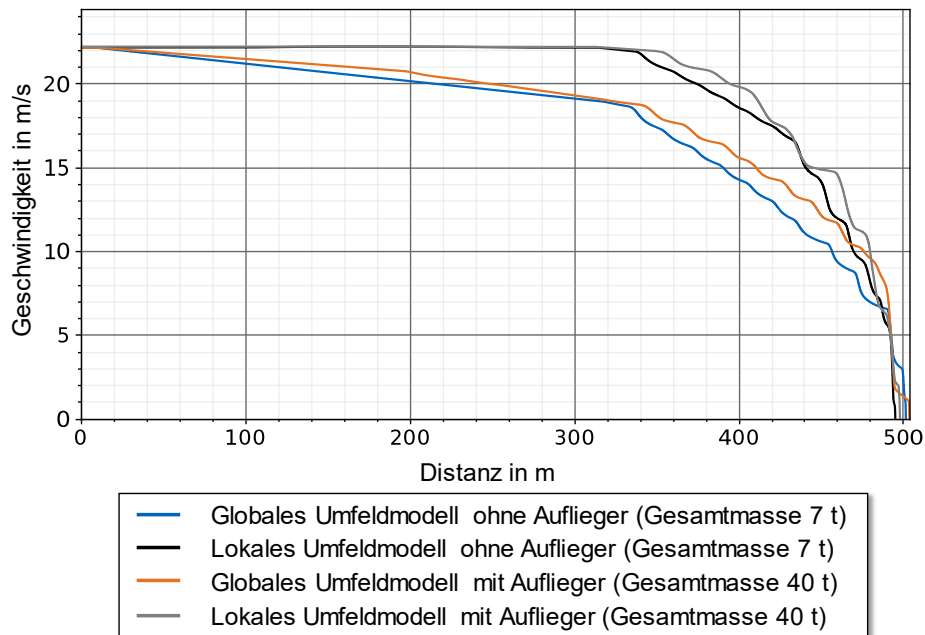


Abbildung 5.7: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim dritten Szenario, Einfädeln vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption

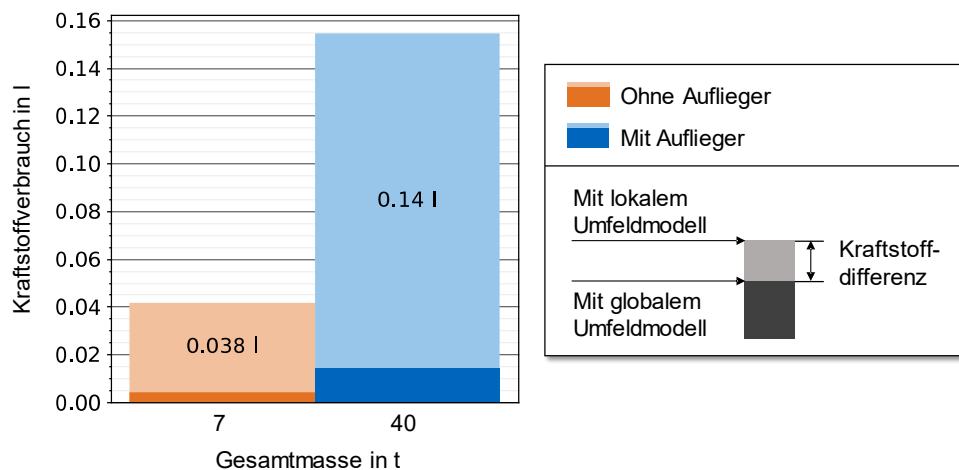


Abbildung 5.8: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim dritten Szenario, Einfädeln vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption

Die Geschwindigkeitsverläufe von Szenario 4, Einfädeln mit Konflikt, zeigt Abbildung 5.9. Mit einem lokalen Umfeldmodell und nur Sensorik nach vorne kann ein Konflikt bzw. eine Kollision nicht vermieden werden. Dies ist aus dem Geschwindigkeitsverlauf ersichtlich, weil keine Reduzierung der Geschwindigkeit stattfindet. Wird die Sensorkonfiguration Rundumsicht gewählt, findet eine Verzögerung bis zum Stillstand statt. Durch die kollektive Perzeption kann dies verhindert werden. Indem das Verkehrsobjekt früher wahrgenommen wird, kann frühzeitig eine

leichte Verzögerung durch ein Rollmanöver eingeleitet werden und ein nach Verkehrsregeln konformer Spurwechsel durchgeführt werden. Dabei muss durch die frühzeitige Reaktion auf die Verkehrssituation das Ego-Fahrzeug nicht bis zum Stillstand verzögern und anschließend vom Stillstand aus beschleunigen. Durch das angepasste Fahrverhalten mit der kollektiven Perzeption wird weniger Kraftstoff in diesem Szenario verbraucht. Insbesondere bei 40 t zeigt sich eine erhebliche Verbesserung im Kraftstoffverbrauch von 0,526 l, beim Nutzen der kollektiven Perzeption gegenüber dem lokalen Umfeldmodell (Abbildung 5.10). Neben der Kraftstoffersparnis ist zusätzlich ein Zeitgewinn nachweisbar. Ohne Sattelaufleger wird die gleiche Strecke mit globalem Umfeldmodell um 6,56 s schneller durchfahren als mit lokalem Umfeldmodell. Bei einer Gesamtmasse von 40 t bzw. mit Sattelaufleger ist der Zeitunterschied 13,99 s und damit noch größer. Aus diesem Grund hat die kollektive Perzeption, in diesem Szenario, nicht nur einen positiven Effekt auf den Kraftstoffverbrauch, sondern wirkt sich ebenfalls positiv auf die Fahrzeit aus.

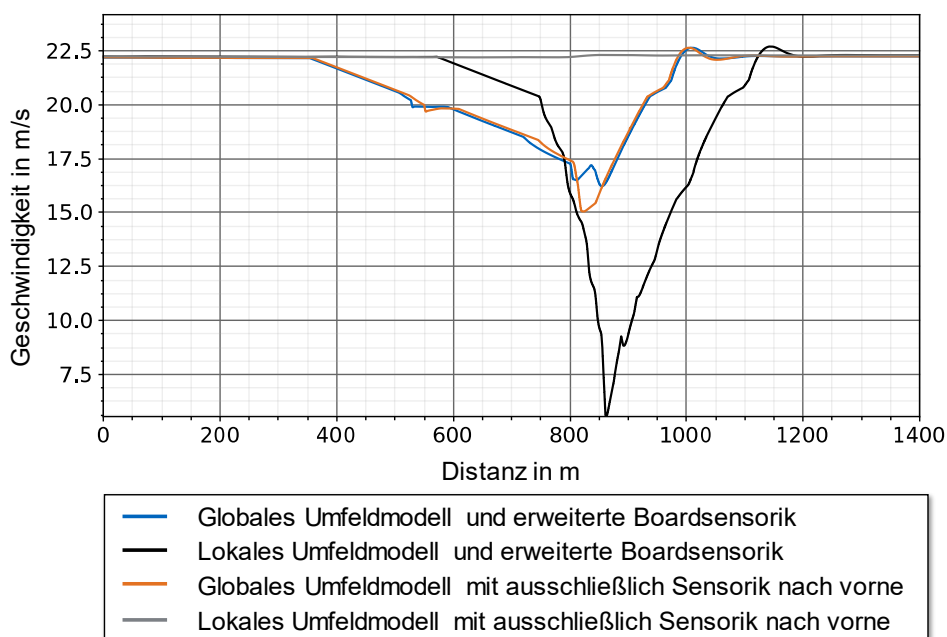


Abbildung 5.9: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges ohne Sattelaufleger beim vierten Szenario, Einfädeln mit Konflikt, für die kollektive Perzeption

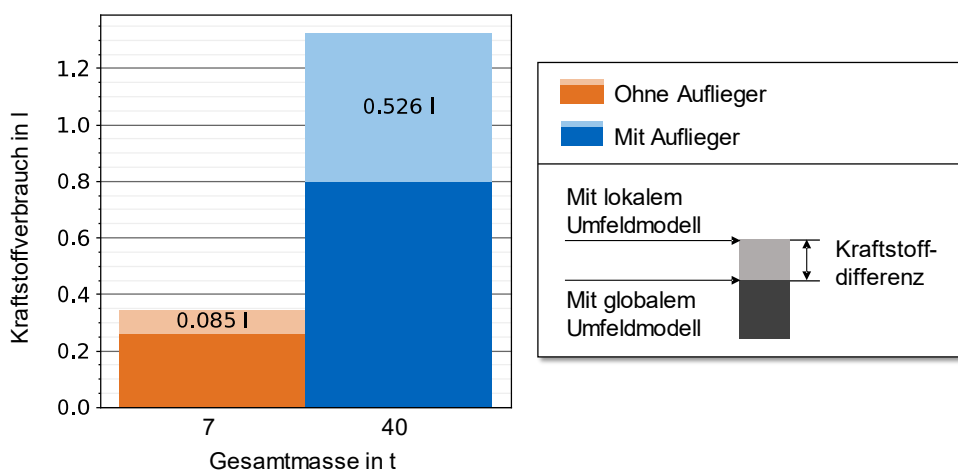


Abbildung 5.10: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim vierten Szenario, Einfädeln mit Konflikt, für die kollektive Perzeption

Im letzten Szenario, Linksabbiegen mit Gegenverkehr, zeigen die Geschwindigkeitsprofile (Abbildung 5.11) mit und ohne kollektive Perzeption ähnliches Verhalten. In allen Varianten muss mindestens bis zur maximal zulässigen Kurvengeschwindigkeit abgebremst werden. Das Bremsen kann nicht mit der kollektiven Perzeption vermieden werden. Das Vermeiden der Bremsung bis zum Stillstand hat kaum Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch. Abbildung 5.12 zeigt die Ergebnisse für den Kraftstoffverbrauch in diesem Szenario.

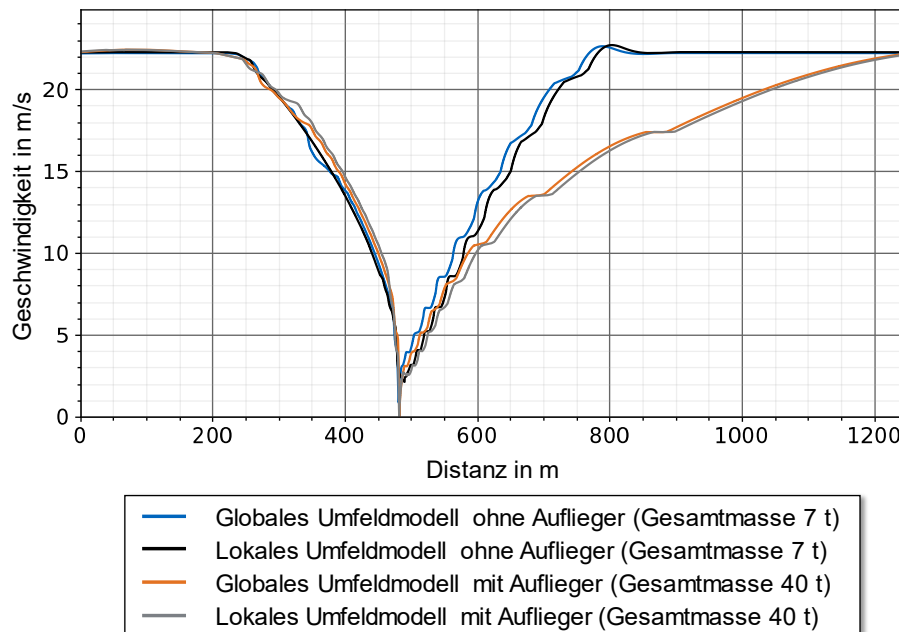


Abbildung 5.11: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim fünften Szenario, Linksabbiegen mit Gegenverkehr, für die kollektive Perzeption

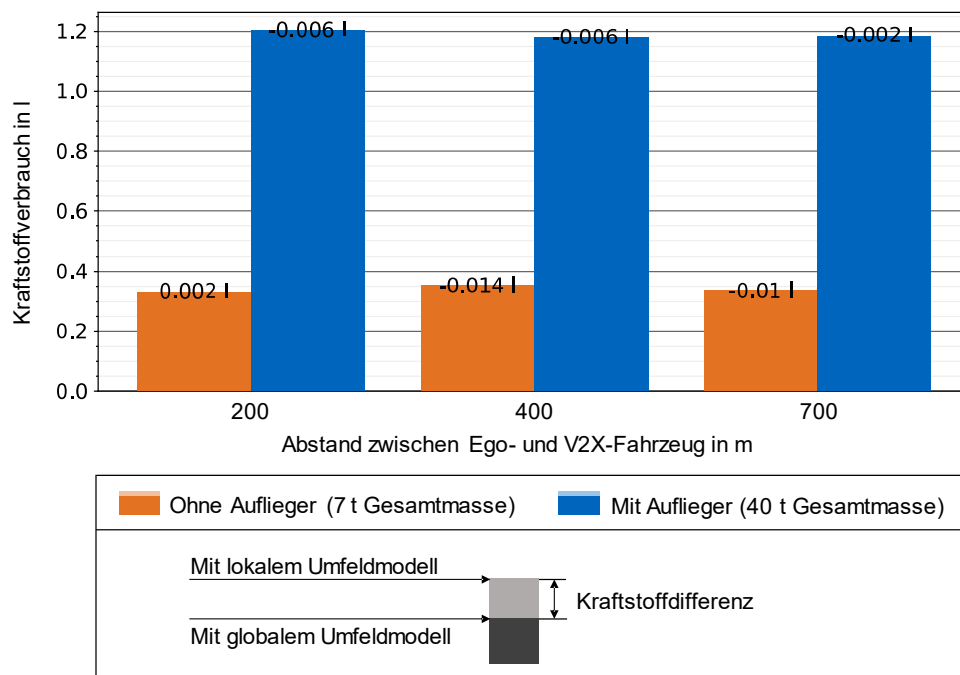


Abbildung 5.12: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim fünften Szenario, Linksabbiegen mit Gegenverkehr, für die kollektive Perzeption

Ebenfalls ersichtlich aus der Abbildung 5.12 ist, dass höhere Kommunikationsreichweiten bzw. größere Anfangsabstände zwischen den kooperativen Fahrzeugen sich nicht auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Die geringen Unterschiede im Kraftstoffverbrauch sind vor allem auf das nicht deterministische Verhalten vom Framework ROS zurückzuführen. Durch den fehlenden Determinismus kann die Dauer der Berechnungszyklen von ROS-Nodes variieren, wodurch bis zur Synchronisation mit CarMaker abweichende Ergebnisse entstehen können. Wie bei Szenario 4 ist kein Stillstand am Ende des Szenarios vorhanden, weshalb die Zeit berücksichtigt werden muss. Allerdings ist wie beim Kraftstoffverbrauch kein Unterschied durch die kollektive Perzeption nachweisbar. Der Grund hierfür ist wiederum die notwendige niedrige Kurvengeschwindigkeit, die nicht durch das globale Umfeldmodell vermieden werden kann.

## 5.1.2 Kooperative Manöverabstimmung

*Dieses Kapitel beruht auf der Veröffentlichung [166].*

### Szenario

In Kapitel 2.1.3 wurden Steigungsfahrten als Problem beim energieeffizienten Fahren, bei hohem Verkehrsaufkommen, identifiziert. Aus diesem Grund wurde für die folgenden Untersuchungen eine Strecke mit einem Berg ausgewählt. Bei Steigungen von mehr als 2 % kann es bei Lkw zu einer Absenkung der Geschwindigkeit kommen. Ursache hierfür ist das hohe Gewicht bzw. die zu schwache Motorisierung [196, S. 94]. Koy und Spacek [197, S. 47-52] zeigen, dass selbst bei hoher Motorleistung, bei Steigungen zwischen 4 % und 8 %, keine konstante Fahrt mit 80 km/h möglich ist. Bei 2 % Steigung kann der ausgewählte Lkw mit 40 t noch mit 80 km/h über den Berg fahren. 80 km/h entspricht nach StVO §18 [12] der erlaubten Höchstgeschwindigkeit für Lkw auf deutschen Autobahnen. 40 t entspricht der zulässigen Gesamtmasse für Lkw in Deutschland nach StVZO §34 [23]. Aus diesen Gründen wurde eine 2 % Steigung gewählt. Bei einem Gefälle von -2 % wird mit Gl. (2.2) ohne Antriebskraft durch den Motor und mit Parametern von Fries [184, S. 40] ein 40 t Lkw nur mit  $0,097 \text{ m/s}^2$  bei 80 km/h durch die Hangabtriebskraft beschleunigt und ein 13 t Lkw wird sogar mit  $-0,002 \text{ m/s}^2$  verzögert. Um den Rollvorgang nicht übermäßig lang zu gestalten, wurde deswegen ein Gefälle von -6 % Steigung gewählt. Abbildung 5.13 zeigt das Höhenprofil der Strecke. Zu beachten ist, dass ohne Fahrwiderstände der Lkw beim Durchfahren der Strecke kinetische Energie aufnehmen würde, weil die potentielle Energie am Ende geringer ist. Für die Untersuchungen spielt dies jedoch keine Rolle, weil einzelne Variationen mit gleichen Gesamtmassen der Lkw bei gleichem Streckenprofil gegenübergestellt werden.

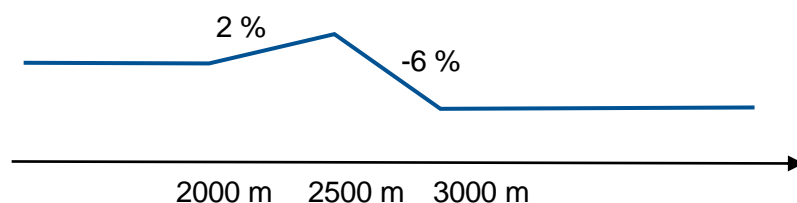


Abbildung 5.13: Höhenprofil für das Simulationsszenario für die kooperative Manöverabstimmung

Der erste Lkw startet in den Szenarien immer bei 1500 m, gefolgt von ein oder zwei weiteren Lkw. Die Initialgeschwindigkeit aller Lkw beträgt 80 km/h, die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf deutschen Autobahnen für Lkw. Der Anfangsabstand ist in Abhängigkeit vom

Sicherheitsabstand und der Toleranz für das Abfahren der Trajektorien gewählt worden. Der Sicherheitsabstand für Lkw auf deutschen Autobahnen bei einer Geschwindigkeit ab 50 km/h beträgt nach StVO §4 [12] 50 m. Um den Kollisionscheck der Stufe 1 zu erfüllen, muss wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, mindestens die zweifache Toleranz aufaddiert werden. Bei zu großen Abständen ist keine Kooperation notwendig, weswegen der Anfangsabstand möglichst nahe an dem Mindestabstand für den Kollisionscheck der Stufe 1 gewählt worden ist. Mit einer Toleranz von 10 m für das Abfahren der Trajektorien und einen Aufschlag von ca. 0,5 m, um kleine Abweichungen auszugleichen, ergibt sich ein Anfangsabstand von 70,5 m. Ein Szenario dauert immer 80 s. Um keine zusätzlichen Effekte auf Grund einer energieeffizienten Fahrstrategie, wie Puls & Glide [22, S. 155-156] zu bekommen, wurden bei der Untersuchung, bis auf der strategischen Trajektorie, keine Trajektorien mit Neutralgangschaltung berechnet. Tabelle 5.2 gibt ausgewählte Parameter an. Mit dem angegebenen Parametersatz konnten alle Simulationen zuverlässig durchgeführt werden. Die Parameter selbst wurden während der Entwicklung des Konzeptes ermittelt.

Tabelle 5.2: Übersicht der gewählten Parameter für den Manöverplaner für die simulativen Untersuchung der kooperativen Manöverabstimmung

| Parameter                                                     | Wert     |
|---------------------------------------------------------------|----------|
| Max. Toleranz Trajektorie                                     | +/- 10 m |
| Bonus Kooperation                                             | 0,5      |
| Gewichtungsfaktor für Vergleichskosten                        | 0,95     |
| Gewichtungsfaktor für Effizienzkosten                         | 0,05     |
| Kosten für Fahraktion Beschleunigen                           | 0,1      |
| Kosten für Fahraktion Geschwindigkeit halten                  | 0,05     |
| Kosten für Fahraktion Rollen                                  | 0        |
| Kosten für Fahraktion leichte Bremsung                        | 0,15     |
| Kosten für Fahraktion Bremsen                                 | 1        |
| Maximale Geschwindigkeitsdifferenz beim Trajektorienvergleich | 30 km/h  |
| MCM Polynomgrad                                               | 3        |
| MCM Anzahl Polynomsektionen pro Trajektorie                   | 3        |
| Planungshorizont strategische Trajektorie                     | 2000 m   |

Es werden fünf Varianten durchfahren, die in Tabelle 5.3 zusammengefasst sind. Bei Variante 1 werden nicht V2X-Fahrzeuge simuliert, die nicht energieeffizient fahren. Diese Variante bildet das Basisszenario ab. Variante 2 stellt nicht V2X-Fahrzeuge dar, die im Gegensatz zu Variante 1 energieeffizient fahren. Dies wird in der Tabelle als Eco-Modus bzw. -Driving bezeichnet. Variante 3 und 4 repräsentieren V2X-Fahrzeuge die kooperative Prädiktion nutzen, aber keiner Manöverabstimmung. Bei Variante 3 wird im Gegensatz zu Variante 4 keine energieeffiziente Fahrstrategie gewählt. Variante 5 stellt energieeffizientes und kooperatives Fahren dar.

Tabelle 5.3: Übersicht der Varianten für die simulativen Untersuchung der kooperativen Manöverabstimmung

| Variante | Kurzbeschreibung                       | Eco-Driving | Prädiktion                | Kooperation |
|----------|----------------------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| 1        | Ohne Eco-Modus, ohne V2X               | Nein        | Konstante Geschwindigkeit | Nein        |
| 2        | Eco-Modus, ohne V2X                    | Ja          | Konstante Geschwindigkeit | Nein        |
| 3        | Ohne Eco-Modus, kooperative Prädiktion | Nein        | V2X/MCM                   | Nein        |
| 4        | Eco-Modus, kooperative Prädiktion      | Ja          | V2X/MCM                   | Nein        |
| 5        | Eco-Modus, kooperatives Verhalten      | Ja          | V2X/MCM                   | Ja          |

## Auswertung

Zunächst werden nur zwei Lkw betrachtet, welche die beschriebene Strecke abfahren. Die Lkw haben jeweils eine Gesamtmasse von 40 t. Um Schwankungen durch das nicht vollständig deterministische Verhalten zu minimieren, wurden für jede Variante jeweils zwei Testdurchläufe durchgeführt und anschließend der Mittelwert gebildet. Die zwei größten Kostenfaktoren für Speditionen im Fernverkehr sind die Kraftstoff- und Fahrerkosten (Kapitel 1.1). Folglich wird neben den Kraftstoffkosten auch die Durchschnittsgeschwindigkeit ausgewertet, weil eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit eine geringere Zeit für die Transportaufgabe bedeutet und somit geringere Kosten. Tabelle 5.4 fasst die Ergebnisse aller Varianten zusammen. Zudem zeigt Abbildung 5.14 den relativen Durchschnittsverbrauch und Abbildung 5.15 die relative Durchschnittsgeschwindigkeit.

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der Ergebnisse für die simulativen Untersuchungen der kooperativen Manöverabstimmung mit zwei Lkw

| Variante | Kurzbeschreibung                       | Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch je Lkw in l | Durchschnittsgeschwindigkeit in m/s |
|----------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1        | Ohne Eco-Modus, ohne V2X               | 1,214                                              | 21,86                               |
| 2        | Eco-Modus, ohne V2X                    | 1,140                                              | 21,76                               |
| 3        | Ohne Eco-Modus, kooperative Prädiktion | 1,159                                              | 22,11                               |
| 4        | Eco-Modus, kooperative Prädiktion      | 1,132                                              | 21,62                               |
| 5        | Eco-Modus, kooperatives Verhalten      | 1,130                                              | 21,85                               |

Der schlechteste Verbrauch wird bei nicht energieeffizienter Fahrweise und ohne Kommunikation erzielt, hingegen der beste Verbrauch bei Eco-Driving bzw. energieeffizienter Fahrweise und kooperativer Manöverabstimmung mit Plan- und Wunschtrajektorien. Neben der kooperativen Manöverabstimmung hat auch die kooperative Prädiktion einen positiven Effekt auf den Kraftstoffverbrauch. Sowohl bei Eco-Driving als auch ohne Nutzen des Eco-Modus wurde weniger Kraftstoff bei der kooperativen Prädiktion verbraucht als in den Varianten, bei denen ohne V2X gefahren worden ist. Der bessere Kraftstoffverbrauch bei Eco-Driving ist auf das Durchführen von Rollmanövern zurückzuführen, bei welchem kaum Kraftstoff verbraucht wird. Die



Rollmanöver verlängern allerdings die Reisezeiten, dies ist durch die geringere Durchschnittsgeschwindigkeit ersichtlich. Die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit, beim Nutzen einer energieeffizienten Fahrweise, wird bei der kooperativen Manöverabstimmung erzielt, obwohl dabei gleichzeitig auch der geringste Kraftstoffverbrauch erreicht wird. Erklärbar ist dies durch die geringere Verzögerung des zweiten Fahrzeuges, was durch ein späteres Rollmanöver des ersten Fahrzeuges ermöglicht wird.

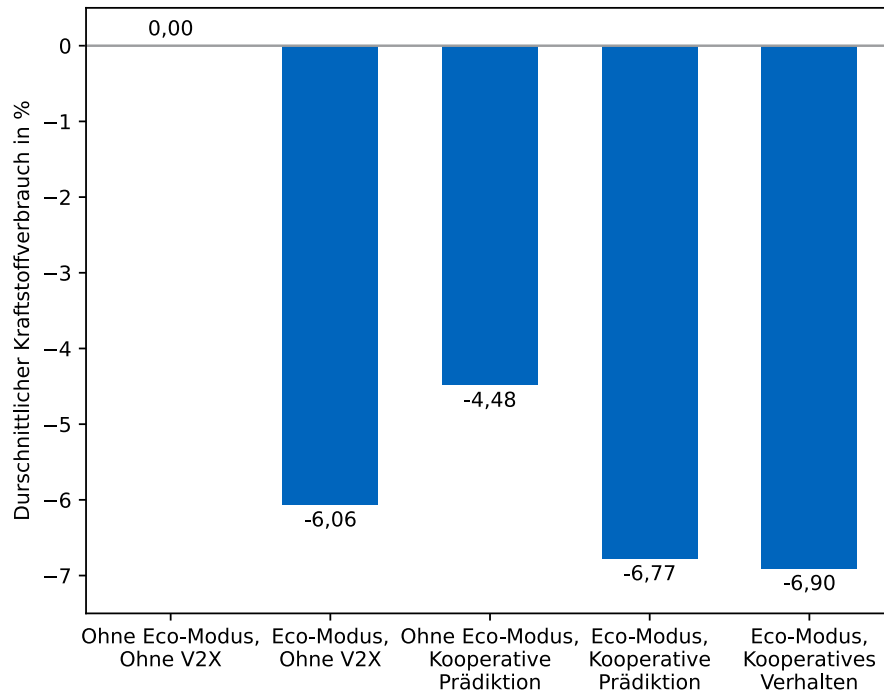


Abbildung 5.14: Relativer durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit zwei Lkw

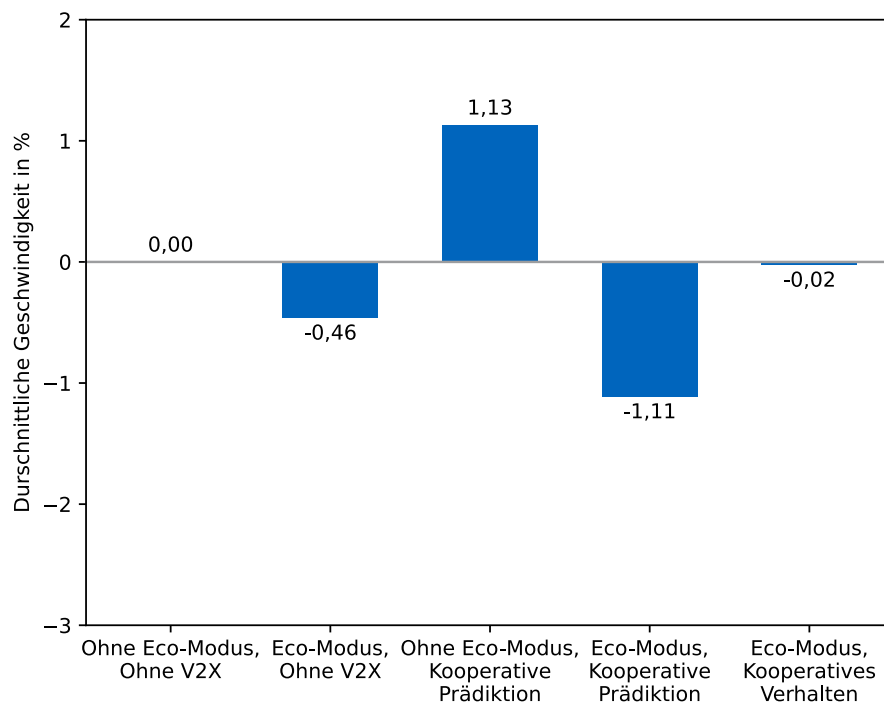


Abbildung 5.15: Relative durchschnittliche Geschwindigkeit bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit zwei Lkw

Tabelle 5.5 zeigt die Ergebnisse für den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch und der Durchschnittsgeschwindigkeit, wenn drei statt zwei Lkw die beschriebenen Varianten des Szenarios durchfahren. Zusätzlich sind in Abbildung 5.16 der relative durchschnittliche Kraftstoffverbrauch und in Abbildung 5.17 die relative Durchschnittsgeschwindigkeit dargestellt. Wie bei der Untersuchung mit zwei Lkw wurde der geringste Kraftstoffverbrauch mit Eco-Driving in Kombination mit kooperativer Manöverabstimmung erzielt. Zudem liegt die durchschnittliche Geschwindigkeit beim Eco-Driving mit kooperativer Manöverabstimmung an zweiter Stelle. Die Reihenfolge beim Kraftstoffverbrauch ist gleichgeblieben, allerdings ist der durchschnittliche Verbrauch gestiegen. Dies ist damit zu erklären, dass jetzt statt einem Fahrzeug zwei Fahrzeuge auf ihre optimale Fahrweise durch Kooperation verzichten. Die relative durchschnittliche Geschwindigkeit zeigt ähnliches Verhalten wie bei zwei Lkw. Bei der Variante ohne Eco-Driving und mit kooperativer Prädiktion wird die höchste und bei Eco-Driving mit kooperativer Prädiktion die geringste Durchschnittsgeschwindigkeit erzielt.

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der Ergebnisse für die simulativen Untersuchungen der kooperativen Manöverabstimmung mit drei Lkw

| Variante | Kurzbeschreibung                       | Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch je Lkw in l | Durchschnittsgeschwindigkeit in m/s |
|----------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1        | Ohne Eco-Modus, ohne V2X               | 1,224                                              | 21,77                               |
| 2        | Eco-Modus, ohne V2X                    | 1,180                                              | 21,80                               |
| 3        | Ohne Eco-Modus, kooperative Prädiktion | 1,182                                              | 22,08                               |
| 4        | Eco-Modus, kooperative Prädiktion      | 1,168                                              | 21,16                               |
| 5        | Eco-Modus, kooperatives Verhalten      | 1,155                                              | 21,82                               |

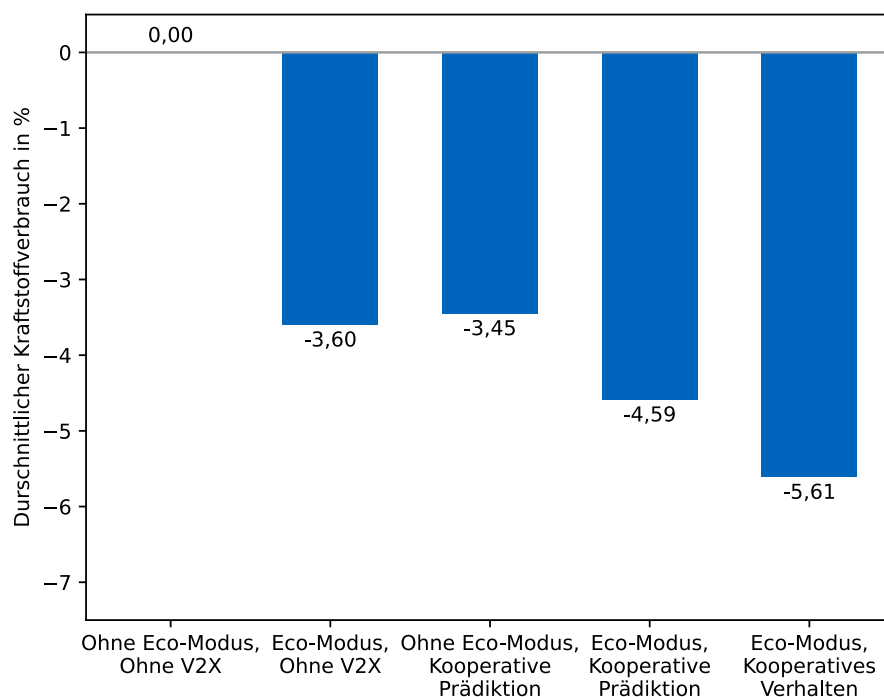


Abbildung 5.16: Relativer durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit drei Lkw

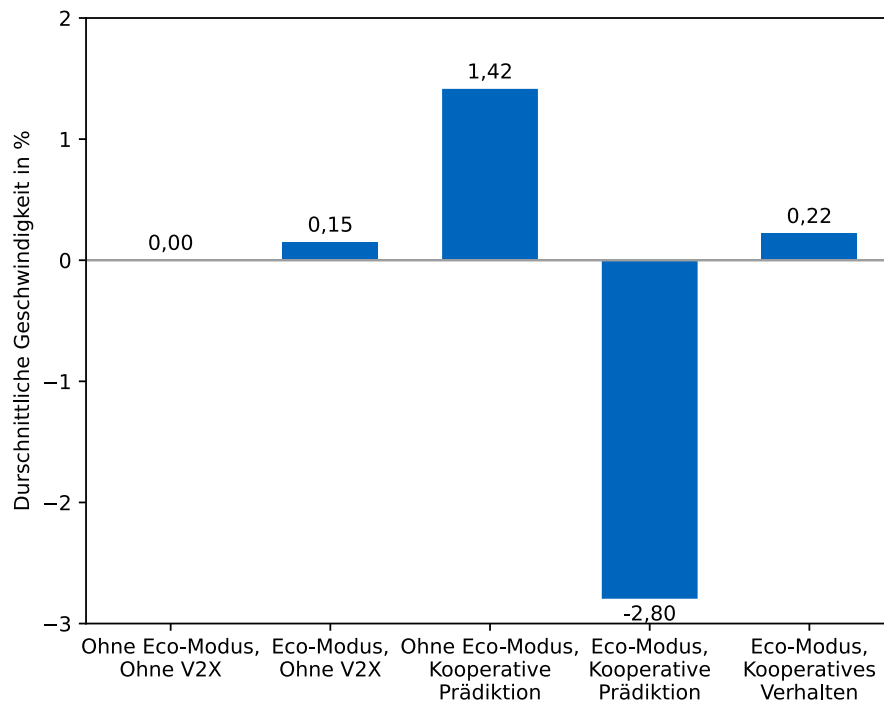


Abbildung 5.17: Relative durchschnittliche Geschwindigkeit bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit drei Lkw

## 5.2 Validierung durch Fahrzeugtests

Simulationen stellen immer Vereinfachungen der Wirklichkeit dar. In diesem Kapitel geht es vor allem um die Umsetzbarkeit in realen Anwendungen zu zeigen und Ergebnisse aus der Simulation zu verifizieren.

### 5.2.1 Szenarien

Für die Untersuchungen des Realverkehrs stand die Teststrecke 2 von MAN zur Verfügung (Abbildung 5.18). Im Wesentlichen ist dies ein ca. 1,3 km langer Rundkurs mit zwei langen Geraden. Beide Geraden sind zweispurig; ansonsten ist der Kurs einspurig. Auf dem Rundkurs befinden sich keine Steigungen, die maximale Geschwindigkeit ist auf 60 km/h beschränkt, in den Kurven muss die Geschwindigkeit verlangsamt werden.

Aufgrund der Einschränkungen durch das Testgelände können die Szenarien aus Kapitel 5.1 nicht abgefahren werden. Um dennoch die Funktionsfähigkeit und die Wirksamkeit zu zeigen, wurden drei Szenarien ausgewählt, die auf der Teststrecke darstellbar sind.



Abbildung 5.18: OpenStreetMap Karte des Testgeländes von MAN [198]

Im ersten Szenario soll gezeigt werden, dass die entwickelte Methode fähig ist, energieeffizientes Fahren abzubilden. Hierzu soll ein Lkw automatisiert mit konstanter Geschwindigkeit von 40 km/h auf der Teststrecke dem Rundkurs im Uhrzeigersinn folgen und vor der Südost-Kurve die Geschwindigkeit auf 25 km/h verringern. Mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h kann bis auf die Südost-Kurve die komplette Runde durchfahren werden, weshalb diese Geschwindigkeit gewählt worden ist. Die Südost-Kurve hingegen kann auf Grund des kleinen Radius nur mit maximal 25 km/h durchfahren werden. Bei energieeffizienter Fahrweise soll die Geschwindigkeitsreduktion durch ein Ausrollmanöver erfolgen, statt durch eine Verzögerung mit aktiver Bremsung.

Das zweite Szenario dient der Verifikation des Trajektorien austausches und der Validierung des Nutzens von V2X für Lkw bzgl. Kraftstoffverbrauch. Ein kooperativer Lkw steht hierfür ca. 50 m nach einer Kurve auf der Fahrbahn. Die Weiterfahrt ist durch ein davorstehendes nicht kooperatives Fahrzeug blockiert. Ein zweiter kooperativer Lkw fährt mit 40 km/h um die Teststrecke. Mit Hilfe von V2X wird das Fahrzeug zum einen früher wahrgenommen als mit der Fahrt ohne Kommunikation und zum anderen wird der aktuelle Fahrplan über die MCM mitgeteilt. Hierdurch soll es mit Kommunikation möglich sein, ein energieeffizientes Ausrollmanöver vor der notwendigen Bremsung durchzuführen.

Im letzten Szenario soll der Nutzen der kollektiven Perzeption im Fahrzeug gezeigt werden. Hierzu soll das zweite Szenario, von der simulativen Untersuchung für die kollektive Perzeption, auf der Teststrecke nachgestellt werden. Statt einer Autobahnausfahrt wird die zweispurige Westgerade für die Untersuchung genutzt. Ein nichtkooperatives Fahrzeug steht auf der linken Spur und stellt ein Stauende dar. Ein kooperativer Lkw nimmt eine andere Route und wechselt

vor dem nicht kooperativen Fahrzeug die Spur und fährt ungehindert weiter. Dabei übermittelt dieses Fahrzeug per V2X zum einem mit der MCM seinen Fahrplan, bei diesem deutlich wird, dass er nicht die gleiche Route fährt und zum anderen seine wahrgenommenen Objekte über die CPM. Der zweite kooperative Lkw fährt mit etwas Abstand zunächst hinter dem ersten kooperativen Lkw hinterher, bleibt aber auf der Route bzw. Spur, auf der das stehende Fahrzeug steht. Im Gegensatz zur Simulation wird mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit von nur 40 km/h gefahren. Durch die kollektive Perzeption soll das stehende Fahrzeug früher wahrgenommen werden und dadurch ein Rollmanöver vor der notwendigen Bremsung möglich sein.

Bei allen Szenarien ist für die Funktionsweise kein Sattelaufleger notwendig. Mit Sattelaufleger ändert sich vor allem die Masse und die Fahrzeuglänge, aber es nehmen auch Unsicherheiten zu, durch beispielsweise unterschiedliche Wartungszustände der Auflieger und somit veränderte Parameter für die Fahrwiderstände. Aus diesen Gründen wird bei den Realversuchen kein Sattelaufleger eingesetzt.

Um Schwankungen durch die Messungen auszugleichen, wurden alle Szenarien zweimal durchlaufen. Bei der Auswertung der Kraftstoffverläufe werden die Durchschnittswerte angegeben.

## 5.2.2 Ergebnisse

Abbildung 5.19 zeigt Geschwindigkeitsverläufe beim ersten Szenario. In der Abbildung wird eine Fahrt mit Eco-Modus und eine Fahrt ohne Eco-Modus verglichen. Dabei ist nur der relevante Abschnitt vor der Geschwindigkeitsbegrenzung auf 25 km/h dargestellt. Die Geschwindigkeitsverläufe und somit die Fahrt um die restliche Teststrecke unterscheiden sich bei Nutzung der energieeffizienten Fahrweise nicht von der Fahrweise ohne Eco-Modus.

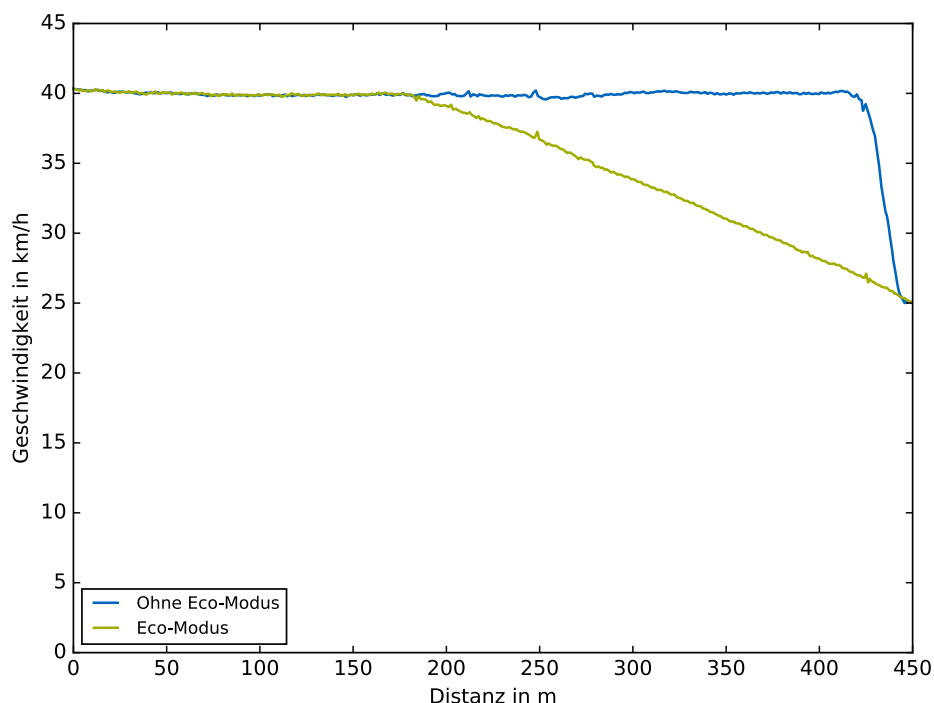


Abbildung 5.19: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim ersten Realversuchsszenario, energieeffizientes Fahren

Zu erkennen ist, dass mit Eco-Modus ein Rollmanöver statt einer Bremsung eingeleitet wird und damit verbunden die Geschwindigkeitsreduzierung ca. 200 m vorher beginnt. Abbildung 5.20

zeigt die Kraftstoffverbräuche in diesen Abschnitt. Mit Eco-Modus wird 0,022 l weniger Kraftstoff verbraucht. Zum Vergleich wurde dieses Szenario auch in der Simulation durchgeführt, hier konnte eine Kraftstoffersparnis von 0,052 l erreicht werden. Die im Realversuch erzielte Reduktion des Kraftstoffverbrauches liegt damit unter dem in der Simulation ermittelten Wert. Eine Ursache für die Differenz kann nicht angegeben werden. Ein möglicher Grund könnte ein erhöhter Nebenverbrauch durch die zusätzlichen Rechner im Versuchsträger sein. Dennoch zeigt der Versuch, dass das Abbilden von energieeffizienten Rollmanövern und die damit verbundene Reduktion des Kraftstoffverbrauches mit dem vorgestellten Vorgehen, sowohl in der Simulation als auch im Realfahrzeug, möglich ist.

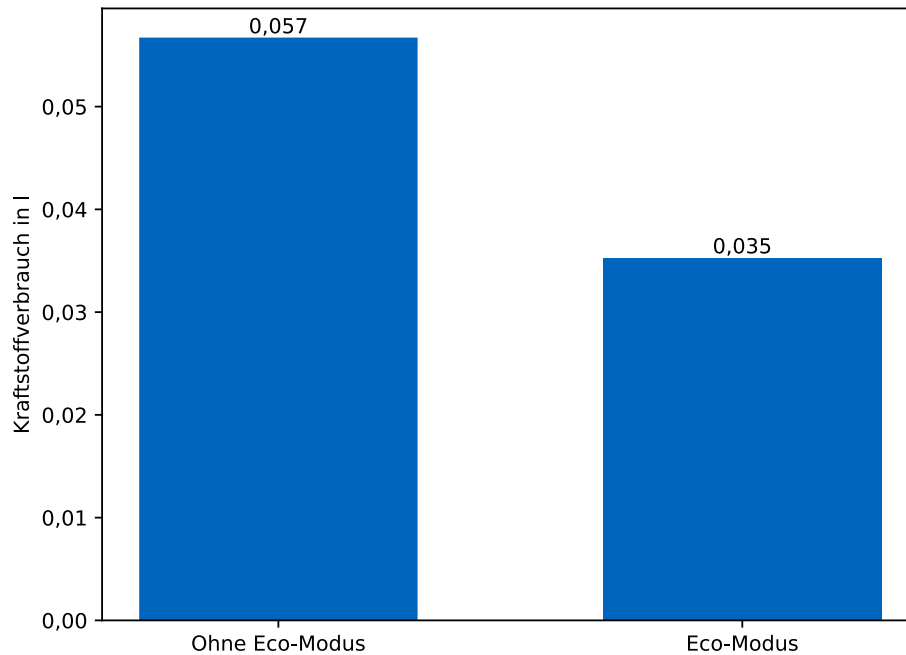


Abbildung 5.20: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim ersten Realversuchsszenario, energieeffizientes Fahren

Die Geschwindigkeitsverläufe des zweiten Fahrzeuges beim zweiten Realversuchsszenario, stoppen hinter einem stehenden Fahrzeug nach einer Kurve, sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Es wird zwischen Fahrt mit und ohne V2X unterschieden. Ohne Kommunikation muss das Fahrzeug durch die eigene Bordsensorik das stehende Objekt erfassen. Erst wenn das Objekt erfasst wird, kann der Planer darauf reagieren und eine von der strategischen Trajektorie abweichende Trajektorie gewählt, die ein Stoppen hinter dem stehenden Fahrzeug ermöglicht. Mit Kommunikation werden Trajektorien über die MCM übermittelt, aus welchen ersichtlich ist, dass das Fahrzeug steht und auch voraussichtlich in den nächsten Sekunden nicht weiterfährt. Durch die Position des Fahrzeuges hinter einer Kurve, wird es mit der eigenen Bordsensorik erst spät erkannt, während mit Kommunikation das stehende Fahrzeug schon vor bzw. in der Kurve wahrgenommen wird. Auch wenn die Kommunikationsreichweite ein frühes Erkennen ermöglicht, erfolgt die Reaktion auf das Fahrzeug erst, wenn dieses innerhalb des Planungshorizont von 10 s liegt. Bei einer Fahrt mit erlaubter Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h kann somit frühestens 111 m vor dem stehenden Objekt eine Reaktion erfolgen. Dennoch kann mit Hilfe von V2X früher auf das Objekt reagiert werden und ein Rollmanöver eingeleitet wird, bevor eine Bremsung in den Stillstand erfolgt. Hierdurch wurde eine Kraftstoffeinsparung von 0,005 l im Szenario erzielt (Abbildung 5.22). Ein Vergleich mit der Simulation zeigt allerdings wiederum

eine verringerte Kraftstoffeinsparung im Realversuch. In der Simulation wurde eine Einsparung von 0,039 l erreicht.

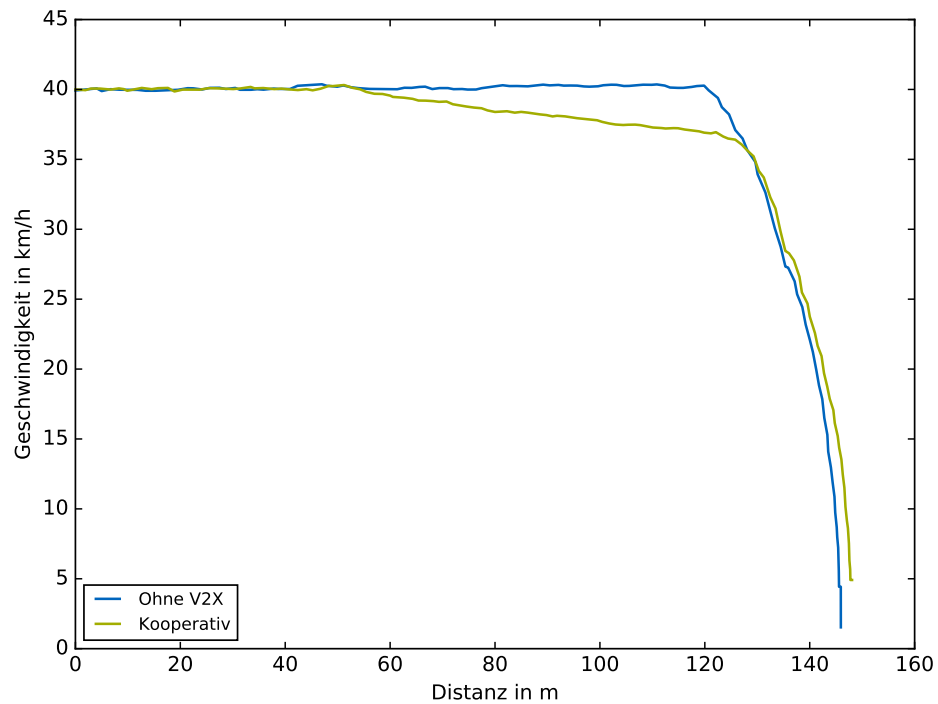


Abbildung 5.21: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim zweiten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug

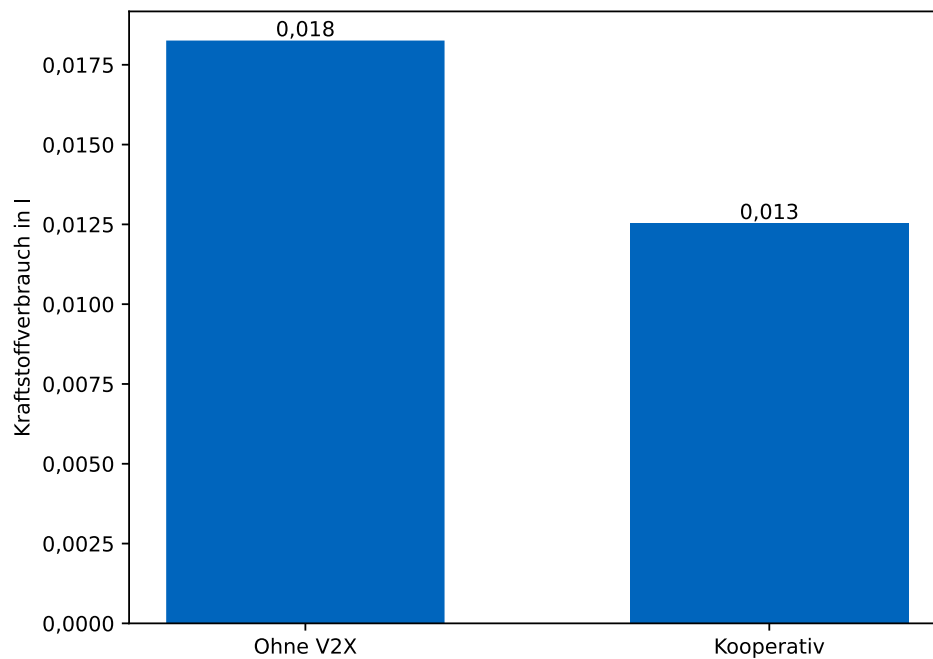


Abbildung 5.22: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim zweiten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug

Wie im vorherigen Szenario, muss auch im dritten Realversuchsszenario das Ego-Fahrzeug hinter einem stehenden Fahrzeug halten. Im Gegensatz zum zweiten Realversuchsszenario steht das stehende Fahrzeug nicht direkt hinter einer Kurve, sondern auf der geraden Strecke. Das stehende Fahrzeug sendet keine Informationen über V2X. Das Fahrzeug wird jedoch vom vorbeifahrenden zweiten kooperativen Lkw mit der Bordsensorik erfasst. Dieses übermittelt das wahrgenommene Fahrzeug per CPM an den zweiten kooperativen Lkw bzw. dem Ego-Fahrzeug. Das Ego-Fahrzeug nimmt somit das Fahrzeug früher wahr, als mit seiner eigenen Sensorik. Zudem weiß das Ego-Fahrzeug durch die MCM, dass das vorausfahrende Fahrzeug eine andere Route fährt und damit in dieser Situation nicht relevant für die eigene Fahrplanung ist. In Abbildung 5.23 sind wiederum die Geschwindigkeitsverläufe des Ego-Fahrzeuges mit und ohne V2X dargestellt. Durch die kollektive Perzeption kann das Fahrzeug früher auf das stehende Fahrzeug reagieren und es ist möglich zuerst ein Rollmanöver einzuleiten, bevor anschließend bis zum Stillstand gebremst wird. Ohne V2X wird das Objekt zu spät durch die Bordsensorik erfasst, um ein Rollmanöver einzuleiten. Die Kostenfunktionen ergeben einen Fahrplan mit dem mehrstufig auf das Objekt gebremst wird. Das Verhalten ist sinnvoll für den Fall, dass das Objekt plötzlich weiterfährt, denn dadurch ist die Geschwindigkeit relativ lange hoch. Der Kraftstoffverbrauch ist in Abbildung 5.24 dargestellt. Durch V2X und der damit verbundenen früheren Wahrnehmung des Objektes wird in diesem Szenario 0,002 l Kraftstoff gegenüber einer Fahrt ohne V2X eingespart. Wie bei den beiden vorherigen Szenarien ist die Kraftstoffeinsparung im Vergleich zur Simulation geringer. In der Simulation wurden 0,009 l Kraftstoff eingespart, wenn V2X verwendet wurde.

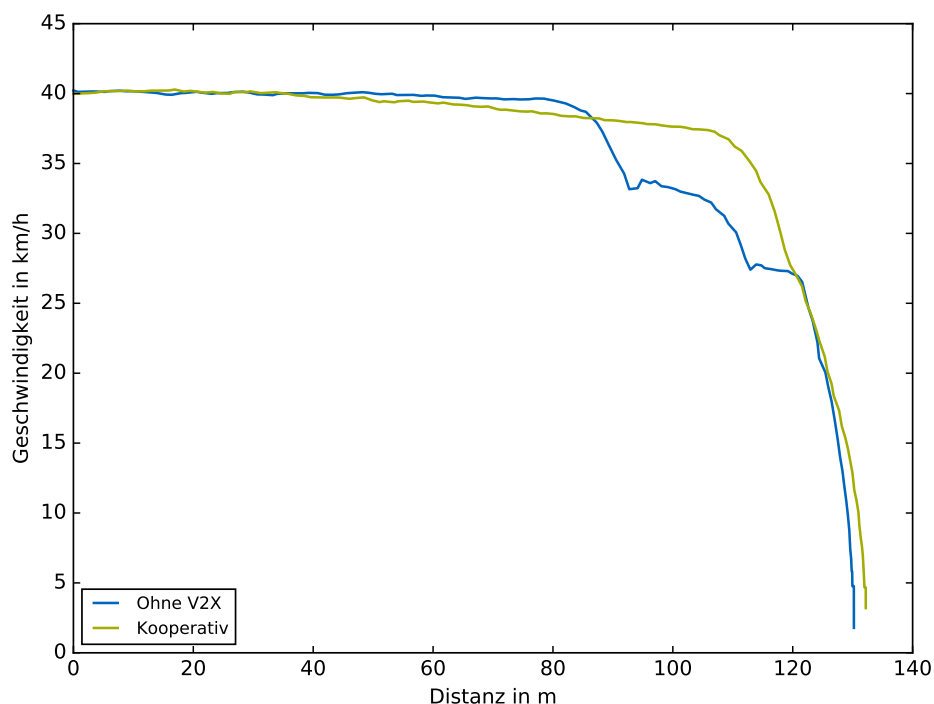


Abbildung 5.23: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim dritten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug mit kollektiver Perzeption



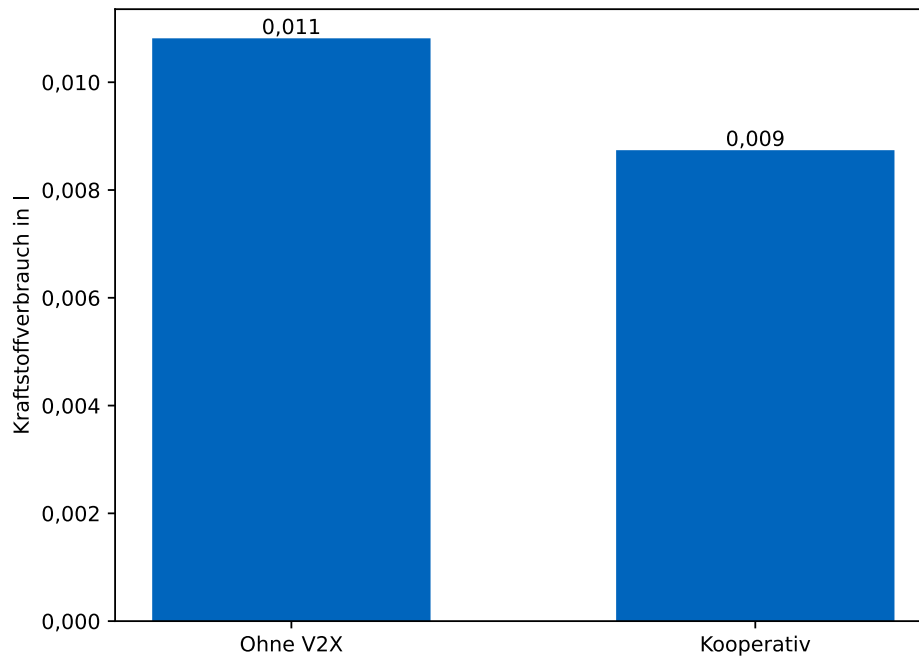


Abbildung 5.24: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim dritten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug mit kollektiver Perzeption

### 5.3 Kostenbetrachtung

Eine Grundvoraussetzung für den Einsatz in Serienfahrzeugen ist eine positive Kostenbilanz. Dies bedeutet, dass die Einsparungen durch die kooperative Längsführung höher sein müssen, als die Kosten für das System. Die NHTSA schätzt die zusätzlichen Kosten für Kunden von V2V-Ausrüstung und der dazugehörigen kooperativen Funktionen auf 341 bis 350 US-Dollar pro Fahrzeug für das Jahr 2020 [199]. Mit einem Umrechnungskurs von 1,13 US-Dollar für ein Euro [200, S. 2] liegen die Maximalkosten bei 310 Euro.

Unklar ist jedoch, wie häufig kooperative Szenarien im Realverkehr auftreten und damit welche Einsparungen durch eine kooperative Längsführung erwartet werden können. In der vorliegenden Arbeit wurden keine Feldtests durchgeführt, die eine Aussage über die Kosten im Speditionsalltag zulassen. Um dennoch eine Kostenbetrachtung zu ermöglichen, wird zunächst eine Analyse von kooperativen Situationen mit dem HighD-Datensatz [24] durchgeführt. Mit einer Drohne wurden deutsche Autobahnabschnitte gefilmt und die Fahrten einzelner Verkehrsteilnehmer als Tracks extrahiert. Damit umfasst der Datensatz das reale Verkehrsgeschehen im fließenden Verkehr. Für die Untersuchung werden nur Lkw für den Fernverkehr betrachtet. Zudem sollen nur potentielle Szenarien für die kooperative Längsführung ermittelt werden, weshalb keine Fahrzeuge betrachtet werden, die einen Spurwechsel durchführen. Als ein potentiell kooperatives Szenario für die Längsführung wird die Unterschreitung des Sicherheitsabstandes angenommen. Zusätzlich kann als weitere Bedingung das Auftreten einer Verzögerung mit einbezogen werden, um gewollte Unterschreitungen des Sicherheitsabstandes, z. B. vor Lkw-Überholmanövern, auszuschließen. Abbildung 5.25 zeigt die durchschnittliche Distanz von kooperativen Situationen in Abhängigkeit des gewählten Beschleunigungsschwellwertes zwischen  $-1,5$  und  $0 \text{ m/s}^2$ . Je kleiner der Beschleunigungsschwellwert gesetzt wird, desto größer ist die durchschnittliche Distanz. Unter  $-0,9 \text{ m/s}^2$  nimmt die Distanz für

kooperative Situationen stark zu und kann als Hinweis für ungewolltes Unterschreiten des Sicherheitsabstandes interpretiert werden.

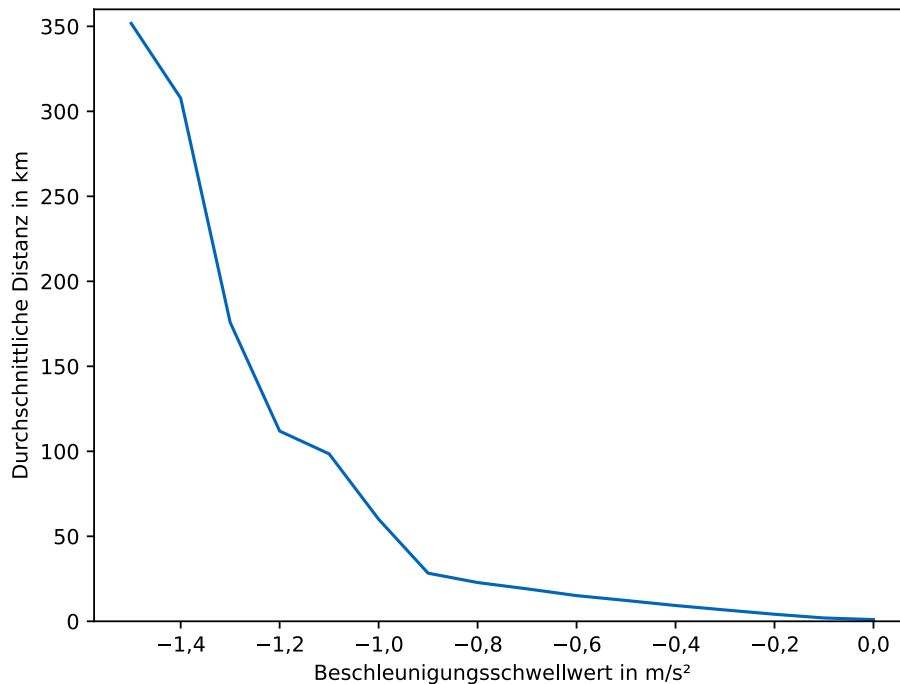


Abbildung 5.25: Durchschnittliche Distanz kooperativer Situationen auf Autobahnen bei fließendem Verkehr in Abhängigkeit des Beschleunigungsschwellwertes

Neben kooperativen Szenarien im fließenden Verkehr können weitere kooperative Szenarien durch Missverständnisse bzw. Fehleinschätzungen entstehen, wie z. B. das vierte Szenario bei den Untersuchungen für die kollektive Perzeption. Bei diesem Szenario wurde ein unnötig starker Bremsvorgang mit anschließender Beschleunigung ausgeführt.

Die Häufigkeit des Auftretens der Szenarien ist zusätzlich von der Jahresfahrleistung abhängig. Die durchschnittliche Jahresfahrleistung wird zwischen 110.000 und 140.000 km im Fernverkehr angegeben [6, 16, S. 5, 201, S. 75]. Im Folgendem werden die gleichen Annahmen für die Kostenbetrachtung wie von Fries [184] getroffen: 120.000 km Jahresfahrleistung, 6 Jahre Nutzungsdauer und 1 Euro/l Kraftstoffkosten.

Für die Kostenberechnung werden drei Szenarien betrachtet. Das erste Szenario geht von einer hohen Anzahl von kooperativen Situationen aus, die zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauches führen. Es wird angenommen, dass alle 60 km eine kooperative Situation vorhanden ist, bei der eine geringe Ersparnis im Kraftstoffverbrauch erzielt wird. 60 km entspricht dem Beschleunigungsschwellwert  $-1,0 \text{ m/s}^2$  bei der Analyse der HighD-Daten. Als geringe Kraftstoffeinsparung wird  $0,025 \text{ l Diesel}$  angesehen, dies entspricht z. B. der Kraftstoffersparnis beim Szenario Bergfahrt mit drei Lkw, bei Nutzung der kooperativen Längsführung gegenüber dem Fahren ohne V2X im Eco-Modus. Zudem wird angenommen, dass zwei Situationen am Tag mit hoher Ersparnis im Kraftstoffverbrauch auftreten, dies entspricht ungefähr 250 km. Eine hohe Kraftstoffersparnis wurde bei der Untersuchung der kollektiven Perzeption im vierten Szenario erreicht. Aus diesem Grund wird auch in der Kostenbetrachtung für diese Situationen eine Kraftstoffeinsparung von  $0,5 \text{ l}$  angenommen.

Das zweite Szenario geht von einer mittleren Anzahl von kooperativen Szenarien aus, die zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauches führen. Für das Szenario wird angenommen, dass alle 90 km eine kooperative Situation auftritt, bei der eine geringe Kraftstoffersparnis erzielt wird.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass alle 500 km eine kooperative Situation mit hoher Kraftstoffersparnis auftritt.

Im letzten Szenario wird von einer geringen Anzahl an kooperativen Situationen ausgegangen. Alle 120 km tritt eine kooperative Situation mit geringer Kraftstoffersparnis und alle 1000 km tritt eine kooperative Situation mit hoher Kraftstoffersparnis auf.

Tabelle 5.6 fasst die Ergebnisse zusammen. Die Kostenersparnis durch das System umfasst die eingesparten Kosten durch reduzierten Kraftstoffverbrauch und die zusätzlichen Anschaffungskosten für die kooperative Längsführung. Alle drei Szenarien zeigen eine positive Bilanz für den Speditionseinsatz, obwohl die Kraftstoffeinsparung pro 100 km gering ist. Wird ein Durchschnittsverbrauch von einem MAN TGX 18.510 Baujahr 2020 mit 26,2 l/100 km angenommen [202], dann liegt die zu erwartende Kraftstoffeinsparung zwischen 0,92 und 0,27 %. Damit liegt die Kraftstoffersparnis im Bereich von Puls & Glide Systemen, die bis zu 0,5 % Kraftstoffersparnis erreichen [43].

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Kostenbetrachtung für die kooperative Längsführung

| Szenario | Durchschnittliche Distanz kooperativer Situationen mit geringer Kraftstoffeinsparung in km | Durchschnittliche Distanz kooperativer Situationen mit hoher Kraftstoffeinsparung in km | Kraftstoffersparnung in l/100 km | Kostenersparnis in Euro/Jahr | Kostenersparnis System in Euro |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1        | 60                                                                                         | 250                                                                                     | 0,24                             | 290,00                       | 1430,00                        |
| 2        | 90                                                                                         | 500                                                                                     | 0,13                             | 153,33                       | 610,00                         |
| 3        | 120                                                                                        | 1000                                                                                    | 0,07                             | 85,00                        | 200,00                         |



# 6 Diskussion

*Teile der Diskussion beruhen auf den Veröffentlichungen [165–167].*

In den vorherigen Kapiteln wurde eine Methode vorgestellt, die energieeffizientes Fahren mit der kollektiven Perzeption und kooperativer Manöverabstimmung verbindet. Mit Simulationen und Tests auf dem Testgelände konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte Verfahren einen positiven Effekt auf den Kraftstoffverbrauch hat. In diesem Kapitel sollen die erreichten Ergebnisse diskutiert werden. Dabei soll u. a. gezeigt werden, welche Grenzen das System hat und welche Verbesserungspotentiale existieren. Zudem wird der potentielle Einsatz im Realverkehr diskutiert und damit der Nutzen für Speditionsunternehmen.

## 6.1 Systemausprägung

Die vorgestellte Methode wurde prototypisch umgesetzt, um im Rahmen der Dissertation die Untersuchungen für die Zielsetzung durchzuführen. Die Implementierung hat daher einen geringeren Reifegrad als beispielsweise Funktionen auf Seriensteuergeräten. Aus diesem Grund existieren verschiedene Verbesserungspotentiale, die Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch haben könnten und im Folgenden vorgestellt werden. Die Verbesserungspotentiale betreffen dabei nur die Umsetzung der Methode und stellen keine generellen Grenzen des Vorgehens dar.

Die Methode und somit die Implementierung besitzt eine Vielzahl von Parametern. Für die Untersuchungen wurden Parameter durch einzelne Tests und der Betrachtung der Geschwindigkeitsprofile ermittelt. Die gewählten Parameter garantierten ein gewünschtes Verhalten, allerdings kann nicht von einer optimalen Parameterwahl ausgegangen werden, denn hierfür müssten alle Parameterkombinationen durchsimuliert werden. Werden beispielsweise nur die fünf Parameter für die Gewichtung der Energieeffizienz der fünf Fahraktionen und der Faktor für die Kooperationsbereitschaft betrachtet, dann sind sechs unabhängige Parameter vorhanden. Bei einer Diskretisierung von zehn Schritten pro Parameter sind eine Millionen Parametersätze möglich. Bei einer angenommenen Simulationsdauer von einer Minute für einen Parametersatz, würde die Durchführung aller Simulationen ohne Parallelisierung ca. 1,9 Jahre benötigen. Tatsächlich werden allein dem Planungsmodul 29 Parameter übergeben. Nicht alle Parameter sind unabhängig, beispielsweise die Gewichtungsfaktoren der Kostenfunktionen müssen in der Summe eins ergeben, dadurch reduziert sich der Aufwand. Allerdings können mehr als zehn Diskretisierungsschritte vorgenommen werden, was den Rechenaufwand wieder erhöht.

Die optimale Fahrstrategie minimiert die Kosten. Aus Gl. (2.1) ist ersichtlich, dass diese für das energieeffiziente Fahren, neben den Fahrkosten auch die Zeit mit beinhaltet. In Kapitel 2.1.2 wurde zudem die Wichtigkeit beider Faktoren begründet. Die Gewichtung zwischen Zeit und

Fahrtkosten ist bei nicht kommerziellen Fahrten subjektiv. Je länger eine Fahrt dauert, desto mehr Freizeit muss hierfür investiert werden. Der Wert der Freizeit ist jedoch subjektiv und somit ist selbst bei einer analytischen Lösung die daraus folgende Trajektorie ebenfalls nicht objektiv. Bei Speditionen hingegen sind die Kosten theoretisch fest bezifferbar. Die Zeit- und Fahrkosten müssen die Kosten für Fahrer, Energie und Verschleiß abdecken. Feste Kosten, z. B. Versicherung oder Maut, sind für die Berechnung von einer Fahrstrategie nicht relevant, weil diese unabhängig von dieser entrichtet werden müssen. Weishäupl [203] hat die Möglichkeit der Quantifizierung der Kosten für das Abfahren einer vorgegebenen Trajektorie bzw. eines Geschwindigkeitsprofils untersucht. Die Zeitkosten können durch die durchschnittlichen Kosten für den Fahrer ermittelt werden. Nicht berücksichtigt wird allerdings, wenn durch eine langsame Fahrt z. B. eine zusätzliche Übernachtung bezahlt werden muss. Die Kosten für Kraftstoff und Verschleiß sind hingegen fahrzeugspezifisch und können nur unzureichend angenähert werden. Beispielsweise entsteht bei einer Verzögerung mit der Betriebsbremse Verschleiß an den Bremsbacken und -scheiben. Die Kosten hierfür sind von der Bauart und Material, sowie vom notwendigen Bremsdruck abhängig. Der Bremsdruck ist wiederum davon abhängig, inwieweit Fahrwiderstände und verschleißfreie Bremsen unterstützend einwirken können. Eine allgemeine fahrzeugunabhängige Beschreibung der Kosten ist daher nicht möglich. Des Weiteren ist der genaue Fahrzeugaufbau mit verwendeten Materialien in der Regel nicht bekannt. Aus diesen Gründen können die Fahrkosten für eine allgemeine Betrachtung nur angenähert werden. Eine objektive Berechnung der optimalen Fahrstrategie für Speditionen ist daher nicht möglich. Die Kostenfunktionen der Trajektorienbewertung des Konzeptes bilden trotzdem annähernd die Kosten ab, beispielsweise wird ein Rollmanöver besser als eine Bremsung bewertet, weil beim Ausrollen kein Verschleiß an den Bremsen entsteht, dennoch könnten detaillierte Kostenfunktionen eine bessere Abbildung der Kosten für Speditionen bewirken und somit das Ergebnis verbessern.

Prinzipiell kann mit einem längeren Planungshorizont, bei der Manöverabstimmung, ein besseres Ergebnis erwartet werden, weil Konfliktsituationen früher erkannt werden. Ebenso können schnellere Zykluszeiten eine schnellere Reaktion bzw. Manöverabstimmung bewirken. Allerdings muss bei der Umsetzung auf die Echtzeitfähigkeit geachtet werden. Dies steht einer beliebig kleinen Zykluszeit und langen Planungshorizont entgegen. Bei der prototypischen Umsetzung wurde eine gewünschte Zykluszeit von 10 Hz und ein Planungshorizont von 10 s umgesetzt. In den Realtest war bereits ein teilweiser Abfall der Frequenz auf kurzfristig bis ca. 3 Hz zu beobachten. Das System hat trotz zeitweiser Reduktion der Zyklusfrequenz seine Funktionsweise erfüllt, dennoch ist eine Grenze der Umsetzbarkeit erreicht, die z. B. einen längeren Planungshorizont verhindert. Eine Analyse der Ursache des Frequenzabfalles konnte wegen eines Bauteildefektes nicht mehr durchgeführt werden. Ein Grund für das Sinken der Frequenz könnte durch die Verwendung des Betriebssystems Ubuntu und dem Framework ROS verursacht worden sein. Durch deren Einsatz war eine schnelle prototypische Umsetzbarkeit möglich, allerdings können beispielsweise andere Prozesse des Betriebssystems den Prozess der kooperativen Planung kurzzeitig verdrängen. Eine Implementierung auf einen Echtzeitrechner mit Echtzeitbetriebssystem könnte dies verhindern. Zudem hat sich der Kollisionscheck als entscheidender begrenzender Faktor bei dem Konzept gezeigt. Während die Trajektorienberechnung wenige Millisekunden Rechenzeit benötigt, ist die Prüfung der Kollisionen von der Trajektorienlänge und der Anzahl an Fahrzeugen abhängig. Insbesondere die Anzahl der V2X-fähigen Fahrzeugen kann die Rechenzeit negativ beeinflussen, weil per MCM bis zu zwei Trajektorien übermittelt werden können. Um die Berechnungszeiten zu verkürzen, ist eine Parallelisierung empfehlenswert. Grafikkarten sind für die Berechnung vieler paralleler Aufgaben besonders geeignet [204]. Bei der entwickelten Methode lassen sich die Trajektorien-

berechnungen und -bewertungen, die den Kollisionscheck beinhaltet, parallelisieren. Die gewonnene Rechenzeit könnte für einen längeren Planungshorizont genutzt werden und somit der Nutzen gesteigert werden.

Die Güte der vorgestellten Methode bei Mischverkehr ist im Wesentlichen von der Wahrnehmung und der Prädiktion nicht kooperativer Fahrzeuge abhängig. Die Wahrnehmung im Konzept ist neben der von der Sensorik bereitgestellten Objektlisten auch vom Umfeldmodell der kollektiven Perzeption abhängig. Bei den Untersuchungen wurde das Umfeldmodell des IMAGinE-Projekts eingesetzt. In Simulationen, aber auch in Realtests, konnte die richtige Funktionsweise gezeigt werden und erste Erfahrungen mit der kollektiven Perzeption mit verschiedenen Herstellern gesammelt werden. Dennoch existieren noch Verbesserungsmöglichkeiten, beispielsweise wurde für die Fusion im Zustandsraum keine Objektdimension aufgeführt, was zu falschen Fusionsergebnissen, bei Fahrzeugen mit stark unterschiedlichen Dimensionen, führen kann [168]. Für die wahrgenommenen Objekte muss im Anschluss die weitere Bewegung präzisiert werden, damit diese in der eigenen Planung mit berücksichtigt wird. In Kapitel 2.2 wurde erwähnt, dass es verschiedene Modellklassen hierfür gibt. In der vorliegenden Implementierung wurde ein modellbasiertes Bewegungsmodell verwendet, mit der Annahme, dass sich Fahrzeuge mit der aktuellen Geschwindigkeit in der aktuellen Fahrspur weiterbewegen. Intelligentere Verfahren, die beispielsweise anhand der Straßendaten Verzögerungen vor Geschwindigkeitsbegrenzungen vorhersagen, könnten eine Verbesserung der Prädiktion bewirken. Durch einbeziehen weiterer Verkehrsteilnehmer in die Prädiktion, und somit eine Umsetzung von aktionsbewussten Prädiktionsmodellen, ist eine weitere Verbesserung erwartbar. Je besser die Fahrzeuge wahrgenommen werden und je besser die Bewegung präzisiert wird, umso besser kann das eigene Fahrzeug planen, was zu einem geringen Kraftstoffverbrauch führen kann. Allerdings benötigen meist bessere Prädiktionsmodelle mehr Rechenkapazität und können bei einer Vielzahl von zu präzisierenden Fahrzeugen zum Verlust der Echtzeitfähigkeit führen.

Des Weiteren wird in der vorgestellten Implementierung nur eine Trajektorienplanung entlang eines Pfades durchgeführt. Durch Erweiterung der Trajektorienplanung könnten zusätzlich nicht zwingend notwendige Spurwechsel durchgeführt werden. Hierdurch könnte beispielsweise bei Autobahnauffahrten ein Einfädeln durch einen Wechsel des vorfahrtsberechtigten Fahrzeug auf die nebenliegende Fahrspur ermöglicht werden, ohne dabei eine Geschwindigkeitsreduktion durchführen zu müssen, um eine Lücke für den Einfädler zu eröffnen. Hierdurch würde der anschließende Beschleunigungsvorgang wegfallen, um wieder die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, wodurch Kraftstoff eingespart werden kann. Eine Erweiterung würde jedoch die Trajektorienzahl erhöhen und somit ebenfalls die Rechenzeit erhöhen. Eine sinnvolle Abwägung zwischen zusätzlichen Trajektorien und Nutzen für den Kraftstoffverbrauch ist dabei zu treffen.

## 6.2 Systemgrenzen

Im vorherigen Abschnitt wurden Verbesserungspotentiale in der Umsetzung des Konzeptes aufgezeigt. Die Methode selbst besitzt allerdings auch Grenzen, die nur durch eine Erweiterung des Konzeptes überwunden werden können. Im Folgenden werden die Systemgrenzen diskutiert.

Prinzipiell ist es möglich, mit dem System im Platoon zu fahren, d. h. mit geringeren Abständen als dem gesetzlichen Sicherheitsabstand, um eine zusätzliche Kraftstoffeinsparung durch Reduktion des Luftwiderstandes zu erzielen. Hierzu müsste nur der gewünschte Sicherheitsabstand heruntersetzt werden. Das System ist jedoch nicht fähig Platooningpartner zu finden. Fahren beispielsweise zwei identische Fahrzeug in 200 m Abstand, dann

würde es keine Abstimmung zwischen den Fahrzeugen geben, weil die bestmöglichen Plantrajektorien der Fahrzeuge nicht kollisionsbehaftet sind. Sowohl das Finden von Platoons als auch das Bilden und Auflösen von Platoons ist mit diesem Vorgehen nicht möglich. Hierzu müsste eine weitere Planungsebene der Methode hinzugefügt werden.

Ein Einflussfaktor für den Kraftstoffverbrauch ist die Routenwahl (Kapitel 2.1.1). Das Konzept geht von einer vorgegebenen Route aus. Sind beispielsweise zwei Routen gleich schnell, aber bei einer Route ist ein höherer Anteil an Steigungsfahrten enthalten, dann ist diese meist ineffizienter. Ebenso könnte bei Stauinformationen das Umfahren des Staus effizienter sein, als eine Fahrt durch den Stau. Wie beim Platooning müsste hierfür eine weitere Planungsebene der Methode hinzugefügt werden.

In Kapitel 2.4.6 wurde bei der Vorstellung des Konzeptes von Plan- und Wunschtrajektorie und deren Erweiterungen erwähnt, dass eindeutige Verkehrsregeln bzw. ein einheitliches Verständnis für die Vorfahrt notwendig ist. Die kooperative Abstimmung beruht auf diesem Konzept, weshalb auch bei der vorgestellten Methode, diese Einschränkung gilt. Für eine Folgefahrt wurde beispielsweise angenommen, dass das vordere Fahrzeug immer vorfahrtsberechtigt ist, d. h. es kann immer eine beliebig starke Verzögerung durchführen. Die Annahme widerspricht allerdings der StVO, denn nach StVO §1 [12] dürfen andere Verkehrsteilnehmer nicht behindert werden. Eine genaue Definition für Behinderung ist nicht gegeben. Bei einem ungleichen Verständnis über das Vorfahrtsrecht ist keine Abstimmung möglich, weil ggf. jeder Teilnehmer davon ausgeht, dass er vorfahrtsberechtigt ist und somit keine Wunschtrajektorie versendet. Um ein gleiches Verständnis zu erreichen, existieren verschiedene Möglichkeiten, z. B. eine Nachbesserung der StVO oder alle Fahrzeughersteller verwenden die gleiche Implementierung.

Eine weitere Einschränkung der Methode ist die Annahme, dass das System nicht von einem Teilnehmer ausgenutzt wird. Bei diesem Konzept könnte ein Fahrzeug alle Wunschtrajektorien von anderen Fahrzeugen ignorieren, selbst jedoch von der Kooperation anderer Verkehrsteilnehmer profitieren. Im Konzept ist kein Mechanismus hinterlegt, der dies verhindert. Das System beruht somit auf Vertrauen, dass sich alle Teilnehmer an die StVO §1 [12] halten, in dem gegenseitige Rücksichtnahme gefordert wird und somit indirekt kooperatives Verhalten vorgeschrieben wird. Zudem profitieren langfristig bei kooperativem Verhalten alle Verkehrsteilnehmer durch ein verbesserten Verkehrsfluss [141]. Alternativ könnte das Konzept um ein Abrechnungssystem erweitert werden, bei dem der Profiteur einen Betrag an denjenigen zahlt, der durch sein kooperatives Verhalten kurzfristig einen Nachteil hat. Allerdings sprechen einige Punkte gegen ein Abrechnungssystem. Durch ein Abrechnungssystem würden zusätzliche Daten anfallen, die ausgetauscht werden müssen und dadurch den Kommunikationskanal zusätzlich belasten. Wird beim Abrechnungssystem eine Art Auktion umgesetzt, d. h. nur wenn genügend Geld geboten wird findet die Kooperation statt, dann könnte dies zusätzlich Zeit in Anspruch nehmen. Hierdurch könnte eine notwendige schnelle Reaktion auf eine Situation verhindert werden und somit eine Kooperation unmöglich gemacht werden. Das Festsetzen von festen Preisen für Kooperation statt einer Auktion ist ebenfalls problematisch, weil die Kosten für die Umsetzung einer Trajektorie fahrzeugspezifisch sind. Zudem ist die Berechnung der tatsächlichen Kosten für das Abfahren einer Trajektorie kaum möglich. Darüber hinaus müsste ein einheitliches Bezahlungssystem geschaffen werden, bei dem sichergestellt wird, dass andere Verkehrsteilnehmer ihre Vergütung bekommen. Dies bringt weitere Herausforderungen mit sich, z. B. müsste geklärt werden, was passiert, wenn jemand zahlungsunfähig ist oder wie die Überweisung von Beträgen stattfindet. Hier könnte ein Vermittlungssystem notwendig werden, damit die betreffenden Inhaber bzw. Betreiber der Fahrzeuge ihr Geld bekommen, ohne dabei bei jeder Kooperation ihre Bankdaten austauschen zu müssen. Allerdings ist ein Vermittlungssystem mit weiterem Aufwand verbunden.



Neben dem Vertrauen, dass das System durch einzelne Teilnehmer nicht ausgenutzt wird, muss auch auf die Richtigkeit der Trajektorien vertraut werden. Mit den Trajektorien wird die zukünftige Bewegung angezeigt und auf deren Basis die Manöverabstimmung durchgeführt. Das Vertrauen auf die angezeigte Bewegungsrichtung ist nicht neu und wird im täglichen Straßenverkehr bereits heute praktiziert. Ein Beispiel für die Anzeige der zukünftigen Bewegung ist das Blinken beim Abbiegen an Kreuzungen. Kommen sich zwei Fahrzeuge entgegen und beide zeigen mit dem Blinker an, dass diese links abbiegen möchten, dann kann der Abbiegevorgang ohne Stopp durchgeführt werden. Hält einer der Teilnehmer sich nicht an seinen angezeigten Plan und fährt hingegen geradeaus, kann dies zu einem Unfall führen. Die Methode besitzt Toleranzen für Trajektorien, um die Robustheit zu erhöhen. Zwar können damit kleinere Abweichung vom Plan akzeptiert werden, dennoch könnte eine falsche Trajektorie übermittelt werden. Um dennoch die Sicherheit zu garantieren, müssten Trajektorien plausibilisiert werden. Dies könnte z. B. durch einen Abgleich des aktuellen Zustandes des kooperativen Fahrzeuges, der über die eigene Sensorik ermittelt wird und dem versendeten Zustand des Fahrzeuges über die Trajektorie erfolgen. Auch wenn die Sicherheit gewährleistet wird, könnten falsche Trajektorien den Kraftstoffverbrauch negativ beeinflussen, weil evtl. unnötige Verzögerungen ausgeführt werden. Aus diesem Grund sollte neben dem aktuellen Fahrzeugzustand ebenfalls die Trajektorie plausibilisiert werden.

Nicht im Konzept bzw. der Implementierung ist die V2I-Kommunikation enthalten. Signale von dynamischen Verkehrszeichen, z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen oder von besonderen Ereignissen, z. B. Stau mit Stillstand könnten über V2X übermittelt werden. Die Daten könnten in der Karte und somit dem strategischen Pfad mit integriert werden. Im Falle der Geschwindigkeitsbegrenzung könnte die erlaubte Höchstgeschwindigkeit herabgesetzt werden und im Falle eines Staus könnte eine virtuelle Stopplinie vor Staubeginn eingefügt werden. Eine weit- aus größere Anpassung bedarf es bei der Integration von Ampelschaltungen. Hier muss sowohl die strategischen Trajektorienberechnung als auch die Trajektorienberechnung bzw. -bewertung für die Planung angepasst werden, um Trajektorien für die Grün-Phasen zu berechnen bzw. um Trajektorien für Rot-Phasen auszuschließen.

## 6.3 Realverkehr

In der vorliegenden Arbeit wurden Simulationen und Realtests, aber kein Feldversuch durchgeführt. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt ein möglicher Einsatz im Realverkehr diskutiert.

Eine Voraussetzung für den Einsatz des Systems im Realverkehr, ist die Fähigkeit, nicht mit dem System ausgestattete Fahrzeuge abzubilden. Dadurch, dass das System nicht auf Kommunikation angewiesen ist, weil für nicht V2X-Fahrzeuge eine Prädiktion der Trajektorien erfolgt, ist diese Bedingung erfüllt. Die Energieeffizienz ist dabei maßgeblich von der richtigen Prädiktion der nicht V2X-Fahrzeuge abhängig. Wird beispielsweise bei einem direkt vor einem fahrenden Fahrzeug eine Bremstrajektorie prädiziert, dann wird zwangsläufig ebenfalls eine Bremsung ausgeführt. Ist die Prädiktion jedoch falsch und das Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit weiter, dann wurde eine unnötige Verzögerung des Fahrzeuges ausgeführt, und ein anschließender unnötiger Beschleunigungsvorgang führt zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Eine Aussage über die Güte der Prädiktion im Realverkehr konnte in der vorliegenden Arbeit nicht getroffen werden.

Unklar ist das Verhalten bei realer Kommunikation. In der Simulation wurde eine verlustfreie Kommunikation angenommen. In den Realversuchen wurden nur zwei Versuchsträger gleichzeitig getestet. Durch die geringe Anzahl an Sendern ist keine Aussage zur Kommunikationskanalauslastung bei hoher Marktdurchdringung möglich. In Kapitel 2.3.1 wurde

bereits erwähnt, dass eine höhere Belastung des Kommunikationskanals zu höheren Paketverlusten bei der Kommunikation führt. Dadurch das neben den bereits existierenden Botschaft CAM und DENM mit der CPM und MCM zwei weitere Botschaften hinzukommen, besteht die Gefahr der Überlastung des Kommunikationskanal. Falls dies Eintritt, könnten angepasste Generierungsregeln oder die Nutzung einer anderen Kommunikationstechnik, z. B. 5G statt IEEE 802.11p, das Problem lösen. Untersuchungen hierzu werden im IMAGinE-Projekt durchgeführt. Prinzipiell ist das System allerdings robust gegenüber Kommunikationsausfall. Bei einer gestörten Kommunikation ist das System arbeitsfähig, weil im Vorgehen nicht kommunizierende Fahrzeuge mit in die Planung einbezogen werden. Zudem hat das System, wie bereits erwähnt, bei den Realversuchen auch mit kurzzeitig reduzierter Frequenz seine Funktion erfüllt.

Damit ein System für Speditionen rentabel ist, darf die Amortisationsdauer drei Jahre nicht überschreiten [16, S. 101-102]. Die Kostenbetrachtung in Kapitel 5.3 zeigt, dass die Rentabilität von der Häufigkeit des Auftretens von kooperativen Situationen abhängig ist. Je häufiger kooperative Situationen auftreten, desto höher ist der Nutzen für Speditionsunternehmen. Die Analyse hat gezeigt, dass nur beim konservativen dritten Szenario mit der Annahme, dass nur wenige kooperative Situationen auftreten, die Amortisationsdauer von drei Jahren überschritten wird. Für eine zuverlässigere Aussage über die Speditionskosten bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen. Eine Möglichkeit besteht in der Aufzeichnung von Speditionsfahrten mit Umgebungswahrnehmung. Im Gegensatz zum HighD-Datensatz, bei diesem nur Autobahnabschnitt mit fließendem Verkehr enthalten sind, ist hierdurch eine bessere Abbildung des realen Verkehrsgeschehens möglich.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Kraftstoffverbrauch ist ein Hauptkostenfaktor für Speditionen im Fernverkehr, weshalb Lkw-Hersteller bemüht sind, energieeffiziente Fahrzeuge zu entwickeln. Eine Möglichkeit den Kraftstoffverbrauch zu senken, ist der Einsatz von GPS-Tempomaten. Mit Hilfe einer digitalen Karte, in der u. a. die Straßentopologien abgebildet sind, wird ausgehend von der aktuellen Position eine energieeffiziente Fahrstrategie berechnet. Bei diesen Verfahren werden keine anderen Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Untersuchungen zeigten, dass sich Fahrzeuge durch ihre energieeffiziente Fahrweise behindern können und es dadurch zu einem Mehrverbrauch kommen kann.

Mit Vehicle-to-Everything (V2X) können Fahrzeuge Daten untereinander austauschen. Diese Technik kann beispielsweise genutzt werden, damit Fahrzeuge gemeinsam Fahrmanöver abstimmen. Dies wird auch als kooperative Manöverabstimmung bezeichnet. Hiermit können Konfliktsituationen, bei denen sich Fahrzeuge gegenseitig behindern, gelöst werden. Die bisherigen Verfahren sind allerdings nicht für das energieeffiziente Fahren ausgelegt.

Darüber hinaus kann V2X zum Aufbau eines kollektiven Umfeldmodelles genutzt werden, das auch als kollektive Perzeption bezeichnet wird. Fahrzeuge teilen anderen Fahrzeuge mit, was sie mit Ihrer Sensorik wahrnehmen. Die übermittelten Objekte können dann in das eigene Umfeldmodell integriert werden. Dadurch können mehr Objekte wahrgenommen werden, als mit der eigenen Bordsensorik. In bereits durchgeführten Studien wurde gezeigt, dass hierdurch die Sicherheit gesteigert werden kann, allerdings ist die Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch bisher unklar.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode entwickelt, welche die drei Forschungsbereiche energieeffizientes Fahren, kooperative Manöverabstimmung und kollektive Perzeption verbindet. Das entwickelte Verfahren kann neben kooperativen Fahrzeugen auch Fahrzeuge ohne V2X in die Planung mit einbeziehen. Zudem ist die Methode fehlertolerant und kann z. B. kleine Abweichungen in der Lokalisierung tolerieren. Eine weitere positive Eigenschaft des Verfahrens ist der generische Ansatz, mit diesem können verschiedene Situationen kooperativ gelöst werden. Des Weiteren besitzt das Verfahren durch die strategische Trajektorie eine weite Vorausschau und kann damit z. B. lange Rollmanöver darstellen, die charakteristisch für das energieeffiziente Fahren von Lkw sind.

Um die Auswirkung der Methode auf den Kraftstoffverbrauch zu untersuchen, wurde das Konzept prototypisch umgesetzt und anschließend in der Simulation und im Realfahrzeug getestet. Hierfür wurden zwei Versuchsträger aufgebaut, die automatisiertes und kooperatives Fahren abbilden können. In der Simulation und im Realversuch auf einem Testgelände konnte gezeigt werden, dass durch die Methode in einzelnen Situationen, durch kooperatives Verhalten, Kraftstoff eingespart wird. Dabei konnte eine Verringerung des Kraftstoffverbrauches von bis zu 0,5 l in einer kooperativen Situation erreicht werden. Darüber hinaus haben die Realversuche gezeigt, dass das Verfahren echtzeitfähig ist und in Realfahrzeugen umgesetzt werden kann.

Um den Nutzen zu steigern, könnte das Konzept und die prototypische Implementierung weiter verbessert werden. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise das Einbeziehen von dynamischen Geschwindigkeitsbegrenzungen über V2X-Kommunikation.

Für den Einsatz im Speditionsalltag ist eine positive Kostenbilanz notwendig. Der Nutzen hängt maßgeblich von der Häufigkeit des Auftretens kooperativer Situationen ab. Eine Kostenbetrachtung mit verschiedenen Szenarien hat ergeben, dass in allen drei vorgestellten Szenarien ein monetärer Nutzen für Speditionsunternehmen zu erwarten ist. Für eine genauere Kostenbetrachtung bedarf es jedoch einer erweiterten Analyse der kooperativen Situationen im Speditionsalltag.

Des Weiteren könnte zukünftig eine abschließende Bewertung mit allen realen Faktoren durch einen Feldtest im Realverkehr erfolgen. Durch einen umfangreichen Test könnten zudem auch weitere Verbesserungen identifiziert werden.

# Abbildungsverzeichnis

|                 |                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1.1:  | Total Cost of Ownership von Speditionen im Fernverkehr [4].....                                                                                                                             | 1  |
| Abbildung 2.1:  | Einflussfaktoren Kraftstoffverbrauch.....                                                                                                                                                   | 3  |
| Abbildung 2.2:  | Übersicht über Lösungsmöglichkeiten für das energieeffiziente Fahren.....                                                                                                                   | 6  |
| Abbildung 2.3:  | Veranschaulichung von Puls and Glide anhand eines Geschwindigkeitsprofiles .....                                                                                                            | 7  |
| Abbildung 2.4:  | Veranschaulichung vom Grundprinzip der dynamischen Programmierung ...                                                                                                                       | 8  |
| Abbildung 2.5:  | Veranschaulichung des Verfahrens nach Huber [49] anhand einer Fahrt über eine Kuppe; Geschwindigkeitsprofile zeigen schematisch simulierte Ausrollmanöver zu verschiedenen Zeitpunkten..... | 9  |
| Abbildung 2.6:  | Übersicht Automatisierungsstufen nach SAE J3016 [53] und VDA [54].....                                                                                                                      | 10 |
| Abbildung 2.7:  | Beispielfahrten mit unterschiedlichen Automatisierungsstufen .....                                                                                                                          | 11 |
| Abbildung 2.8:  | Einteilung automatisiertes Fahren nach Sense-Plan-Act Paradigma.....                                                                                                                        | 11 |
| Abbildung 2.9:  | Beispiel für Bewegungsprädiktion mit unterschiedlichen Methoden nach [74] .....                                                                                                             | 13 |
| Abbildung 2.10: | Arten von Netzwerken für V2X. Links: Ad-hoc-Netzwerk; Rechts: Zellulares Netzwerk.....                                                                                                      | 16 |
| Abbildung 2.11: | Arten von Kooperation nach [107].....                                                                                                                                                       | 18 |
| Abbildung 2.12: | Grundprinzip kollektive Perzeption .....                                                                                                                                                    | 21 |
| Abbildung 2.13: | Grundprinzip Platooning .....                                                                                                                                                               | 22 |
| Abbildung 2.14: | Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit des Abstandes beim Fahren im Platoon [127] .....                                                                                                     | 22 |
| Abbildung 2.15: | Beispiele für Maneuvertemplates .....                                                                                                                                                       | 26 |
| Abbildung 2.16: | Abstimmungskonzept CMP .....                                                                                                                                                                | 27 |
| Abbildung 2.17: | Abstimmungskonzept STRP .....                                                                                                                                                               | 29 |
| Abbildung 2.18: | Abstimmungskonzept Plan- und Wunschtrajektorie .....                                                                                                                                        | 29 |
| Abbildung 2.19: | Beispielszenario für Uneindeutigkeit Plan- und Wunschtrajektorie nach [164] .....                                                                                                           | 31 |
| Abbildung 2.20: | Einordnung es Neuigkeitswerts der Dissertation in Themenfelder.....                                                                                                                         | 32 |
| Abbildung 3.1:  | Definition der MCM in der Protocol Buffers Notation .....                                                                                                                                   | 36 |

|                 |                                                                                                                                                                                  |    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 3.2:  | Schematische Darstellung der Reichweiten für die Manöverplanung anhand einer ebenen Strecke mit Geschwindigkeitsbegrenzung.....                                                  | 36 |
| Abbildung 3.3:  | Vereinfachte Darstellung der Komponenten für den kooperativen Funktionsalgorithmus .....                                                                                         | 37 |
| Abbildung 3.4:  | Veranschaulichung des Prinzips der kollektiven Perzeption und des globalen Umfeldmodelles.....                                                                                   | 37 |
| Abbildung 3.5:  | Übersicht über Komponenten des Planungsalgorithmus .....                                                                                                                         | 39 |
| Abbildung 3.6:  | Veranschaulichung der strategischen Trajektorienberechnung anhand von Geschwindigkeitsprofilen.....                                                                              | 40 |
| Abbildung 3.7:  | Vereinfachtes Ablaufdiagramm der strategischen Trajektorienberechnung.                                                                                                           | 41 |
| Abbildung 3.8:  | Veranschaulichung der Trajektorienberechnung anhand von angedeuteten Geschwindigkeitsprofilen.....                                                                               | 42 |
| Abbildung 4.1:  | Überblick über die Simulationsarchitektur .....                                                                                                                                  | 47 |
| Abbildung 4.2:  | Versuchsträger für das automatisierte und kooperative Fahren.....                                                                                                                | 48 |
| Abbildung 4.3:  | Übersicht über die relevanten Erweiterungen der E/E-Architektur der Realfahrzeuge .....                                                                                          | 49 |
| Abbildung 5.1:  | Übersicht über Szenarien für die simulative Evaluation der kollektiven Perzeption .....                                                                                          | 52 |
| Abbildung 5.2:  | Sensorkonfigurationen für die simulativen Untersuchungen der kollektiven Perzeption in der Draufsicht. Oben: Nur Frontsensoren; Unten: Rundumsicht .....                         | 54 |
| Abbildung 5.3:  | Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges ohne Sattelauflieger beim ersten Szenario, Stoppen vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption.....                                 | 55 |
| Abbildung 5.4:  | Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim ersten Szenario, Stoppen vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption .....                                                         | 55 |
| Abbildung 5.5:  | Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges ohne Sattelauflieger beim zweiten Szenario, Stoppen vor Stauanfang und abfahrendem Vorderfahrzeug, für die kollektive Perzeption..... | 56 |
| Abbildung 5.6:  | Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim zweiten Szenario, Stoppen vor Stauanfang und abfahrendem Vorderfahrzeug, für die kollektive Perzeption .....                         | 56 |
| Abbildung 5.7:  | Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim dritten Szenario, Einfädeln vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption .....                                                  | 57 |
| Abbildung 5.8:  | Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim dritten Szenario, Einfädeln vor Stauanfang, für die kollektive Perzeption .....                                                      | 57 |
| Abbildung 5.9:  | Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges ohne Sattelauflieger beim vierten Szenario, Einfädeln mit Konflikt, für die kollektive Perzeption .....                               | 58 |
| Abbildung 5.10: | Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim vierten Szenario, Einfädeln mit Konflikt, für die kollektive Perzeption .....                                                        | 58 |

---

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 5.11: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim fünften Szenario, Linksabbiegen mit Gegenverkehr, für die kollektive Perzeption.....              | 59 |
| Abbildung 5.12: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim fünften Szenario, Linksabbiegen mit Gegenverkehr, für die kollektive Perzeption.....                  | 59 |
| Abbildung 5.13: Höhenprofil für das Simulationsszenario für die kooperative Manöverabstimmung.....                                                                | 60 |
| Abbildung 5.14: Relativer durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit zwei Lkw.....         | 63 |
| Abbildung 5.15: Relative durchschnittliche Geschwindigkeit bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit zwei Lkw.....               | 63 |
| Abbildung 5.16: Relativer durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit drei Lkw.....         | 64 |
| Abbildung 5.17: Relative durchschnittliche Geschwindigkeit bei der simulativen Untersuchung für die kooperative Manöverabstimmung mit drei Lkw.....               | 65 |
| Abbildung 5.18: OpenStreetMap Karte des Testgeländes von MAN [198].....                                                                                           | 66 |
| Abbildung 5.19: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim ersten Realversuchsszenario, energieeffizientes Fahren.....                                       | 67 |
| Abbildung 5.20: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim ersten Realversuchsszenario, energieeffizientes Fahren.....                                           | 68 |
| Abbildung 5.21: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim zweiten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug.....                            | 69 |
| Abbildung 5.22: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim zweiten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug.....                                | 69 |
| Abbildung 5.23: Geschwindigkeitsverlauf des Ego-Fahrzeuges beim dritten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug mit kollektiver Perzeption..... | 70 |
| Abbildung 5.24: Kraftstoffverbrauch des Ego-Fahrzeuges beim dritten Realversuchsszenario, Bremsung auf ein stehendes Fahrzeug mit kollektiver Perzeption.....     | 71 |
| Abbildung 5.25: Durchschnittliche Distanz kooperativer Situationen auf Autobahnen bei fließendem Verkehr in Abhängigkeit des Beschleunigungsschwellwertes...      | 72 |





# Tabellenverzeichnis

|              |                                                                                                                                  |    |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2.1: | Übersicht der wichtigsten Sensoren für die Umfeldwahrnehmung.....                                                                | 12 |
| Tabelle 2.2: | Übersicht über Berechnungsmethoden für Trajektorien.....                                                                         | 14 |
| Tabelle 2.3: | Übersicht über V2X-Nachrichten.....                                                                                              | 17 |
| Tabelle 2.4: | Ergebnisse von Lkw-Platooningprojekten [124].....                                                                                | 24 |
| Tabelle 5.1: | Übersicht der Varianten für die simulativen Untersuchungen der kollektiven Perzeption.....                                       | 53 |
| Tabelle 5.2: | Übersicht der gewählten Parameter für den Manöverplaner für die simulativen Untersuchung der kooperativen Manöverabstimmung..... | 61 |
| Tabelle 5.3: | Übersicht der Varianten für die simulativen Untersuchung der kooperativen Manöverabstimmung.....                                 | 62 |
| Tabelle 5.4: | Zusammenfassung der Ergebnisse für die simulativen Untersuchungen der kooperativen Manöverabstimmung mit zwei Lkw.....           | 62 |
| Tabelle 5.5: | Zusammenfassung der Ergebnisse für die simulativen Untersuchungen der kooperativen Manöverabstimmung mit drei Lkw.....           | 64 |
| Tabelle 5.6: | Ergebnisse der Kostenbetrachtung für die kooperative Längsführung.....                                                           | 73 |



# Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt, *Verkehr: Verkehr aktuell*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-aktuell-pdf-2080110.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-aktuell-pdf-2080110.pdf?__blob=publicationFile) (Zugriff am: 17. August 2021).
- [2] INTRAPLAN Consult GmbH, *Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr: Mittelfristprognose Winter 2020/21*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsprognose/Mittelfristprognose\\_Winter\\_2020\\_2021.pdf;jsessionid=3B1554ADB4DE9DD5A4602B282069C602.live21324?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsprognose/Mittelfristprognose_Winter_2020_2021.pdf;jsessionid=3B1554ADB4DE9DD5A4602B282069C602.live21324?__blob=publicationFile&v=2) (Zugriff am: 17. August 2021).
- [3] S. F. Wiesbaden, *Kompakt-Lexikon Wirtschaft: 5.400 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden ; [mit 900 neuen Stichwörtern]*, 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [4] IVECO MAGIRUS AG, *Der neue STRALIS: TCO2 Champion*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iveco.com/austria/neufahrzeuge/pages/tco2-champion-stralis-truck.aspx.aspx> (Zugriff am: 3. März 2018).
- [5] T. Esch und U. Dahlhaus, „Antrieb“ in *ATZ / MTZ-Fachbuch, Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, E. Hoepke und S. Breuer, Hg., 8 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 403–540.
- [6] G. Nowak, J. Maluck, C. Stürmer und J. Pasemann, *The era of digitized trucking: Transforming the logistics value chain*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.strategyand.pwc.com/media/file/The-era-of-digitized-trucking.pdf> (Zugriff am: 23. Juni 2019).
- [7] H. Fuchs, F. Hofmann, H. Löhr und G. Schaaf, „Car-2-X“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., 3 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 525–540.
- [8] S. Tsugawa, S. Jeschke und S. E. Shladover, „A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings“, *IEEE Trans. Intell. Veh.*, Jg. 1, Nr. 1, S. 68–77, 2016, doi: 10.1109/TIV.2016.2577499.
- [9] B. McAuliffe, M. Lammert, X.-Y. Lu, S. Shladover, M.-D. Surcel und A. Kailas, „Influences on Energy Savings of Heavy Trucks Using Cooperative Adaptive Cruise Control“ in *WCX World Congress Experience*, 2018, doi: 10.4271/2018-01-1181.
- [10] Carl Bergenheim, Henrik Pettersson, Erik Coelingh, Cristofer Englund, Steven Shladover, Sadayuki Tsugawa, *Overview of Platooning Systems*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/256670304> (Zugriff am: 27. Juli 2017).

- [11] Hochschule Fresenius, Schenker Deutschland AG und MAN Truck & Bus SE, *EDDI Elektronische Deichsel - Digitale Innovation: Faktendatenblatt Pilotbetrieb Platooning*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.truck.man.eu/man/media/de/content\\_medien/doc/global\\_corporate\\_website\\_1/presse\\_und\\_medien\\_1/2019\\_5/190510\\_MTB\\_Platooning\\_EDDI\\_Factsheet.pdf](https://www.truck.man.eu/man/media/de/content_medien/doc/global_corporate_website_1/presse_und_medien_1/2019_5/190510_MTB_Platooning_EDDI_Factsheet.pdf) (Zugriff am: 4. November 2019).
- [12] *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/)
- [13] M. Zhou, H. Jin und W. Wang, „A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 49, S. 203–218, 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.09.008.
- [14] P. Fafoutellis, E. G. Mantouka und E. I. Vlahogianni, „Eco-Driving and Its Impacts on Fuel Efficiency: An Overview of Technologies and Data-Driven Methods“, *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 1, S. 1–17, 2021, doi: 10.3390/su13010226.
- [15] S. Breuer und S. Kopp, „Fahrmechanik“ in *ATZ / MTZ-Fachbuch, Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, E. Hoepke und S. Breuer, Hg., 8 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 37–122, doi: 10.1007/978-3-658-09537-6\_2.
- [16] A. Süßmann, „Kundenspezifische Bewertung von Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei schweren Nutzfahrzeugen“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [17] S. Breuer und T. Esch, „Getriebe“ in *ATZ / MTZ-Fachbuch, Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, E. Hoepke und S. Breuer, Hg., 8 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 541–581.
- [18] H. Naunheimer, B. Bertsche, J. Ryborz, W. Novak und P. Fietkau, *Fahrzeuggetriebe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [19] M. Ersoy, C. Elbers, D. Wegener, J. Lützwow, C. Bachmann und C. Schimmel, „Fahrndynamik“ in *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen – Fahrndynamik – Fahrverhalten– Komponenten – Elektronische Systeme – Fahrerassistenz – Autonomes Fahren– Perspektiven*, M. Ersoy und S. Gies, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 51–169, doi: 10.1007/978-3-658-15468-4\_2.
- [20] H. J. Walnum und M. Simonsen, „Does driving behavior matter? An analysis of fuel consumption data from heavy-duty trucks“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 36, S. 107–120, 2015, doi: 10.1016/j.trd.2015.02.016.
- [21] J. Zürn, „Der Neue Actros: Effizienz mit EuroVI“ in *lastauto omnibus Zukunftskongress*, Ludwigsburg, 2011.
- [22] A. Sciarretta und A. Vahidi, *Energy-Efficient Driving of Road Vehicles*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020.
- [23] *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/)
- [24] R. Krajewski, J. Bock, L. Kloeker und L. Lutz Eckstein, „The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems“ in *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, Hawaii, USA, 2018, S. 2118–2125.

- [25] J. C. Mertens, L. Jahn, J. Hauenstein, S. Kraus und F. Diermeyer, „Cooperative Truck Overtaking on Freeways“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 9/10/2020 - 9/12/2020, S. 1–15, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243145.
- [26] International Council on Clean Transportation, *Truck Eco-Driving Programs: Current Status in Latin America and International Best Practices*. [Online]. Verfügbar unter: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/eco-driving-latam-EN-apr2021.pdf> (Zugriff am: 13. September 2021).
- [27] Y. Huang, E. C. Ng, J. L. Zhou, N. C. Surawski, E. F. Chan und G. Hong, „Eco-driving technology for sustainable road transport: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 93, S. 596–609, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.030.
- [28] A. Zavalko, „Applying energy approach in the evaluation of eco-driving skill and eco-driving training of truck drivers“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 62, S. 672–684, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.01.023.
- [29] MAN Truck & Bus AG, *MAN EfficientCruise® - GPS-gesteuerter Tempomat | MAN Lkw*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.truck.man.eu/de/de/man-welt/technologie-und-kompetenz/effizienzsysteme/gps-gestuetzter-tempomat/GPS-gestuetzter-Tempomat.html> (Zugriff am: 23. August 2017).
- [30] Daimler AG, *Predictive Powertrain Control - Schlauer Tempomat spart Sprit*. Stuttgart, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/in-stance/ko/Predictive-Powertrain-Control---Schlauer-Tempomat-spart-Sprit.xhtml?oid=9917205>
- [31] P.-E. Nordström, *Spectacular fuel savings - Scania Opticruise with performance modes*. Södertälje, Sweden, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.scania.com/group/en/spectacular-fuel-savings-scania-opticruise-with-performance-modes/>
- [32] K. Pudenz, *Bei Steigung und Gefälle: I-See von Volvo Trucks hilft beim Kraftstoffsparen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/fahrerassistenz/bei-steigung-und-gefaelle-i-see-von-volvo-trucks-hilft-beim-kraf/6578176?searchResult=1.bei%20steigung%20gef%C3%A4lle%20i%20see%20von%20volvo%20trucks%20hilft&searchBackButton=true> (Zugriff am: 29. März 2018).
- [33] Renault Trucks, *Optivision*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.renault-trucks.de/aktuelles/optivision-k4z.html> (Zugriff am: 30. März 2018).
- [34] DAF Trucks N.V., *Predictive Cruise Control*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.daf-trucks.de/de-de/trucks/comfort-and-safety-systems-euro-6/predictive-cruise-control> (Zugriff am: 30. März 2018).
- [35] BMW AG, *Efficient Driving: Lower consumption and increase range with BMW EfficientDynamics*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmw.cc/en/topics/fascination-bmw/efficient-dynamics/energy-management.html> (Zugriff am: 5. August 2021).
- [36] Audi AG, *Driver assistance systems*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.audi-mediacenter.com/en/technology-lexicon-7180/driver-assistance-systems-7184> (Zugriff am: 5. August 2021).

- [37] E. Hellström, *Look-ahead control of heavy vehicles*. Linköping: Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2010. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.vehicular.isy.liu.se/en/Publications/PhD/10\\_PhD\\_1315\\_EH.pdf](http://www.vehicular.isy.liu.se/en/Publications/PhD/10_PhD_1315_EH.pdf)
- [38] A. Sciarretta, G. D. Nunzio und L. L. Ojeda, „Optimal Ecodriving Control: Energy-Efficient Driving of Road Vehicles as an Optimal Control Problem“, *IEEE Control Syst.*, Jg. 35, Nr. 5, S. 71–90, 2015, doi: 10.1109/MCS.2015.2449688.
- [39] B. Saerens, „Optimal Control Based Eco-Driving: Theoretical Approach and Practical Applications“. Dissertation, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, Belgium, 2012. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/243463882\\_Optimal\\_Control\\_Based\\_Eco-Driving](https://www.researchgate.net/publication/243463882_Optimal_Control_Based_Eco-Driving)
- [40] T. Radke, „Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien“. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2013.
- [41] K.-L. Haken, *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*, 2. Aufl. München: Hanser, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446428492>
- [42] M. Ayoubi *et al.*, „Fahrzeugphysik“ in *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seiffert, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 57–130, doi: 10.1007/978-3-658-09528-4\_3.
- [43] Scania Deutschland GmbH, *Scania gewinnt Europäischen Transport Preis für Nachhaltigkeit 2018*. Koblenz, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.scania.com>
- [44] Z. Khalik, G. P. Padilla, T. Romijn und M. Donkers, „Vehicle Energy Management with Ecodriving: A Sequential Quadratic Programming Approach with Dual Decomposition“ in *2018 Annual American Control Conference (ACC)*, Milwaukee, WI, 2018, S. 4002–4007, doi: 10.23919/ACC.2018.8431544.
- [45] K.-L. Bauer, „Echtzeit-Strategieplanung für vorausschauendes automatisiertes Fahren“. Dissertation, Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2019.
- [46] M. Roth *et al.*, „Porsche InnoDrive - An Innovative Approach for the Future of Driving“ in *20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2011*, Aachen, 2011, S. 1453–1467.
- [47] P. Fischer und P. Hofer, *Lexikon der Informatik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [48] J. Hromkovič, *Theoretische Informatik*, 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [49] M. Huber, „Verfahren zum Betreiben eines Fahrzeuges, insbesondere eines Nutzfahrzeuges, Steuer- und/oder Auswerteeinrichtung, Fahrerassistenzsystem für ein Nutzfahrzeug sowie Nutzfahrzeug,“ DE102008023135B4. Deutschland, Nov 12, 2009.
- [50] Z. Samaras *et al.*, „Quantification of the Effect of ITS on CO2 Emissions from Road Transportation“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 14, S. 3139–3148, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.254.

- [51] A. Alam, „Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning“. Dissertation, KTH School of Electrical Engineering, Automatic Control Lab, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2014.
- [52] S. A. Bagloee, M. Tavana, M. Asadi und T. Oliver, „Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies“, *J. Mod. Transport.*, Jg. 24, Nr. 4, S. 284–303, 2016, doi: 10.1007/s40534-016-0117-3.
- [53] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, SAE J3016, SAE On-Road Automated Driving (ORAD) committee, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_202104/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/)
- [54] Verband der Automobilindustrie e. V., *Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/vda/de/aktuelles/publikationen/publication/automatisierung> (Zugriff am: 22. Oktober 2021).
- [55] *Intelligent transport systems -- Adaptive Cruise Control systems -- Performance requirements and test procedures*, ISO 15622:2010, International Organization for Standardization, Apr. 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/50024.html>
- [56] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Selbstfahrende Autos – assistiert, automatisiert oder autonom?*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Presse/Mitteilungen/2021/06-2021.html](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Presse/Mitteilungen/2021/06-2021.html)
- [57] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Nutzerkommunikation: Was heißt eigentlich autonomes Fahren?* [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Fahrzeugtechnik/Fachthemen/f4-nutzerkommunikation.html;jsessionid=C8835D7A4842185CCAFE574057651E95.live21322?nn=1497062](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Fahrzeugtechnik/Fachthemen/f4-nutzerkommunikation.html;jsessionid=C8835D7A4842185CCAFE574057651E95.live21322?nn=1497062).
- [58] S. Pendleton *et al.*, „Perception, Planning, Control, and Coordination for Autonomous Vehicles“, *Machines*, Jg. 5, Nr. 1, S. 1–54, 2017, doi: 10.3390/machines5010006.
- [59] E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo und K. Takeda, „A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies“, *IEEE Access*, Jg. 8, S. 58443–58469, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983149.
- [60] Ankit Srivastava, „Sense-Plan-Act in Robotic Applications“, 2019.
- [61] S. Berger, „Development of Automated Driving Functions“, 19. Sep. 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ko-haf.de/ergebnisse/>. Zugriff am: 25. Oktober 2021.
- [62] K. Tong, Z. Ajanovic und G. Stettinger, „Overview of Tools Supporting Planning for Automated Driving“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rhodes, Greece, 2020, S. 1–8, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294512.
- [63] K. Reif, *Automobilelektronik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [64] M. Noll und P. Rapps, „Ultraschallsensorik“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., 3 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 243–258.

- [65] H. Winner, „Radarsensorik“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 259–316.
- [66] M. Punke, S. Menzel, B. Werthessen, N. Stache und M. Höpfl, „Kamera-Hardware“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 347–368.
- [67] C. Stiller, A. Bachmann und A. Geiger, „Maschinelles Sehen“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, 369–393.
- [68] H. Gotzig und G. Geduld, „LIDAR-Sensorik“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 317–334.
- [69] F. Rosique, P. J. Navarro, C. Fernández und A. Padilla, „A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 19, Nr. 3, S. 1–29, 2019, doi: 10.3390/s19030648.
- [70] A.D.C. GmbH, *SRR 20X /-2 /-2C /-21 Short Range Radar*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.continental-automotive.com/getattachment/e98ad36c-49d6-400f-8b99-32ff1ef4e45b/SRR20X-Datasheet-EN.pdf.pdf> (Zugriff am: 4. November 2020).
- [71] Robert Bosch GmbH, *Chassis Systems Control: Fourth generation long-range radar sensor (LRR4)*. [Online]. Verfügbar unter: [http://cds.bosch.us/themes/bosch\\_cross/amc\\_pdfs/LRR4\\_292000P0ZH\\_EN\\_low.pdf](http://cds.bosch.us/themes/bosch_cross/amc_pdfs/LRR4_292000P0ZH_EN_low.pdf) (Zugriff am: 28. März 2018).
- [72] M. B. Alatisse und G. P. Hancke, „A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods“, *IEEE Access*, Jg. 8, S. 39830–39846, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2975643.
- [73] L. Biagiotti und C. Melchiorri, *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [74] S. Lefèvre, D. Vasquez und C. Laugier, „A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles“, *Robomech J*, Jg. 1, Nr. 1, 2014, doi: 10.1186/s40648-014-0001-z.
- [75] R. Schubert, E. Richter und G. Wanielik, „Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking“ in *2008 IEEE 11th International Conference on Information Fusion*, Cologne, Germany, 2008, S. 730–735.
- [76] P. Karle, M. Geisslinger, J. Betz und M. Lienkamp, „Scenario Understanding and Motion Prediction for Autonomous Vehicles - Review and Comparison“, *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, S. 1–21, 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3156011.
- [77] D. Gonzalez, J. Perez, V. Milanés und F. Nashashibi, „A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles“, *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, Jg. 17, Nr. 4, S. 1135–1145, 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2498841.



- [78] B. Paden, M. Cap, S. Z. Yong, D. Yershov und E. Frazzoli, „A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles“, *IEEE Trans. Intell. Veh.*, Jg. 1, Nr. 1, S. 33–55, 2016, doi: 10.1109/TIV.2016.2578706.
- [79] L. Claussmann, M. Revilloud, D. Gruyer und S. Glaser, „A Review of Motion Planning for Highway Autonomous Driving“, *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, Jg. 21, Nr. 5, S. 1826–1848, 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2913998.
- [80] T. Stahl, A. Wischnewski, J. Betz und M. Lienkamp, „Multilayer Graph-Based Trajectory Planning for Race Vehicles in Dynamic Scenarios“ in *22st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019, S. 3149–3154.
- [81] M. Lee und Y. Ha, „Autonomous Driving Control Using End-to-End Deep Learning“ in *2020 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp)*, Busan, Korea (South), 2/19/2020 - 2/22/2020, S. 470–473, doi: 10.1109/BigComp48618.2020.00-23.
- [82] M. Wood *et al.*, *Safety First for Automated Driving*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/dokumente/innovation/sonstiges/safety-first-for-automated-driving.pdf> (Zugriff am: 19. Juli 2019).
- [83] A. Festag, „Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11p to 5G“, *Elektrotech. Inftech.*, Jg. 132, Nr. 7, S. 409–416, 2015, doi: 10.1007/s00502-015-0343-0.
- [84] R. Weber, J. Misener und V. Park, „C-V2X - A Communication Technology for Cooperative, Connected and Automated Mobility“ in *Mobile Communication - Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium*, Osnabrueck, Germany, 2019, S. 111–116.
- [85] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez und M. Sepulcre, „Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation With Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size“, *IEEE Access*, Jg. 8, S. 121526–121548, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007115.
- [86] G. Naik, B. Choudhury und J.-M. Park, „IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications“, *IEEE Access*, Jg. 7, S. 70169–70184, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
- [87] A. Festag, „Cooperative intelligent transport systems standards in europe“, *IEEE Commun. Mag.*, Jg. 52, Nr. 12, S. 166–172, 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6979970.
- [88] T. T. Almeida, L. de C. Gomes, F. M. Ortiz, J. G. R. Junior und L. H. M. K. Costa, „IEEE 802.11p Performance Evaluation: Simulations vs. Real Experiments“ in *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, Hawaii, USA, 2018, S. 3840–3845, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569676.
- [89] *Intelligent Transport Systems (ITS); Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz range; Access layer part*, ETSI TS 102 687, European Telecommunications Standards Institute, Apr. 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102600\\_102699/102687/01.02.01\\_60/ts\\_102687v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102687/01.02.01_60/ts_102687v010201p.pdf)
- [90] D. Eckhoff, N. Sofra und R. German, „A performance study of cooperative awareness in ETSI ITS G5 and IEEE WAVE“ in *2013 10th Annual Conference on Wireless On-demand*

- Network Systems and Services (WONS)*, Banff, AB, Canada, 2013, S. 196–200, doi: 10.1109/WONS.2013.6578347.
- [91] R. Molina-Masegosa und J. Gozalvez, „LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Jg. 12, Nr. 4, S. 30–39, 2017, doi: 10.1109/MVT.2017.2752798.
- [92] K. C. Dey, A. Rayamajhi, M. Chowdhury, P. Bhavsar und J. Martin, „Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network – Performance evaluation“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 68, S. 168–184, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.03.008.
- [93] K. Ganesan, J. Lohr, P. B. Mallick, A. Kunz und R. Kuchibhotla, „NR Sidelink Design Overview for Advanced V2X Service“, *IEEE Internet Things M.*, Jg. 3, Nr. 1, S. 26–30, 2020, doi: 10.1109/IOTM.0001.1900071.
- [94] W. Rudschies, *C2X im VW Golf 8: Erster ADAC Test*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/assistenzsysteme/c2x-im-vw-golf-8/> (Zugriff am: 5. Oktober 2020).
- [95] *Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Security header and certificate formats*, ETSI TS 103 097, European Telecommunications Standards Institute, Okt. 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/103000\\_103099/103097/01.04.01\\_60/ts\\_103097v010401p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103000_103099/103097/01.04.01_60/ts_103097v010401p.pdf)
- [96] M. Boban, A. Kousaridas, K. Manolakis, J. Eichinger und W. Xu, „Connected Roads of the Future: Use Cases, Requirements, and Design Considerations for Vehicle-to-Everything Communications“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Jg. 13, Nr. 3, S. 110–123, 2018, doi: 10.1109/MVT.2017.2777259.
- [97] J. M. Lozano Domínguez und T. J. Mateo Sanguino, „Review on V2X, I2X, and P2X Communications and Their Applications: A Comprehensive Analysis over Time“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 19, Nr. 12, 2019, doi: 10.3390/s19122756.
- [98] *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service*, ETSI EN 302 637-2, European Telecommunications Standards Institute, Nov. 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.etsi.org>
- [99] *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service*, ETSI EN 302 637-3, European Telecommunications Standards Institute, Nov. 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.etsi.org>
- [100] J. B. Kenney, „Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States“, *Proc. IEEE*, Jg. 99, Nr. 7, S. 1162–1182, 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2132790.
- [101] *Intelligent transport systems — Cooperative ITS — Using V2I and I2V communications for applications related to signalized intersections*, ISO/TS 19091:2019, International Organization for Standardization. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/73781.html>

- [102] *V2X Communications Message Set Dictionary*, SAE J2735, SAE V2X Core Technical Committee, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, Jul. 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.sae.org/standards/content/j2735\\_202007/](https://www.sae.org/standards/content/j2735_202007/)
- [103] J. Weingart, *Standardisation of SPaT and MAP*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.collaborative-team.eu/downloads/get/SWARCO%20standardisation%20activities%20in%20cooperative%20systems.pdf> (Zugriff am: 23. Dezember 2021).
- [104] European Telecommunications Standards Institute, *Work Programme: Details of 'DTS/ITS-00167' Work Item*. [Online]. Verfügbar unter: [https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report\\_WorkItem.asp?wki\\_id=46541](https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report_WorkItem.asp?wki_id=46541) (Zugriff am: 4. November 2020).
- [105] European Telecommunications Standards Institute, *Work Programme: Details of 'DTS/ITS-00184' Work Item*. [Online]. Verfügbar unter: [https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report\\_WorkItem.asp?WKI\\_ID=53496&curlItemNr=1&otalNrItems=1&optDisplay=10&qSORT=HIGHVERSION&qETSI\\_ALL=&Search-Page=TRUE&qETSI\\_NUMBER=103+561&qINCLUDE\\_SUB\\_TB=True&qINCLUDE\\_MOVED\\_ON=&qSTOP\\_FLG=&qKEYWORD\\_BOOLEAN=&qCLUSTER\\_BOOLEAN=&qFREQUENCIES\\_BOOLEAN=&qSTOPPING\\_OUTDATED=&butSimple=Search&includeNonActiveTB=FALSE&includeSubProjectCode=&qREPORT\\_TYPE=SUMMARY](https://portal.etsi.org/webapp/WorkProgram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=53496&curlItemNr=1&otalNrItems=1&optDisplay=10&qSORT=HIGHVERSION&qETSI_ALL=&Search-Page=TRUE&qETSI_NUMBER=103+561&qINCLUDE_SUB_TB=True&qINCLUDE_MOVED_ON=&qSTOP_FLG=&qKEYWORD_BOOLEAN=&qCLUSTER_BOOLEAN=&qFREQUENCIES_BOOLEAN=&qSTOPPING_OUTDATED=&butSimple=Search&includeNonActiveTB=FALSE&includeSubProjectCode=&qREPORT_TYPE=SUMMARY) (Zugriff am: 4. November 2020).
- [106] M. Düring und P. Pascheka, „Cooperative decentralized decision making for conflict resolution among autonomous agents“ in *2014 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Alberobello, Italy, 2014, S. 154–161, doi: 10.1109/INISTA.2014.6873612.
- [107] C. Burger, P. F. Orzechowski, O. S. Tas und C. Stiller, „Rating cooperative driving: A scheme for behavior assessment“ in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Yokohama, 2017, S. 1–6, doi: 10.1109/ITSC.2017.8317794.
- [108] J. Chang, *Summary of NHTSA Heavy-Vehicle Vehicle-to-Vehicle Safety Communications Research*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812300.pdf> (Zugriff am: 10. November 2020).
- [109] G. Howe, G. Xu, D. Hoover, D. Elsasser und F. Barickman, *Commercial Connected Vehicle Test Procedure Development and Test Results – Forward Collision Warning*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812298\\_connectedvehiclev2vreport.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812298_connectedvehiclev2vreport.pdf) (Zugriff am: 10. November 2020).
- [110] G. Howe, G. Xu, D. Hoover, D. Elsasser und F. Barickman, *Commercial Connected Vehicle Test Procedure Development and Test Results – Emergency Electronic Brake Light*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nhtsa.gov/document/commercial-connected-vehicle-test-procedure-development-and-test-results-emergency> (Zugriff am: 8. November 2021).
- [111] G. Howe, G. Xu, D. Hoover, D. Elsasser und F. Barickman, *Commercial Connected Vehicle Test Procedure Development and Test Results – Blind Spot Warning/Lane Change Warning*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812317\\_connectedveh.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/812317_connectedveh.pdf) (Zugriff am: 10. November 2020).

- [112] G. Howe, G. Xu, D. Hoover, D. Elsasser und F. Barickman, *Commercial Connected-Vehicle Test Procedure Development and Test Results – Intersection Movement Assist*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nhtsa.gov/document/commercial-connected-vehicle-test-procedure-development-and-test-results-intersection> (Zugriff am: 8. November 2021).
- [113] ADAC e. V., *Welche Hersteller bieten bereits C2X an?: ADAC-Umfrage 6/2020*. [Online]. Verfügbar unter: [https://assets.adac.de/image/upload/v1595919606/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/Umfrage\\_Hersteller\\_Car2X\\_dl45xm.pdf](https://assets.adac.de/image/upload/v1595919606/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/Umfrage_Hersteller_Car2X_dl45xm.pdf) (Zugriff am: 5. Oktober 2020).
- [114] P. Themann, R. Krajewski und L. Eckstein, „Discrete dynamic optimization in automated driving systems to improve energy efficiency in cooperative networks“ in *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Dearborn, Michigan, USA, 2014, S. 370–375, doi: 10.1109/IVS.2014.6856411.
- [115] Q. Jin, G. Wu, K. Boriboonsomsin und M. J. Barth, „Power-Based Optimal Longitudinal Control for a Connected Eco-Driving System“, *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, Jg. 17, Nr. 10, S. 2900–2910, 2016, doi: 10.1109/TITS.2016.2535439.
- [116] Z. Wei, P. Hao und M. J. Barth, „Developing an Adaptive Strategy for Connected Eco-Driving under Uncertain Traffic Condition“ in *30th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE IV 2019)*, Paris, France, 2019, S. 1809–1814.
- [117] H.-J. Günther, „Collective Perception in Vehicular Ad-hoc Networks“. Dissertation, Carl-Friedrich-Gauß-Fakultät, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2017.
- [118] F. A. Schiegg, I. Llatser, D. Bischoff und G. Volk, „Collective Perception: A Safety Perspective“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 21, Nr. 1, 2020, doi: 10.3390/s21010159.
- [119] *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS)*., ETSI TR 103 562, European Telecommunications Standards Institute, Dez. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.etsi.org>
- [120] L. Eiermann, F. Wirthmüller, K. Massow, G. Breuel und I. Radusch, „Driver Assistance for Safe and Comfortable On-Ramp Merging Using Environment Models Extended through V2X Communication and Role- Based Behavior Predictions“ in *2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP 2020)*, Cluj-Napoca, Romania, 2020.
- [121] C. Allig und G. Wanielik, „Dynamic Dissemination Method for Collective Perception“ in *22st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019, S. 3756–3762.
- [122] Q. Delooz und A. Festag, „Network Load Adaptation for Collective Perception in V2X Communications“ in *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Graz, Austria, 11/4/2019 - 11/8/2019, S. 1–6, doi: 10.1109/ICCVE45908.2019.8964988.
- [123] G. Thandavarayan, M. Sepulcre und J. Gozalvez, „Analysis of Message Generation Rules for Collective Perception in Connected and Automated Driving“ in *30th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE IV 2019)*, Paris, France, 2019, S. 132–137.

- [124] A. Fleury, M. Ackermann, F. Leonardi und A. de Souza Mendes, „Heavy-duty Truck Platooning: A Review“ in *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 12/03/2017, doi: 10.26678/ABCM.COBEM2017.COB17-0843.
- [125] S. Kopp und T. Frank, „Commercial Vehicles“ in *R / SAE International*, Bd. 430, *Aerodynamics of road vehicles*, T. Schütz, Hg., Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International, 2015, S. 711–794.
- [126] L. Humphreys, J. Batterson, D. Bevly und R. Schubert, *Lateral Offset and Its Potential Effects on Platooning*. [Online]. Verfügbar unter: [http://eng.auburn.edu/~dmbevly/FHWA\\_AU\\_TRUCK\\_EAR/Humphreys\\_SAE\\_2016\\_Presentation.pdf](http://eng.auburn.edu/~dmbevly/FHWA_AU_TRUCK_EAR/Humphreys_SAE_2016_Presentation.pdf) (Zugriff am: 28. September 2018).
- [127] Mährle, Christian, Wolff, Sebastian, S. Held und G. Wachtmeister, „Influence of the Cooling System and Road Topology on Heavy Duty Truck Platooning“ in *22st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019.
- [128] K. Reif, *Grundlagen Fahrzeug- und Motorentchnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [129] M. P. Lammert, A. Duran, J. Diez, K. Burton und A. Nicholson, „Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances, and Mass“, *SAE Int. J. Commer. Veh.*, Jg. 7, Nr. 2, S. 626–639, 2014, doi: 10.4271/2014-01-2438.
- [130] M. Saeednia und M. Menendez, „Analysis of Strategies for Truck Platooning: Hybrid Strategy“, *Transportation Research Record*, Jg. 2547, Nr. 1, S. 41–48, 2016, doi: 10.3141/2547-07.
- [131] F. Hubik, *Technik ineffizient: Vernetzte Trucks – Daimler beerdigt die Hoffnungstechnik Platooning*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/technik-ineffizient-vernetzte-trucks-daimler-beerdigt-die-hoffnungstechnik-platooning/23836178.html?ticket=ST-295281-JamOaToD4HsYKKbLCtO6-ap6> (Zugriff am: 8. Januar 2019).
- [132] A. Farag, A. Hussein, O. M. Shehata, F. García, H. H. Tadjine und E. Matthes, „Dynamics Platooning Model and Protocols for Self-Driving Vehicles“ in *30th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE IV 2019)*, Paris, France, 2019, S. 1717–1723.
- [133] T. Renzler, M. Stolz und D. Watzenig, „Decentralized Dynamic Platooning Architecture with V2V Communication Tested in Omnet++“ in *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Graz, Austria, 11/4/2019 - 11/8/2019, S. 1–6, doi: 10.1109/ICCVE45908.2019.8965224.
- [134] K.-Y. Liang, J. Mårtensson und K. H. Johansson, „When is it Fuel Efficient for a Heavy Duty Vehicle to Catch Up With a Platoon?“, *7th IFAC Symposium on Advances in Automotive*, Tokyo, Japan, September 4-7, 2013, 2013.
- [135] K.-Y. Liang, J. Mårtensson und K. H. Johansson, „Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation for Fuel Efficiency“, *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, Jg. 17, Nr. 4, S. 1051–1061, 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2492243.

- [136] Z. Kokkinogenis, M. Teixeira, P. M. d'Orey und R. J. F. Rossetti, „Tactical Level Decision-Making for Platoons of Autonomous Vehicles Using Auction Mechanisms“ in *30th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE IV 2019)*, Paris, France, 2019, S. 1450–1456.
- [137] A. Brandt, G. Jentzsch und A. Pradka, *EDDI Elektronische Deichsel - Digitale Innovation: Kurzbericht mit Ergebnispräsentation*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.truck.man.eu/man/media/de/content\\_medien/doc/global\\_corporate\\_website\\_1/presse\\_und\\_medien\\_1/2019\\_5/190510\\_MTB\\_Platooning\\_EDDI\\_Zusammenfassung.pdf](https://www.truck.man.eu/man/media/de/content_medien/doc/global_corporate_website_1/presse_und_medien_1/2019_5/190510_MTB_Platooning_EDDI_Zusammenfassung.pdf) (Zugriff am: 4. November 2019).
- [138] O. Bartels und U. Ellmers, „EuroNCAP Aktive Sicherheit - Statusreport der Testverfahren: PNCAP - Primary New Car Assessment Programme“ in *fahrwerk.tech*, Garching near Munich, 2005.
- [139] S. Kallenbach, „Truck Platooning – A Pragmatical Approach“ in *Proceedings, Fahrerassistenzsysteme 2018*, T. Bertram, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 132–157, doi: 10.1007/978-3-658-23751-6\_14.
- [140] S. Ulbrich, S. Grossjohann, C. Appelt, K. Homeier, J. Rieken und M. Maurer, „Structuring Cooperative Behavior Planning Implementations for Automated Driving“ in *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems - (ITSC 2015)*, Gran Canaria, Spain, 2015, S. 2159–2165, doi: 10.1109/ITSC.2015.349.
- [141] N. Hyldmar, Y. He und A. Prorok, „A Fleet of Miniature Cars for Experiments in Cooperative Driving“ in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, 2019, S. 3238–3244, doi: 10.1109/ICRA.2019.8794445.
- [142] S. Chuprov, I. Viksnin und I. Kim, „Urban Intersection Management with Connected Infrastructure Objects and Autonomous Vehicles“ in *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Graz, Austria, 11/4/2019 - 11/8/2019, S. 1–6, doi: 10.1109/ICCVE45908.2019.8964917.
- [143] M. Khayatian, R. Dedinsky, S. Choudhary, M. Mehrabian und A. Shrivastava, „R 2 IM- Robust and Resilient Intersection Management of Connected Autonomous Vehicles“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rhodes, Greece, 2020, S. 1–6, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294437.
- [144] B. Koopmann, S. Puch, G. Ehmen und M. Fränzle, „Cooperative Maneuvers of Highly Automated Vehicles at Urban Intersections: A Game-theoretic Approach“ in *6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Prague, Czech Republic, 5/2/2020 - 5/4/2020, S. 15–26, doi: 10.5220/0009351500150026.
- [145] C. Philippe, L. Adouane, A. Tsourdos, H.-S. Shin und B. Thuilot, „Probability Collectives Algorithm applied to Decentralized Intersection Coordination for Connected Autonomous Vehicles“ in *30th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE IV 2019)*, Paris, France, 2019, S. 1671–1677.
- [146] X. Zhao, J. Wang, G. Yin und K. Zhang, „Cooperative Driving for Connected and Automated Vehicles at Non-signalized Intersection based on Model Predictive Control“ in *22st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019, S. 2121–2126.
- [147] S. Akti, I. G. Erdagi, M. A. Silgu und H. B. Celikoglu, „A Game-Theoretical Approach for Lane-Changing Maneuvers on Freeway Merging Segments“ in *2020 IEEE 23rd*

- International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rhodes, Greece, 2020, S. 3342–3347, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294458.
- [148] C. Burger, T. Schneider und M. Lauer, „Interaction aware cooperative trajectory planning for lane change maneuvers in dense traffic“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rhodes, Greece, 2020, S. 3011–3018, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294638.
- [149] S. A. Hussain, B. Shahian Jahromi und S. Cetin, „Cooperative Highway Lane Merge of Connected Vehicles Using Nonlinear Model Predictive Optimal Controller“, *Vehicles*, Jg. 2, Nr. 2, S. 249–266, 2020, doi: 10.3390/vehicles2020014.
- [150] B. Li, Y. Zhang, Y. Zhang und N. Jia, „Cooperative Lane Change Motion Planning of Connected and Automated Vehicles: A Stepwise Computational Framework“ in *29th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IEEE IV 2018)*, Changshu, Suzhou, China, 2018, S. 334–338.
- [151] W. Xiao, C. G. Cassandras und C. Belta, „Decentralized Optimal Control in Multi-lane Merging for Connected and Automated Vehicles“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rhodes, Greece, 2020, S. 2320–2325, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294469.
- [152] A. Okoso, K. Otaki und T. Nishi, „Multi-Agent Path Finding with Priority for Cooperative Automated Valet Parking“ in *22st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019, S. 2135–2140.
- [153] C. Knies, L. Hermansdorfer und F. Diermeyer, „Cooperative Maneuver Planning for Highway Traffic Scenarios based on Monte-Carlo Tree Search“ in *AAET Automatisiertes und Vernetztes Fahren: Beiträge zum gleichnamigen 20. Braunschweiger Symposium am 6. und 7. Februar 2019, Stadthalle, Braunschweig*, 1 Aufl., Braunschweig: ITS mobility e.V., 2019, S. 10–25.
- [154] S. Manzinger, M. Leibold und M. Althoff, „Driving strategy selection for cooperative vehicles using maneuver templates“ in *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Los Angeles, CA, USA, 2017, S. 647–654, doi: 10.1109/IVS.2017.7995791.
- [155] O. Sawade, M. Schulze und I. Radusch, „Robust Communication for Cooperative Driving Maneuvers“, *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, Jg. 10, Nr. 3, S. 159–169, 2018, doi: 10.1109/MITS.2018.2842241.
- [156] O. Sawade, I. Radusch und M. Hauswirth, „A Fault-Tolerant Protocol to Enable Distributed State Machines Using IEEE802.11p“ in *2020 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, New York, NY, USA, 2020, S. 1–8, doi: 10.1109/VNC51378.2020.9318418.
- [157] L. Eiermann, O. Sawade, S. Bunk, G. Breuel und I. Radusch, „Cooperative automated lane merge with role-based negotiation“ in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Las Vegas, NV, USA, 2020.
- [158] S. Manzinger und M. Althoff, „Negotiation of drivable areas of cooperative vehicles for conflict resolution“ in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Yokohama, 2017, S. 1–8, doi: 10.1109/ITSC.2017.8317765.

- [159] D. Heß, R. Lattarulo, Pérez, J. Schindler, T. Hesse und F. Köster, „Fast Maneuver Planning for Cooperative Automated Vehicles“ in *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, Hawaii, USA, 2018, S. 1625–1632.
- [160] D. Heß, R. Lattarulo, J. Perez, T. Hesse und F. Köster, „Negotiation of Cooperative Maneuvers for Automated Vehicles: Experimental Results“ in *22st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Auckland, New Zealand, 2019, S. 1545–1551.
- [161] B. Lehmann, H.-J. Gunther und L. Wolf, „A Generic Approach towards Maneuver Coordination for Automated Vehicles“ in *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, Hawaii, USA, 2018, S. 3333–3339, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569442.
- [162] I. Llatser, T. Michalke, M. Dolgov, F. Wildschuette und H. Fuchs, „Cooperative Automated Driving Use Cases for 5G V2X Communication“, *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF'19)*, S. 120–125, 2019.
- [163] W. Xu, A. Willecke, M. Wegner, L. Wolf und R. Kapitza, „Autonomous Maneuver Coordination Via Vehicular Communication“ in *2019 49th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W)*, Portland, OR, USA, 2019, S. 70–77, doi: 10.1109/DSN-W.2019.00022.
- [164] B. Lehmann und L. Wolf, „Safety Analysis of a Maneuver Coordination Protocol“ in *2020 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, New York, NY, USA, 2020, S. 1–8, doi: 10.1109/VNC51378.2020.9318359.
- [165] J. Hauenstein und F. Diermeyer, „Cooperative Longitudinal Control for Commercial Vehicles“ in *9. Tagung Automatisiertes Fahren*, Munich, 2019.
- [166] J. Hauenstein, J. C. Mertens, F. Diermeyer und A. Zimmermann, „Cooperative- and Eco-Driving: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks on Hills“, *Electronics*, Jg. 10, Nr. 19, S. 2373, 2021, doi: 10.3390/electronics10192373.
- [167] J. Hauenstein, J. Gromer, J. C. Mertens, F. Diermeyer und S. Kraus, „Collective Perception: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks“ in *VEHITS 2021 - 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Onlinestreaming, 2021, S. 350–361, doi: 10.5220/0010405503500361.
- [168] L. Dahlbock *et al.*, *IMAGinE D3.1 Spezifikation und Implementierung kooperatives Umfeldmodell*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.imagine-online.de/ergebnisse-publikationen> (Zugriff am: 7. Oktober 2021).
- [169] H. Ostermeier, „Entwicklung und Evaluation einer trajektorienbasierten kooperativen Manöverabstimmung für Nutzfahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [170] Google LLC, *Protocol Buffers*. [Online]. Verfügbar unter: <https://developers.google.com/protocol-buffers> (Zugriff am: 5. August 2021).
- [171] H. Erlenkötter, *C++: Objektorientiertes Programmieren von Anfang an*, 30. Aufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt-Taschenbuch-Verl., 2000.
- [172] *Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary*, ETSI TS 102 894-2, European Telecommunications Standards Institute, Sep. 2014. [Online]. Verfügbar unter:



[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/102800\\_102899/10289402/01.02.01\\_60/ts\\_10289402v010201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10289402/01.02.01_60/ts_10289402v010201p.pdf)

- [173] M. Sharma, *C++ Program for Polynomial Fit (Least Squares)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bragitoff.com/2015/09/c-program-for-polynomial-fit-least-squares/> (Zugriff am: 30. Juli 2021).
- [174] J. Langenberg, „Auslegung, Simulation und Bewertung von Verkehrsassistenzsystemen durch die Kopplung mit Verkehrsflussmodellen“. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs\\_mods\\_00062307](https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00062307)
- [175] M. Ersoy, C. Elbers und B. Schick, „Fahrwerkentwicklung“ in *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen – Fahrdynamik – Fahrverhalten – Komponenten – Elektronische Systeme – Fahrerassistenz – Autonomes Fahren – Perspektiven*, M. Ersoy und S. Gies, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 245–300.
- [176] H. Amelunxen, „Fahrdynamikmodelle für Echtzeitsimulationen im komfortrelevanten Frequenzbereich“. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://digital.ub.uni-paderborn.de/hsx/content/titleinfo/954350>
- [177] Open Source Robotics Foundation, Inc., *ROS Documentation*. [Online]. Verfügbar unter: <http://wiki.ros.org/> (Zugriff am: 21. Januar 2022).
- [178] IPG Automotive GmbH, *TruckMaker*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ipg-automotive.com/de/produkte-loesungen/software/truckmaker/> (Zugriff am: 21. Januar 2022).
- [179] N. An und F. Specka, „Entwicklung und Test kooperativer Fahrfunktionen in virtueller Umgebung“ in *AAET Automatisiertes und Vernetztes Fahren: Beiträge zum gleichnamigen 20. Braunschweiger Symposium am 6. und 7. Februar 2019, Stadthalle, Braunschweig*, 1 Aufl., Braunschweig: ITS mobility e.V, 2019.
- [180] N. Ahn und F. Specka, „Development and Test of Cooperative Driving Functions in a Virtual Environment“ in *38th FISITA World Congress, Virtual Congress/Prague, Czech Republic*, 2021.
- [181] IPG Automotive GmbH, *CarMaker 9: Improved versatility, efficiency and scalability*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ipg-automotive.com/products-services/simulation-software/carmaker-release-90/> (Zugriff am: 30. Juli 2021).
- [182] Canonical Ltd., *Ubuntu 16.04.6 LTS (Xenial Xerus)*. [Online]. Verfügbar unter: <http://releases.ubuntu.com/16.04/> (Zugriff am: 15. Juli 2019).
- [183] Open Source Robotics Foundation, Inc., *ROS Kinetic Kame*. [Online]. Verfügbar unter: <http://wiki.ros.org/kinetic> (Zugriff am: 15. Juli 2019).
- [184] M. J. Fries, „Maschinelle Optimierung der Antriebsauslegung zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten im Nutzfahrzeug“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [185] S. Wolff, „Mehrzieloptimierung von schweren Nutzfahrzeuggetrieben zur Verbesserung der Transporteffizienz und der TCO“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2016.

- [186] J. C. Mertens, D. Erb, S. Kraus und F. Diermeyer, „ITS-G5 Antenna Position on Trucks“ in *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Las Vegas, NV, USA, 2020.
- [187] MTS Schrode AG, *Präzise GPS-Messungen mit Hilfe von DGPS und RTK*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.magicmaps.de/gnss-wissen/praezise-gps-messungen-mit-hilfe-von-dgps-und-rtk/?L=0> (Zugriff am: 8. März 2022).
- [188] InfoTip Service GmbH, *Globale Navigations-satellitensysteme - GNSS: Fehlerquellen, Erweiterungen und Verbesserungen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://kompendium.infotip.de/id-4-fehlerquellen-erweiterungen-und-verbesserungen.html> (Zugriff am: 8. März 2022).
- [189] European Space Agency, *What is Galileo?* [Online]. Verfügbar unter: [https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What\\_is\\_Galileo](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo) (Zugriff am: 4. Februar 2022).
- [190] K. Gade, „The Seven Ways to Find Heading“, *J. Navigation*, Jg. 69, Nr. 5, S. 955–970, 2016, doi: 10.1017/S0373463316000096.
- [191] N. Steinhardt und S. Leinen, „Datenfusion für die präzise Lokalisierung“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, Hg., 3 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 481–511.
- [192] J. Gromer, „Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Integration kollektiver Umfeldinformationen in die Manöverplanung“. Masterthesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [193] MathWorks, Inc., *Help Center Simulink: R2018a*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/simulink/release-notes-R2018a.html> (Zugriff am: 1. Februar 2022).
- [194] dSPACE GmbH, *Information about Release 2018-B*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dspace.com/de/gmb/home/support/supvers/rlsinfo/rlscontent2018b.cfm> (Zugriff am: 1. Februar 2022).
- [195] M. Baek, D. Jeong, D. Choi und S. Lee, „Vehicle Trajectory Prediction and Collision Warning via Fusion of Multisensors and Wireless Vehicular Communications“ (eng), *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 20, Nr. 1, 2020, doi: 10.3390/s20010288.
- [196] D. Ellinghaus und J. Steinbrecher, *Lkw im Straßenverkehr: Eine Untersuchung über die Beziehungen zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bau.uni-siegen.de/subdomains/verkehrsplanung/publikationen/uniroyal/buch27.pdf> (Zugriff am: 6. August 2021).
- [197] T. Koy und P. Spacek, *Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen*. [Online]. Verfügbar unter: [http://archiv.ivt.ethz.ch/iv/research/v\\_in\\_steigungen/vss1998079.pdf](http://archiv.ivt.ethz.ch/iv/research/v_in_steigungen/vss1998079.pdf) (Zugriff am: 6. August 2021).
- [198] OpenStreetMap Foundation, *OpenStreetMap*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.openstreetmap.org/#map=17/48.21962/11.48639> (Zugriff am: 24. September 2021).
- [199] Office of the Assistant Secretary for Research and Technology, United States Department of Transportation, *Questions About Connected Vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.its.dot.gov/cv\\_basics/cv\\_basics\\_20qs.htm](https://www.its.dot.gov/cv_basics/cv_basics_20qs.htm) (Zugriff am: 21. September 2020).

- [200] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp, „An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles“, *WEVJ*, Jg. 12, Nr. 1, S. 1–29, 2021, doi: 10.3390/wevj12010021.
- [201] P. Wittenbrink, *Transportmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [202] J. Burgdorf, „Der Löwe brüllt wieder: Supertest MAN TGX 18.510 GM“, *Trucker*, Nr. 7, S. 20–27, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.truck.man.eu/man/media/content\\_medien/doc/business\\_websites\\_germany\\_1/neue\\_man\\_truck\\_generation\\_test\\_1/TR\\_7\\_2020\\_Der\\_Loewe\\_bruellt\\_wieder.pdf](https://www.truck.man.eu/man/media/content_medien/doc/business_websites_germany_1/neue_man_truck_generation_test_1/TR_7_2020_Der_Loewe_bruellt_wieder.pdf)
- [203] L. Weishäupl, „Entwicklung eines Abrechnungskonzeptes für kooperatives Fahren für Nutzfahrzeuge“. Bachelorthesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [204] C. A. Navarro, N. Hitschfeld-Kahler und L. Mateu, „A Survey on Parallel Computing and its Applications in Data-Parallel Problems Using GPU Architectures“, *Commun. comput. phys.*, Jg. 15, Nr. 2, S. 285–329, 2014, doi: 10.4208/cicp.110113.010813a.



# Vorveröffentlichungsliste

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

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

- [166] J. Hauenstein, J. C. Mertens, F. Diermeyer und A. Zimmermann, „Cooperative- and Eco-Driving: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks on Hills“, *Electronics*, Jg. 10, Nr. 19, S. 2373, 2021, doi: 10.3390/electronics10192373.

## **Konferenzen, Magazine, etc.; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)**

- [25] J. C. Mertens, L. Jahn, J. Hauenstein, S. Kraus und F. Diermeyer, „Cooperative Truck Overtaking on Freeways“ in 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte-Carlo, Monaco, 9/10/2020 - 9/12/2020, S. 1–15, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243145.
- [167] J. Hauenstein, J. Gromer, J. C. Mertens, F. Diermeyer und S. Kraus, „Collective Perception: Impact on Fuel Consumption for Heavy Trucks“ in VEHITS 2021 - 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, Onlinestreaming, 2021, S. 350–361, doi: 10.5220/0010405503500361.

## **Patente**

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

- [165] J. Hauenstein und F. Diermeyer, „Cooperative Longitudinal Control for Commercial Vehicles“ in 9. Tagung Automatisiertes Fahren, Munich, 2019.
- [168] L. Dahlbock, M. Dolgov, S. Gläser, T. Grotendorst, H.-J. Günther, J. Hartog, J. Hauenstein, D. Heußner, B. Lehmann, B. Schäufele, H. Scholz, S. Strunck, F. Wildschütte, *IMAGinE D3.1 Spezifikation und Implementierung kooperatives Umfeldmodell*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.imagine-online.de/ergebnisse-publikationen> (Zugriff am: 7. Oktober 2021).

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

J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer und A. Zimmermann, “Strategic Coordination of Cooperative Truck Overtaking Maneuvers,” in VEHITS 2021 - 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, Onlinestreaming, 2021, S. 513–520, doi: 10.5220/0010447805130520.

J. C. Mertens, J. Hauenstein, F. Diermeyer und S. Kraus, “Reduced Safety Distance during Cooperative Truck Overtaking,” in 2020 IEEE Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte-Carlo, Monaco, 9/10/2020 - 9/12/2020, S. 1–7, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242946.

## **Dissertationsrelevante Open-Source Software**

### **Betreute Studienarbeiten**

- [169] H. Ostermeier, „Entwicklung und Evaluation einer trajektorienbasierten kooperativen Manöverabstimmung für Nutzfahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [192] J. Gromer, „Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Integration kollektiver Umfeldinformationen in die Manöverplanung“. Masterthesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [203] L. Weishäupl, „Entwicklung eines Abrechnungskonzeptes für kooperatives Fahren für Nutzfahrzeuge“. Bachelorthesis, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.