



# Verbundprojekt MEC-View

Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren

<http://www.mec-view.de/>

## BMW-Förderprogramm:

Hoch- und vollautomatisiertes Fahren für anspruchsvolle Fahrsituationen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Projektlaufzeit 01.12.2017 – 31.05.2020**

# Individueller Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:

**Universität Duisburg-Essen**

Förderkennzeichen (Aktenzeichen):

**19A16010H**

## Individueller Schlussbericht

---

### Autoren (A-Z)

#### Nachname, Vorname

Kerner, Boris

Kumm, Maximilian

Schreckenberg, Michael

Wegerle, Dominik

#### Partner, Organisation

Universität Duisburg-Essen, Physik von Transport und Verkehr

Universität Duisburg-Essen, Physik von Transport und Verkehr

Universität Duisburg-Essen, Physik von Transport und Verkehr

Universität Duisburg-Essen, Physik von Transport und Verkehr

### Ergebnisverbreitung

- Öffentlich
- BMWi
- Projektträger
- Projektpartner

**Dateiname: MEC-View-Schlussbericht\_UDE\_FINAL.docx**

**Seitenzahl: 107**

# Inhalt

1. Aufgabenstellung .....	5
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	7
3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	8
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
6. Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses.....	9
6.1 AP 1 Gesamtsystem: .....	9
6.1.1 UAP 1.1 Requirements Engineering .....	9
6.1.2 UAP 1.2 Fortschrittverfolgung .....	9
6.1.3 UAP 1.3 Pilotanlage Ulm .....	9
6.1.4 UAP 1.4 Projektmanagement, Dokumentation, und Ergebnisverbreitung .....	9
6.2 AP 2 Digitale Karte, Dynamische Streckenfreigabe und Verhaltensanalyse: .....	10
6.2.1 UAP 2.3 Untersuchung mikroskopischer Daten: .....	10
6.2.2 UAP 2.4 Dynamische Streckenfreigabe.....	14
6.2.3 UAP 2.5 Lernende Fahrzeuge .....	42
6.3 AP 6: Automatisiertes Fahrzeug .....	81
6.3.1 UAP 6.5 Dynamische Objektprädiktion.....	81
7. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	94
8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	94

## Individueller Schlussbericht

---

9. Voraussichtlicher Nutzen .....	94
10. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	94
11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	95
Monographien: .....	95
Abschlussarbeiten .....	95
Beiträge in Fachzeitschriften und Konferenzbänden:.....	95
Abbildungsverzeichnis: .....	97
Literaturverzeichnis:.....	106
Glossar .....	107

### 1. Aufgabenstellung

Die Universität Duisburg-Essen (UDE) setzte ihre Schwerpunkte im Projekt MEC-View in die Untersuchung mikroskopischer Verkehrsdaten, die dynamische Streckenfreigabe und „lernenden“ Fahrzeugen (AP 2). Hier entwickelte die UDE mathematische Modelle und Simulationen der automatisierten Fahrzeuge an verschiedenen Engstellen. Zusätzlich wird die Interaktion von automatisierten und nicht automatisierten Fahrzeugen mittels stochastischer mikroskopischer Modelle untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt der UDE ist die Entwicklung von optimierten Regelungsstrategien für „lernende Fahrzeuge“. Auch wurde untersucht, wie die Prädiktion dynamischer Objekte für einen Zeitraum größer 3 Sekunden möglich ist (AP 6).

In AP 2 arbeitete die UDE an der Entwicklung der Theorien, mikroskopischer stochastischer Modelle und Durchführung der mikroskopischen stochastischen Simulationen zur Untersuchungen der mikroskopischen Daten für die dynamische Streckenfreigabe (UAP 2.4) und Lernende Fahrzeuge (UAP 2.5).

Entsprechende Aufgabenstellungen des UAP 2.4 Dynamische Streckenfreigabe:

- Durch Simulationen sollen Voraussetzungen geschaffen werden, um die Spezifikation und Definition der Charakteristika der Engstellen (z.B. lieengebliebenes Fahrzeug, Baustellen, Fußgänger/Öl auf Fahrbahn, usw.) zu erstellen. Die Engstellen sollen hinsichtlich ihrer Häufigkeit und ihres realen Einflusses auf die Verkehrslage anhand historischer Flottendaten und Verkehrslagemeldungen spezifiziert werden.
- Es sollen mikroskopische Modelle der Bewegung der Fahrzeuge an den Engstellen weiterentwickelt werden. Für die Simulation der Engstellen werden die Modelle der mikroskopischen Verkehrssimulation angepasst und die Engstellen der Spezifikation folgend implementiert.
- Um eine dynamische Streckenfreigabe zu simulieren, soll ein Model des gemischten Verkehrs, das sowohl aus automatisierten Fahrzeugen und auch nicht automatisierten Fahrzeugen besteht, entwickelt werden. Dabei wird ein klassisches Model eines automatisierten Fahrzeugs verwendet. Die Fahrzeugmodellierung in der mikroskopischen stochastischen Simulation wird auf automatisierte Fahrzeuge erweitert, um die Simulation des Mischverkehrs in den Engstellen zu ermöglichen.
- Durch Simulationen soll eine Parameterstudie der Durchdringungsrate der automatischen Fahrzeuge durchgeführt werden. Die Rate der automatischen Fahrzeuge soll in Simulationen variiert werden, um der Einfluss auf die Verkehrslage bei den definierten Engstellen untersuchen zu können.

Entsprechende Aufgabenstellungen des UAP 2.5 Lernende Fahrzeuge:

- Entwicklung mikroskopischer stochastischer Modelle der Fahrstrategien menschlicher Fahrer in dynamischen Engstellen und anderen anspruchsvollen Fahrsituationen, z.B. Auffahrt auf vorfahrtsberechtigte Straße.
- Es soll eine Spezifikation der charakteristischen Eigenschaften „lernender“ automatisierter Fahrzeuge in anspruchsvollen Fahrsituationen ausgearbeitet werden. Wissenstransfer aus mikroskopischen Datenuntersuchungen soll zur Ableitung charakteristischer Eigenschaften aus mikroskopischen Verkehrsdaten eingesetzt werden.
- Es sollen theoretische Lösungen für optimierte Regelungsstrategie für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge entwickelt werden. Diese Regelungsstrategien dienen zur Optimierung einer autonomen Fahrt im urbanen Umfeld hinsichtlich der Sicherheit und des Komforts.

## Individueller Schlussbericht

---

- Entwicklung eines Modells des Mischverkehrs mit lernenden, automatisierten Fahrzeugen. Durch die sukzessive flächendeckende Einführung von lernenden automatisierten Fahrzeugen in den Straßenverkehr, gibt es zwei Arten von Fahrzeugen im Verkehr: lernende automatisierte Fahrzeuge und nicht automatisierte Fahrzeuge. Es sollen mikroskopische Modelle und eine Spezifikation der Interaktion von lernenden automatisierten Fahrzeugen und nicht automatisierte Fahrzeugen in anspruchsvollen Fahrsituationen entwickelt werden.
- Simulation des gemischten Verkehrs, bestehend aus automatisierten und lernenden sowie aus klassischen Fahrzeugen, in anspruchsvollen Fahrsituationen.

In AP 6 untersuchte die UDE wie die Prädiktion dynamischer Objekte für den Versuchsträger möglich (UAP 6.5) ist.

Entsprechende Aufgabenstellungen des UAP 6.5 Prädiktion dynamischer Objekte:

- Prädiktion dynamischer Verkehrsteilnehmer auf Basis mikroskopisch, stochastischer Methoden: Entwicklung einer mikroskopischen Systemumgebung und Modellierung der langfristigen ( $> 3$  s) Prädiktion von Objekten in einer Umgebung des automatischen Fahrzeugs basierend auf mikroskopischen stochastischen Objektmodellierung.
- Entwicklung der Modelle der anspruchsvollen Situationen in einer Stadt (Kreuzung, Einfahrt, Kreisverkehr): Es wird anspruchsvollen Situationen in einer Stadt ausgewählt, die die höchste Relevanz haben. Insbesondere sollen diese Situationen der ausgewählten Kreuzungen und/oder Einfahrt und/oder Kreisverkehr in Stadt Ulm entsprechen, die als Teststrecken für die Evaluierung der entwickelten Ansätze im Projekt dienen werden.
- Entwicklung stochastisch, mikroskopischer Modelle: Entwicklung stochastischen mikroskopischen Modelle der Bewegung der Verkehrsteilnehmer (nichtautomatisch fahrende Fahrzeuge) in einer Umgebung des automatischen Fahrzeugs. Es wird ein stochastisches Model der Bewegung der nicht automatisch fahrenden Fahrzeuge in einer Umgebung des automatischen Fahrzeugs entwickelt. Dabei werden stochastische Regeln, die individuelle Modellparameter für jeweiligen Fahrzeug beinhalten, entwickelt.
- Validierung des mikroskopischen Modells: Validierung des mikroskopischen Modells mit vorhandenen mikroskopischen Daten. Die Validierung des mikroskopischen Modells wird durch eine Analyse der vorhandenen mikroskopischen gemessenen Daten durchgeführt.
- Evaluation des Gesamtmodells: Validierung des gesamten Modells mit vorhandenen mikroskopischen Daten.

### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der Lehrstuhl „Physik von Transport und Verkehr“, der Universität Duisburg-Essen unter der Leitung von Professor Dr. Michael Schreckenberg arbeitet seit über 20 Jahren auf dem Gebiet der Theorie und mikroskopischen Modellierung von bewegten diskreten Objekten (Fahrzeuge, Fußgänger) im Bereich Straßenverkehr. Die Arbeitsgruppe der UDE hat umfangreiche wissenschaftliche Arbeiten (die in ca. 300 referierten Artikeln veröffentlicht wurden - siehe Referenzen in den Büchern [1]-[2] und in dem Übersichtartikel [3]) in Bereichen der Analyse der empirischen Verkehrsdaten, der Theorie und Modellierung des automatisierten Fahrens, der Modellierung des gemischten Verkehrs (Interaktion der nicht automatisch fahrenden und automatisch fahrenden Fahrzeuge) und der kooperativen vernetzten Fahrens durchgeführt. Es wurden verschiedene mikroskopische stochastische Modelle zur Modellierung der Fußgänger, des gemischten Verkehrs und des Verhaltens der automatisierten Fahrzeuge entwickelt. Das Institut „Physik von Transport und Verkehr“ der UDE ist an zahlreichen Forschungsinitiativen wie z.B. UR:BAN u.v.m. beteiligt.

Diese Kompetenzen- und Simulationsmodelle werden entsprechend den adressierten Schwerpunkten weiterentwickelt und im Projekt „MEC-View“ eingesetzt. Insbesondere werden die wissenschaftlichen Kompetenzen und Vorerfahrungen des Instituts „Physik von Transport und Verkehr“ der UDE für die folgenden Aufgaben im Projekt „MEC-View“ weiterentwickelt und eingesetzt:

- Analyse der mikroskopischen Daten, die die Bewegungen der einzelnen Fahrzeuge einhalten.
- Stochastische mikroskopische Modellierung des automatischen Fahrzeugs (Versuchsträger) in der Umgebung der nichtautomatisch fahrenden Fahrzeuge.
- Simulationen des Mischverkehrs im Bereich der Engstellen.
- Theoretische Lösungen für optimierte Regelungsstrategie für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge.

[1] Boris S. Kerner, The Physics of Traffic, Springer, Berlin, New York, 2004.

[2] Boris S. Kerner, Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control, Springer, Berlin, New York, 2009.

[3] Boris S. Kerner, Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving, Physica A (2016) DOI: 10.1016/j.physa.2016.01.034.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt MEC-View war für den Zeitraum von drei Jahren, beginnend mit dem 1. Dezember 2016 geplant. Durch einen späten Erhalt des Zuwendungsbescheides konnte an der Universität Duisburg-Essen mit der Projektarbeit erst zum 1. Januar 2017 durch zwei Mitarbeiter begonnen werden. Ein dritter Mitarbeiter für die Arbeiten im Arbeitspaket 6 konnte erst zum 1. Juni 2017 gewonnen werden, so dass sich hier zu Beginn Verzögerungen im Ablauf des Vorhabens ergaben.

Die UDE arbeitete während der gesamten Projektlaufzeit eng mit den Partnern zusammen. Während der kompletten Projektlaufzeit nahm sie regelmäßig an den Projekttreffen und den Videokonferenz-Runden teil.

Zur Mitte des Jahres 2019 wurde von allen Partnern der Antrag auf eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes „MEC-View“ um sechs Monate gestellt. Durch entsprechende personelle und organisatorische Maßnahmen konnte so alle Arbeiten bis zum neuen Projektende am 31. Mai 2020 erfolgreich durchgeführt werden.

### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Systeme zur Regelung eines vollautomatisierten Fahrzeugs können durch die jeweilige Fahrzeugsensorik die reale Situationsumgebung nur auf einer kurzen Strecke erfassen. Das reicht aber in vielen Fällen nicht, um eine komfortable und sichere Fahrt eines vollautomatisierten Fahrzeugs zu gewährleisten. Deshalb braucht man eine dynamische Streckenfreigabe, d.h. zu jedem Zeitpunkt in jeder Umgebungssituation eine zeit- und raumabhängige Aussage darüber, wie und in welcher Weise eine Strecke für automatisiertes Fahren geeignet bzw. nicht geeignet ist. Vor diesem Hintergrund ergeben sich die folgenden Aufgaben für die Universität Duisburg-Essen:

- Zum hochautomatisierten Fahren ist es notwendig, dynamische Streckeninformationen zu untersuchen und zu modellieren. Diese Informationen sind Voraussetzung, um eine Strecke für das automatisierte Fahren freizugeben („dynamische Streckenfreigabe“).
- Da urbane Gebiete und Strecken im Gegensatz zu Autobahnen und Schnellstraßen weitaus komplexere Strukturen (Ampeln, Kreuzungen, Kreisverkehr, etc.) bieten, müssen Methoden für eine dynamische Streckenfreigabe für diese anspruchsvollen Fahrsituationen entwickelt werden. Um diese anspruchsvollen Situationen zu verstehen und nachzuvollziehen, bedarf es einer genauen Untersuchung der mikroskopischen Umgebungs- und Verkehrsdaten von bereits vorhandenen Flottendaten oder Testfahrzeugen.

Die Systeme zur Längsregelung eines Fahrzeugs, die zum Zeitpunkt der Antragstellung existierten und für vollautomatisierte Fahrzeuge eingesetzt wurden, basierten auf einem klassischen Modellansatz, welcher sich vom Verhalten menschlicher Fahrer unterscheidet. Dies kann dazu führen, dass vollautomatisierte Fahrzeuge im gemischten Verkehr als „Fremdkörper“ für Fahrer von nicht automatisierten Fahrzeugen empfunden werden könnten. Die Wahrscheinlichkeit der Unfälle, die durch die Fahrer nicht automatisierter Fahrzeuge verursacht würden, kann deutlich steigen. Anspruchsvolle Fahrsituationen erhöhen das Gefahrenpotenzial. Vor diesem Hintergrund ergeben sich die folgenden Aufgaben für die Universität Duisburg-Essen:

- Es müssen neue Modelle für Fahrstrategien eines vollautomatisierten Fahrzeugs entwickelt werden, die für alle anderen Verkehrsteilnehmer in der Umgebung vorhersehbar sein müssen.
- Es sollten Fahrstrategien eines vollautomatisierten Fahrzeugs entwickelt werden, die den „menschlichen“ Faktor in gemischtem Verkehr integrieren.
- Es sollten neue Lösungen für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge vorgeschlagen und untersucht werden, die ihr dynamisches Verhalten in Abhängigkeit von anspruchsvollen Fahrsituationen automatisch ändern können und auch von positiven Eigenschaften des dynamischen Verhaltens der realen Fahrer lernen können.

### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Universität Duisburg-Essen arbeitete im Projekt MEC-View eng mit den Partnern zusammen.

In AP 2 gab es gemeinschaftliche Forschungsaufgaben zur Analyse von realen mikroskopischen Verkehrsdaten in denen eng mit der Daimler AG und der IT-Designers GmbH zusammengearbeitet wurde.

In AP 6 gab es eine Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH zum Thema der Objektprädiktion im Umfeld des hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugs.



### **6. Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses**

Im Rahmen des Projektes MEC-View wurden durch die Universität Duisburg-Essen (UDE) die folgenden Ergebnisse erzielt. Die Ergebnisse sind den einzelnen Arbeitspaketen und Unterarbeitspaketen mit Beteiligung der Universität Duisburg-Essen zugeordnet:

#### **6.1 AP 1 Gesamtsystem:**

##### **6.1.1 UAP 1.1 Requirements Engineering**

Zusammen mit den Partnern wurden Use-Cases definiert. Es wurden Szenarien für die durchgeführten Simulationen gewählt, welche anspruchsvolle Situationen für automatisiert fahrende Fahrzeuge widerspiegeln. Im weiteren Projektverlauf wurden diese Use-Cases weiterentwickelt und an die Erfordernisse des Projektes angepasst.

Parallel hierzu fand kontinuierlich eine Beobachtung und Analyse des Stands der Technik statt. Bis zum Projektende gab es nur wenige Forschungsarbeiten, welche sich ebenfalls mit Simulationen von automatisiertem Verkehr beschäftigen. Dabei wurden bisher vor allem allgemeine Aspekte untersucht. Aus der Literaturrecherche sind keine Arbeiten zu Simulationen von anspruchsvollen Fahrsituationen mit automatisiert fahrenden Fahrzeugen bekannt, die von Relevanz für die Arbeiten im Projekt waren.

##### **6.1.2 UAP 1.2 Fortschrittverfolgung**

Die Universität Duisburg-Essen beteiligte sich im Rahmen des Projektkonsortiums mittels festgelegter Key Performance Indikatoren (KPI) an der Fortschrittsverfolgung. Hierzu nahm die Universität Duisburg-Essen regelmäßig an den Regelterminen der Skype-Besprechung und an den Projekttreffen teil.

##### **6.1.3 UAP 1.3 Pilotanlage Ulm**

Die Universität hat sich an den allgemeinen Gesprächen, zum Beispiel zur Auswahl des Kreuzungsbereichs in Ulm Lehr beteiligt. Darüber hinaus hat die Pilotanlage in Ulm Lehr nur bedingten Einfluss auf die Arbeiten der UDE. Daher wurden die Entwicklungen um die Anlage mit Interesse verfolgt, eine weitere Beteiligung an spezifischen Diskussionen fand jedoch nicht mehr statt.

##### **6.1.4 UAP 1.4 Projektmanagement, Dokumentation, und Ergebnisverbreitung**

Im Rahmen des Projektes MEC-View wurde über Server der Universität Duisburg-Essen der Internetauftritt <http://www.MEC-View.de> gehostet. Die Universität Duisburg-Essen hat dabei den Aufbau und den Betrieb im Rahmen ihrer Möglichkeiten unterstützt.

Zusammen mit Bosch wurden für den Projektabschluss die Projektergebnisse für eine virtuelle Abschlusspräsentation auf den Seiten Ergebnisse und Publikationen aufbereitet und bereitgestellt. Die Webseite wird auch über das Projektende hinaus weiter betrieben.

Seitens der UDE hat es eine Reihe an wissenschaftlichen Konferenzbeiträgen und Veröffentlichungen gegeben. Eine Aufstellung der Veröffentlichungen ist in Abschnitt 11 auf Seite 95 dieses Berichtes zu finden.

Darüber hinaus erfüllt die Universität Duisburg-Essen ihre Dokumentationspflichten.

### 6.2 AP 2 Digitale Karte, Dynamische Streckenfreigabe und Verhaltensanalyse:

#### 6.2.1 UAP 2.3 Untersuchung mikroskopischer Daten:

##### 6.2.1.1 Empirischer Übergang zwischen den drei Verkehrsphasen *F*, *S*, und *J* in Daten von Stichproben-Fahrzeugen (FCD)

Die meisten der für diese Art von Untersuchungen verwendeten empirischen Daten sind (über eine Minute) gemittelte (makroskopische) Daten, welche durch Induktionsschleifen entlang von Autobahnabschnitten gemessen werden können.

Im Rahmen des Projektes MEC-View ergeben sich durch neue Untersuchungen von empirischen mikroskopischen Verkehrsdaten (FCD), welche durch Stichproben-Fahrzeuge innerhalb des Verkehrs gewonnen werden, einige neue Erkenntnisse zu empirischen Merkmalen der drei Verkehrsphasen *F*, *S* und *J* im Fahrzeugverkehr. Viele dieser Untersuchungen wurden in der Zusammenarbeit mit den MEC-View Partnern Daimler AG und IT-Designers GmbH durchgeführt und durch diese Partner in MEC-View präsentiert (siehe Veröffentlichungen [4] - [7]).

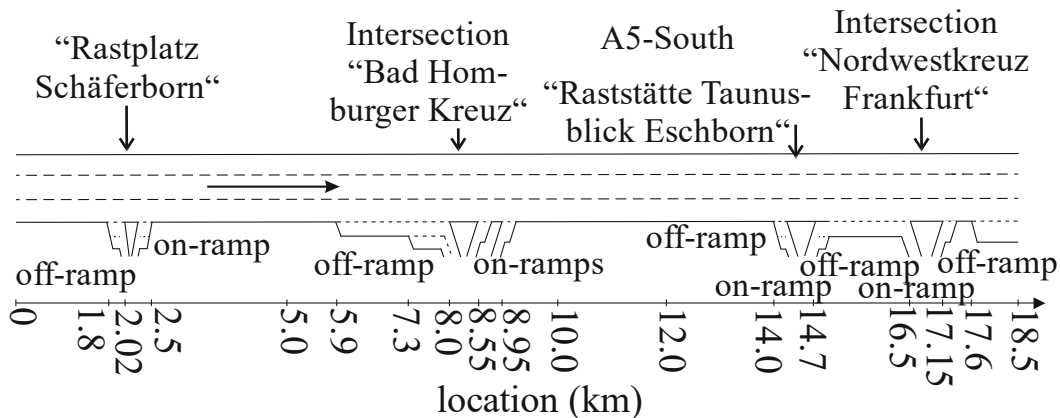
In den gezeigten Beispielen empirischer Daten von Stichproben-Fahrzeugen, die wir in MEC-View untersucht haben (Abbildung 6.2.1.1, Abbildung 6.2.1.2, Abbildung 6.2.1.3) [7], gibt es zwei unterschiedliche Engstellen, an denen sich häufig ein Verkehrszusammenbruch beobachten lässt (Abbildung 6.2.1.1):

- (i) Eine nachgelagerte Engstelle, hervorgerufen durch eine Abfahrt innerhalb des Autobahnkreuzes "Nordwestkreuz Frankfurt" (effektive Position der Engstelle bei etwa 15 km).
- (ii) Eine vorgelagerte Engstelle, welche durch eine Auffahrt innerhalb des Autobahnkreuzes "Bad Homburger Kreuz" verursacht wird (effektive Position der Engstelle bei etwa 9 km)

- [4] Stefan Kaufmann, Boris S. Kerner, Hubert Rehborn, Micha Koller, Sergey L. Klenov. Aerial Observations of Moving Synchronized Flow Patterns in Over-Saturated City Traffic. *Transportation Research C*, **86**, 393-406 (2018)
- [5] Sven-Eric Molzahn, Boris S. Kerner and Hubert Rehborn. Phase based jam warnings: an analysis of synchronized flow with floating car data. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, (2019) DOI: 10.1080/15472450.2019.1638781
- [6] Yildirim Dülger, Sven-Eric Molzahn, Hubert Rehborn, Micha Koller, Boris S. Kerner, Dominik Wegerle, Michael Schreckenberg, Michael Menth, and Sergey L. Klenov. Empirical random phase transitions between free flow and synchronized flow at highway bottlenecks. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, (2019) DOI: 10.1080/15472450.2019.1615488
- [7] Boris S. Kerner, Statistical physics of synchronized traffic flow: Spatiotemporal competition between  $S \rightarrow F$  and  $S \rightarrow J$  instabilities. *Phys. Rev. E* **100**, 012303 (2019)

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.1.2 Empirischer S→F Phasenübergang innerhalb des Staumusters an einer Engstelle mit Entstehung eines MSP Musters



**Abbildung 6.2.1.1: Schematische Darstellung des Autobahnabschnitts A5-Süd auf dem die FCD-Daten untersucht wurden.**

Zu Beginn entsteht um 07:19:30 Uhr ein spontan auftretendes Staumuster durch einen F→S Phasenübergang an der nachgelagerten, stromabwärtigen Engstelle (markiert durch "spontaneous traffic breakdown" in Abbildung 6.2.1.1). Der synchronisierte Verkehrsfluss bleibt an der Engstelle aber nur für etwa 10 Minuten bestehen: Durch einen S→F Phasenübergang, kehrt der Verkehr an der Engstelle wieder in die Freifluss-Phase zurück. Dann kommt es zu einem neuen F→S Phasenübergang welchem erneut nach einer gewissen Zeit ein S→F Phasenübergang folgt. Diese Abfolge wiederholt sich dann mehrmals.

Durch diese komplexen Sequenzen aus F→S und S→F Phasenübergängen, bilden sich aufeinander folgende Bereiche von synchronisiertem Verkehr, welche aber durch Bereiche mit Freifluss von einander separiert sind. So entsteht das empirische Muster mehrerer sich stromaufwärts bewogender Bereiche synchronisierten Verkehrs (MSP – *moving synchronised pattern*). Einige dieser Muster sind mit „MSP1“, „dissolving MSP“ und „MSP2“ in Abbildung 6.2.1.2 bezeichnet.

Um eine diese Sequenzen aus F→S und S→F Phasenübergängen an der nachgelagerten, stromabwärtigen Engstelle in den empirischen Daten zu verdeutlichen zeigt Abbildung 6.2.1.3(a) die gegen den Ort aufgetragene Geschwindigkeit dreier Fahrzeuge (2,3 und 4), welche die Engstelle passieren:

- Fahrzeug 2 befindet sich innerhalb des synchronisierten Verkehrs,
- Fahrzeug 3 befindet sich durch den S→F Phasenübergang an der Engstelle im Freifluss,
- Fahrzeug 4 befindet sich durch den erneuten F→S Phasenübergang jedoch wieder in der Phase des synchronisierten Verkehrs

In einigen Fällen lösen sich die Bereiche synchronisierten Verkehrs im Laufe der Zeit auf, was gleichzeitig zur Auflösen des MSPs führt. Eines dieser auflösenden MSPs ist in Abbildung 6.2.1.2 durch „dissolving MSP“ gekennzeichnet. In anderen Fällen erreicht die sich bewogende stromaufwärts gerichtete Front eines MSP jedoch die vorgelagerte Engstelle („MSP1“ und „MSP2“ in Abbildung 6.2.1.2).

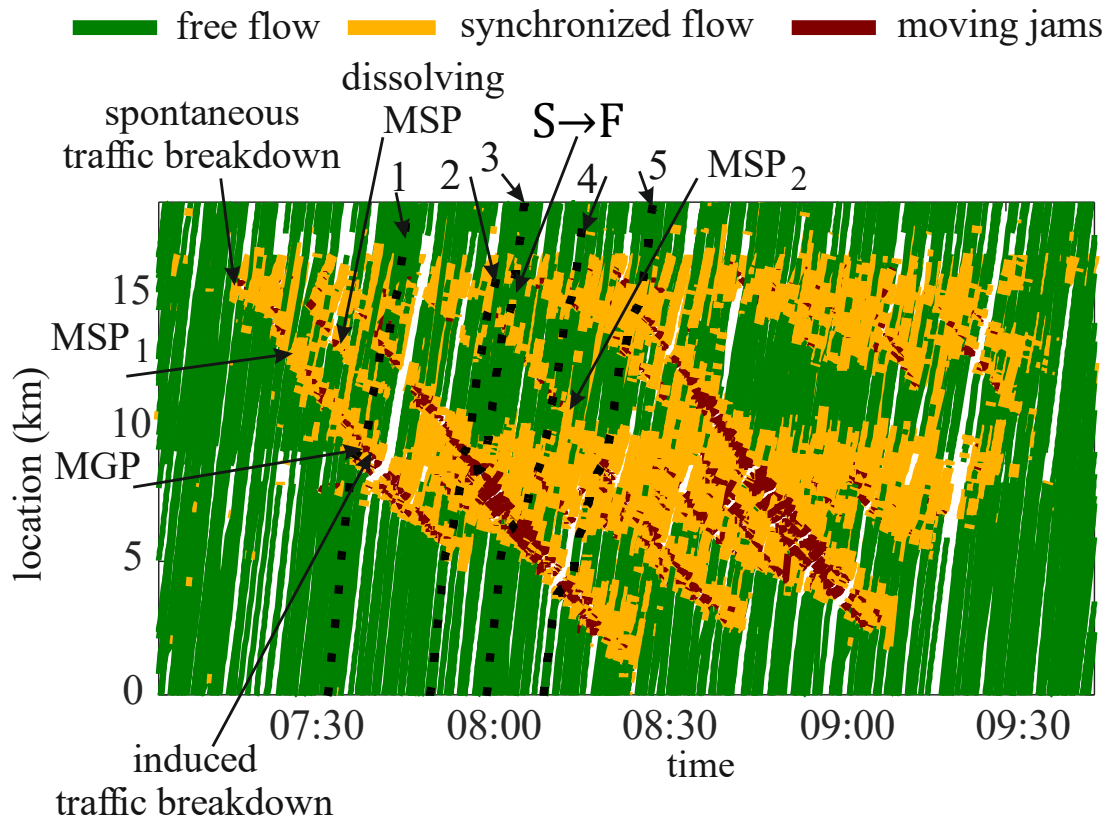


Abbildung 6.2.1.2: Fahrzeugtrajektorien aus FCD-Daten, welche auf dem Autobahnabschnitt A5-Süd (siehe Abbildung 6.2.1.1) gemessen wurden. Der Unterschied zwischen den drei Verkehrsphasen: Freier Verkehr, Synchronisierter Verkehr, und „Wide Moving Jam“ (bezeichnet als „free flow“, „synchronized flow“, und „moving jams“ in der Abbildung) wurde durch die Methode aus Section 4 des Papers [8] durchgeführt.

- [8] Boris S. Kerner, Hubert Rehborn, Ralf-Peter Schäfer, Sergey Klenov, Jochen Palmer, Stefen Lorkowski, Nikolaus Witte. Traffic Dynamics in Empirical Probe Vehicle Data studied with Three-Phase Theory: Spatiotemporal Reconstruction of Traffic Phases and Generation of Jam Warning Messages. *Physica A*, 392, 221-251 (2013).

### 6.2.1.3 Empirischer Transformierung eines MSP Musters in ein bewegtes GP Muster (MGP)

Ein empirisches allgemeines Staumuster (GP – *general congested pattern*) welches aus beiden Verkehrsphasen S und J, also gestautem Verkehr besteht ist von Studien aus empirischen makroskopischen über den Zeitraum einer Minute gemittelten Daten bekannt.

Durch neue Analysen von FCD-Daten welche im Rahmen des Projektes MEC-View durchgeführt werden konnten, hat sich gezeigt, dass es ein weiterer Typ eines GP bilden kann (als „MGP“ in Abbildung 6.2.1.2 markiert). Da dieses Muster wandert, wird es als bewegtes allgemeines Staumuster bezeichnet (MGP – *moving general congested pattern*).

Genau wie das GP, besteht auch das MGP aus gestautem Verkehr in beiden Verkehrsphasen S und J. Jedoch bewegt sich das MGP dem Verkehrsstrom entgegen, während das GP ortsfest an eine Engstelle gebunden ist.

Die gefundenen Muster des MGP, welche in den empirischen Daten aus Stichproben-Fahrzeugen gefunden wurden entstehen durch einen S → J Phasenübergang innerhalb des bewegten Musters synchronisierten Verkehrs („MSP1“ in Abbildung 6.2.1.2). Dieses MGP besteht dabei aus zwei sich bewegenden, breiten Staus (J – *wide moving jam*) welche durch einen Bereich aus synchronisiertem Fluss S (Trajektorie 1 in Abbildung 6.2.1.3) getrennt werden.

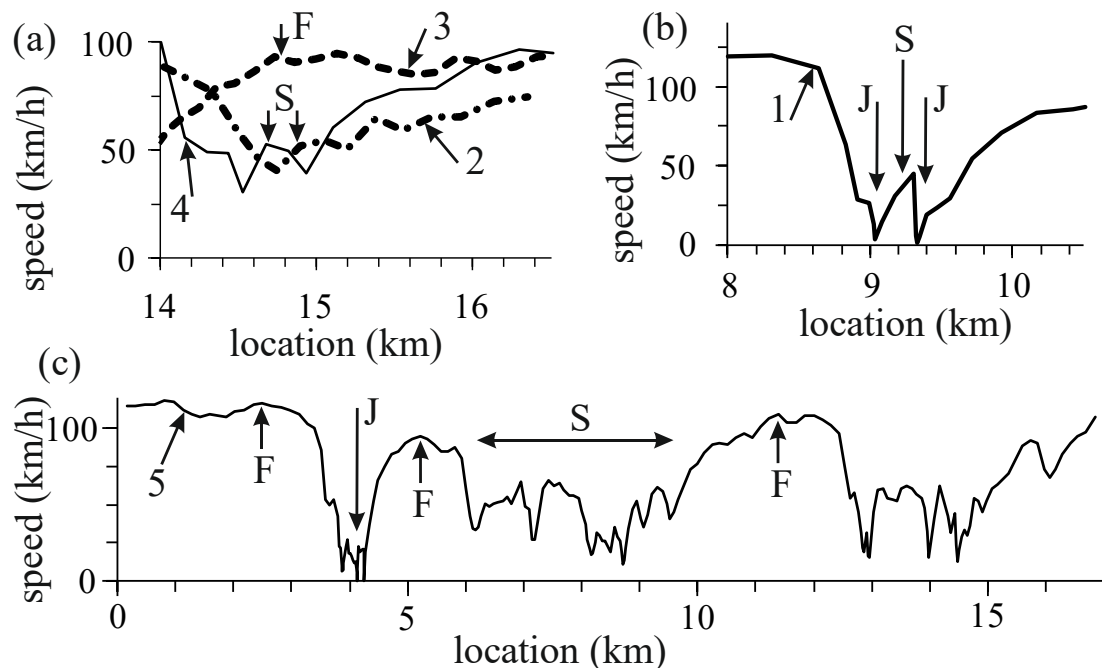


Abbildung 6.2.1.3: Fahrzeuggeschwindigkeit in Abhängigkeit des Ortes abgeleitet aus Fahrzeugtrajektorien von fünf ausgewählten FCD-Fahrzeugen, die mit entsprechenden Nummern von 1 bis 5 in Abbildung 1.2.1.2 markiert wurden. F – „free flow“, S – „synchronized flow“, J – „wide moving jam“.

#### 6.2.1.4 Empirische Wechselfolge der Phasen S, J, und F innerhalb des GP Musters welches räumlich an die Engstelle gebunden ist

Das MGP induziert einen S→F Phasenübergang an der vorgelagerten Engstelle (markiert durch die Beschriftung „induced traffic breakdown“ in Abbildung 6.2.1.2). Durch diesen induzierten Verkehrszusammenbruch bildet sich an der vorgelagerten Engstelle das Muster eines GP aus.

In Übereinstimmung mit früher veröffentlichten theoretischen Ergebnissen, zeigt das GP an der vorgelagerten Engstelle komplexe raumzeitliche Wechsel von breiten, bewegten Staus, Freifluss und synchronisiertem Verkehr (bspw. Wechsel der Phasen J, F und S an Position 7-8 km innerhalb des GP in Abbildung 6.2.1.2).

Die Trajektorie von Fahrzeug 5 und das zugehörige Geschwindigkeitsprofil in Abbildung 6.2.1.3(c) verdeutlichen, wie ein Fahrer die komplexen Wechsel der Verkehrsphasen F, S und J wahrnimmt während er den Bereich des GP an der vorgelagerten Engstelle passiert (die Phasenabschnitte sind entsprechend mit F, S und J in Abbildung 6.2.1.3(c) bezeichnet), während er den kompletten Autobahnabschnitt (Abbildung 6.2.1.1) durchfährt. Dies geschieht in vollständiger Übereinstimmung mit der Theorie der Phasenübergänge.

Wie bisher gezeigt wurde, ermöglichen Daten von Stichproben Fahrzeugen neue Erkenntnisse über empirische Eigenschaften der Phasenübergänge im Verkehr und daraus resultierender Verkehrsmuster im realen Verkehr. Insbesondere wurden empirische S→F Phasenübergänge am nachgelagerten Engpass mit der Entstehung eines MSP, welches sich dann in ein MGP transformiert, gefunden.

Gleichzeitig wurden in den empirischen FCD Daten komplexe Wechsel der Verkehrsphasen F, S und J innerhalb des GP an der vorgelagerten Engstelle beobachtet.

## Individueller Schlussbericht

---

Es soll jedoch betont werden, dass für eine detaillierte empirische Analyse der mikroskopischen Merkmale von  $S \rightarrow F$ - und  $S \rightarrow J$ -Instabilitäten sowie ihrer raum-zeitlichen Konkurrenz mehr als nur vereinzelte Trajektorien von Stichproben-Fahrzeugen (Abbildung 6.2.1.2), sondern mikroskopisch und raum-zeitlich aufgelöste Fahrzeuggeschwindigkeiten aller Fahrzeuge benötigt werden. Solche empirischen mikroskopischen Daten, bei denen die Verkehrsstörung ( $F \rightarrow S$  Übergang) an Autobahnengpässen gemessen wurde, sind derzeit nicht verfügbar.

Es ist zu hoffen, dass solche empirischen, mikroskopischen Verkehrsdaten (z.B. durch Luftbeobachtungen mittels Drohnen) in naher Zukunft zur Verfügung stehen. Die Untersuchung der empirischen, mikroskopischen Merkmale von  $S \rightarrow F$  und  $S \rightarrow J$  Phasenübergängen werden eine der wichtigsten Aufgaben für die Verkehrsforschung in Hinsicht auf die, in Zukunft zu erwartenden, Mischverkehre aus autonom und menschlich gesteuerten Fahrzeugen sein.

### 6.2.2 UAP 2.4 Dynamische Streckenfreigabe

#### 6.2.2.1 Erkennung spontan auftretender Störungen für die dynamische Streckenfreigabe

Um die Sicherheit zu erhöhen werden in automatisierten Fahrzeugen Daten benötigt, die Informationen über das Verhalten und den Zustand des Verkehrs im Bereich vor dem Fahrzeug liefern. Diese können von Fahrzeugsensoren nicht mehr erfasst werden und sind nicht in digitalen Karten verzeichnet. Eine dieser wichtigen Informationen, sind Informationen über langsam fahrende Fahrzeuge, welche sich stromabwärts vor dem automatisierten Fahrzeug auf der Straße befinden können oder spontan auftretende Hindernisse durch ein stehen gebliebenes Fahrzeug.

Ein langsam fahrendes Fahrzeug wird in der Literatur als „moving bottleneck“ bezeichnet und kann einen Verkehrszusammenbruch auslösen. Die für das automatisierte Fahren angefertigten hoch detaillierten digitalen Karten werden räumlich immer genauer und auch laufend durch Erfassungsfahrzeuge aktualisiert, jedoch enthalten sie tatsächlich nur Informationen über lokale Engstellen auf der Straße, wie Zu- und Abfahrten, Spurverengungen oder Baustellen. Deswegen können automatisierte Fahrzeuge auf diese Informationen immer zugreifen. Hingegen kann keine digitale Karte bewegte Engstellen, durch langsam fahrende Fahrzeuge enthalten, weil solche Engstellen innerhalb weniger Sekunden durch Einscheren eines solchen Fahrzeugs, zum Beispiel an einer Auffahrt, auftreten können.

Auch kann ein dynamisch auftretendes Hindernis jederzeit und überall spontan und zufällig entstehen, zum Beispiel durch einen technischen Defekt oder einen Unfall. Daher ist es für ein automatisiertes Fahrzeug sehr wichtig zu wissen, ob eine bewegte oder dynamische Engstelle, sowie die damit verbundenen Störungen, zum Beispiel auf einer bis zu zwei Kilometer voraus liegenden Strecke zu erwarten ist.

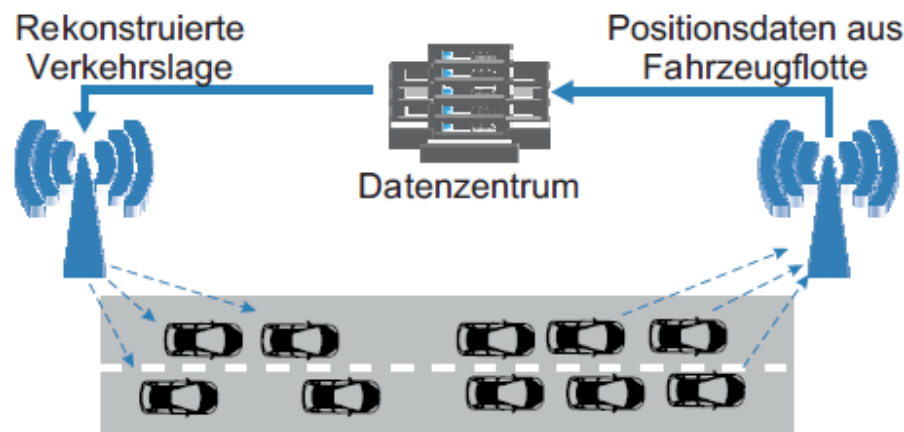
Im Rahmen des Arbeitspakets „Dynamische Streckenfreigabe“ beschäftigte sich die Universität Duisburg-Essen mit der Untersuchung, in wie weit „floating car“- Daten für die Identifizierung spontan auftretender Engstellen für einen solchen Verkehrsdienst genutzt werden können.

Um den automatisiert fahrenden Fahrzeugen Daten über einen stromabwärtigen Zusammenbruch des Verkehrs an einer bewegten Engstelle bereitzustellen, muss man diese Informationen zunächst durch eine geeignete Messtechnik erlangen. Stationäre Detektoren, wie zum Beispiel Zählstreifen, sind hierfür kaum geeignet, da zwischen ihnen viel zu große Abstände (meist mehrere Kilometer) bestehen und daher ein Zusammenbruch in den synchronisierten Verkehr nicht aufgelöst werden könnte.

## Individueller Schlussbericht

Seit einigen Jahren existiert jedoch die Möglichkeit, Verkehrszusammenbrüche auf andere Weise zu erkennen: Vernetzte Fahrzeuge, welche als „probe vehicles“ bezeichnet werden und im Verkehr beliebig verteilt sind. Diese mitschwimmenden Fahrzeuge übermitteln so genannte „floating car“ - Daten (FCD).

Dabei können die Fahrzeuge entweder mit separaten Navigationsgeräten den „personal navigation devices“ (PNDs) oder mit werksseitig fest verbauten Systemen ausgestattet sein, welche es erlauben Positionen (GPS Daten) und Zeitangaben, sowie Geschwindigkeiten, aufzuzeichnen und zu versenden. Aus diesen Fahrzeugen können große Flottenverbände an Stichprobenfahrzeugen gebildet werden.



**Abbildung 6.2.2.1: Schematische Darstellung des Daimler Verkehrsservice: Fahrzeuge übermitteln per Funk Daten an ein zentrales Datenzentrum, dieses rekonstruiert eine Verkehrslage und übermittelt diese an nachfolgende Fahrzeuge. Adaptiert von [9].**

Um die Funktionsweise der Nutzung von „floating car“ - Daten zu verstehen, kann als Beispiel während der Fahrt erhobene Daten von Fahrzeugen, welche mit dem Daimler Verkehrsservice zentral verbunden sind (vgl. Abbildung 6.2.2.1), herangezogen werden. Hier werden Daten von einer großen Flotte von Fahrzeugen gesammelt, welche sich mit einem Zentralrechner verbinden. Daimler betreibt in Europa eine Flotte von etwa einer Million Fahrzeuge, von denen die Daten anonym erhoben werden. Die Positionsdaten werden mit Zeitstempeln versehen und je nach eingestelltem Modus, in Abständen von 5 oder 10 Sekunden an das Datenzentrum übermittelt, um dort in Echtzeit verarbeitet und zu einer Verkehrslage für Kunden rekonstruiert zu werden [9]. Hierbei liegt die Fehlerrate für Geschwindigkeiten in diesen Daten unter 2 Meter pro Sekunde, was ausreichend ist um Verkehrszusammenbrüche an allen Arten von Engstellen detektieren zu können.

Dementsprechend wurde untersucht, unter welchen Bedingungen auf Schnellstraßen eine Engstelle, mittels datenübermittelnder FCD-Fahrzeuge, erkannt werden kann. Dies geschieht mit Hilfe mikroskopischer Simulationen, welche durch Verwendung des Kerner-Klenov Modells im Rahmen der Drei-Phasen Theorie realisiert werden. Anschließend wird eine statistische Analyse notwendig, weil Durchdringungsraten zum heutigen Zeitpunkt im Bereich von 0,5-2% liegen. Insbesondere liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in einer statistischen Analyse einer bewegten Engstelle oder *moving bottleneck* (MB), weil diese zufällig entstehen und auf einer digitalen Karte nicht vorhanden sind. Statistische Eigenschaften der Analyse der Identifizierung der bewegten Engstelle werden im Weiteren mit der Identifizierung eines stehengebliebenen Fahrzeugs oder *stopped vehicle* (SV), welches ebenfalls nicht auf Karten verzeichnet ist, verglichen.

[9] Yildirim Dülger, Sven-Eric Molzahn, Hubert Rehborn, Micha Koller, Boris S. Kerner, Dominik Wegerle, Michael Schreckenberg, Michael Menth & Sergey L. Klenov. „Empirical random phase transitions between free flow and synchronized flow at highway bottlenecks“. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 1297, no. 6 (2019): 1–17

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.2.2 Untersuchte Szenarien der spontan auftretenden Engstellen

Im Rahmen des Projektes MEC-View wurden zwei Szenarien betrachtet. In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass eine Störung auf einer ansonsten freien Strecke, also einem zweispurigen Straßenabschnitt, auf dem es keine baulichen Engpässe, also z.B. Auf-, Abfahrten oder Spurveränderungen gibt, welche ja in digitalen Karten verzeichnet wären.

Die Fragestellungen wurden dabei an Hand von Simulationen mit dem stochastisch, mikroskopischen Verkehrsmodell von Kerner und Klenov [10] untersucht.

Als erstes Szenario wurde eine bewegte Engstelle untersucht, also eine Engstelle, welche sich langsam mit dem Verkehrsstrom mitbewegt. Eine solche Engstelle kann z.B. durch ein langsam fahrendes Fahrzeug, etwa einem Schwertransport ausgelöst werden.

Abbildung 6.2.2.2 zeigt die qualitative Beschreibung der Verkehrsphänomene rund um eine bewegte Engstelle:

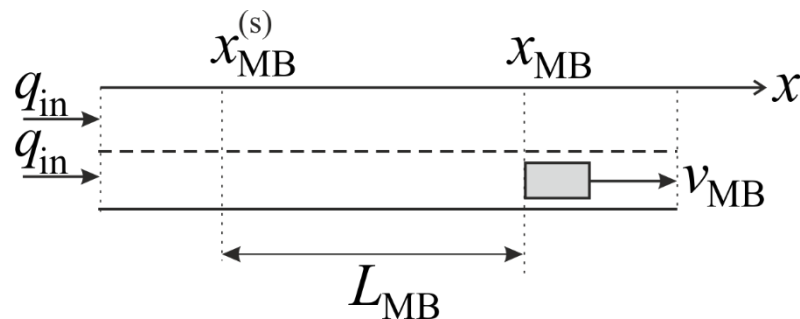


Abbildung 6.2.2.2: Schematische Darstellung einer bewegten Engstelle mit  $v_{MB}$  auf dem rechten Fahrstreifen einer zweispurigen Straße.  $q_{in} = 1375$  Fahrzeuge/(h·Spur).

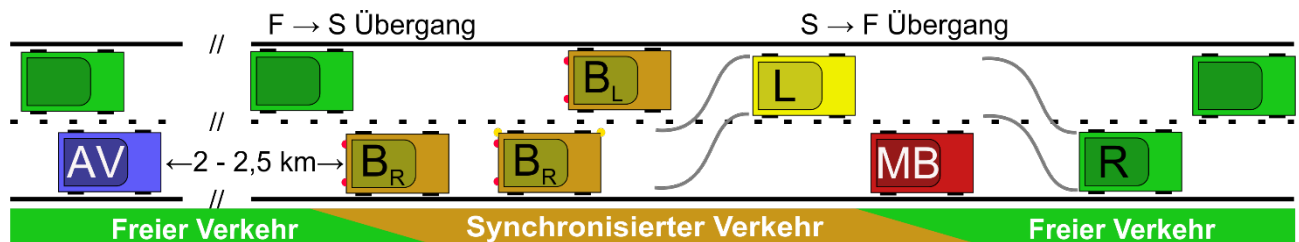
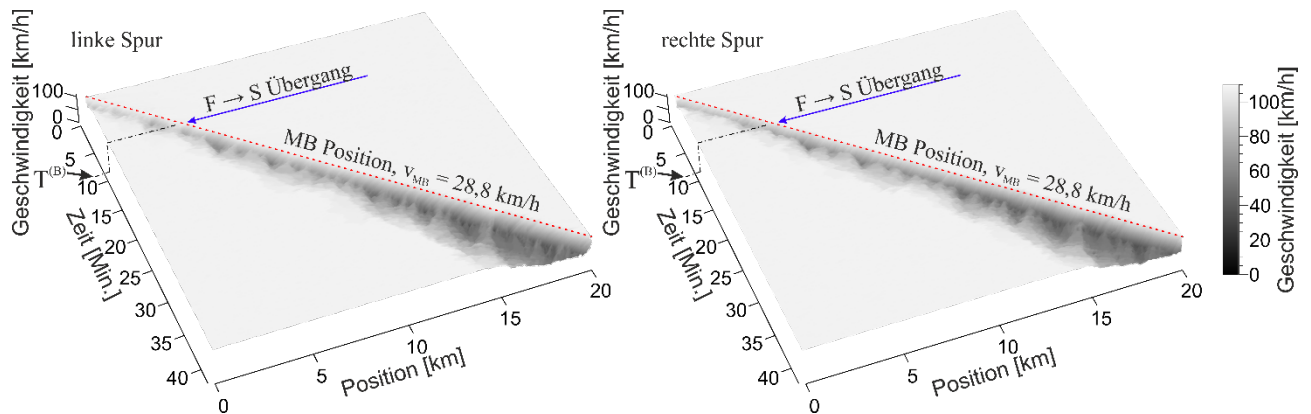


Abbildung 6.2.2.3: Qualitative Beschreibung der Effekte eines langsam fahrenden Fahrzeugs (MB) innerhalb restlichen Freiflusses: Die bewegte Engstelle (MB) befindet sich auf der rechten von zwei Fahrspuren. Andere Fahrzeuge überholen, scheren vorher nach links (L) aus und kehren nach dem Manöver auf die rechte Spur zurück (R). Gelingt ihnen dies nicht, so sind sie gezwungen hinter dem MB abzubremfen (BR). Darüber hinaus können spurwechselnde Fahrzeuge die sich von hinten nähernden Fahrzeuge auf der linken Spur ausbremsen (BL). Die Verkehrsphasen des Freiflusses (F), des synchronisierten Verkehrs (S) sind genauso wie die jeweiligen Übergänge F→S und S→F um die bewegte Engstelle herum in Übereinstimmung mit [10] eingezeichnet. (AV – automatisiert fahrendes Kraftfahrzeug; BR und BL – bremsende Fahrzeuge auf der rechten und linken Fahrspur; L – Fahrzeug bei einem Spurwechsel von der rechten auf die linke Fahrspur; R – Fahrzeug bei einem Spurwechsel von der linken auf die rechte Fahrspur.)

[10] Boris S. Kerner. „Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science“. Springer, 2017

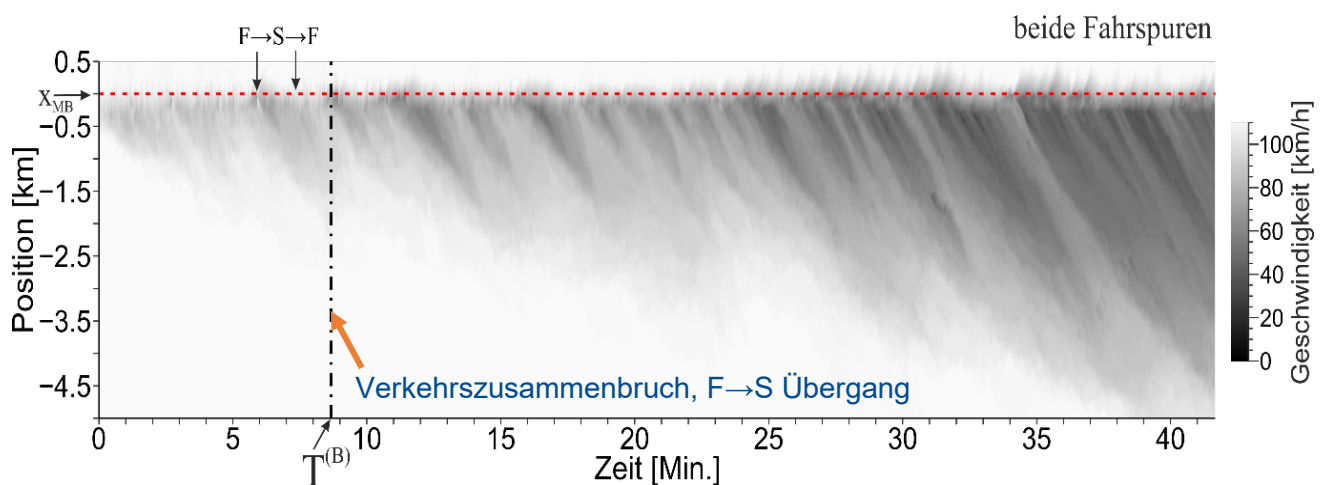


## Individueller Schlussbericht



**Abbildung 6.2.2.4:** Simulation eines zufällig zeitverzögerten Verkehrszusammenbruchs (F→S Übergang) an einer bewegten Engstelle. Dargestellt sind Profile der Geschwindigkeiten auf der rechten und linken Fahrspur dabei wird die Geschwindigkeit in unterschiedlichen Grauschattierungen dargestellt. Die Schattierung verläuft von hell (108 km/h) zu schwarz (0 km/h). Die rote gestrichelte Linie markiert die Position der bewegten Engstelle. Ähnliche Simulationen einer bewegten Engstelle wurden in [11] durchgeführt.

Für eine bessere Veranschaulichung der Gemeinsamkeiten der Geschwindigkeitsstrukturen zwischen einer bewegten und einer ortsfesten Engstelle wurde das Simulationsergebnis in ein relatives Koordinatensystem transformiert, so, dass sich das langsam fahrende Fahrzeug stets im Ursprung der Ortsachse befindet (siehe Abbildung 6.2.2.5).



**Abbildung 6.2.2.5:** Darstellung der Ergebnisse der gleichen Simulation wie Abbildung 6.2.2.4, dargestellt in bewegten Systemkoordinaten parallel zur Geschwindigkeit des langsam fahrenden Fahrzeugs mit  $v_{MB} = 28,8$  km/h. Die Ortskoordinate  $x = 0$  entspricht somit der jeweils aktuellen Position der bewegten Engstelle  $x_{MB}(t)$ . Die Geschwindigkeit des Verkehrs ist über beide Fahrspuren (rechte und linke) gemittelt und in Grauschattierungen dargestellt. Die Schattierung verläuft von hell (108 km/h) zu schwarz (0 km/h).

[11] Boris S. Kerner und Sergey L. Klenov. „A theory of traffic congestion at moving bottlenecks“. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 43, no. 42 (2010): 425101

## Individueller Schlussbericht

Als zweites Szenario wurde eine zufällig entstehende Engstelle durch ein stehen gebliebenes Fahrzeug (SV) untersucht. Hierzu begann ein Fahrzeug in der Simulation zufällig an bis zum Stillstand abzubremsen und stehen zu bleiben.

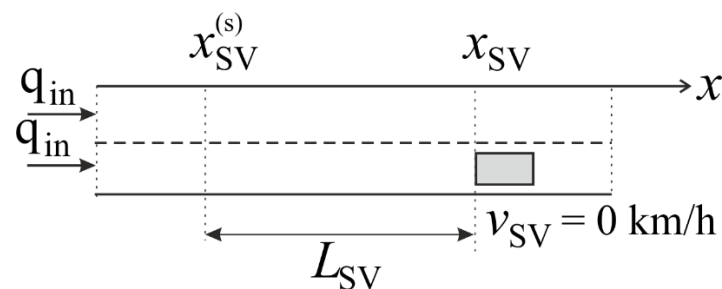


Abbildung 6.2.2.6: Schematische Darstellung einer spontan auftretenden ortsfesten Engstelle mit  $v_{SV} = 0$  km/h auf dem rechten Fahrstreifen einer zweispurigen Straße.  $q_{in} = 1259$  Fahrzeuge/(h·Spur).

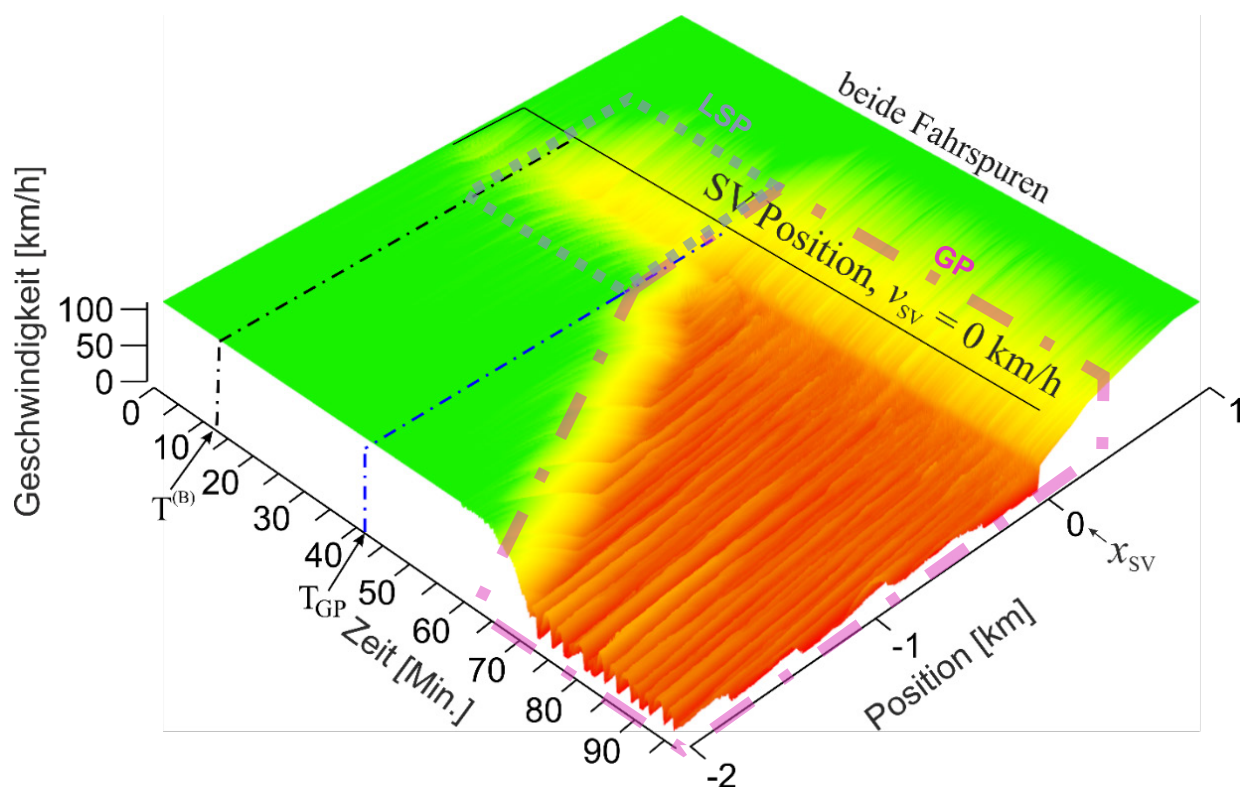


Abbildung 6.2.2.7: Simulationsergebnis für eine Realisation des Szenarios mit einem stehen gebliebenen Fahrzeug. Zunächst bildet nach dem Verkehrszusammenbruch zum Zeitpunkt  $T^{(B)}$  sich ein *localised synchronised pattern* (LSP) aus, welches zum Zeitpunkt  $T_{GP}$  in ein *general pattern* (GP) übergeht.

Abbildung 6.2.2.7 zeigt, dass es nach einer gewissen Zeit zum Zeitpunkt  $T^{(B)}$  zu einem Verkehrszusammenbruch an der spontanen ortsfesten Engstelle kommt. Dies führt zu einer längeren Phase in der sich ein *localised synchronised pattern* (LSP) an der Engstelle ausbildet. Also ein Verkehrsmuster in der sich synchronisierter Verkehr in einem beschränkten Bereich vor der Engstelle ausbildet. Erst nach einem größeren Zeitraum geht das LSP in ein *general pattern* (GP) über. Das GP ist das allgemeine Staumuster, es besteht aus Bereichen mit synchronisiertem Verkehr (S) und breiten sich bewegendem Staus (*wide moving jams* – J). Für die weiteren Untersuchungen wurden die Analysen auf den Zeitraum bis zum Zeitpunkt  $T_{GP}$  ab dem sich das allgemeine Staumuster ausbildet begrenzt. Dieser Zeitraum ist auch noch einmal als zweidimensionale Darstellung in Abbildung 6.2.2.8 dargestellt.

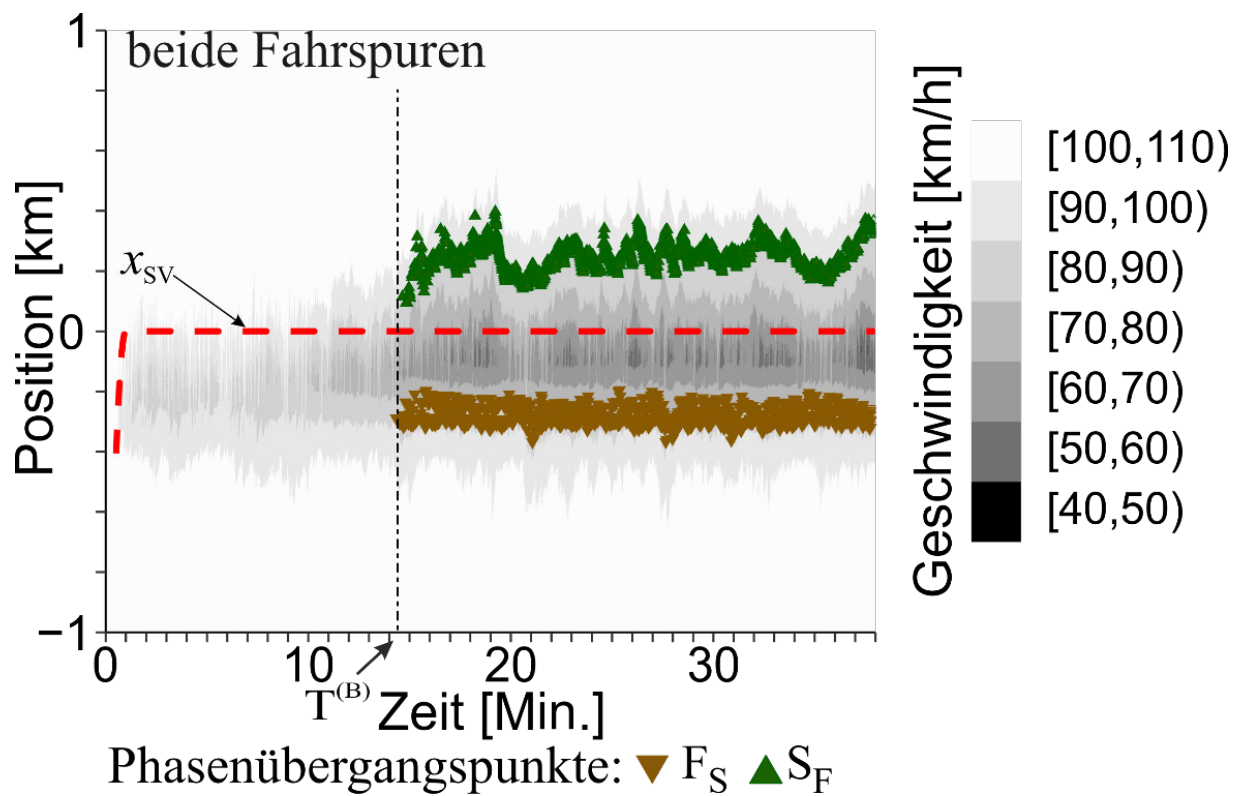
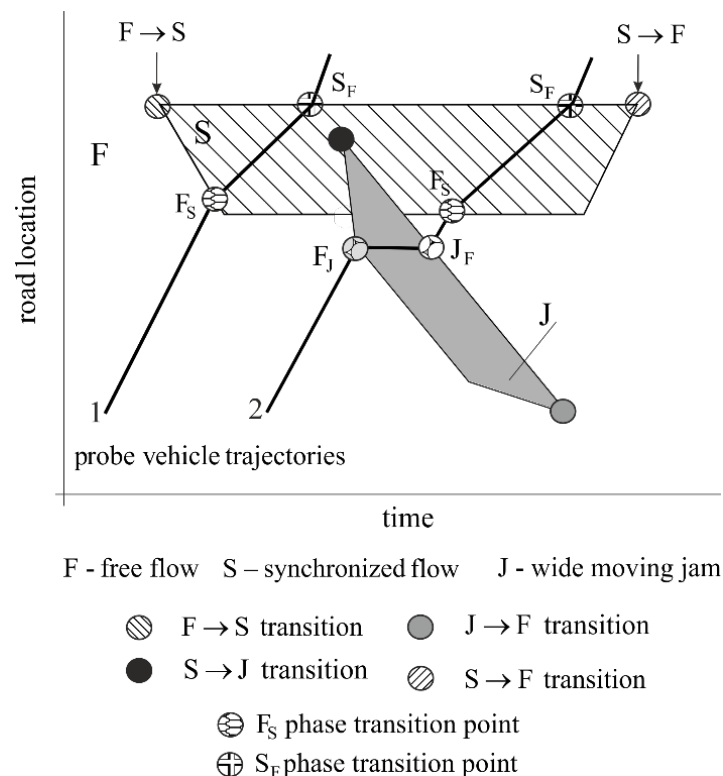


Abbildung 6.2.2.8: Betrachtung der Simulation der Ortsfesten Engstelle für den Zeitraum, in dem sich ein Verkehrsmuster des lokalisierten synchronisierten Verkehrs ausbildet.

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.2.3 Phasenübergangspunkte aus stichprobenhaften Fahrzeugdaten (FCD) für die Erkennung von spontanen Engstellen.

Für die Erkennung von Verkehrszustände werden immer häufiger stichprobenhafte Daten aus am Verkehr teilnehmenden Fahrzeugen, sogenannte „floating car“- Daten (FCD) verwendet. Bereits früher wurde durch Kerner et.al [8] eine Methode vorgestellt, wie sich in einzelnen Fahrzeugtrajektorien Phasenübergangspunkte erkennen lassen, aus denen sich dann auch wieder Verkehrsmuster erkennen lassen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen gab es im Projekt MEC-View weitere Untersuchungen. So zeigt die Abbildung 6.2.2.9 schematisch den Zusammenhang zwischen Verkehrsmustern und Phasenübergangspunkten in einzelnen Fahrzeugtrajektorien.



**Abbildung 6.2.2.9: Schematische Darstellung von Verkehrsmustern und entsprechenden Phasenübergangspunkten in einzelnen Fahrzeugtrajektorien. [8]**

Entsprechend dieser Methode lassen sich auch in den simulierten Szenarien mit spontan auftretenden Störungen sowohl die Trajektorien jedes einzelnen Fahrzeugs betrachten und in diesen die jeweiligen Phasenübergangspunkte ermitteln. So zeigen die Abbildung 6.2.2.10 exemplarisch die Erkennung der Phasenübergangspunkten in drei Geschwindigkeitsprofilen der drei Fahrzeugtrajektorien aus Abbildung 6.2.2.11.

[8] Boris S. Kerner, Hubert Rehborn, Ralf-Peter Schäfer, Sergey Klenov, Jochen Palmer, Stefen Lorkowski, Nikolaus Witte. Traffic Dynamics in Empirical Probe Vehicle Data studied with Three-Phase Theory: Spatiotemporal Reconstruction of Traffic Phases and Generation of Jam Warning Messages. Physica A, 392, 221-251 (2013).

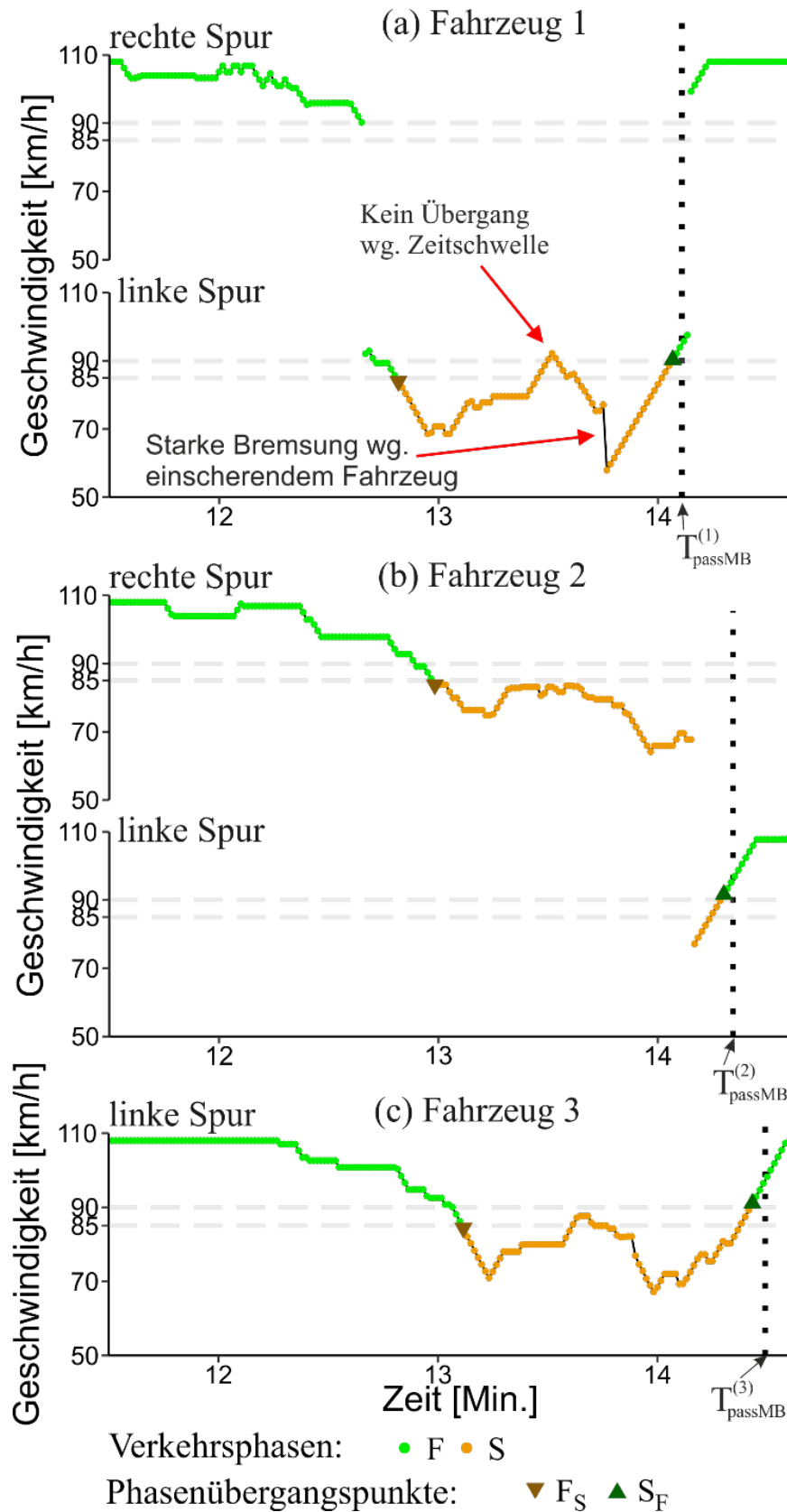


Abbildung 6.2.2.10: Erkennung von Phasenübergangspunkten in den Geschwindigkeitsprofilen von drei nummerierten Fahrzeugen: 1 (a), 2 (b), und 3 (c). Die Nummerierung entspricht den Zahlen, mit denen die Trajektorien dieser Fahrzeuge in Abbildung 6.2.2.11 markiert sind. Durch die gepunktete, senkrechte Linie ist der Zeitpunkt markiert, an welchem die jeweiligen Fahrzeuge das Hindernis passieren.

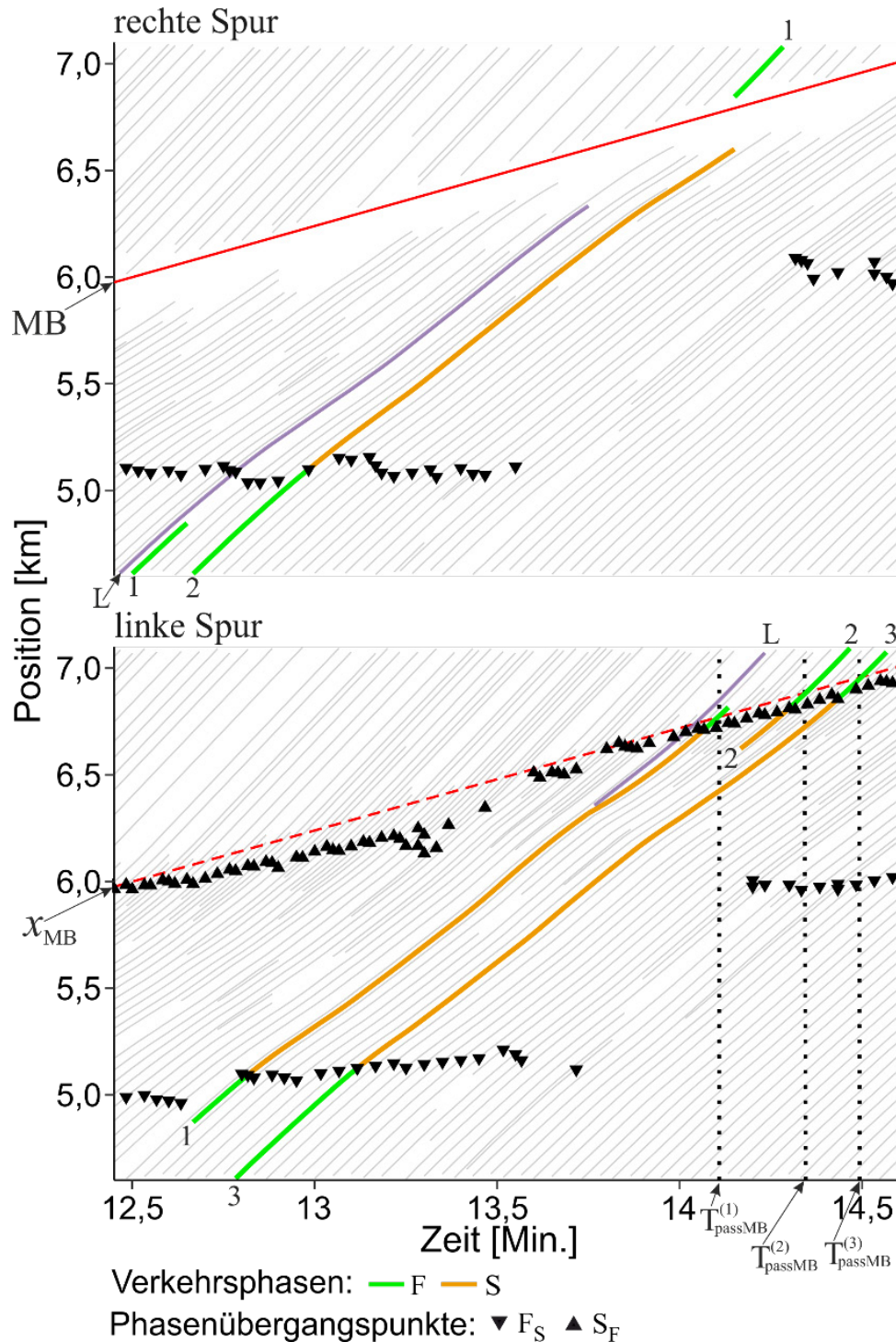
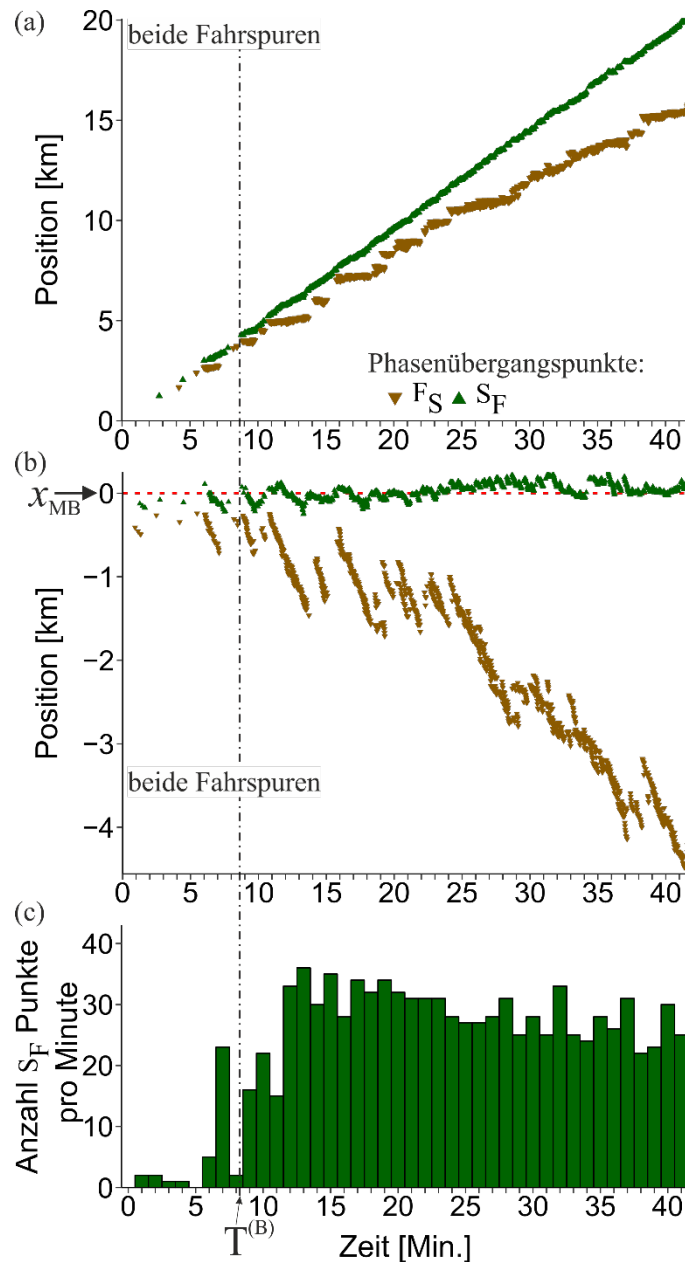


Abbildung 6.2.2.11: Fahrzeugtrajektorien in einem ausgewählten Zeitabschnitt im Umfeld der bewegten Engstelle (MB). Hervorgehoben und markiert sind Trajektorien der Fahrzeuge 1, 2 und 3, für welche die Erkennung der  $F_S$  und  $S_F$  Phasenübergangspunkte in den Geschwindigkeitsprofilen in Abbildung 6.2.2.10 gezeigt wurde. Diese Trajektorien sind entsprechend der Verkehrsphase farblich gekennzeichnet (grün – Freifluss (F), orange – synchronisierter Verkehr (S)). Die violette mit „L“ gekennzeichnete Trajektorie gehört einem Fahrzeug, welches sehr knapp vor Fahrzeug 1 auf die linke Fahrspur einschert und dieses dadurch zu einem starken Bremsmanöver zwingt. ▼ kennzeichnet  $F_S$  Phasenübergangspunkte und ▲ kennzeichnet  $S_F$  Phasenübergangspunkte.  $T_{passMB}^{(1)}$ ,  $T_{passMB}^{(2)}$  und  $T_{passMB}^{(3)}$  bezeichnen die Zeitpunkte, zu denen das jeweilige Fahrzeug das MB passiert.

## 6.2.2.4 Physikalische Effekte an einer bewegten Engstelle

Für die Betrachtung der physikalischen Effekte an der Engstelle lassen sich zwei Zeiträume unterscheiden. Zunächst wird der zeitliche Ausschnitt bis zum Eintreten des Verkehrszusammenbruchs zum Zeitpunkt  $T^{(B)}$  betrachtet, anschließend die Zeit nach diesem Verkehrszusammenbruch.



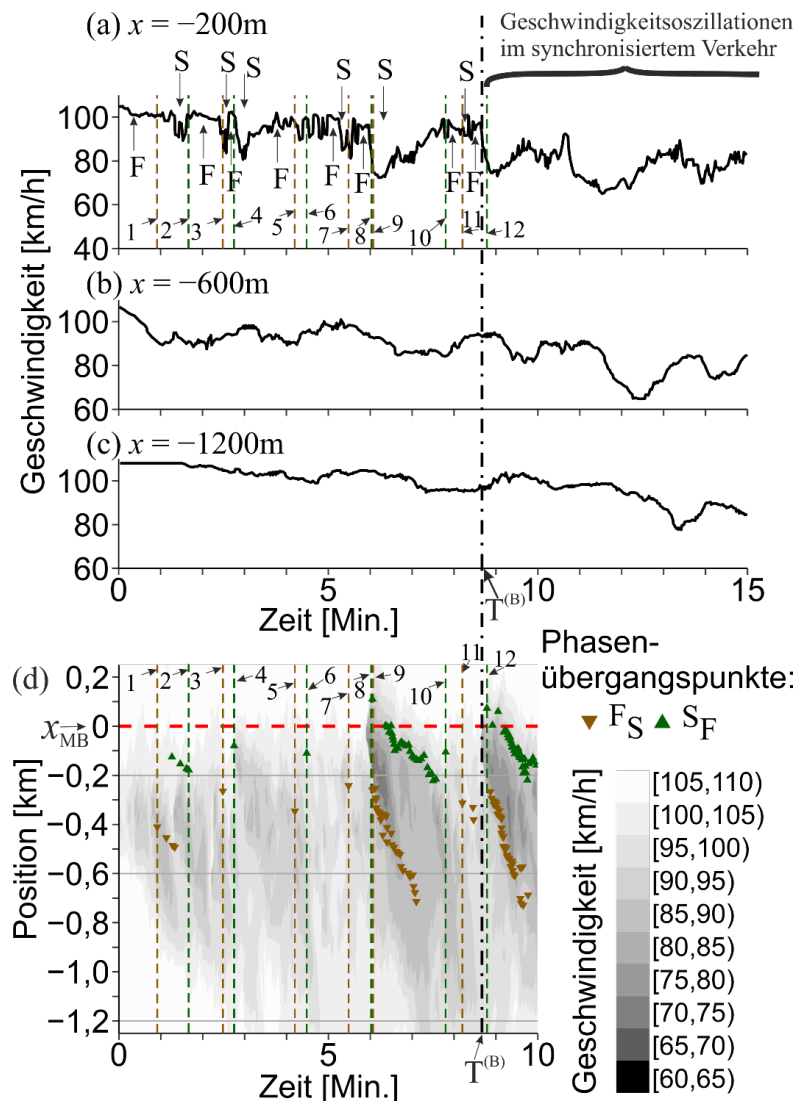
**Abbildung 6.2.2.12:**  $F_S$  and  $S_F$  Phasenübergangspunkte aus Fahrzeugtrajektorien unabhängig von der Fahrspur, (a) im ortsfesten Bezugssystem der Straße, (b) im bewegten Bezugssystem der bewegten Engstelle, (c) statistische Analyse der Anzahl der  $S_F$  Phasenübergangspunkte aus (a,b) pro Minute.

Vor dem Verkehrszusammenbruch zum Zeitpunkt  $t^{(B)}$  lassen sich, wie in Abbildung 6.2.2.12 nur vereinzelte  $S_F$  Phasenübergangspunkte erkennen. Dies hängt mit dem Auftreten einzelner Sequenzen von  $F \rightarrow S \rightarrow F$  Phasenübergängen zusammen. Dies sind kleine Störungen, welche zu einem Phasenübergang von freiem Verkehr in den synchronisierten Verkehr führen, welche sich aber nach kurzer Zeit selbständig wieder auflösen, so, dass der Verkehr zur Phase des freien Verkehrs zurückkehrt. Da in freiem Verkehr keine

## Individueller Schlussbericht

Phasenübergangspunkte erkannt werden können, bleiben in diesen Zeiträumen, in denen wieder freier Verkehr an der bewegten Engstelle vorherrscht neue Informationen aus.

In Abbildung 6.2.2.13 sind diese Sequenzen von  $F \rightarrow S \rightarrow F$  Phasenübergängen vergrößert dargestellt:



**Abbildung 6.2.2.13:** Fortführung der Abbildung 6.2.2.5 und Abbildung 6.2.2.12(b): (a – c) zeigen zeitabhängige Verläufe der Fahrzeuggeschwindigkeiten (gleitender Mittelwert über drei Fahrzeuge), abgeleitet aus Abbildung 6.2.2.5, an verschiedenen Messpunkten mit relativem Abstand stromaufwärts der bewegten Engstelle an Position  $x = 0$  in bewegten Systemkoordinaten. Die Pfeile mit „S“ bezeichnen Bereiche mit synchronisiertem Verkehrsfluss und Pfeile mit „F“ bezeichnen Bereiche mit freiem Verkehrsfluss. Die vertikalen, gestrichelten Linien 1 – 12 in (a) haben, bei gleicher Bezeichnung, die gleiche Bedeutung wie in (d). (d) ist ein Ausschnitt aus Abbildung 6.2.2.12(b) mit schattierter Darstellung der Geschwindigkeit, in dem die gestrichelten Linien 1 – 12 Regionen von sich auflösendem synchronisiertem Verkehr wie in (a) markieren.

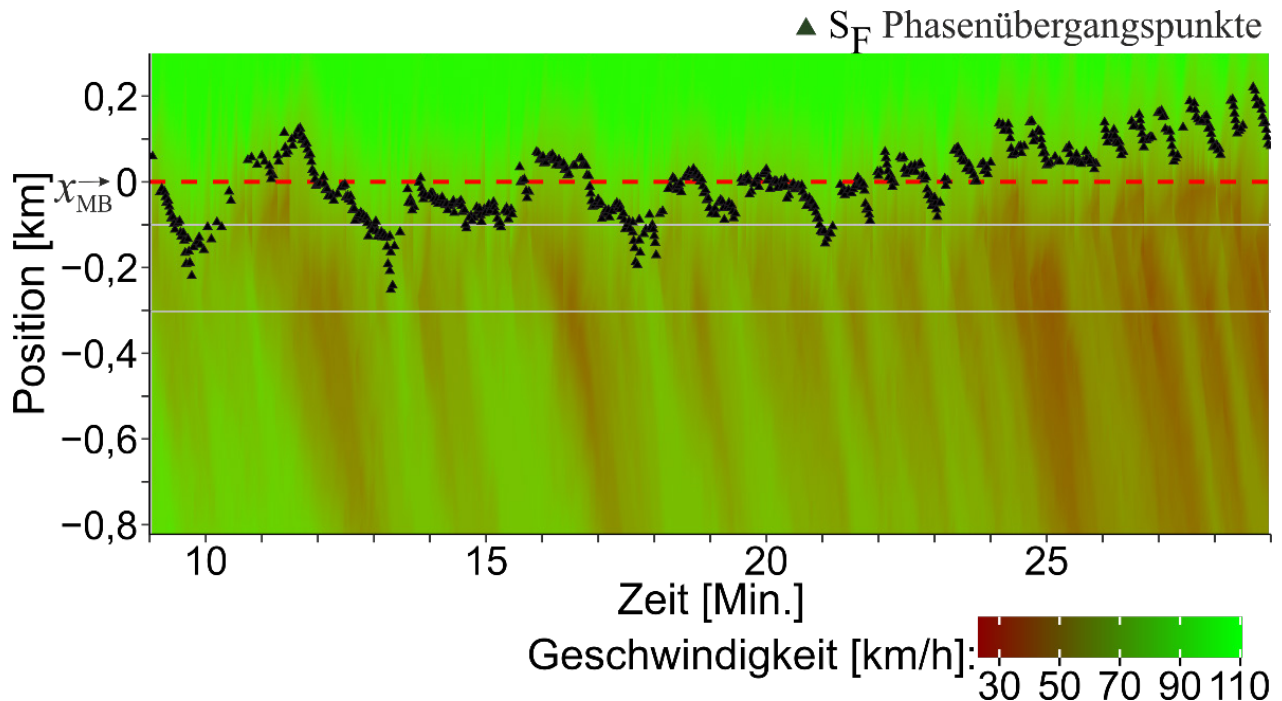
Es wurde weiterhin festgestellt, dass sich in der Zeit nach dem Verkehrszusammenbruch nun in jeder Fahrzeugtrajektorie die  $S_F$  Phasenübergangspunkte erkennen lassen. Diese liegen auch im Bereich der bewegten Engstelle, jedoch kommt es zu Schwankungen im Ort im Vergleich zur Position der bewegten Engstelle.



## Individueller Schlussbericht

Wie die  $S_F$  Phasenübergangspunkte um die bewegte Engstelle verteilt sind lässt sich gut in Abbildung 6.2.2.14 erkennen.

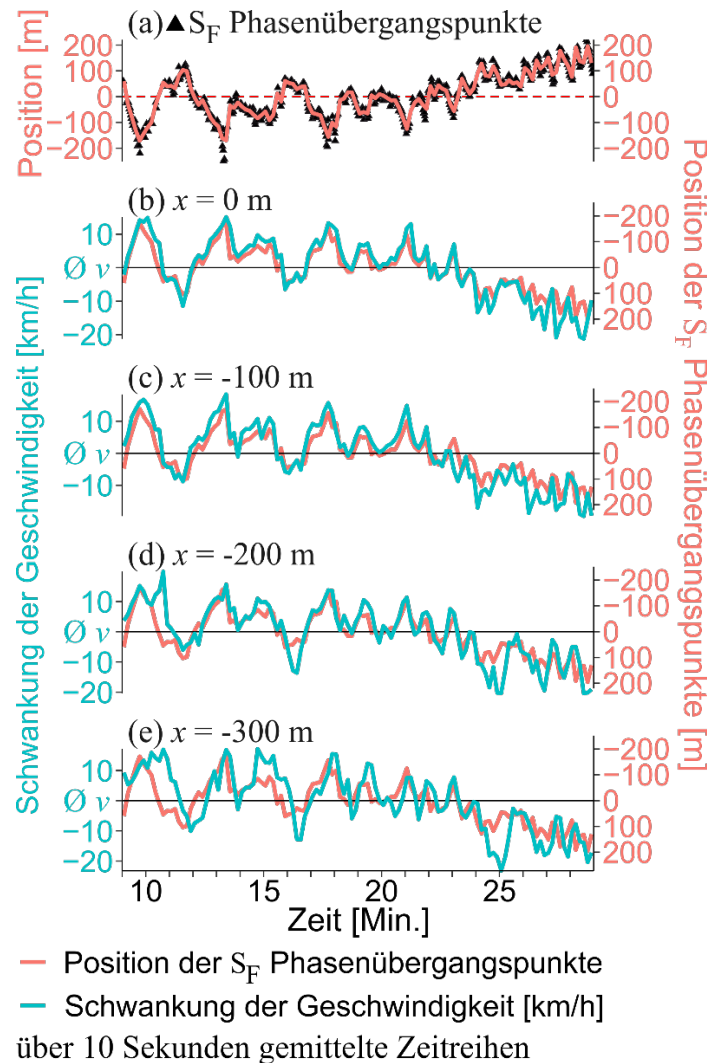
In diesem Zeitausschnitt erkennt man ebenfalls wellenartige Muster in der aufgetragenen Geschwindigkeit.



**Abbildung 6.2.2.14:** Dargestellt ist ein 20-minütiges Zeitfenster ab Minute 9, also für  $t > T^{(B)}$ . Waagerechte graue Linien markieren die Positionen virtueller Detektoren an den Positionen  $x = 0$  m,  $x = -100$  m,  $x = -200$  m und  $x = -300$  m.

Es wurde ein zeitlicher Bereich gewählt, in dem bei einer Mittelung über jeweils zehn Sekunden ein längerer, jetzt lückenloser, Zeitraum betrachtet werden kann (Abbildung 6.2.2.14). So ergibt sich ein zeitlicher Abschnitt von 20 Minuten, welcher ab Minute 9 beginnt. Dieser Abschnitt liegt folglich nach dem Eintreten des Verkehrszusammenbruchs bei  $T^{(B)}$ . In dieser Analyse ist auch die Position der  $S_F$  Phasenübergangspunkte über 10 Sekunden gemittelt. Dies ist in Abbildung 6.2.2.15(a) durch die rote Linie dargestellt. Der mittlere Verlauf des Abstands aller Phasenübergangspunkte ist auch in der Abbildung 6.2.2.15(b – e) aufgetragen, allerdings sind hier die y-Achse für den Abstand (rote Achsenbeschriftung am rechten Rand der Plots) gespiegelt, um eine bessere Vergleichbarkeit mit der mittleren Geschwindigkeit für vier virtuelle Detektoren zu zeigen (b:  $x = 0$  m, c:  $x = 100$  m, d:  $x = 200$  m, e:  $x = 300$  m). In diesem zeitlichen Abschnitt lässt sich eine extrem hohe Korrelation zwischen der Geschwindigkeit vor der bewegten Engstelle und der Distanz der Phasenübergangspunkte zum Hindernis feststellen.

Diese Oszillationen der Geschwindigkeit des synchronisierten Verkehrs sind bereits bekannt und untersucht. Die Abbildung 6.2.2.15 zeigt deutlich, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen diesen Geschwindigkeitsoszillationen und dem Abstand zwischen dem  $S_F$  Phasenübergangspunkt zur tatsächlichen Position der bewegten Engstelle gibt.



**Abbildung 6.2.2.15:** Der zeitliche Ausschnitt, identisch zu, zeigt ein 20-minütiges Zeitfenster ab Minute 9, also für  $t > T^{(B)}$ . Geglättete Zeitreihen für die Position der  $S_F$  Phasenübergangspunkte (a), sowie für vier virtuelle Detektoren (b – e) an den Positionen  $x = 0$  m,  $x = -100$  m,  $x = -200$  m und  $x = -300$  m, welchen mit der gespiegelten Kurve der  $S_F$  Phasenübergangspunkte hinterlegt sind. Die Geschwindigkeit in den Detektoren ist dabei im Vergleich zum Mittelwert  $\bar{\varnothing} v$  der gemessenen Geschwindigkeiten innerhalb der Zeitspanne aufgetragen.

Es wurde gezeigt, dass komplexe Oszillationen der Fahrzeuggeschwindigkeit im synchronisierten Verkehr stromaufwärts der bewegten Engstelle tatsächlich existieren und dass die komplexe Oszillationen der Geschwindigkeit im synchronisierten Verkehr die Ursache für die komplexe Oszillationen im zeitlichen Verlauf des Abstands der  $S_F$  Phasenübergangspunkte zum Hindernis in sind. Die Kernaussage dieser Analyse ist daher für eine Identifizierung der Engstelle mittels  $S_F$  Phasenübergangspunkten aus Trajektorien von FCD-Fahrzeugen: Komplexe Oszillationen der Fahrzeuggeschwindigkeit im synchronisierten Verkehr begrenzen die Auflösung bei der Bestimmung der Position der bewegten Engstelle und gleichzeitig die Genauigkeit einer Rekonstruktion der Geschwindigkeit einer bewegten Engstelle.

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.2.5 Identifizierungsmethode für die Erkennung spontan auftretender Engstellen

Es wurde eine Identifizierungsmethode entwickelt, die spontan auftretende Engstellen im Verkehr durch die Analyse von FCD Stichprobendaten verlässlich ermöglichen soll. Diese Methode wurde anhand der beiden simulierten Szenarien getestet und analysiert:

1. Angenommen wird eine zufällige Verteilung von FCD-Fahrzeugen zwischen normalen Fahrzeugen bei einer gewählten Durchdringungsrate  $\gamma$ . Diese eine zufällige Verteilung innerhalb der Simulation wird als zufällige Realisierung oder als eine Stichprobe von FCD-Fahrzeugen bezeichnet. Es werden insgesamt  $M = 1000$  dieser zufällig erzeugten, unabhängigen und unterschiedlichen Stichproben erzeugt.
2. Für jeden Zeitpunkt  $t$  wird überprüft, ob FCD-Fahrzeuge in dieser Stichprobe  $S_F$  Phasenübergangspunkte  $[t_i, x_i] \forall t_i \leq t$  (Übergänge aus der Phase des synchronisierten Flusses ( $S$ ) hin zu freiem Verkehr ( $F$ )) erkannt haben. Sollten durch die FCD-Fahrzeuge  $S_F$  Phasenübergangspunkte in der Stichprobe erkannt worden sein, ist eine Störung oder Engstelle im Verkehrsfluss anzunehmen.
3. Diese Engstelle lässt sich nur dann als Engstelle identifizieren, wenn ab einem Zeitpunkt  $t$  mindestens zwei  $S_F$  Phasenübergangspunkte erkannt wurden:

$$K \geq 2$$

$$(6.2.2.1)$$

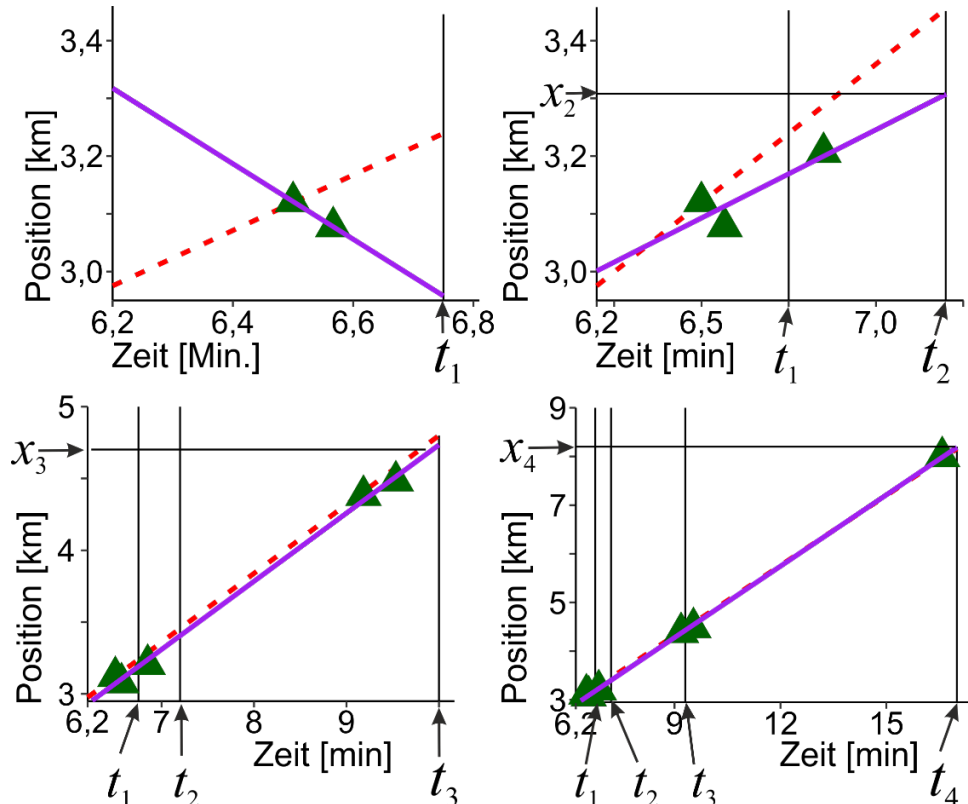


Abbildung 6.2.2.16: Rekonstruktion der Geschwindigkeit und des Ortes mittels linearer Regression durch die zum jeweiligen Zeitpunkt  $t_i$  vorliegenden  $S_F$  Phasenübergangspunkte, dargestellt für vier verschiedene Zeitpunkte in einer Stichprobe.

## Individueller Schlussbericht

4. Um eine mögliche Bewegung des Hindernisses abschätzen zu können, wird die Geschwindigkeit mittels linearer Regression durch die zum Zeitpunkt  $t$  vorliegenden  $S_F$  Phasenübergangspunkte  $[t_i, x_i] \forall t_i \leq t$  in jeder der  $M = 1000$  zufällig erzeugten, unabhängigen und unterschiedlichen Stichproben (Abbildung 6.2.2.16) rekonstruiert. Aufgrund von Bedingung (6.2.2.1) wird angenommen, dass zum Zeitpunkt  $t$  mindestens zwei  $S_F$  Phasenübergangspunkte erkannt wurden. Somit ergibt sich für die rekonstruierte Geschwindigkeit:

$$v_{\text{rec}}(K) = \frac{\sum_{i=1}^K (t_i - \bar{t}) \cdot (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^K (t_i - \bar{t})^2} \quad (6.2.2.2)$$

$$\text{mit } K = K(t); \bar{t} = \left(\frac{1}{K}\right) \sum_{i=1}^K t_i \text{ und } \bar{x} = \left(\frac{1}{K}\right) \sum_{i=1}^K x_i$$

5. Mittels (4.2) lässt sich gleichzeitig eine Position als zeitliche Funktion rekonstruieren. Diese wird mit  $x_{\text{rec}}$  bezeichnet und es ergibt sich:

$$x_{\text{rec}}(t) = v_{\text{rec}}(K) \cdot (t - \bar{t}) + \bar{x} \quad (6.2.2.3)$$

6. Für die rekonstruierte Geschwindigkeit  $v_{\text{rec}}(K)$  lässt sich ab  $K > 2$  ein entsprechender Standardfehler errechnen:

$$\sigma_{\text{rec}}(K) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x}_{\text{rec}}(t_i))^2}{(K-2) \sum_{i=1}^K (t_i - \bar{t})^2}} \quad (6.2.2.4)$$

7. Unter Verwendung der rekonstruierten Geschwindigkeit  $v_{\text{rec}}$  (6.2.2.2) und dem zugehörigen Standardfehler  $\sigma_{\text{rec}}$  (6.2.2.4) lässt sich eine Bedingung finden, zu der die Engstelle als bewegt angesehen werden kann. Man kann daher von einer realen, positiven Geschwindigkeit  $v > 0$  des Hindernisses ausgehen. Diese Bedingung, dass die Geschwindigkeit des MB als tatsächlich positiv unter Berücksichtigung eines Konfidenzniveaus von  $p_\alpha$  angenommen werden kann, lautet:

$$v_{\text{rec}}(K) - t_{\alpha, K-2}^{(1)} \cdot \sigma_{\text{rec}}(K) > 0 \text{ km/h} \quad (6.2.2.5)$$

Hierbei kann der Wert für  $t_{\alpha, K-2}^{(1)}$  aus der Quantilentabelle der einseitigen Student'schen t-Verteilung mit  $K - 2$  Freiheitsgraden und bei gegebenem Konfidenzniveau  $p_\alpha$  gefunden werden. Der Parameter  $\alpha$  ist hierbei  $\alpha = 1 - p_\alpha \ll 1$  und wird auch als Irrtumsniveau bezeichnet.  $K_{\text{MB}}$  bezeichnet den Wert  $K = K(t_{\text{MB}})$ , ab dem die Bedingung (6.2.2.5) für alle Zeitpunkte  $t > t_{\text{MB}}$  erfüllt wird. Ist die Bedingung (6.2.2.5) für  $K = K_{\text{MB}}$  erfüllt, lässt sich daraus schlussfolgern, dass die Engstelle als bewegte Engstelle innerhalb des Verkehrsflusses bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  identifiziert ist. Um die oben erwähnte Definition von  $K_{\text{MB}}$  zu erklären, ist anzumerken, dass, falls die Bedingung (6.2.2.5) für einen Wert  $K$  erfüllt wurde, die Bedingung für alle weiteren größeren Werte von  $K$  ebenfalls geprüft werden muss. Sollte bei einem größeren  $K(t)$  die Bedingung (6.2.2.5) ungültig werden, so muss der frühere Wert  $K_{\text{MB}}$  aus den Berechnungen entfernt und ein neuer Wert  $K = K_{\text{MB}}$  gefunden werden, für den die Bedingung (6.2.2.5) erneut Gültigkeit bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  hat. Ferner muss die Bedingung (6.2.2.5) erneut für alle weiteren Werte von  $K(t)$  überprüft werden.

## Individueller Schlussbericht

8. Ebenfalls lassen sich unter Verwendung der rekonstruierten Geschwindigkeit  $v_{rec}$  (6.2.2.2) und dem zugehörigen Standardfehler  $\sigma_{rec}$  (6.2.2.4) sich zwei Bedingungen finden, mit denen die Engstelle als unbewegt oder ortsfest angesehen werden kann. Das heißt, dass man von einer Geschwindigkeit der Engstelle  $v_{SV} = 0$  km/h oder  $-\Delta_{SV} < v_{SV} < \Delta_{SV}$  nahe Null ausgehen kann. Die Bedingungen, dass bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  die Geschwindigkeit gleich oder nahe Null angenommen werden kann, lauten:

$$\begin{aligned} v_{rec}(K) - t_{\alpha, K-2}^{(2)} \cdot \sigma_{rec}(K) &\geq -\Delta_{SV} \text{ und} \\ v_{rec}(K) + t_{\alpha, K-2}^{(2)} \cdot \sigma_{rec}(K) &\leq \Delta_{SV} \end{aligned} \quad (6.2.2.6)$$

Dabei ist  $\Delta_{SV} > 0$  als Konstante gewählt (z.B.  $\Delta_{SV} = 2$  km/h) und beschreibt einen Toleranzbereich für die rekonstruierte Geschwindigkeiten, welche dann dennoch zu einer Identifizierung als ortsfester Engstelle führen soll. Der Wert für den Term  $t_{\alpha, K-2}^{(2)}$  kann der Quantilentabelle der zweiseitigen Student'schen t-Verteilung bei  $K - 2$  Freiheitsgraden und bei gegebenem Konfidenzniveau  $p_\alpha$  gefunden werden. Der Parameter entspricht  $\alpha = 1 - p_\alpha \ll 1$  und wird auch als Irrtumsniveau bezeichnet.  $K_{SV}$  bezeichnet nun den Wert  $K = K(t_{SV})$  ab dem die beiden Bedingungen (5.1) für alle Zeitpunkte  $t > t_{SV}$  erfüllt werden. Sind die Bedingungen (6.2.2.6) für  $K = K_{SV}$  erfüllt, so lässt sich daraus schlussfolgern, dass eine ortsfeste Engstelle innerhalb des Verkehrsflusses bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  identifiziert ist. Wie bereits analog für den Wert  $K_{MB}$  erläutert wurde, muss ebenfalls für  $K_{SV}$  geprüft werden, ob die Bedingungen (6.2.2.6) auch für alle weiteren Werte  $K(t)$  für alle Zeiten  $t > t_{SV}$  gültig bleibt.

9. Es wurde festgestellt, dass die  $S_F$  Phasenübergangspunkte in der Umgebung um die bewegte Engstelle liegen. Diese Engstelle kann durch ein langsam fahrendes Fahrzeug erzeugt werden, welches eine positive Geschwindigkeit hat. Daher sollten die  $S_F$  Phasenübergangspunkte, welche durch FCD-Fahrzeuge erkannt werden, sich im Mittel ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit des langsamen Fahrzeugs ausbreiten. Hieraus lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:
- i. Die Geschwindigkeit der spontan auftretenden Engstelle  $v_{rec}(K(t))$  und ihre Position  $x_{rec}(t)$  lassen sich durch die Formeln (6.2.2.2) und (6.2.2.3) entsprechend abschätzen.
  - ii. Wenn die Bedingung (6.2.2.5) ab einem Zeitpunkt  $t = t_{MB}$  dauerhaft erfüllt wird, kann bei einem entsprechenden Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  festgestellt werden, dass eine bewegte Engstelle im Verkehrsfluss vorliegt.  $t_{MB}$  ist somit der Zeitpunkt in einer Stichprobe, ab dem mit der benötigten Anzahl  $K_{MB}$  an  $S_F$  Phasenübergangspunkten die Engstelle als bewegte Engstelle identifizierbar ist. Die Werte  $t_{MB}$  und  $K_{MB}$  lassen sich somit über  $M = 1000$  Stichproben statistisch untersuchen.
  - iii. Wenn die Bedingungen (6.2.2.6) ab einem Zeitpunkt  $t = t_{SV}$  dauerhaft erfüllt werden, kann bei einem entsprechenden Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  und für einen gewählten Toleranzbereich  $\Delta_{SV}$  festgestellt werden, dass eine ortsfeste Engstelle im Verkehrsfluss vorliegt.  $t_{SV}$  ist somit der Zeitpunkt in einer Stichprobe, ab dem mit der benötigten Anzahl  $K_{SV}$  an  $S_F$  Phasenübergangspunkten die Engstelle als ortsfeste Engstelle identifizierbar ist. Die Werte  $t_{SV}$  und  $K_{SV}$  lassen sich somit über  $M = 1000$  Stichproben statistisch untersuchen.

## Individueller Schlussbericht

10. Die abgeschätzte Geschwindigkeit  $v_{rec}$  (6.2.2.2) und die abgeschätzte Position  $x_{rec}$  (6.2.2.3) werden nach erfolgreicher Identifikation als Verkehrsinformation versandt.

Abbildung 6.2.2.17 und Abbildung 6.2.2.18 zeigen die Anwendung der Methode jeweils für eine Stichprobe im Szenario der bewegten Engstelle und im Szenario des stehen gebliebenen Fahrzeugs:

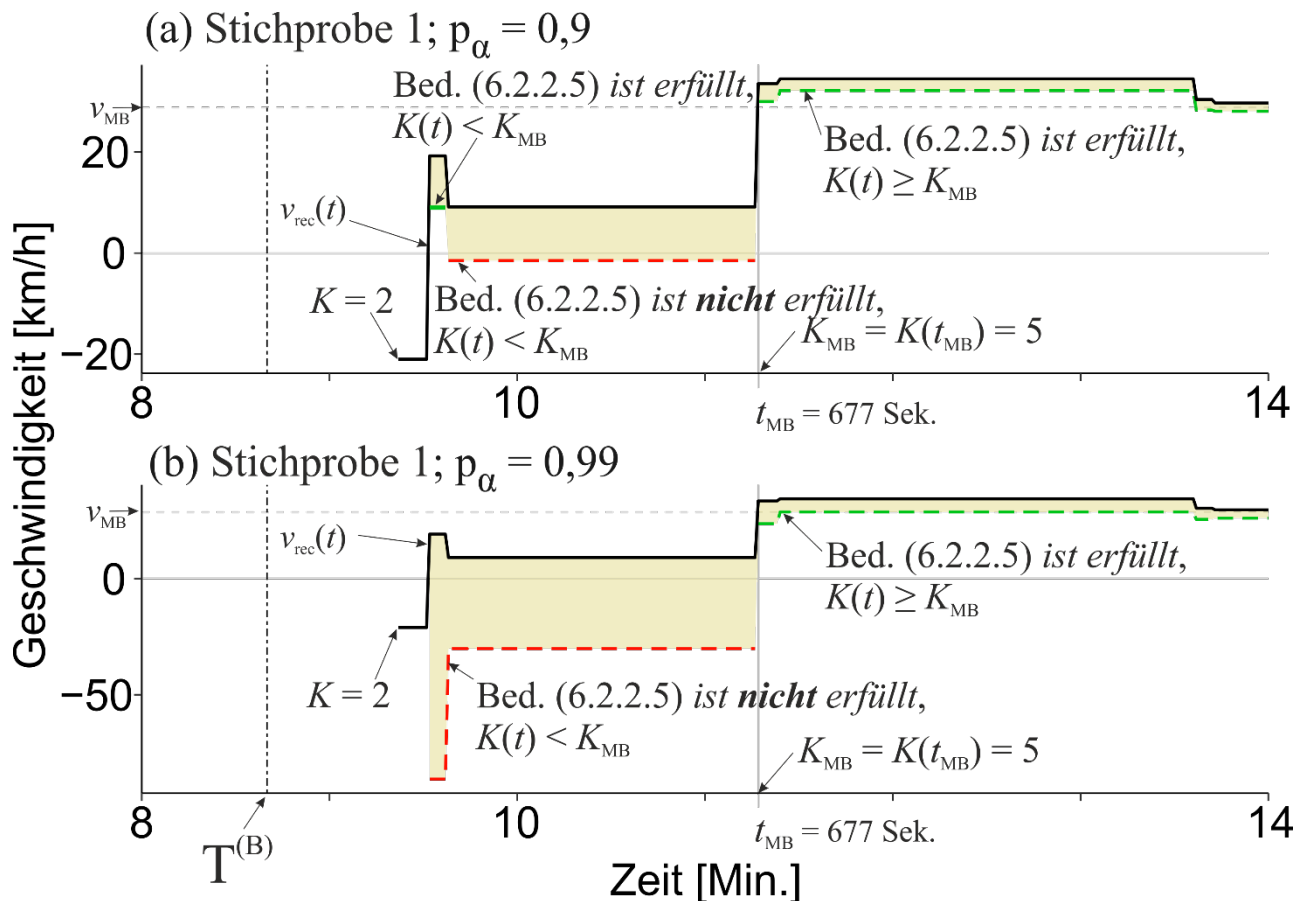


Abbildung 6.2.2.17: Zeitlicher Verlauf der rekonstruierten Geschwindigkeit  $v_{rec}(t)$  für das Szenario der bewegten Engstelle und Vergleich mit dem Term  $t_{\alpha, K-2}^{(1)} \cdot \sigma_{rec}(K)$  aus Bedingung (6.2.2.5) für eine Stichprobe bei einer Durchdringungsrate der FCD Fahrzeuge  $\gamma = 2\%$ . Dargestellt sind unterschiedliche Konfidenzniveaus: (a)  $p_\alpha = 0.9$ . (b)  $p_\alpha = 0.99$ . Gestrichelte Linienzeichnen den Verlauf von  $\Delta_v = v_{rec}(K) - t_{\alpha, K-2}^{(1)} \cdot \sigma_{rec}(K)$  (rot für  $\Delta_v < 0$  und grün für  $\Delta_v > 0$ ).

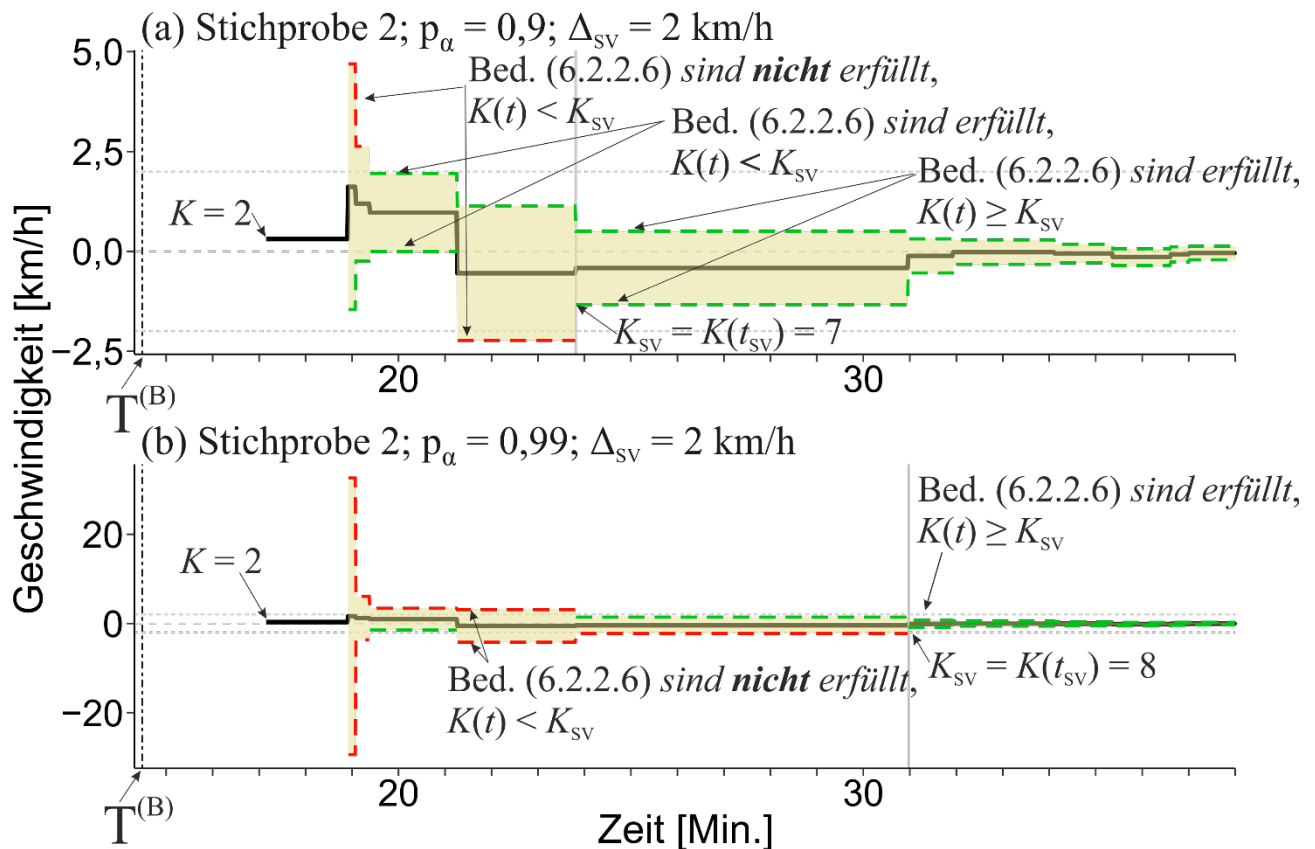


Abbildung 6.2.2.18: Abhängigkeit der kritischen Anzahl  $K_{SV}$  der  $S_F$  Phasenübergangspunkte und der entsprechenden kritischen Zeiten  $t_{SV}$ , die für die Erkennung des stehenden Fahrzeugs (SV) notwendig sind, bei gewählten Parametern  $p_\alpha$  (a)  $p_\alpha = 0,9$ ; (b)  $p_\alpha = 0,99$  für eine Realisation bei einer Durchdringungsrate von  $\gamma = 2\%$  und mit einem Toleranzbereich für die Geschwindigkeit von  $\Delta_{SV} = 2$  km/h.

Wie in den Abbildung 6.2.2.17 und Abbildung 6.2.2.18 dargestellt lassen sich somit für jede Stichprobe bei der bewegten Engstelle Werte  $K_{MB}$  und  $t_{MB}$  oder entsprechend beim stehengebliebenen Fahrzeug Werte  $K_{SV}$  und  $t_{SV}$  ermitteln.

Dabei geben die Werte  $K_{MB}$  und  $K_{SV}$  jeweils Auskunft darüber, wie viele  $S_F$  Phasenübergangspunkte in einer Stichprobe benötigt wurden um die Engstelle jeweils als bewegte oder ortsfeste Engstelle zu identifizieren. Die Werte  $t_{MB}$  und  $t_{SV}$  erlauben eine Untersuchung, wie lange es dauert bis diese Identifikation möglich ist.

Da für jedes Szenario jeweils  $M = 1000$  Stichproben untersucht wurden lassen sich diese Werte statistisch betrachten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abschnitt 6.2.2.6 dieses Berichtes erläutert.

## Individueller Schlussbericht

---

### 6.2.2.6 Statistische Untersuchung der Identifizierungswahrscheinlichkeit für die Erkennung spontan entstehender Engstellen

Es wurde untersucht, wie sich die gewählten Parameter ( $p_\alpha$  und  $\Delta_{SV}$ ) und insbesondere die Durchdringungsrate  $\gamma$  auf die Identifizierung der spontan auftretenden Engstelle auswirken.

Hierfür wurde die Anzahl der Stichproben  $m_{MB}(t)$  (mit  $m_{MB}(t) < M$ ) berechnet, in denen zum Zeitpunkt  $t$  die Bedingung (6.2.2.5) bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  erfüllt ist. Die Anzahl gegenteiliger Fälle, in denen die Bedingung (6.2.2.5) nicht erfüllt ist entspricht dabei  $M - m_{MB}(t)$ .

Folglich gilt für die Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$ , dass zu dem jeweiligen Zeitpunkt  $t$  eine bewegte Engstelle mit dem Konfidenzniveau  $p_\alpha$  identifiziert werden konnte:

$$P_{MB}(t) = \frac{m_{MB}(t)}{M} \quad (6.2.2.7)$$

Analog gilt für die Wahrscheinlichkeit der Identifizierung der spontanen ortsfesten Engstelle:

$$P_{SV}(t) = \frac{m_{SV}(t)}{M} \quad (6.2.2.8)$$

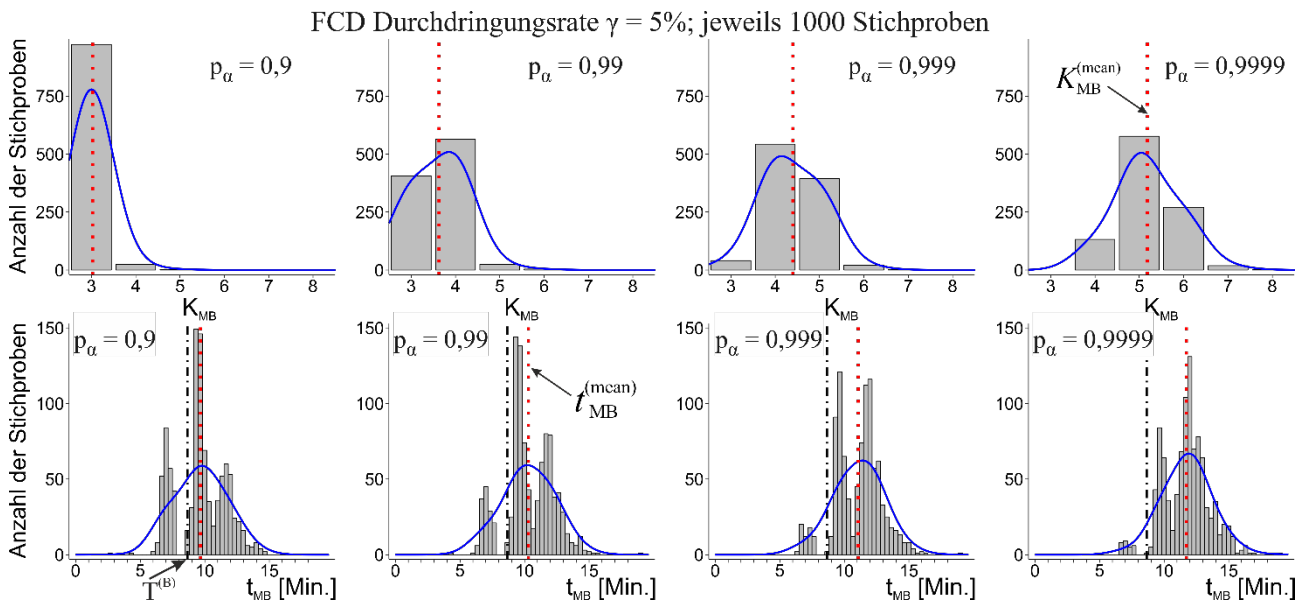
mit  $m_{SV}(t)$  als der Anzahl an Stichproben in denen zum Zeitpunkt  $t$  die Bedingungen (6.2.2.6) bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha$  erfüllt werden.

Für die statistische Untersuchung der Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$  der Identifizierung einer bewegten Engstelle mittels Formel (6.2.2.7) und  $P_{SV}(t)$  der Identifizierung einer spontanen ortsfesten Engstelle mittels Formel (6.2.2.8) wurde die Anzahl der zufällig erzeugten und unabhängigen Stichproben von  $M = 1000$  gewählt. Diese Entscheidung spiegelt eine Abwägung zwischen einem möglichst großen Wert  $M$  für eine hohe Präzision in der statistischen Analyse und einem möglichst kleinen Wert  $M$  für einen moderaten Zeitaufwand der Analysen wieder. Versuche haben gezeigt, dass sich bei  $M = 1000$  die Ergebnisse für eine Aussage zur Zuverlässigkeit der Methode zur Identifizierung mit einer Auflösung besser als 1% erreichen lässt und dabei sich dennoch der Zeitaufwand für die Analysen in akzeptablen Grenzen hält.

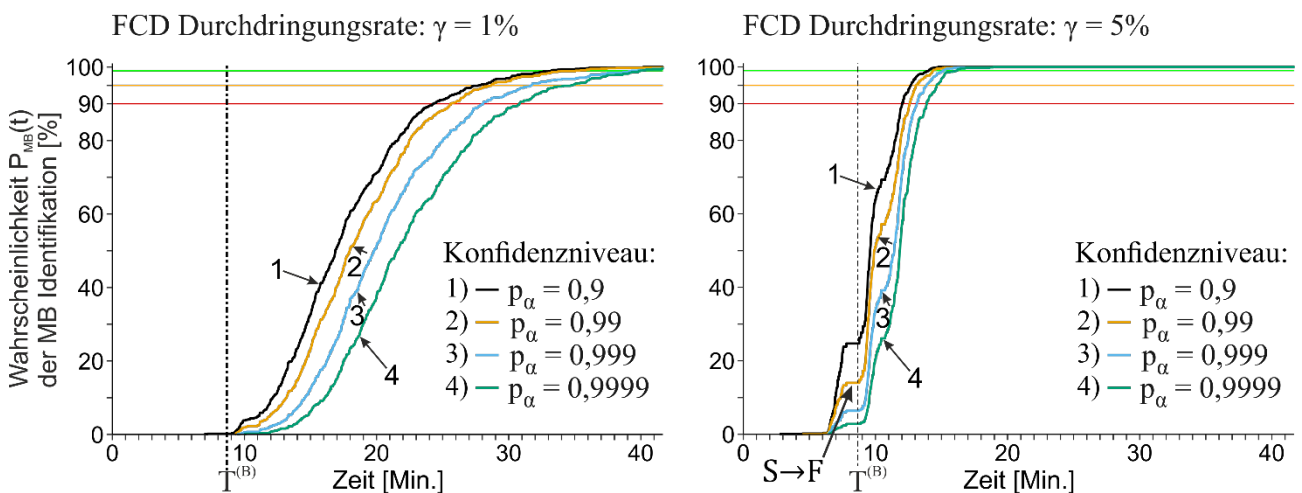


# Individueller Schlussbericht

## 6.2.2.6.1 Ergebnisse für die bewegte Engstelle

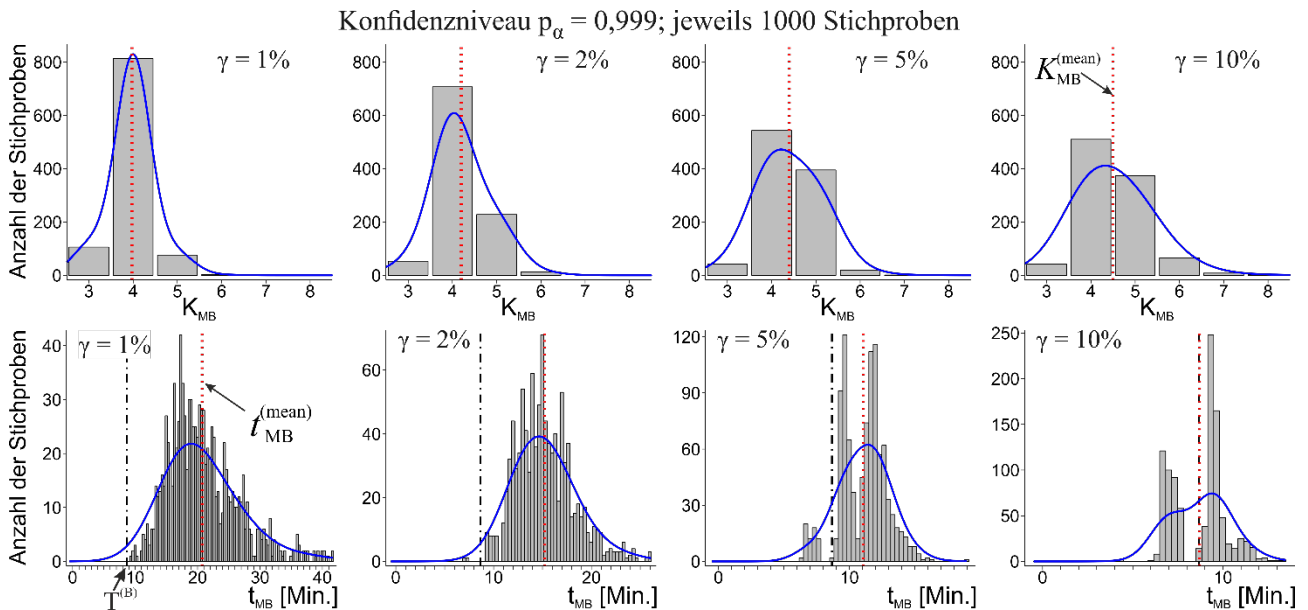


**Abbildung 6.2.2.19:** Histogramme jeweils für die Anzahl  $K_{MB}$  der für die Identifikation der bewegten Engstelle benötigten  $S_F$  Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit  $t_{MB}$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus  $M=1000$  Stichproben bei einer Durchdringungsrate  $\gamma = 5\%$  an FCD Fahrzeugen. Dargestellt sind Histogramme für vier Konfidenzniveaus  $p_\alpha$ .

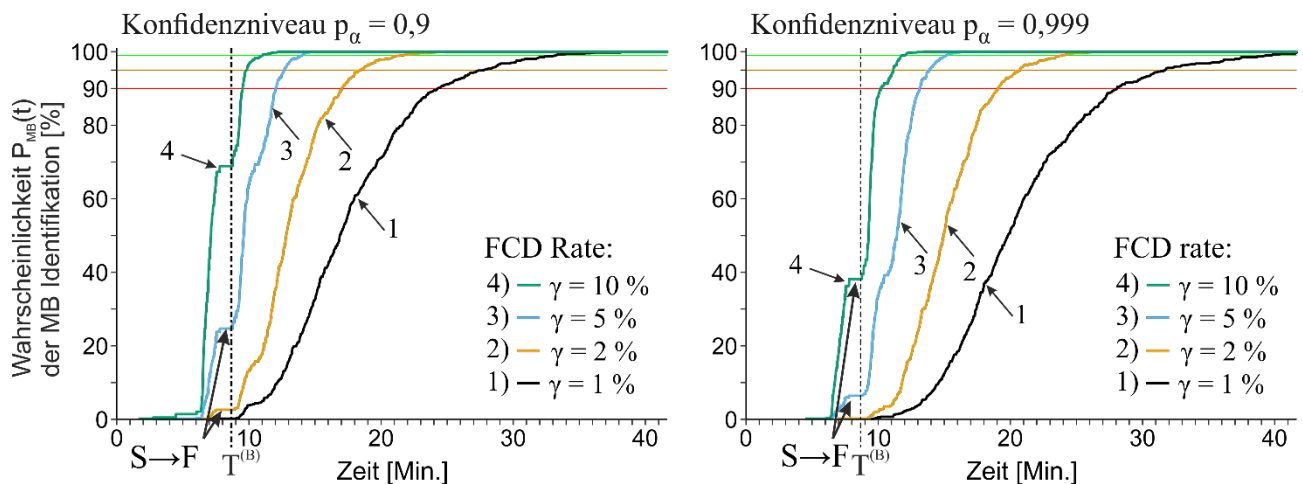


**Abbildung 6.2.2.20:** Vergleich der Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$  der Identifikation der bewegten Engstelle anhand Formel (6.2.2.7) für zwei unterschiedliche Durchdringungsraten an FCD-Fahrzeugen: (a)  $\gamma = 1\%$ . (b)  $\gamma = 5\%$ , abhängig von den gewählten Konfidenzniveaus  $p_\alpha$ : Kurve 1 für  $p_\alpha = 0,9$ ; Kurve 2 für  $p_\alpha = 0,99$ ; Kurve 3 für  $p_\alpha = 0,999$  und Kurve 4 für  $p_\alpha = 0,9999$ . Berechnet aus  $M = 1000$  Stichproben.

# Individueller Schlussbericht



**Abbildung 6.2.2.21:** Histogramme jeweils für die Anzahl  $K_{MB}$  der für die Identifikation der bewegten Engstelle benötigten  $S_F$  Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit  $t_{MB}$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus  $M = 1000$  Stichproben bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha = 0,999$ . Dargestellt sind Histogramme für vier verschiedene FCD-Durchdringungsraten  $\gamma$ .



**Abbildung 6.2.2.22:** Vergleich der Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$  der Identifikation der bewegten Engstelle anhand Formel (6.2.2.7) für zwei unterschiedliche Konfidenzniveaus von  $p_\alpha = 0,9$  und  $p_\alpha = 0,999$ , abhängig von den gewählten FCD-Durchdringungsraten  $\gamma$ : Kurve 1 für  $\gamma = 1\%$ ; Kurve 2 für  $\gamma = 2\%$ ; Kurve 3 für  $\gamma = 5\%$  und Kurve 4 für  $\gamma = 10\%$ .

## Individueller Schlussbericht

---

Folgendes lässt sich aus den Abbildung 6.2.2.19 und Abbildung 6.2.2.21 ablesen:

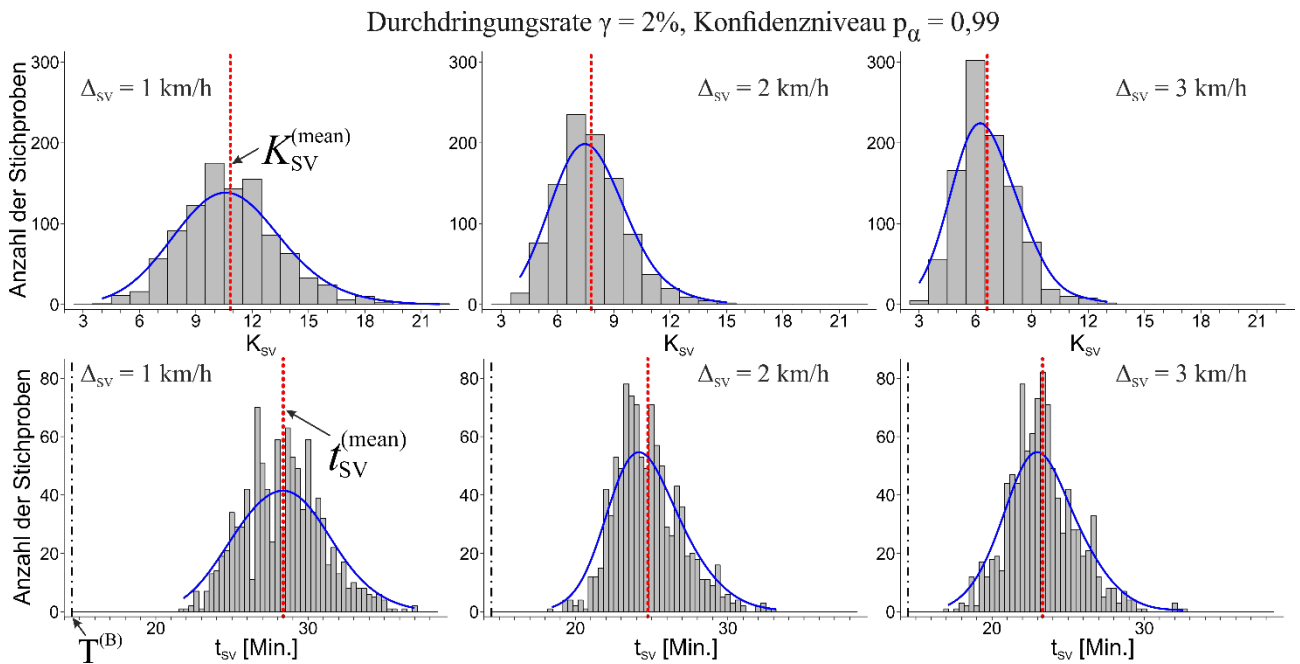
- Erhöht man das gewählte Konfidenzniveau, so benötigt man bei gleicher Durchdringungsrate  $\gamma$  im Schnitt mehr  $S_F$  Phasenübergangspunkte  $K = K_{MB}$  für die Erfüllung der Bedingung (6.2.2.5).
- Gleichzeitig steigt auch die mittlere Zeit an, welche benötigt wird, bis die Zeitpunkte  $t = t_{MB}$  erreicht werden, zu denen die Bedingung (6.2.2.5) erfüllt wird.
- Steigert man die Durchdringungsrate, so werden im Schnitt ebenfalls mehr  $S_F$  Phasenübergangspunkte  $K = K_{MB}$  für die Erfüllung der Bedingung (6.2.2.5) benötigt, jedoch sinkt gleichzeitig die benötigte Zeit deutlich. Das heißt, man benötigt zwar im Mittel eine größere Anzahl  $K = K_{MB}$  an  $S_F$  Phasenübergangspunkten, diese Menge wird aber durch die höhere Dichte an FCD-Fahrzeugen schon zu wesentlich früheren Zeitpunkten erreicht. So lässt sich zum Beispiel erkennen, dass für eine Durchdringungsrate von  $\gamma = 10\%$  viele Werte für  $t = t_{MB}$  bereits vor dem eigentlichen Zeitpunkt des Zusammenbruchs bei  $T^{(B)}$  liegen.

Die Abbildung 6.2.2.20 und Abbildung 6.2.2.22 zeigen die Ergebnisse dieser statistischen Analysen. Es zeigt sich ein mit der Zeit ansteigender Verlauf der Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$  für die Identifizierung der bewegten Engstelle. Dabei ist auch offensichtlich, dass für gleiche Zeitpunkte die Wahrscheinlichkeit deutlich höher ist, wenn die Durchdringungsraten  $\gamma$  der FCD-Fahrzeuge größer gewählt wird. Gleichzeitig ist festzustellen, dass bei der höheren Wahl des Konfidenzniveaus  $p_\alpha$  die Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$  der Identifikation der bewegten Engstelle sinkt.

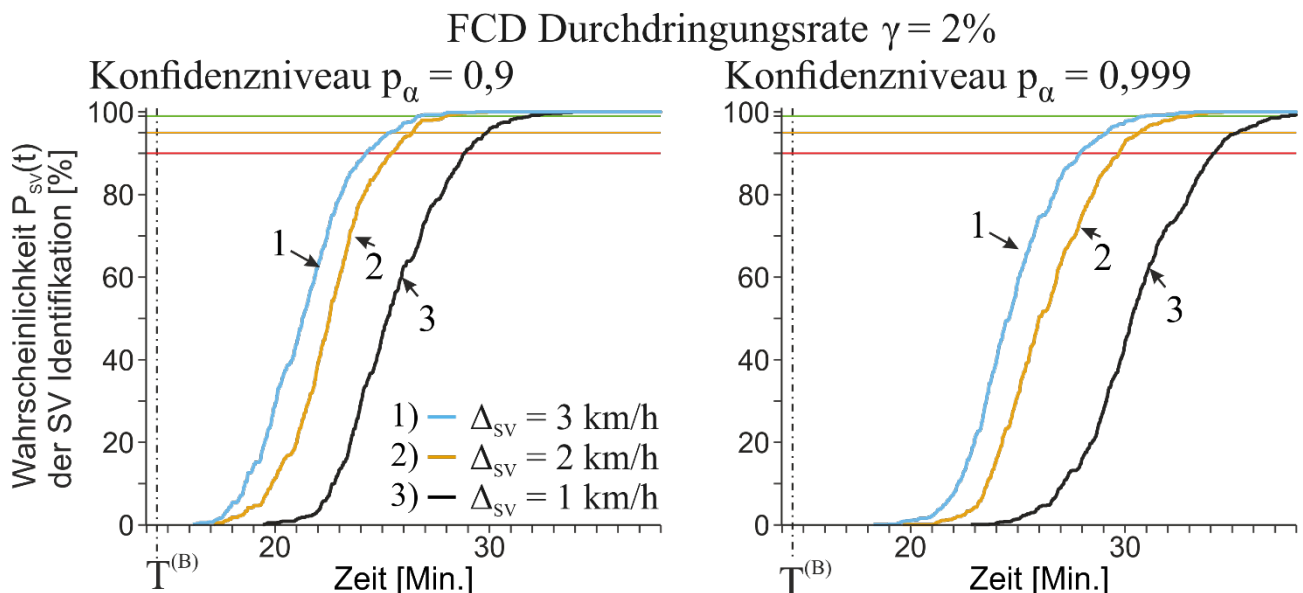
Es gibt in allen Kurven zeitliche Abschnitte, in denen die Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$  nicht ansteigt, sondern ein Plateau ausbildet. Diese Plateaus sind mit „S→F“ in den Abbildungen markiert (z.B. in Abbildung 6.2.2.22 für die Kurve 1 bei  $\gamma = 1\%$ ) und liegt zeitlich vor dem Zeitpunkt  $T^{(B)}$ , also dem Zeitpunkt des vollständigen Verkehrszusammenbruchs an der bewegten Engstelle. Daher lassen sich diese Plateaus mit den bereits beschriebenen Sequenzen von F→S→F Phasenübergängen erklären. Durch den S→F Übergang innerhalb des F→S→F Übergangs kehrt der Verkehr an der Engstelle wieder zum Freifluss zurück. Solange jedoch Freifluss an der Engstelle vorherrscht, können keine weiteren  $S_F$  Phasenübergangspunkte in den Trajektorien der vorbeifahrenden Fahrzeuge erkannt werden. Somit kann auch die Wahrscheinlichkeit  $P_{MB}(t)$  der Identifizierung der bewegten Engstelle in diesem Zeitraum, in dem Freifluss besteht, nicht weiter ansteigen.

# Individueller Schlussbericht

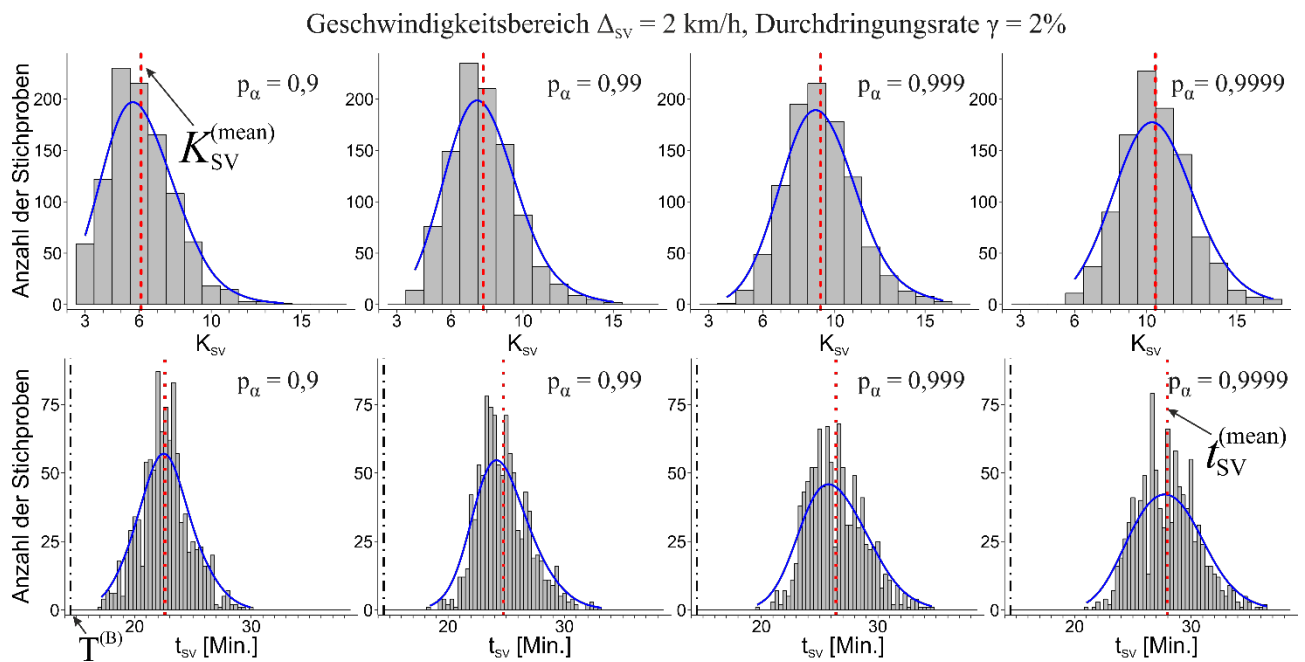
## 6.2.2.6.2 Ergebnisse für die spontan auftretende ortsfeste Engstelle



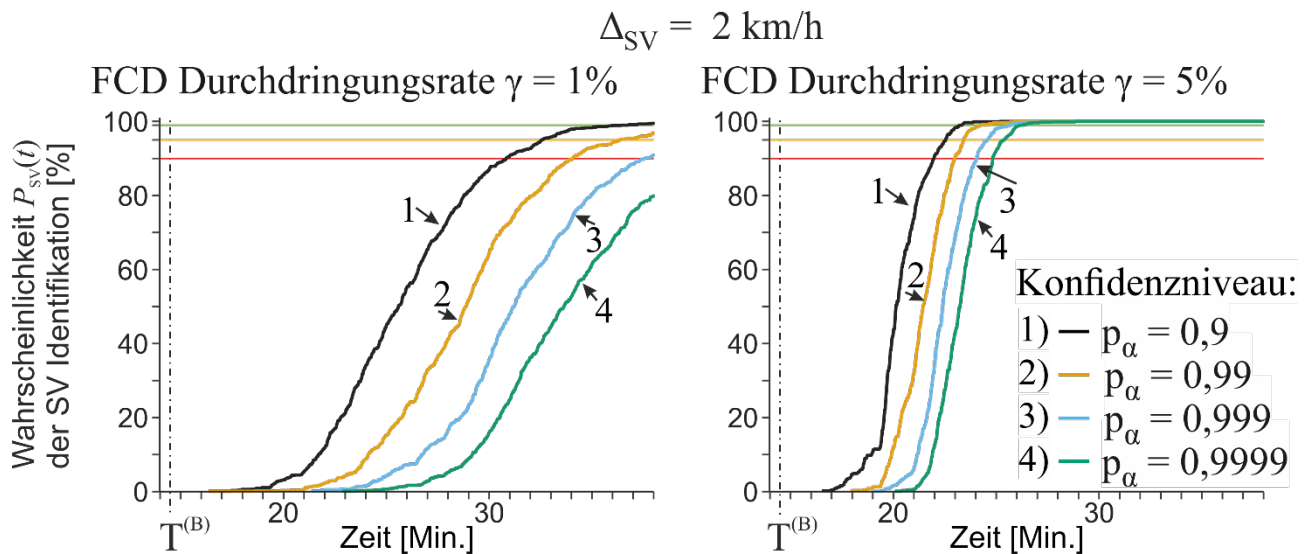
**Abbildung 6.2.2.23:** Histogramme jeweils für die Anzahl  $K_{SV}$  der für die Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle benötigten  $S_F$  Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit  $t_{SV}$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus  $M=1000$  Stichproben bei einer Durchdringungsrate  $\gamma = 2\%$  an FCD Fahrzeugen und für das Konfidenzniveau  $p_\alpha = 0,99$ . Dargestellt sind Histogramme für drei Toleranzbereich  $\Delta_{SV}$  für die Geschwindigkeit.



**Abbildung 6.2.2.24:** Vergleich der Wahrscheinlichkeit  $P_{SV}(t)$  der Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle anhand Formel (6.2.2.8) für zwei unterschiedliche Konfidenzniveaus von  $p_\alpha = 0,9$  und  $p_\alpha = 0,999$  und bei einer Durchdringungsrate  $\gamma = 2\%$  an FCD-Fahrzeugen in Abhängigkeit von der Wahl für den Toleranzbereich  $\Delta_{SV}$  für die Geschwindigkeit: Kurve 1 für  $\Delta_{SV} = 3$  km/h ; Kurve 2 für  $\Delta_{SV} = 2$  km/h; Kurve 3 für  $\Delta_{SV} = 1$  km/h.

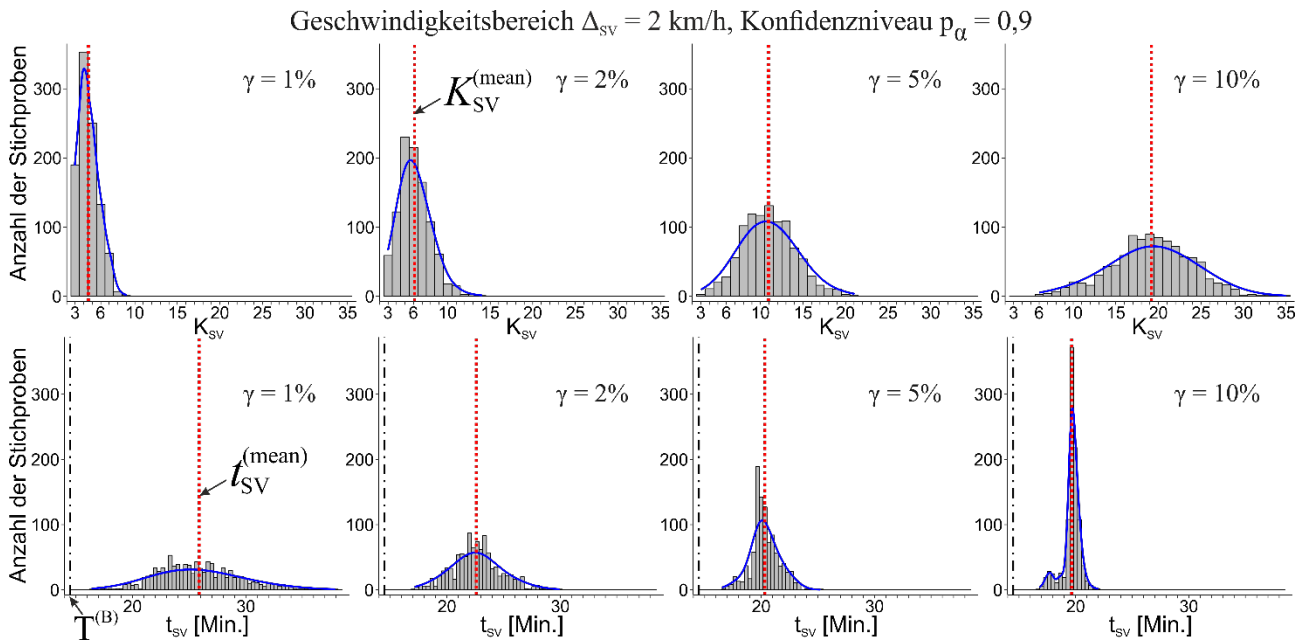


**Abbildung 6.2.25:** Histogramme jeweils für die Anzahl  $K_{SV}$  der für die Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle benötigten  $S_F$  Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit  $t_{SV}$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus  $M=1000$  Stichproben bei einer Durchdringungsrate  $\gamma = 5\%$  an FCD Fahrzeugen. Dargestellt sind Histogramme für vier Konfidenzniveaus  $p_\alpha$ .

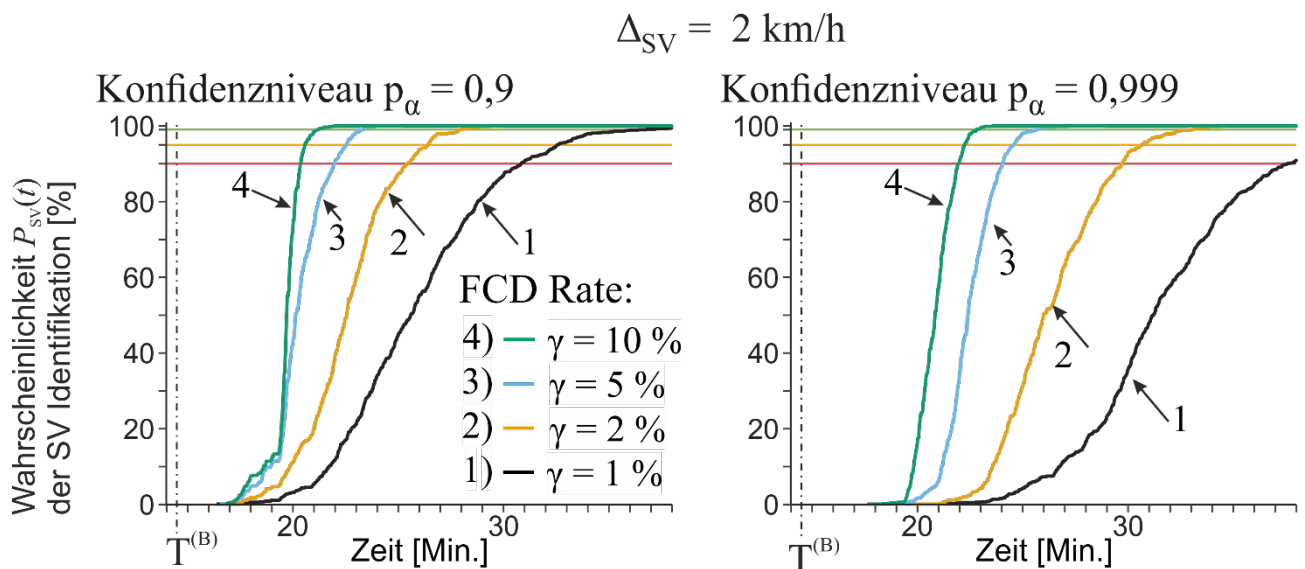


**Abbildung 6.2.26:** Vergleich der Wahrscheinlichkeit  $P_{SV}(t)$  der Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle anhand Formel (6.2.2.8) für zwei unterschiedliche Durchdringungsraten an FCD-Fahrzeugen: (a)  $\gamma = 1\%$ . (b)  $\gamma = 5\%$ , abhängig von den gewählten Konfidenzniveaus  $p_\alpha$ : Kurve 1 für  $p_\alpha = 0,9$ ; Kurve 2 für  $p_\alpha = 0,99$ ; Kurve 3 für  $p_\alpha = 0,999$  und Kurve 4 für  $p_\alpha = 0,9999$ .

# Individueller Schlussbericht



**Abbildung 6.2.2.27:** Histogramme jeweils für die Anzahl  $K_{SV}$  der für die Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle benötigten  $S_F$  Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit  $t_{SV}$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus  $M = 1000$  Stichproben bei einem Konfidenzniveau von  $p_\alpha = 0,9$ . Dargestellt sind Histogramme für vier verschiedene FCD-Durchdringungsraten  $\gamma$ .



**Abbildung 6.2.2.28:** Vergleich der Wahrscheinlichkeit  $P_{SV}(t)$  der Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle anhand Formel (6.2.2.8) für zwei unterschiedliche Konfidenzniveaus von  $p_\alpha = 0,9$  und  $p_\alpha = 0,999$ , abhängig von den gewählten FCD-Durchdringungsraten  $\gamma$ : Kurve 1 für  $\gamma = 1\%$ ; Kurve 2 für  $\gamma = 2\%$ ; Kurve 3 für  $\gamma = 5\%$  und Kurve 4 für  $\gamma = 10\%$ .

## Individueller Schlussbericht

---

Die Ergebnisse der statistischen Analyse für die spontane, ortsfeste Engstelle lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei Verkehr im Freifluss (F) kann ein stehendes Fahrzeug (SV) durch FCD-Fahrzeuge nicht erkannt werden: Die Wahrscheinlichkeit  $P_{SV}(t)$  der Identifizierung des stehenden Fahrzeugs (SV) ist, solange es zu keinem Verkehrszusammenbruch an der Engstelle kommt, also für Zeiten  $t < T^{(B)}$  gleich null. Im untersuchten, simulierten Szenario wurde der Verkehrsfluss so klein gewählt, dass während dem Zeitintervall  $0 < t < T^{(B)}$  keine F→S→F Phasenübergänge auftreten.
- Zwischen dem Zeitpunkt des Verkehrszusammenbruches an der Engstelle  $t = T^{(B)}$  und dem Zeitpunkt  $t_{SV}$ , ab dem die Engstelle als ortsfestes Hindernis dauerhaft erkannt wird, gibt es eine zeitliche Verzögerung. Diese Zeitverzögerung  $\Delta t_{SV} = t_{SV} - T^{(B)}$  hängt von der Anzahl  $K_{SV}$  der benötigten  $S_F$  Phasenübergangspunkte ab, welche für die dauerhafte Identifizierung, entsprechend den Bedingungen (6.2.2.6) in der Stichprobe notwendig sind.
- Die Wahrscheinlichkeit  $P_{SV}(t)$  hängt von den folgenden Parametern der Methode ab. Dem gewählten Parameter  $\Delta_{SV}$  für den Toleranzbereich der Geschwindigkeit, dem Konfidenzniveau  $p_\alpha$  sowie von der Durchdringungsrate  $\gamma$  an FCD-Fahrzeugen. Dabei wirken sich die Parameter folgendermaßen auf die Wahrscheinlichkeit der Identifizierung des stehen gebliebenen Fahrzeugs aus:
  - Die Durchdringungsrate an FCD-Fahrzeugen beeinflusst den Verlauf der Wahrscheinlichkeit. Bei  $\gamma = 1\%$  wird eine Wahrscheinlichkeit  $P_{SV}(t) = 100\%$  erst zum Ende des betrachteten Zeitraums erreicht. Dies gilt obendrein nur für das Konfidenzniveau von  $p_\alpha = 0,9$ . Für größere  $p_\alpha$  erreicht die Wahrscheinlichkeit im betrachteten Zeitraum nie die 100% Marke. Steigert man jedoch die FCD-Durchdringungsrate so sind die Kurvenverläufe deutlich steiler und eine Wahrscheinlichkeit  $P_{SV}(t) = 100\%$  wird deutlich früher erreicht.
  - Möchte man durch eine höhere Wahl des Konfidenzniveaus die Sicherheit der Identifizierung steigern, so geht dies zu Lasten der benötigten Zeit.
  - Der Parameter für den Toleranzbereich der Geschwindigkeits  $\Delta_{SV}$  beeinflusst ebenfalls die Identifizierung. Je genauer die Geschwindigkeiten um 0 km/h eingegrenzt werden, also je kleiner man  $\Delta_{SV}$  wählt, desto mehr verzögert sich eine Identifizierung.
- Bereits ab einer Durchdringungsrate von 2% und geeigneter Wahl von  $\Delta_{SV} = 3$  km/h sowie  $p_\alpha = 0,99$  ist eine Identifizierung deutlich vor Ende des betrachteten Zeitraums zu 100% möglich, also vor dem Einsetzen des allgemeinen Staumusters (GP) zum Zeitpunkt  $t = T_{GP}$ .

## Individueller Schlussbericht

---

### 6.2.2.7 Anwendbarkeit der Identifizierungsmethoden für einen zukünftigen Verkehrsdienst für eine dynamische Streckenfreigabe

Mittels mikroskopischer, stochastischer Verkehrssimulationen, basierend auf der Drei-Phasen Theorie, wurden Szenarien sowohl für eine bewegte Engstelle, als auch für ein dynamisch, spontan auftretendes Hindernis, welches durch ein stehen gebliebenes Fahrzeug entsteht, untersucht. Es wurde analysiert, wie sich physikalische Charakteristiken des Verkehrs an den Engstellen auf die Identifizierbarkeit der Engstellen auswirken.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für die Erkennung einer Engstelle muss es an dieser zu einer ausreichend großen Störung und zu Phasenübergängen in den synchronisierten Verkehr kommen. Nur dann lässt sich ein, im Bereich der Engstelle fixierter,  $S \rightarrow F$  Phasenübergang als  $S_F$  Phasenübergangspunkte in Trajektorien von FCD-Fahrzeugen erkennen. Gleiches kann jedoch auch bei Störungen beobachtet werden, bei denen noch kein Verkehrszusammenbruch stattfindet.
- Das Verhalten ließ sich insbesondere bei  $F \rightarrow S \rightarrow F$  Phasenübergängen beobachten, welche bei leichter Erhöhung des Verkehrsflusses an einer bewegten Engstelle zustande kommen. Durch diese, zum Teil in Sequenzen, auftretenden  $F \rightarrow S \rightarrow F$  Phasenübergänge lassen sich  $S_F$  Phasenübergangspunkte im Bereich der Engstelle erkennen, noch bevor ein Zusammenbruch des Verkehrs an der Engstelle stattfindet. Dies bedeutet, dass die Identifizierung einer Engstelle eben auch dann schon möglich sein kann, wenn noch kein Verkehrszusammenbruch an der Engstelle auftritt. In zeitlichen Intervallen zwischen einzelnen  $F \rightarrow S \rightarrow F$  Phasenübergängen befindet sich der Verkehr am Hindernis jedoch im Freifluss, so dass in dieser Zeit keinerlei Erkennung möglich ist.
- Die zweite physikalische Eigenschaft des Verkehrs an der Engstelle lässt sich in Schwankungen der Positionen der  $S_F$  Phasenübergangspunkte feststellen. Es stellt sich heraus, dass diese Schwankungen klar mit Oszillationen der Geschwindigkeit des synchronisierten Verkehrs stromaufwärts der Engstelle korrelieren. Je stärker die Geschwindigkeit vor der Engstelle einbricht, desto weiter stromabwärts werden die  $S_F$  Phasenübergangspunkte ermittelt.
- Durch diese Schwankungen in den Positionen der  $S_F$  Phasenübergangspunkte wird die Qualität einer Abschätzung der Geschwindigkeit und des Ortes bei einer Rekonstruktion der Engstelle gemindert.
- Die an der bewegten Engstelle beobachteten Charakteristiken entsprechen dabei denen, welche sich bei einer ortsfesten Engstelle beobachten lassen.

Mit diesem Verständnis wurden geeignete Methoden entwickelt, um die jeweiligen Engstellen identifizieren und auch untereinander differenzieren zu können. Die Methoden beruhen auf Zeitreihen von  $S_F$  Phasenübergangspunkten, welche aus Trajektorien von FCD-Fahrzeugen stammen. Hierfür werden zufällig Fahrzeuge der Simulationen als FCD Fahrzeuge, entsprechend der Durchdringungsrate ausgewählt. Aus diesen Zeitreihen werden die Geschwindigkeit und Position der jeweiligen Engstelle abgeschätzt. Die Wahrscheinlichkeit der Identifizierung der jeweiligen Engstelle wurde, mit Hilfe von datenübermittelnder FCD-Fahrzeuge im Straßenverkehr bei Durchdringungsraten von 1% - 10%, statistisch untersucht. Für die statistische Analyse sind es jeweils  $M = 1000$  verschiedene, zufällige Stichproben, aus denen die Wahrscheinlichkeit der Identifizierung berechnet wird.



## Individueller Schlussbericht

---

Als Ergebnis bleibt festzuhalten:

- Die Wahrscheinlichkeit der Erkennung einer Engstelle ist eine Funktion der Zeit und abhängig von der Durchdringungsrate an im Verkehr willkürlich verteilten FCD-Fahrzeugen. Je mehr FCD-Fahrzeuge im Verkehr verteilt sind, also je größer die Durchdringungsrate ist, desto schneller steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Identifikation an.
- Ebenfalls bestimmt das für die Methode verwendete Konfidenzniveau  $p$  den Verlauf der Wahrscheinlichkeit. Hier dämpft ein größeres Konfidenzniveau den Anstieg der Wahrscheinlichkeit.
- Bei der Identifizierung des stehen gebliebenen Fahrzeugs (SV) spielt ebenfalls die Toleranz oder die Präzision für kleine Geschwindigkeiten um null eine Rolle für die Wahrscheinlichkeit der Identifikation. Je kleiner die Toleranz SV gewählt wird, desto geringer fällt die Wahrscheinlichkeit einer Identifikation aus.
- Wie oben geschildert, können bei der bewegten Engstelle in Zeiten zwischen  $F \rightarrow S \rightarrow F$  Phasenübergängen keine neuen Informationen erlangt werden. Dies führt zu Plateauphasen im zeitlichen Verlauf der Wahrscheinlichkeit.
- Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass die vorgeschlagenen Methoden durchaus in der Lage sind, selbst bei geringeren Durchdringungsraten 2%, schon nach einer recht kurzer Zeit von weniger als 10 Minuten die Engstelle mit einer Wahrscheinlichkeit größer 50% zu identifizieren.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die vorgestellte Methode vollumfänglich in der Lage ist, sowohl eine bewegte Engstelle als auch eine spontane, ortsfeste Engstelle zu identifizieren. Gleichzeitig lassen sich Engstellen mit dieser Methode auch deutlich unterscheiden. Heutige, real erreichbare Durchdringungsraten im Bereich von 2% an FCD-Fahrzeugen können bereits die Möglichkeit bieten diese Methoden im Alltag anzuwenden und für Echtzeit-Verkehrsdienste zu nutzen.

Im nächsten Schritt sollten die hier vorgestellten Ergebnisse genutzt werden, um die Methoden, mit realen Verkehrsdaten oder in einen tatsächlichen Echtzeit-Verkehrsdienst, zu testen. Dabei muss natürlich berücksichtigt werden, dass es sich bei den vorgestellten Szenarien um vereinfachte Verkehrsstrukturen handelt. Die Anwesenheit von Lastkraftwagen und anderen Verkehrsteilnehmern machen eine Anpassung der Parameter, insbesondere der Schwellenwerte für die Phasenübergangspunkte notwendig. Auch dies bietet Möglichkeiten für weitere Studien. In dieser Arbeit wurden Verkehr mit symmetrischen Spurwechsel-Regeln betrachtet, das heißt, auf beiden Fahrspuren bildet sich in etwa die gleiche Verkehrsdichte aus, es könnte daher durchaus interessant sein, Verkehr mit asymmetrischen Spurwechsel-Regeln, also bei einem Rechtsfahrgebot zu untersuchen.

### 6.2.3 UAP 2.5 Lernende Fahrzeuge

Es wurde ein mikroskopisch stochastisches Modell der Fahrstrategien menschlicher Fahrer in dynamischen Engstellen und anderen anspruchsvollen Fahrsituationen entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells wurde in Simulationen das Verhalten des menschlichen Fahrers, beim Spurwechsel und bei dem Ein- und Ausseren der Fahrzeuge an verschiedenen dynamischen Engstellen und in anderen anspruchsvollen Fahrsituationen (z.B. Auffahrt auf vorfahrtsberechtigter Straße, Überholen der langsamen Fahrzeuge) untersucht.

Es wurde eine Spezifikation der charakteristischen Eigenschaften „lernender“ automatisierter Fahrzeuge in anspruchsvollen Fahrsituationen ausgearbeitet. Diese Spezifikationen wurden aus den charakteristischen Eigenschaften in mikroskopischen Verkehrsdaten abgeleitet.

Entwicklung neuer theoretischer Lösungen für optimierte Regelungsstrategie für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge. Diese Regelungsstrategien dienen zur Optimierung einer autonomen Fahrt im urbanen Umfeld hinsichtlich der Sicherheit und des Komforts.

Die Untersuchungen von real gemessenen mikroskopischen Verkehrsdaten haben gezeigt, dass menschliche Fahrer keine bestimmte Zeitlücke beim Folgen auf den Vordermann anstreben. Dagegen wählt der menschliche Fahrer ein Zeitlücken-Intervall, in welchem er dem vorrausfahrenden Fahrzeug folgt. Diese Eigenschaft des menschlichen Fahrers hat eine gravierende dynamische Wirkung auf den Verkehr in anspruchsvollen Fahrsituationen, wie Simulationen zeigen. Deswegen wurde diese Eigenschaft des menschlichen Fahrers als eine der charakteristischen Eigenschaften „lernender“ automatisierter Fahrzeuge in anspruchsvollen Fahrsituationen ausgearbeitet.

#### 6.2.3.1 Mathematisches Modell für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge

Es wurde ein mathematisches Modell für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge in anspruchsvollen Fahrsituationen entwickelt:

Das Modell besteht aus dem Gleichungs-System:

$$a_n^{(TPACC)} = \begin{cases} K_{\Delta v} (v_{\ell,n} - v_n) & \text{at } g_{safe,n} \leq g_n \leq G_n \\ K_1(g_n - v_n \tau_p) + K_2(v_{\ell,n} - v_n) & \text{at } g_n > G_n \end{cases} \quad (6.2.3.1)$$

Außerdem beinhaltet das Modell spezielle Sicherheit-Bedingungen, die eine Kollision mit anderen Fahrzeugen verhindern:

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= \max(0, \min(v_{free}, v_{c,n}^{(TPACC)}, v_{s,n})), \\ v_{c,n}^{(TPACC)} &= v_n + \tau \max(-b_{max}, \min(\lfloor a_n^{(TPACC)} \rfloor, a_{max})), \\ t &= n\tau, n = 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (6.2.3.2)$$

In diesen Gleichungen ist  $v_{s,n}$  eine Sicherheitsgeschwindigkeit, die nicht überschritten werden darf (und durch die Modellformulierung nicht überschritten werden kann).

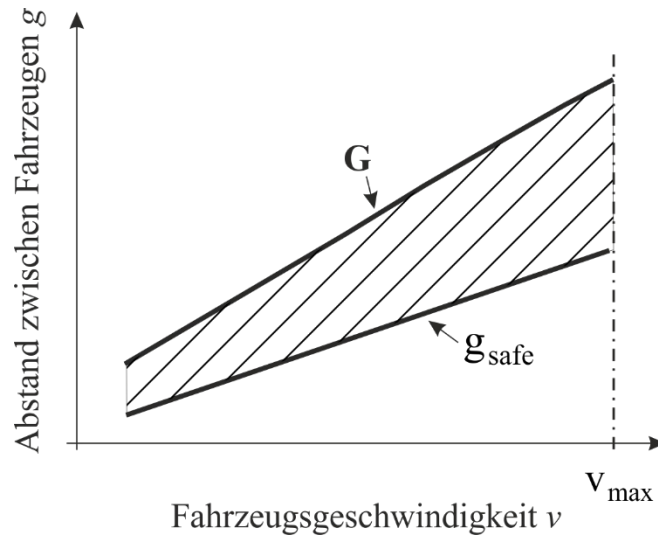
Die Sicherheitsgeschwindigkeit  $v_{s,n}$  wurde aus dem stochastischen mikroskopischen Kerner-Klenov Modell genommen. Wir bezeichnen das Modell als *TPACC-Modell*.

Eine detaillierte Betrachtung und Erklärung des mathematischen TPACC-Modells, das im Projekt MEC-View entwickelt wurde, sind in den Anhängen C bis D in der Veröffentlichung [10] zu finden.

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.3.2 Erklärung des TPACC-Modells für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge

Abbildung 6.2.3.1 illustriert die charakteristischen Eigenschaften „lernender“ automatisierter Fahrzeuge (TPACC-Fahrzeuge) in anspruchsvollen Fahrsituationen.



**Abbildung 6.2.3.1: Qualitative Erklärung zwei charakteristische Abstände  $g$  zwischen einem „lernenden“ automatisierten Fahrzeug (TPACC-Fahrzeug-Modell) und dem vorausfahrenden Fahrzeug:  $g = G$  ist der Synchronisationsabstand.  $g = g_{safe}$  ist der Sicherheitsabstand.**

Es gibt zwei charakteristische Abstände  $g$  zwischen einem automatisch fahrenden Fahrzeug und dem vorausfahrendem Fahrzeug, welche sich mit einer Geschwindigkeit  $v > 0$  bewegen:

- (i) Ein Synchronisationsabstand  $g = G$  und ein Sicherheitsabstand  $g = g_{safe}$  (Abbildung 6.2.3.1). Diesen charakteristischen Abständen entsprechen zwei charakteristische Zeitlücken  $\tau_{Aut}$  des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs: eine Synchronisationszeitlücke  $\tau_{Aut} = \tau_G$  und eine Sicherheitszeitlücke  $\tau_{Aut} = \tau_{safe}$ , wobei  $\tau_G = G/v$  und  $\tau_{safe} = g_{safe}/v$ .
- (ii) Liegt der Abstand  $g$  zwischen den beiden Fahrzeugen innerhalb des Intervalls

$$G \geq g \geq g_{safe}, \quad (6.2.3.3)$$

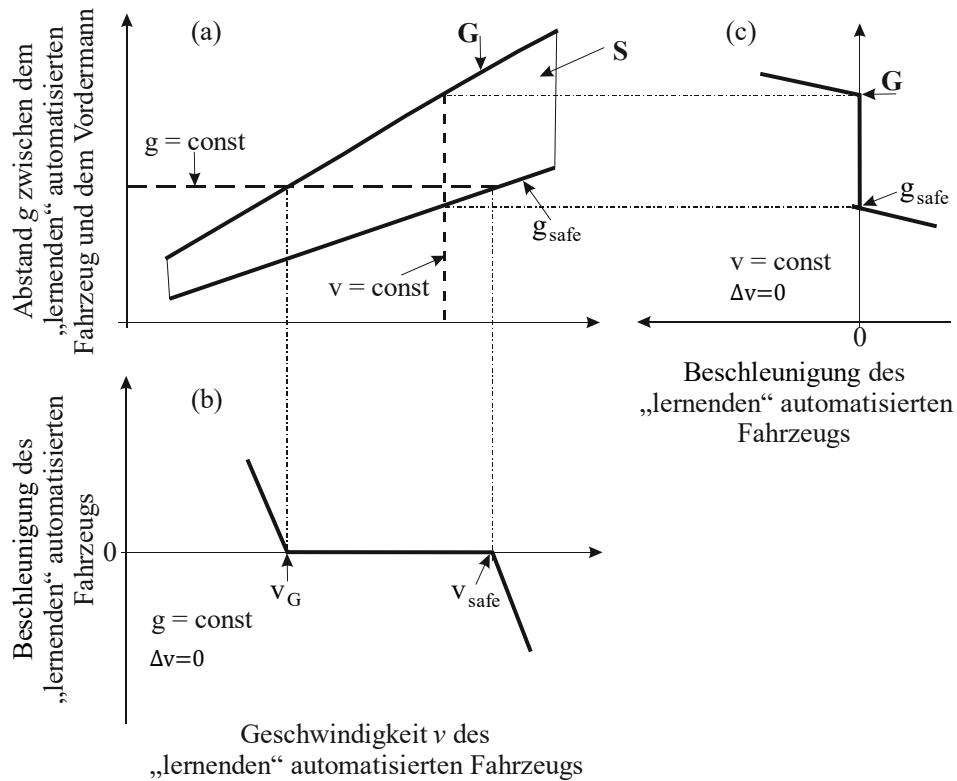
dann beschleunigt das „lernende“ automatisierte Fahrzeug nicht (Abbildung 6.2.3.2), falls die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Fahrzeug des Vordermanns  $v_\ell$  und der Geschwindigkeit des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs  $v$  gleich Null ist:  $\Delta v = v_\ell - v = 0$ . Dies bedeutet, dass das „lernende“ automatisierte Fahrzeug keine bestimmte Zeitlücke zum vorausfahrendem Fahrzeug anstrebt:

Weder beschleunigt noch verzögert das „lernende“ automatisierte Fahrzeug, solange die Zeitlücke  $\tau_{Aut}$  zum Vordermann innerhalb des Intervalls

$$\tau_G \geq \tau_{Aut} \geq \tau_{safe} \quad (6.2.3.4)$$

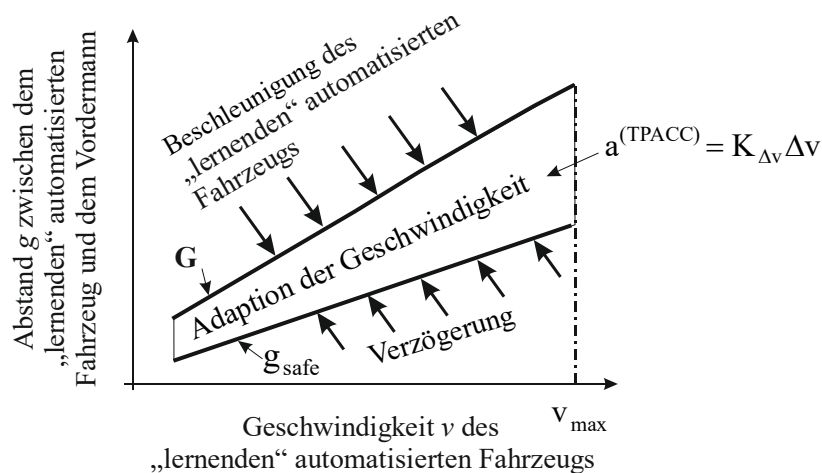
liegt und  $\Delta v = v_\ell - v = 0$  gilt.

# Individueller Schlussbericht



**Abbildung 6.2.3.2: Qualitative Erklärung des dynamischen Verhaltens für ein „lernendes“ automatisiertes Fahrzeug, falls der Abstand  $g$  zwischen dem „lernenden“ automatisierten Fahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug im Intervall  $G \geq g \geq g_{safe}$  (6.2.3.3) liegt und die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs  $v_\ell$  und der Geschwindigkeit des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs  $v$  gleich Null ist:  $\Delta v = v_\ell - v = 0$ .**

Basierend auf diesen charakteristischen Eigenschaften des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs in anspruchsvollen Fahrsituationen wurde ein mikroskopisches Modell für ein lernendes Fahrzeug entwickelt, das die Längsführung des lernenden automatisierten Fahrzeugs ermöglicht, siehe Abbildung 6.2.3.3. Falls die Bedingung (6.2.3.4) erfüllt wird, hängt die Beschleunigung des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs (TPACC-Fahrzeug)  $a^{(TPACC)}$  nicht von der Zeitlücke  $\tau_{Aut}$  zum vorausfahrenden Fahrzeug ab:  $a^{(TPACC)} = K_{\Delta v} \Delta v$ .



**Abbildung 6.2.3.3: Qualitative Erklärung des dynamischen Verhaltens für ein „lernendes“ automatisiertes Fahrzeug.  $a^{(TPACC)}$  ist die Beschleunigung des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs,  $K_{\Delta v}$  ist ein dynamischer Koeffizient des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs.**

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.3.3 Model für „lernende“ automatisierte Fahrzeuge gegenüber klassischem Ansatz

Die Simulationen des TPACC-Modells (6.2.3.1) - (6.2.3.2) der „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge in anspruchsvollen Fahrsituationen, das im Projekt entwickelt wurde, haben gezeigt, dass die „lernende“ automatisierte Fahrzeuge die folgenden Vorteile gegenüber klassischen Ansätzen aufweisen können:

1. Keine Kolonneninstabilität
2. Kleinere Geschwindigkeitsstörungen an Engstellen
3. Kleinere Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruches

Im weiterem werden wir diese Vorteile der „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge gegenüber klassischen Ansätzen näher erläutern:

Der klassische Ansatz zur Abstandregelung (Abkürzung - ACC), der in den automatisierten Fahrzeugen eine wichtige Rolle spielt, kann durch die bekannte Formel repräsentiert werden:

$$a^{(ACC)} = K_1 (g - v\tau_d^{(ACC)}) + K_2 (v_\ell - v), \quad (6.2.3.5)$$

wobei  $a^{(ACC)}$  die Beschleunigung des automatisierten Fahrzeugs ist,  $\tau_d^{(ACC)}$  eine der vorgegebenen Ziel-Zeitlücken zum Vordermann ist. Eine Erklärung der anderen Variablen kann man der Abbildung 6.2.3.4 entnehmen. Durch Formel (6.2.3.5) wird das automatisierte Fahrzeug durch eine vorgegebene Zeitlücke zum Vordermann automatisch gesteuert (Abbildung 6.2.3.5).

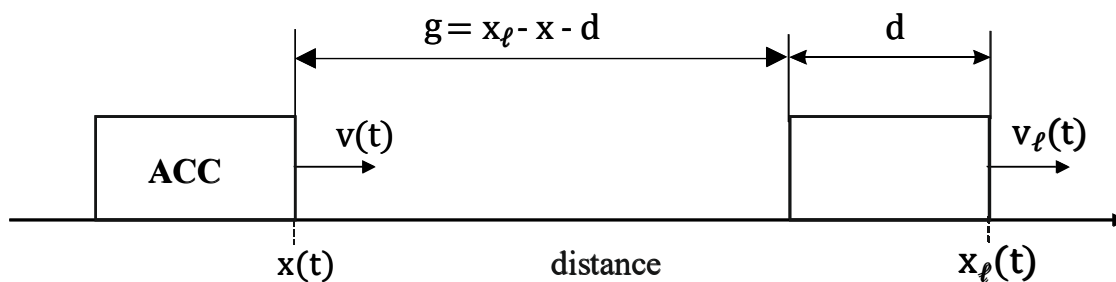


Abbildung 6.2.3.4: Schema zur Erklärung der Formel (6.2.3.5) zur klassischen Abstandregelung (ACC)

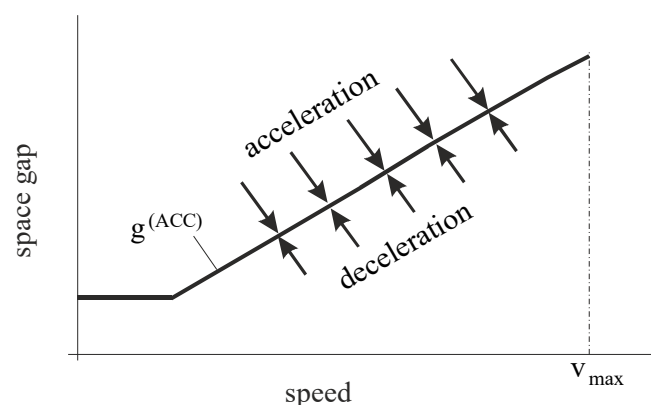
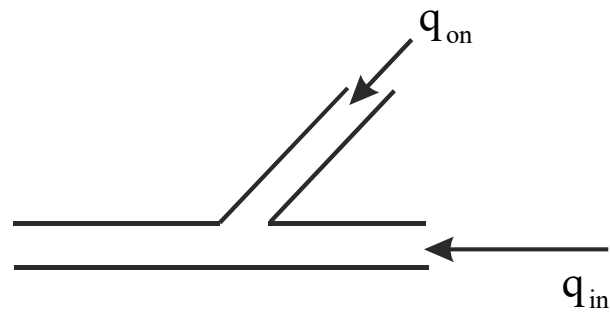


Abbildung 6.2.3.5: Durch Formel (6.2.3.5) wird das automatisierte Fahrzeug auf eine vorgegebene Zeitlücke  $\tau_d^{(ACC)}$  zum Vordermann automatisch gesteuert ( $g^{(ACC)} = v\tau_d^{(ACC)}$ )



**Abbildung 6.2.3.6: Schema zur Erklärung der Simulationen des gemischten Verkehrs an einer Zufahrt**

In den Simulationen des gemischten Verkehrs, der aus der Fahrzeuge, die durch menschlichen Fahrer gesteuert werden, und einem Prozentsatz an automatisierten Fahrzeuge zusammengesetzt ist, wird die folgende anspruchsvolle Fahrsituation untersucht: Fahrt in Richtung zu einer Zufahrt auf eine vorfahrtsberechtigten Straße (Abbildung 6.2.3.6).

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.3.4 Kolonneninstabilität

Unter Anwendung der dynamischen Parameter  $K_1=0.3 \text{ s}^{-2}$ ,  $K_2=K_{\Delta v} = 0.3 \text{ s}^{-1}$ ,  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p = 1.3 \text{ s}$   $\tau_G = \frac{G}{v} = 1.4 \text{ s}$  zeigt der Verkehr mit 100% der automatisierten Fahrzeuge mit der klassischen Abstandregelung (ACC) (6.2.3.5) eine Kolonneninstabilität (Abbildung 6.2.3.7). Unter diesen dynamischen Parametern ist der Verkehr mit 100% der „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge (TPACC-Modell (6.2.3.1) - (6.2.3.2)) [2][3] stabil (Abbildung 6.2.3.8).

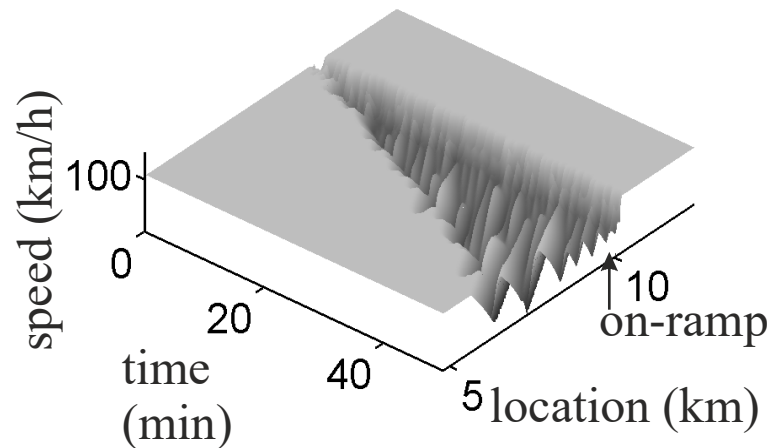


Abbildung 6.2.3.7: Kolonneninstabilität der automatisierten Fahrzeuge mit der klassischen Abstandregelung (ACC) (6.2.3.5) (100% ACC-Fahrzeuge)

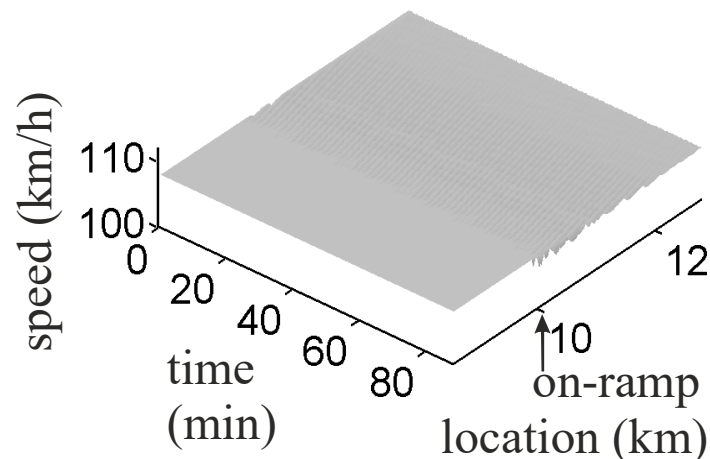


Abbildung 6.2.3.8: Kolonnenstabilität der „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge (TPACC) (6.2.3.1)-(6.2.3.2) (100% TPACC-Fahrzeuge)

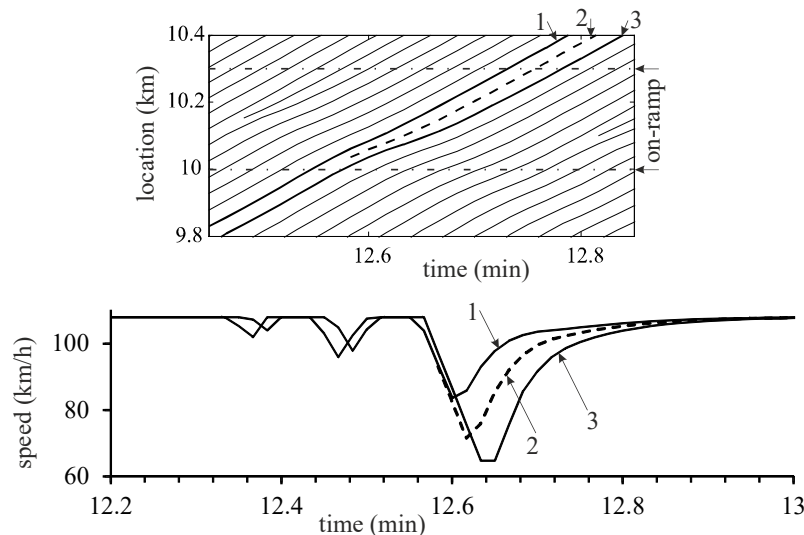
[2] Boris S. Kerner, Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control, Springer, Berlin, New York, 2009.

[3] Boris S. Kerner, Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving, Physica A (2016) DOI: 10.1016/j.physa.2016.01.034.

## Individueller Schlussbericht

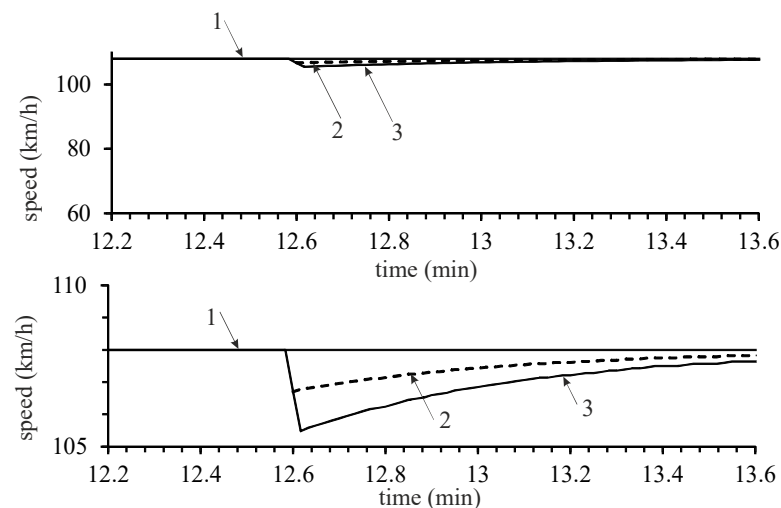
### 6.2.3.5 Geschwindigkeitsstörungen an Engstellen

Wir haben herausgefunden, dass Kolonnen der ACC-Fahrzeuge stabil sind, falls deren dynamische Charakteristika der klassischen Formel (6.2.3.5) entsprechen und diese Kolonnen von ACC-Fahrzeugen eine große Geschwindigkeitsstörung an einer Zufahrt erzeugen (Abbildung 6.2.3.9).



**Abbildung 6.2.3.9: Geschwindigkeitsstörungen an einer Zufahrt, welche die stabilen Kolonnen der automatisierten Fahrzeuge mit der klassischen Abstandregelung (ACC) (6.2.3.5) verursachen (100% ACC-Fahrzeuge)**

Dagegen erzeugen Kolonnen der TPACC-Fahrzeuge eine sehr kleine Geschwindigkeitsstörung an einer Zufahrt (Abbildung 6.2.3.10).



**Abbildung 6.2.3.10: Geschwindigkeitsstörungen an einer Zufahrt, welche die Kolonnen der „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge (TPACC-Modell (6.2.3.1) - (6.2.3.2)) verursachen (100% TPACC-Fahrzeuge)**

Parameter der Simulationen sind:

$$K_1 = 0,3 \text{ s}^{-2}, \quad K_2 = K_{\Delta v} = 0,6 \text{ s}^{-1}, \quad \tau_d^{(ACC)} = \tau_p = 1,3 \text{ s}, \quad \tau_G = \frac{G}{v} = 1,4 \text{ s}.$$



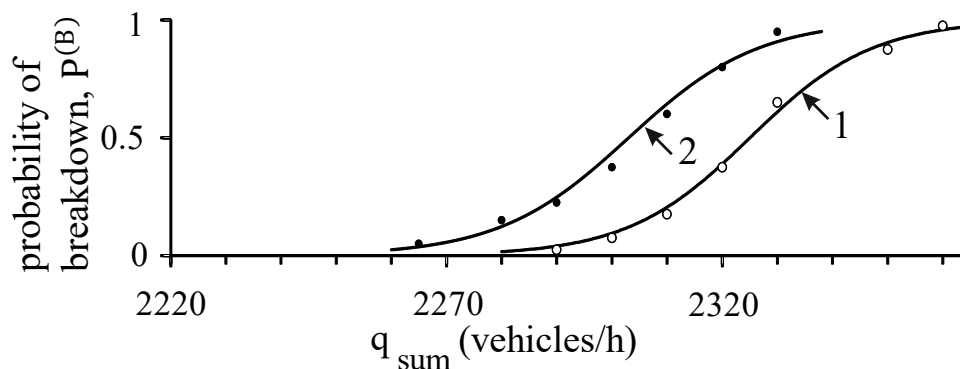
## Individueller Schlussbericht

### 6.2.3.6 Effekte eines einzelnen Autonomen Fahrzeugs auf die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs

Anstatt mit einem Verkehr bei einer vollständigen Durchdringung von 100% an autonomen Fahrzeugen, wie er in den Abschnitten 6.2.3.4 und 6.2.3.5 (Abbildungen Abbildung 6.2.3.7 - Abbildung 6.2.3.10) untersucht wurde, ist in naher Zukunft mit einem Mischverkehr zu rechnen, in dem der Anteil an automatisierten / autonomen Fahrzeugen sehr gering sein wird. Darum wird im Weiteren ein gemischter Verkehr mit einer Durchdringungsrate von 2% an autonomen Fahrzeugen untersucht, wobei diese Fahrzeuge zufällig zwischen menschlich gelenkten Fahrzeugen verteilt sind.

Bei solch kleinen Anteilen an autonomen Fahrzeugen im gemischten Verkehr, kann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Ansammlung / eines Platoons aus mehreren autonomen Fahrzeugen vernachlässigt werden. In anderen Worten, fast jedes autonome Fahrzeug kann als einzelnes autonomes Fahrzeug betrachtet werden, welches nur von menschlich gelenkten Fahrzeugen umgeben ist.

Ziel unserer Studie ist es zu zeigen, dass bereits ein einziges autonom fahrendes Fahrzeug die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs im gemischten Verkehrsfluss an einer Engstelle erheblich beeinflussen kann.

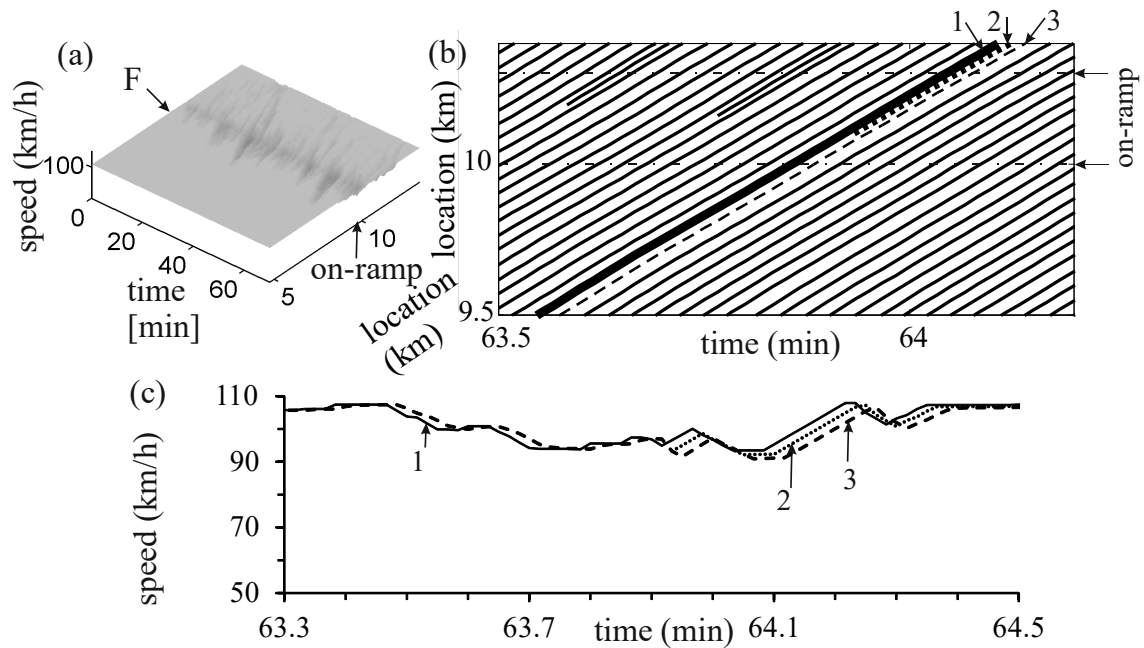


**Abbildung 6.2.3.11: Effekt eines einzelnen autonom fahrenden Fahrzeugs auf die Wahrscheinlichkeit  $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$  des Verkehrszusammenbruchs an einer Engstelle durch eine Auffahrt zu einer einspurigen Straße bei gemischtem Verkehr. Die flussratenabhängigen Funktionen der Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs  $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$  (Kurven 1 und 2) wurden mittels Änderung der Zuflussrate  $q_{\text{on}}$  an der Auffahrt bei feststehendem Verkehrsfluss von  $q_{\text{in}} = 2000$  Fahrzeugen/h berechnet. Kurve 1 entspricht Berechnungen sowohl bei einem Verkehrsfluss ohne autonome Fahrzeuge als auch einem Mischverkehr mit 2% an TPACC-Fahrzeugen. Kurve 2 entspricht einer Berechnung bei 2% ACC-Fahrzeugen mit  $\tau_d^{(ACC)} = 1.3$  s. Simulationsparameter für den ACC entsprechend Gleichung (6.2.3.5) und für den TPACC entsprechend Gleichungen (6.2.3.1)-(6.2.3.2) sind:  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p = 1,3$  s,  $\tau_G = 1,4$  s,  $K_1 = 0,3$  s<sup>-2</sup> und  $K_2 = K_{\Delta v} = 0,6$  s<sup>-1</sup>,  $a_{\text{max}} = b_{\text{max}} = 3$  m/s<sup>-2</sup>,  $v_{\text{free}} = 30$  m/s, (108 km/h), Fahrzeuglänge  $d = 7,5$  m.**

Der Verkehrszusammenbruch im Verkehrsfluss von menschlich gesteuerten Fahrzeugen ist ein F→S Übergang. Der Verkehrszusammenbruch tritt in einem metastabilen Freiflussauf in Bezug auf den F→S Übergang auf. Lokale Geschwindigkeitsstörungen, die durch Fahrzeuginteraktionen in der Nähe des Engpasses verursacht werden, können dabei spontan, bzw. zufällig eine Verkehrsstörung im metastabilen freien Fluss auslösen.

Solche Verkehrsstörungen werden daher *spontane Verkehrszusammenbrüche* (Spontaner F→S Übergang, „spontaneous F→S transition“) genannt.

Je größer hierbei die Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsstörung an der Engstelle ist, desto wahrscheinlicher ist das Auftreten einer Keimzelle des spontanen Verkehrszusammenbruchs, das heißt desto größer ist die Wahrscheinlichkeit einer Verkehrsstörung  $P^{(B)}$  an der Engstelle.



**Abbildung 6.2.3.12:** Erklärung des Ergebnisses dargestellt durch Kurve 1 aus Abbildung 6.2.3.11, dass ein einzelnes TPACC-Fahrzeug keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle durch eine Auffahrt bei gemischtem Verkehr hat.

Geschwindigkeitsstörungen, welche an einer Auffahrt als einem Engpass durch ein einzelnes TPACC-Fahrzeug auftreten (a-c): (a) Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b) Ausschnitte aus Fahrzeug Trajektorien. (c) Mikroskopische Geschwindigkeit entlang einzelner, entsprechend wie in (b) beschrifteter, Trajektorien. In (b,c) Fahrzeug 1 und 2 sind menschlich gesteuerte Fahrzeuge, während Fahrzeug 3 ein TPACC-Fahrzeug ist. Gemischter Verkehrsfluss mit 2% an TPACC-Fahrzeugen. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz./h. Die anderen Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. In (a, b) ist der Bereich des Beschleunigungstreifen der Auffahrt innerhalb des Straßenabschnitts  $x_{on} \leq x \leq x_{on}^{(e)}$  (siehe Appendix D aus [10]) mit „↑ on-ramp ↑“ gekennzeichnet.

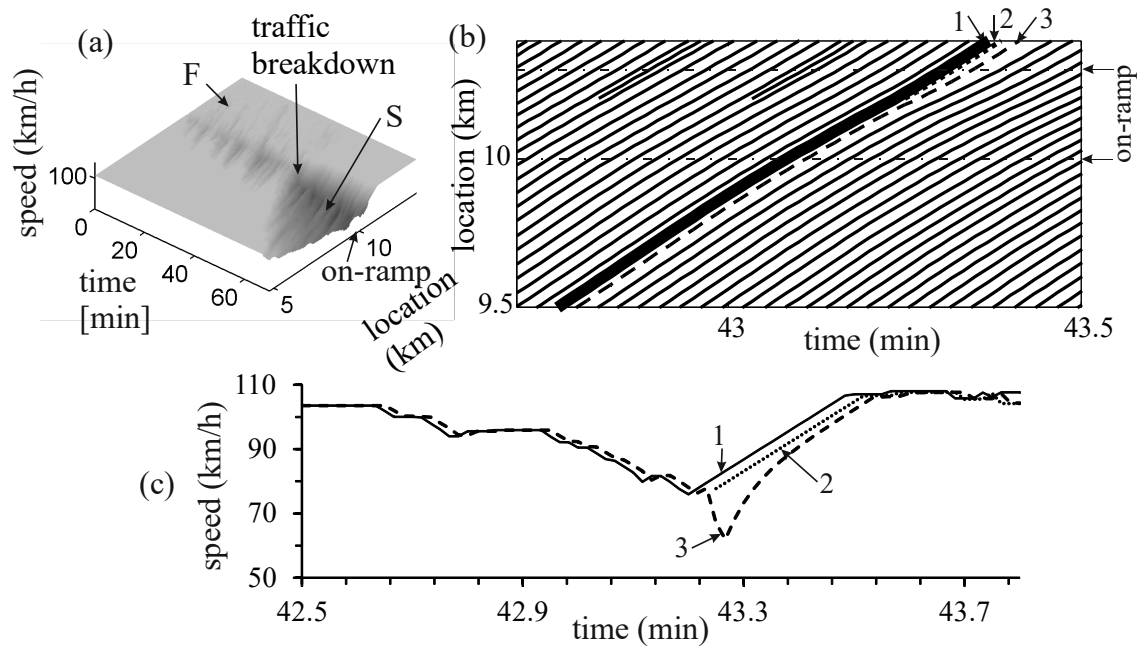
Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit  $P^{(B)}(q_{sum})$  des Verkehrszusammenbruchs im Freifluss an der Engstelle wurde für jeden Datenpunkt bei der entsprechenden Flussrate stromabwärts der Engstelle  $q_{sum} = q_{in} + q_{on}$  jeweils  $N_r = 40$  verschiedene Durchläufe oder Realisierungen der Simulation (*runs*) bei gleichem Beobachtungsintervall von  $T_{ob} = 30$  Minuten durchgeführt (Abbildung 6.2.3.11).

Die verschiedenen Realisationen wurden dabei mit exakt den gleichen Parametern des Modells durchgeführt. Ausschließlich der initiale Wert (*Seed*) der Zufallsfunktion  $rand()$  im Verkehrsflussmodell (siehe Appendix A aus [10]) wurde für jede Realisation geändert.

Es ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs  $P^{(B)}(q_{sum}) = n_r/N_r$ , mit  $n_r$  als der Anzahl an Realisationen in denen es zu einem Verkehrszusammenbruch innerhalb des Beobachtungszeitraums von  $T_{ob}$  gekommen ist. (Eine detailliertere Erklärung der Berechnung der flussratenabhängigen Wahrscheinlichkeit  $P^{(B)}(q_{sum})$  findet sich in Buch [1])

[1] Boris S. Kerner, The Physics of Traffic, Springer, Berlin, New York, 2004.

[10] Boris S. Kerner. „Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science“. Springer, 2017



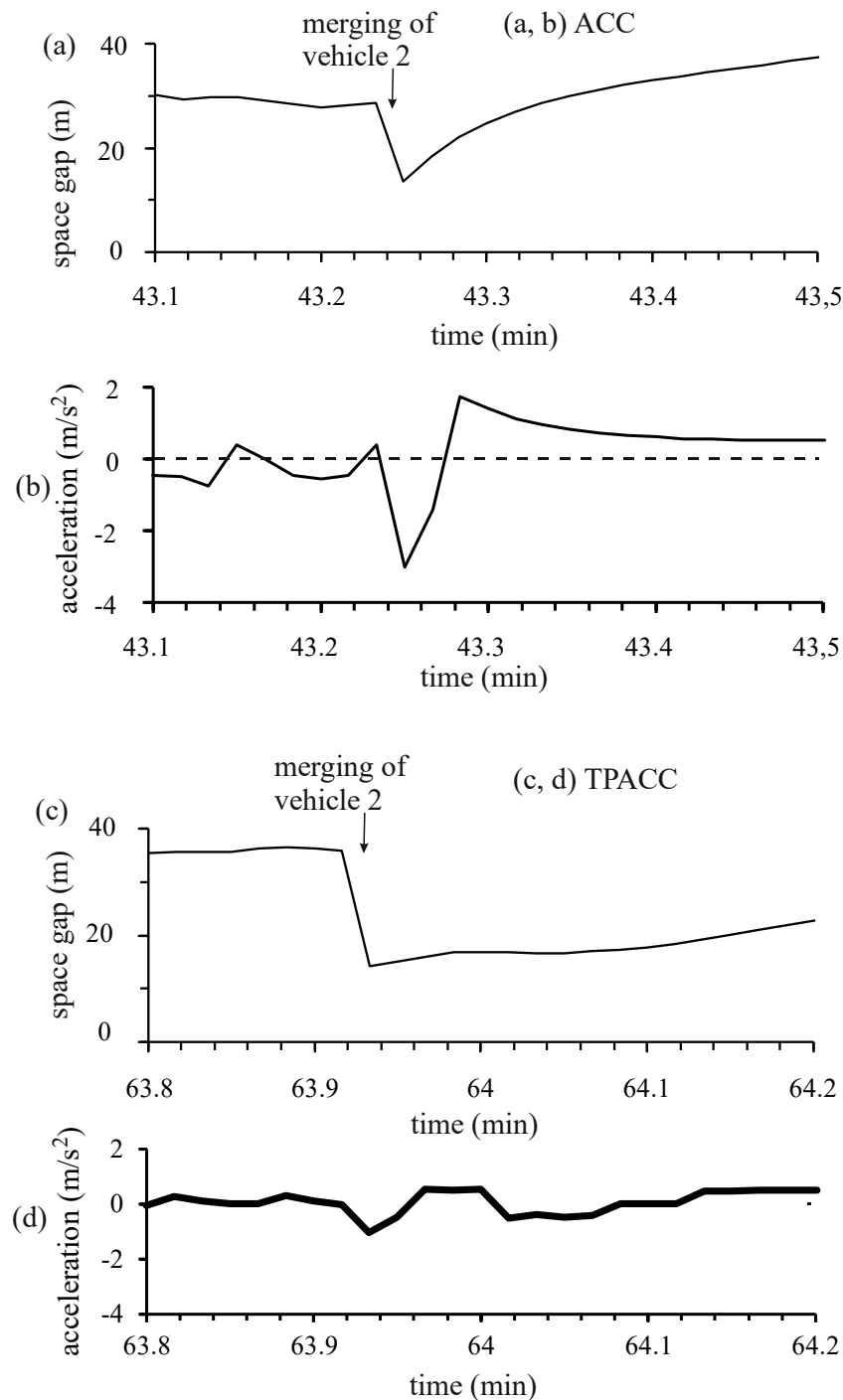
**Abbildung 6.2.3.13:** Erklärung des Ergebnisses dargestellt durch Kurve 2 aus Abbildung 6.2.3.11, dass ein einzelnes klassisches ACC-Fahrzeug einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle durch eine Auffahrt bei gemischtem Verkehr hat. Geschwindigkeitsstörungen, welche an einer Auffahrt als einem Engpass durch ein einzelnes ACC-Fahrzeug auftreten (a-c): (a) Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b) Ausschnitte aus Fahrzeug Trajektorien. (c) Mikroskopische Geschwindigkeit entlang einzelner, entsprechend wie in (b) beschrifteter, Trajektorien. In (b,c) Fahrzeug 1 und 2 sind menschlich gesteuerte Fahrzeuge, während Fahrzeug 3 ein klassisches ACC-Fahrzeug ist. Gemischter Verkehrsfluss mit 2% an ACC-Fahrzeugen. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz/h. Die anderen Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. In (a, b) ist der Bereich des Beschleunigungstreifen der Auffahrt innerhalb des Straßenabschnitts  $x_{on} \leq x \leq x_{on}^{(e)}$  (siehe Appendix D aus [10]) mit „ $\uparrow$ on-ramp $\uparrow$ “ gekennzeichnet. In (a) bezeichnen F – Freifluss und S – synchronisierten Verkehrsfluss.

Einzelne TPACC-Fahrzeuge, welche sich in einem solchen Mischverkehr bewegen verursachen nur sehr kleine Geschwindigkeitsstörungen an der Engstelle (Abbildung 6.2.3.12(a-c)). Tatsächlich wurde herausgefunden, dass sich die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs bei Mischverkehr mit TPACC-Fahrzeug im Vergleich zu Verkehr, welcher nur aus menschlich gelenkten Fahrzeugen besteht, nicht verändert (Kurve 1 in Abbildung 6.2.3.11). Demnach haben einzelne TPACC-Fahrzeuge keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle.

Im Gegensatz zu TPACC-Fahrzeugen haben einzelne klassische ACC-Fahrzeuge einen deutlichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle: Die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs kann zunehmen, selbst wenn nur  $\gamma = 2\%$  an klassischen ACC-Fahrzeugen im gemischten Verkehr verteilt sind (Kurve 2 in Abbildung 6.2.3.11). Dies liegt daran, da bereits ein einzelnes ACC-Fahrzeug einen Verkehrszusammenbruch auslösen kann (Abbildung 6.2.3.13(a, b)).

Diese Verschlechterung des Verkehrsflusses durch klassisches autonomes Fahren erklärt sich durch das Auftreten einer Geschwindigkeitsstörung mit großer Amplitude, die durch ein klassisches ACC-Fahrzeug an der Engstelle verursacht wird (gestrichelte Fahrzeugtrajektorie 3 in Abbildung 6.2.3.13(b, c)).

**6.2.3.7 Erklärung für den Effekt einzelner autonomer Fahrzeuge auf die Geschwindigkeitsstörung an einer Engstelle**



**Abbildung 6.2.3.14: Erklärung der Geschwindigkeitsstörungen, welche durch die Fahrt eines einzelnen autonom fahrenden Fahrzeugs durch die Engstelle verursacht werden.**

**ACC (a, b):** Zeitfunktionen der Raumlücke  $g(t)$  (a) und der Beschleunigung (Abbremsung) des ACC-Fahrzeugs (b) bezogen auf die Fahrzeugtrajektorie 3 in Abbildung 6.2.3.13(b, c).

**TPACC (c, d):** Zeitfunktionen der Lücke  $g(t)$  (c) und der Beschleunigung (Verzögerung) des TPACC-Fahrzeugs (d) bezogen auf die Fahrzeugtrajektorie 3 in Abbildung 6.2.3.12(b, c). Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.

## Individueller Schlussbericht

Das Auftreten sehr unterschiedlicher Amplituden von lokalen Geschwindigkeitsstörungen, welche durch die Fahrt eines einzelnen klassischen ACC- und TPACC-Fahrzeugs durch den Engpass verursacht werden (vergleiche gestrichelte Fahrzeugtrajektorien 3 in Abbildung 6.2.3.13(b, c) und Abbildung 6.2.3.12(b, c)), kann verstanden werden, wenn wir Zeitfunktionen der Raumlücke  $g(t)$  und der Beschleunigung (Verzögerung) der ACC- und TPACC-Fahrzeuge betrachten (Abbildung 6.2.3.14).

Es ist zu erkennen, dass nach der abrupten Abnahme der Raumlücke  $g(t)$  durch das Einscheren von Fahrzeug 2 (in Abbildung 6.2.3.14 (a, c) als "merging of vehicle 2" bezeichnet) sowohl das ACC-Fahrzeug als auch das TPACC-Fahrzeug abbremsen, um die Raumlücke  $g(t)$  zu vergrößern. Das Abbremsen des ACC-Fahrzeugs (Abbildung 6.2.3.14(b)) ist jedoch erheblich stärker als das des TPACC-Fahrzeugs (Abbildung 6.2.3.14(d)). Die starke Bremsung des ACC-Fahrzeuges erklärt die starke Geschwindigkeitsreduzierung des ACC-Fahrzeuges, welche in Trajektorie 3 in Abbildung 6.2.3.13(c) gezeigt wird.

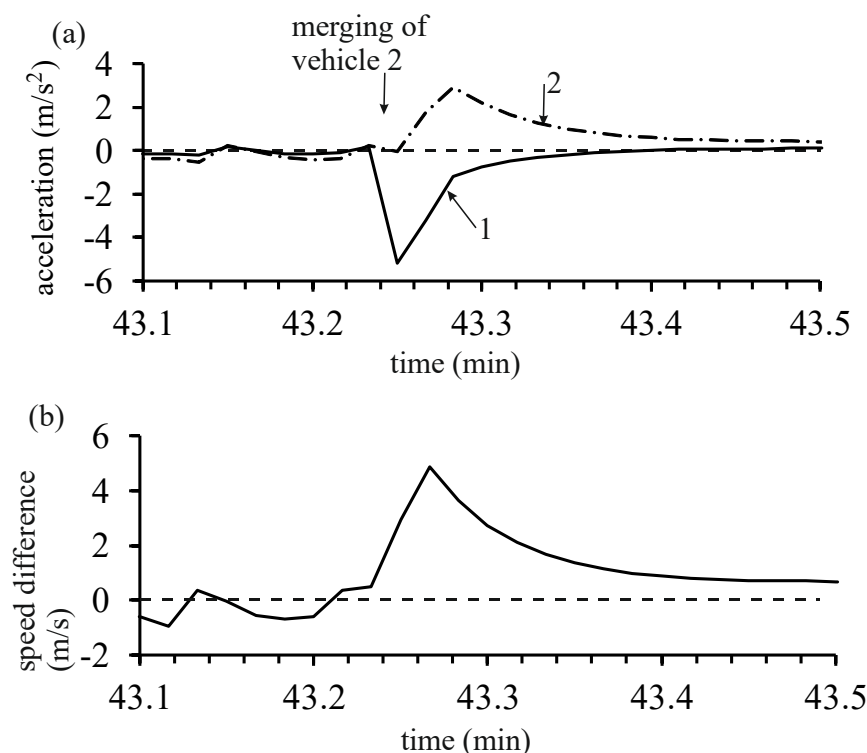


Abbildung 6.2.3.15: Fortsetzung von Abbildung 6.2.3.14(a, b):

(a) Bestandteile der Formel (6.2.3.5) als Zeitfunktionen: Die durchgezogene Kurve 1 ist die Zeitabhängigkeit des Terms  $K_1(g - v\tau_d^{(ACC)})$  und die gestrichelt gepunktete Kurve 2 ist die Zeitabhängigkeit des Terms  $K_2(v_\ell - v)$ .

(b) Relativgeschwindigkeit zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug und dem ACC-Fahrzeug:

Es ist zu beachten, dass die durch  $K_1(g - v\tau_d^{(ACC)})$  in (6.2.3.5) berechnete Verzögerung einen großen negativen Wert von etwa  $-5,2 \text{ m/s}^2$  annimmt. Man beachte, dass solange  $v(t) \leq v_s(t)$  erfüllt ist, in den ACC- und TPACC-Modellen eine Begrenzung des Bremsvermögens auf den Wert  $-3 \text{ m/s}^2$  vorliegt. Dies erklärt die maximale Abbremsung des ACC-Fahrzeuges um  $-3 \text{ m/s}^2$  wie in Abbildung 6.2.3.14(b) dargestellt. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.

Um dieses sehr unterschiedliche mikroskopische dynamische Verhalten von ACC- und TPACC-Fahrzeugen zu verstehen, sollte erwähnt werden, dass es in den Modellen von ACC- und TPACC-Fahrzeugen (siehe Anhängen B bis E in der Veröffentlichung [10]) eine sichere Geschwindigkeit  $v_s$  gibt, die von der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs  $v_\ell$  und von der räumlichen Lücke  $g(t)$  zwischen den Fahrzeugen abhängt:

## Individueller Schlussbericht

---

Wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit eines autonom fahrenden Fahrzeugs die Bedingung  $v(t) \leq v_s(t)$  erfüllt, dann wird die Beschleunigung (Verzögerung) von autonomen Fahrzeugen durch die Formel (6.2.3.5) für ACC und die Formeln (6.2.3.1) , (6.2.3.2) für TPACC bestimmt.

Es ist zu beachten, dass die Sicherheitsbedingung für die Geschwindigkeit  $v(t) \leq v_s(t)$  equivalent zu der Bedingung  $g(t) \geq g_{safe}(t)$  für den Sicherheitsabstand ist. Aus diesem Grund sollte bei einer Unterschreitung des Sicherheitsabstands  $g(t) < g_{safe}(t)$  die Abbremsung eines autonom fahrenden Fahrzeugs mindestens so stark sein, wie sie sich aus der Formel für die sichere Geschwindigkeit ergibt (siehe Anhang A in der Veröffentlichung [10]).

Dabei ist die Formel für die sichere Geschwindigkeit für alle Fahrzeuge gleich, egal ob diese von Menschen, einem ACC oder einem TPACC gesteuert werden. Die Formulierung für die sichere Geschwindigkeit  $v_s(v_\ell, g)$  garantiert eine kollisionsfreie Bewegung von autonom fahrenden Fahrzeugen.

Es zeigt sich, dass die räumliche Lücke  $g(t)$  aufgrund des Einschlerens von Fahrzeug 2 zwar abrupt abnimmt (in Abbildung 6.2.3.14(a) als „merging of vehicle 2“ bezeichnet), jedoch das Abbremsen des ACC-Fahrzeugs, welches durch die Formel (6.2.3.5) zu einer stärkeren Fahrzeugbremsung (Abbildung 6.2.3.15(a)) führt, als es sich aus der Formel für die sichere Geschwindigkeit  $v_s(v_\ell, g)$  ergibt. Daher wird die nach Formel (6.2.3.5) ermittelte stärkere Verlangsamung des Fahrzeugs angewendet.

Durch das Einschieren von Fahrzeug 2 von der Auffahrt gibt es zwei aufeinander folgende Effekte:

- (i) die abrupte Abnahme der Raumlücke  $g(t)$
- (ii) die anschließende Zunahme der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v = v_\ell - v$ .

Da der Effekt (i) früher eintritt, wird zunächst die Abbremsung des ACC-Fahrzeugs durch den Term  $K_1(g - v\tau_d^{(ACC)})$  in (6.2.3.5) (Kurve 1 in Abbildung 6.2.3.15(a)) bestimmt. Die anschließende Zunahme der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v = v_\ell - v$ , welche für den positiven Wert des Terms  $K_2(v_\ell - v)$  in (6.2.3.5) (Kurve 2 in Abbildung 6.2.3.15(a)) verantwortlich ist, kann die oben erwähnte starke Abbremsung des ACC-Fahrzeugs (Abbildung 6.2.3.14(b)) nicht verhindern.

[10] Boris S. Kerner. „Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science“. Springer, 2017

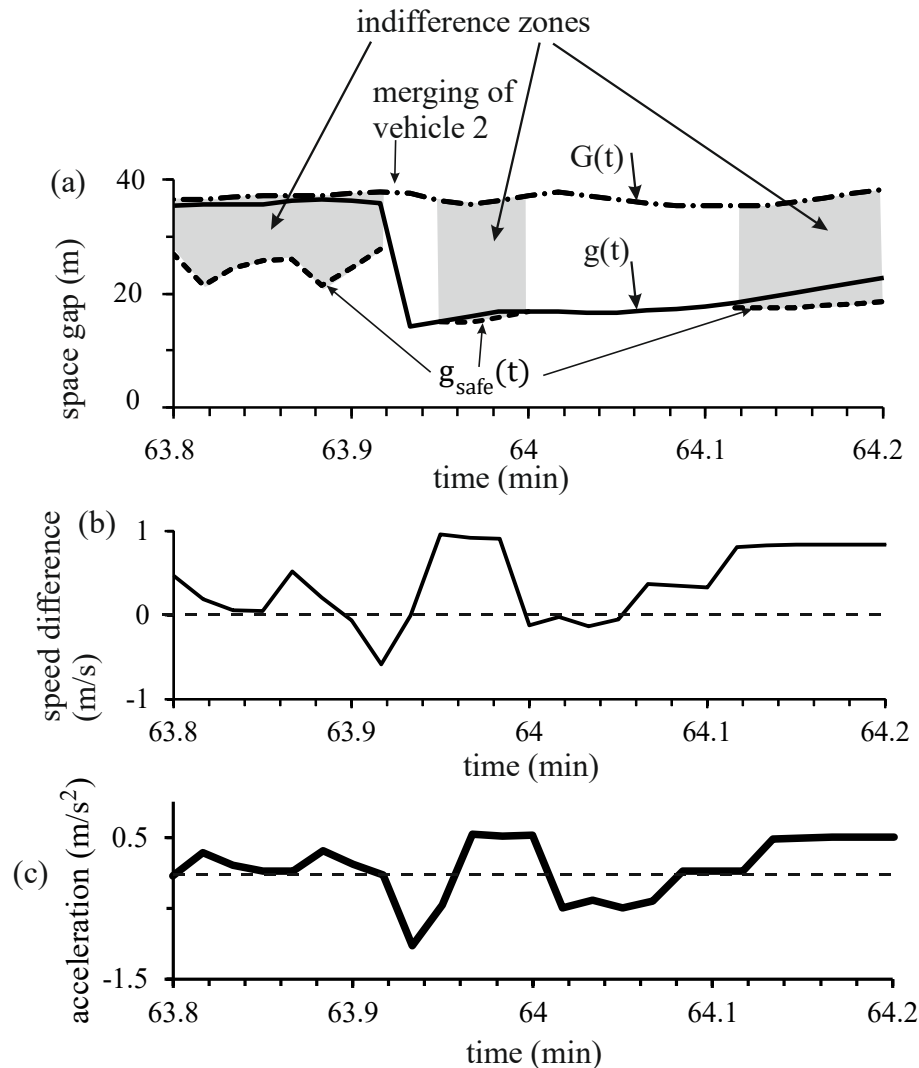


Abbildung 6.2.3.16: Fortsetzung von Abbildung 6.2.3.14(c, d):

- (a) Zeitfunktion der räumlichen Lücke  $g(t)$  des TPACC-Fahrzeugs zusammen mit Indifferenz-Bereichen (graue Flächen);  $G(t)$  ist der Synchronisationsabstand;  $g_{safe}(t)$  (gestrichelte Kurven) ist der Sicherheitsabstand; graue Regionen zeigen Zeitintervalle, in denen die Bedingung (6.2.3.3) für den Indifferenz-Bereich erfüllt ist.
- (b) Relativgeschwindigkeit  $\Delta v = v_\ell - v$  zwischen der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs und der Geschwindigkeit des TPACC-Fahrzeugs.
- (c) Beschleunigung (Abbremsung) des TPACC-Fahrzeugs in einem vergrößerten Maßstab als in Abbildung 6.2.3.14(d). Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.

Das mikroskopische Verhalten eines TPACC-Fahrzeugs (Abbildung 6.2.3.16) unterscheidet sich qualitativ von dem im vorherigen diskutierten ACC-Fahrzeug (Abbildung 6.2.3.15). Bevor Fahrzeug 2 auf die Hauptfahrbahn einschert, erfüllt die räumliche Lücke  $g(t)$  des TPACC-Fahrzeugs die Bedingung (6.2.3.3) eines indifferenten Bereichs der Zeitlücken eines Fahrzeugs (kurz „der Indifferenz-Bereich“) (erste graue Fläche in Abbildung 6.2.3.16(a), welche sich auf das Zeitintervall vor der Kennzeichnung "merging of vehicle 2" bezieht).

Nachdem die räumliche Lücke  $g(t)$  durch das Einscheren von Fahrzeug 2 schlagartig abgenommen hat (in Abbildung 6.2.3.16(a) mit "merging of vehicle 2" bezeichnet), ist die Bedingung  $g(t) < g_{safe}(t)$  für ein TPACC-Fahrzeug erfüllt. Im Gegensatz zum ACC-Fahrzeug führt die durch Formel (6.2.3.1) bestimmte Verzögerung des TPACC-Fahrzeugs zu einer schwächeren Fahrzeugverzögerung als sie sich aus der

## Individueller Schlussbericht

---

Formulierung für die sichere Geschwindigkeit  $v_s(v_l, g)$  ergeben würde. Infolgedessen bremst das TPACC-Fahrzeug entsprechend der Formulierung für die sichere Geschwindigkeit  $v_s(v_l, g)$  ab.

Wie bereits erwähnt, bezieht sich die Formulierung der sicheren Geschwindigkeit  $v_s(v_l, g)$  auf das Verhalten eines menschlich gesteuerten Fahrzeugs. Aus diesem Grund hängt die sichere Geschwindigkeit  $v_s(v_l, g)$  wesentlich stärker von der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v = v_l - v$  als von der räumlichen Lücke  $g(t)$  ab. Wenn unter der Bedingung  $g(t) < g_{safe}(t)$  die Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v = v_l - v \geq 0$ , dann ist die Verzögerung des TPACC-Fahrzeugs in Verbindung mit den Sicherheitsbedingungen (Abbildung 6.2.3.14(d) und Abbildung 6.2.3.16(c)) wesentlich geringer als die Verzögerung des ACC-Fahrzeugs, die durch die Formel (6.2.3.5) (Abbildung 6.2.3.14 (b) und Abbildung 6.2.3.15(a)) gegeben ist.

Darüber hinaus ist, wenn der Wert  $\Delta v = v_l - v > 0$  groß genug ist, die Bedingung  $g(t) > g_{safe}(t)$  für den Indifferenz-Bereich erfüllt (zweite graue Fläche in Abbildung 6.2.3.16(a)).

Der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v(t)$  (Abbildung 6.2.3.16(b)) bestimmt in hohem Maße die Verzögerung (Beschleunigung) von TPACC-Fahrzeugen (Abbildung 6.2.3.16(c)). Im Laufe der Zeit wechseln sich Indifferenz-Bereich (6.2.3.3) (in denen die Formeln (6.2.3.1), (6.2.3.2) gültig sind) und Bereiche mit Sicherheitsbremsungen (in denen sich das TPACC-Fahrzeug entsprechend der Formel für die sichere Geschwindigkeit  $v_{safe}$  bewegt) ab (Abbildung 6.2.3.16(a)).

Dieser Wechsel ist entscheidend für die langsame Zunahme der räumlichen Lücke  $g(t)$  des TPACC-Fahrzeugs (Abbildung 6.2.3.16(a)). Schließlich bewegt sich das TPACC-Fahrzeug nur in dem Indifferenz-Bereich.

Beide Sicherheitsbedingungen des TPACC-Fahrzeuges und des Fahrzeugfolgeverhaltens (6.2.3.1), (6.2.3.2) an der Engstelle (Trajektorie 3 in Abbildung 6.2.3.12(c)) sind ähnlich wie die für Fahrzeuge mit menschlichen Fahrern (Trajektorien 1 und 2 in Abbildung 6.2.3.12(c)). Aus diesem Grund können wir das autonome Fahren im Rahmen der Drei-Phasen-Theorie als "Autonomes Fahren durch Lernen aus dem realen Fahrverhalten" betrachten.

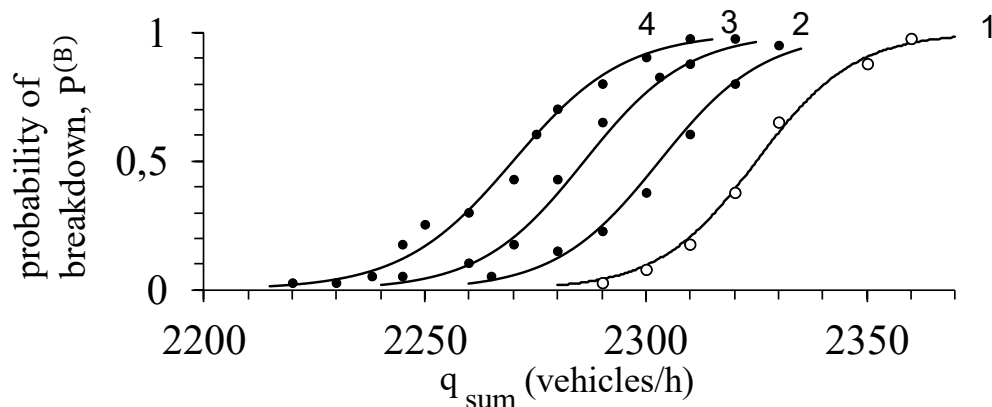
Insbesondere wenn durch das einsicherende Fahrzeug der räumliche Abstand  $g(t)$  kürzer als der Sicherheitsabstand  $g_{safe}(t)$  und die Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v = v_l - v \approx 0$  wird, bremst ein TPACC-Fahrzeug genauso langsam ab wie ein menschlich gesteuertes Fahrzeug. Dies erklärt, warum in den in Abbildung 6.2.3.12(b, c) dargestellten Simulationen gemischter Verkehrsströme mit TPACC-Fahrzeugen keine großen Geschwindigkeitsstörungen an der Auffahrt auftreten. Dies erklärt auch, warum im Gegensatz zum klassischen autonomen Fahren (Kurve 2 in Abbildung 6.2.3.11) einzelne TPACC-Fahrzeuge im gemischten Verkehrsfluss (Kurve 1 in Abbildung 6.2.3.11) keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit von Verkehrszusammenbrüchen an der Engstelle haben.



## Individueller Schlussbericht

### 6.2.3.8 Effekte der ACC-Parameter auf die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an einer Engstelle

Innerhalb des Projektes MEC-View wurde bereits gezeigt, dass ein Verkehrszusammenbruch an einer Engstelle durch eine Auffahrt bereits durch ein einziges mit klassischen ACC Modellen gesteuertes Fahrzeug mit einer Wahrscheinlichkeit  $P^{(B)} > 0$  eintreten kann, während die Wahrscheinlichkeit des Zusammenbruchs für ein Fahrzeug, welches entsprechend nach TPACC Regeln fährt bei gleichen Rahmenbedingungen bei null liegt. Dieses Ergebnis hängt aber mit einem gewählten Wert für den erwünschten zeitlichen Abstand zum vorrausfahrenden Fahrzeug  $\tau_d^{(ACC)} = 1.3$  s zusammen.



**Abbildung 6.2.3.17: Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $P^{(B)}$  eines Verkehrszusammenbruchs an einer Auffahrt zu einer einspurigen Straße bei unterschiedlichen ACC and TPACC Parametern. Funktionen der Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs  $P^{(B)}(q_{\text{sum}})$  in Abhängigkeit des Verkehrsflusses (Kurven 1-4) berechnen sich aus Änderungen der Zuflussrate  $q_{\text{on}}$  über die Auffahrt und einem festen Fluss auf der einspurigen Straße von  $q_{\text{in}} = 2000$  Fhz./h. Kurve 1 bezieht sich sowohl auf Verkehrsfluss ohne autonom fahrende Fahrzeuge als auch auf Mischverkehrsflüsse mit 2% an TPACC-Fahrzeugen mit den Parametern in (6.2.3.7), (6.2.3.8). Die Kurven 2-4 beziehen sich auf Mischverkehr mit 2% an ACC-Fahrzeugen: Kurve 2 ist für  $\tau_d^{(ACC)} = 1.3$  s, Kurve 3 ist für  $\tau_d^{(ACC)} = 1.5$  s, Kurve 4 ist für  $\tau_d^{(ACC)} = 2$  s,  $K_2 = 0.5$  s<sup>-1</sup>. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.**

Daher stellt sich die Frage, ob dieses Ergebnis auch für einen breiteren Bereich für die erwünschte Zeitlücke zum vorrausfahrenden Fahrzeug als ACC Parameter bzw. die entsprechenden TPACC Parameter Gültigkeit behält.

Die Untersuchung dieser Frage für einen Bereich der erwünschten Zeitlücken von

$$1.3 \text{ s} \leq \tau_d^{(ACC)} \leq 2 \text{ s} \quad (6.2.3.6)$$

als ACC Parameter zeigt, dass für jeden dieser Werte für eine ACC Zeitlücke (6.2.3.6) die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs durch ein einziges ACC-Fahrzeug größer ist als im Verkehr, welcher nur aus menschlichen Fahrern besteht.

Darüber hinaus stellt man fest, dass je länger die erwünschte Zeitlücke  $\tau_d^{(ACC)}$  zum vorrausfahrenden Fahrzeug gewählt wird, desto stärker steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Verkehrszusammenbruch bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen an (Kurven 2-4 in Abbildung 6.2.3.17).

## Individueller Schlussbericht

Im Gegensatz zu klassischen ACC-Fahrzeugen, lassen sich in Übereinstimmung mit (6.2.3.6) bei der Wahl der TPACC-Modellparameter im Bereich

$$1.3 \text{ s} \leq \tau_p^{(TPACC)} \leq 2 \text{ s}, \quad (6.2.3.7)$$

$$1.4 \text{ s} \leq \tau_G^{(TPACC)} \leq 2.2 \text{ s}, \quad (6.2.3.8)$$

keine bemerkbaren Veränderungen in der Wahrscheinlichkeit für einen Verkehrszusammenbruch (Kurve 1 in Abbildung 6.2.3.17) feststellen.

### 6.2.3.9 Statistische Analyse der Störung durch ein klassisches ACC Fahrzeug an der Engstelle

Zu Beginn wird eine Zuflussrate von  $q_{on} = 280$  Fhz./h über die Auffahrt, bei einer Flussrate von  $q_{in} = 2000$  Fhz./h auf der einspurigen Straße gewählt, bei der die Wahrscheinlichkeit für einen Verkehrszusammenbruch  $P^{(B)}$  für gemischten Verkehr mit 2% TPACC Fahrzeugen gleich null ist, während die Wahrscheinlichkeit für gemischten Verkehr mit 2% ACC Fahrzeugen die Bedingung

$$0 < P^{(B)} < 1 \quad (6.2.3.9)$$

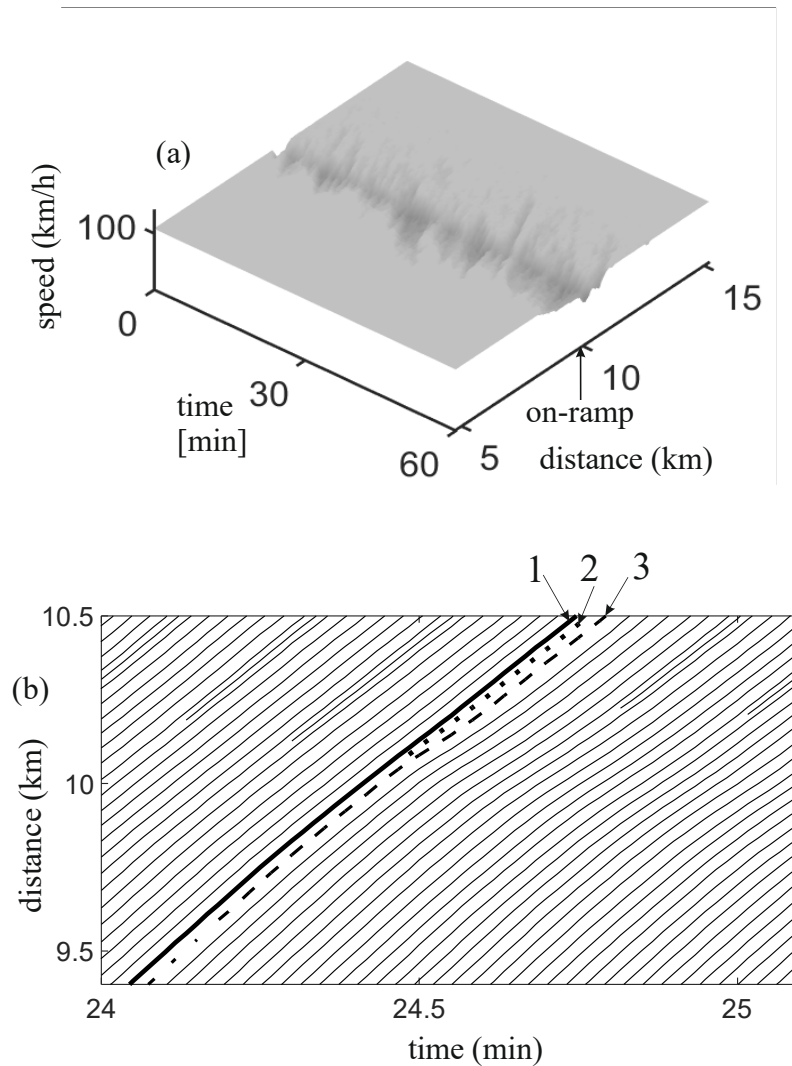
erfüllt, für jede der gewählten erwünschten Zeitlücken des ACC entsprechend (6.2.3.6) (Kurven 2-4 in Abbildung 6.2.3.17).

Bedingung (6.2.3.9) erlaubt es, solche Realisationen der Simulation von gemischtem Verkehr mit 2% ACC zu betrachten, in denen kein Verkehrszusammenbruch innerhalb eines betrachteten Zeitraums  $T_{ob}$  für jedwede Wahl der erwünschten Zeitlücke des ACC (6.2.3.6) entsteht. Über diese Realisationen der Simulation kann eine statistische Analyse der Amplituden der Störung der Geschwindigkeit gemacht werden. Dabei werden nur Störungen betrachtet, welche durch das ACC-Fahrzeug verursacht werden, vor dem ein Fahrzeug von der Auffahrt kommend einschert, welches durch einen Menschen gelenkt wird.

Für die Amplitude der Geschwindigkeitsstörung  $\Delta v_{ACC}$  wird die Differenz aus der Geschwindigkeit des einscherenenden, von der Auffahrt kommenden Fahrzeugs (Fahrzeug 2 in Abbildung 6.2.3.18) und der Mindestgeschwindigkeit des darauf folgenden ACC-Fahrzeugs (Fahrzeug 3 in Abbildung 6.2.3.18) betrachtet:

$$\Delta v_{ACC} = v_{l,m} - v_{min}^{(ACC)}, \quad (6.2.3.10)$$

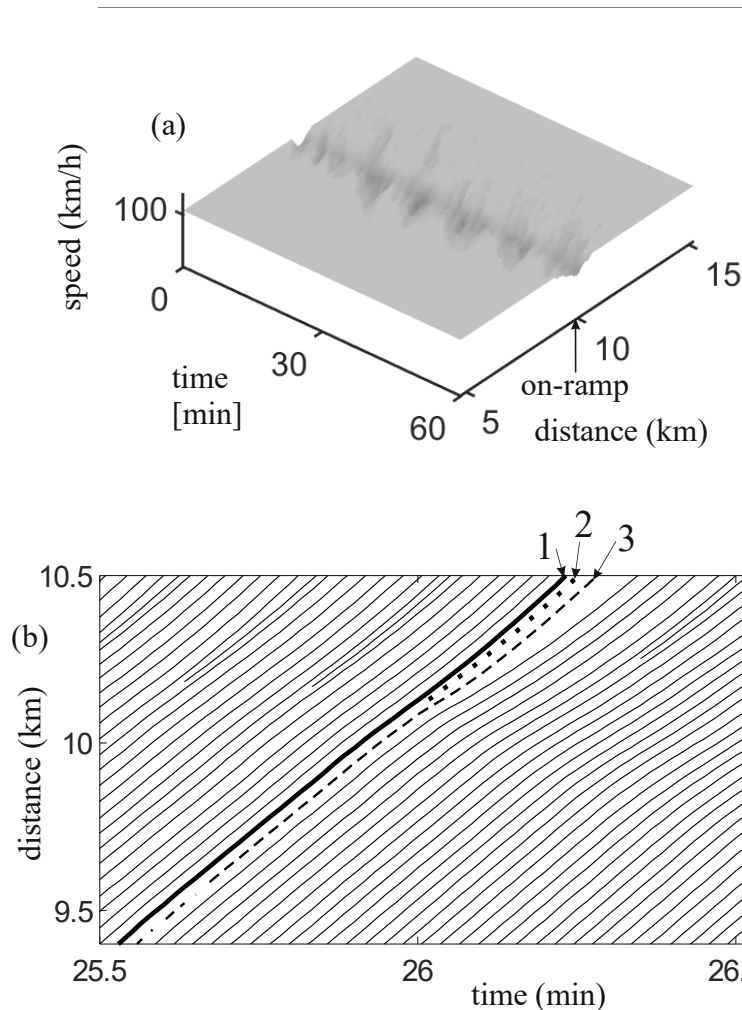
dabei ist  $v_{l,m}$  die Geschwindigkeit, welche Fahrzeug 2 zum Zeitschritt  $n=m$ , in dem Fahrzeug 2 das vorausfahrende Fahrzeug vor dem ACC-Fahrzeug wird, hat.  $v_{min}^{(ACC)}$  ist die Mindestgeschwindigkeit des ACC-Fahrzeugs innerhalb der Geschwindigkeitsstörung an der Engstelle.



**Abbildung 6.2.3.18: Ergebnis einer Realisation der Simulation gemischten Verkehrs bei 2% ACC-Fahrzeugen und  $\tau_d^{(ACC)} = 1.3$  s, bei welcher unter Bedingung (6.2.3.6) innerhalb des Beobachtungszeitraums  $T_{ob} = 60$  Minuten kein Verkehrszusammenbruch stattfindet:**

**(a) Verkehrsgeschwindigkeit als raum-zeitliche Fläche.**

**(b) Ausschnitt aus Fahrzeugtrajektorien im Bereich der Auffahrt. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz./h. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.**



**Abbildung 6.2.3.19: Ergebnis einer Realisation der Simulation gemischten Verkehrs bei 2% ACC-Fahrzeugen und  $\tau_d^{(ACC)} = 1.5$  s, bei welcher unter Bedingung (6.2.3.6) innerhalb des Beobachtungszeitraums  $T_{ob} = 60$  Minuten kein Verkehrszusammenbruch stattfindet:**

**(a) Verkehrsgeschwindigkeit als raum-zeitliche Fläche.**

**(b) Ausschnitt aus Fahrzeugtrajektorien im Bereich der Auffahrt. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz./h. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.**

Als Beispiele aus Simulationen für  $\tau_d^{(ACC)} = 1.3$  s und  $\tau_d^{(ACC)} = 1.5$  s werden jeweils einzelne Realisationen dieser Simulationen entsprechend in der Abbildung 6.2.3.18 und der Abbildung 6.2.3.19 gezeigt. In der unteren Hälfte dieser Abbildungen Abbildung 6.2.3.18(b) und Abbildung 6.2.3.19(b) entsprechen die markierten Fahrzeuge 1 und 2 jeweils menschlich gesteuerte Fahrzeuge, während es sich bei Fahrzeug 3 immer um ein durch ACC gesteuertes Fahrzeug handelt. In Abbildung 6.2.3.20 werden die Geschwindigkeiten dieser drei Fahrzeuge jeweils für die entsprechende Simulation mit unterschiedlichen  $\tau_d^{(ACC)}$  jeweils vergleichend gegen die Zeit aufgetragen. So ist hier zu erkennen, dass das ACC-Fahrzeug in der in der Simulation mit  $\tau_d^{(ACC)} = 1.5$  s (Nr. 3 in Abbildung 6.2.3.18(b)) im zeitlichen Verlauf eine starke Geschwindigkeitsreduktion  $\Delta v_{ACC}$  erfährt.

Das gleiche Verhalten lässt sich auch für das ACC-Fahrzeug in der Simulation mit  $\tau_d^{(ACC)} = 1.5$  s feststellen (Nr. 3 in Abbildung 6.2.3.19(b)).

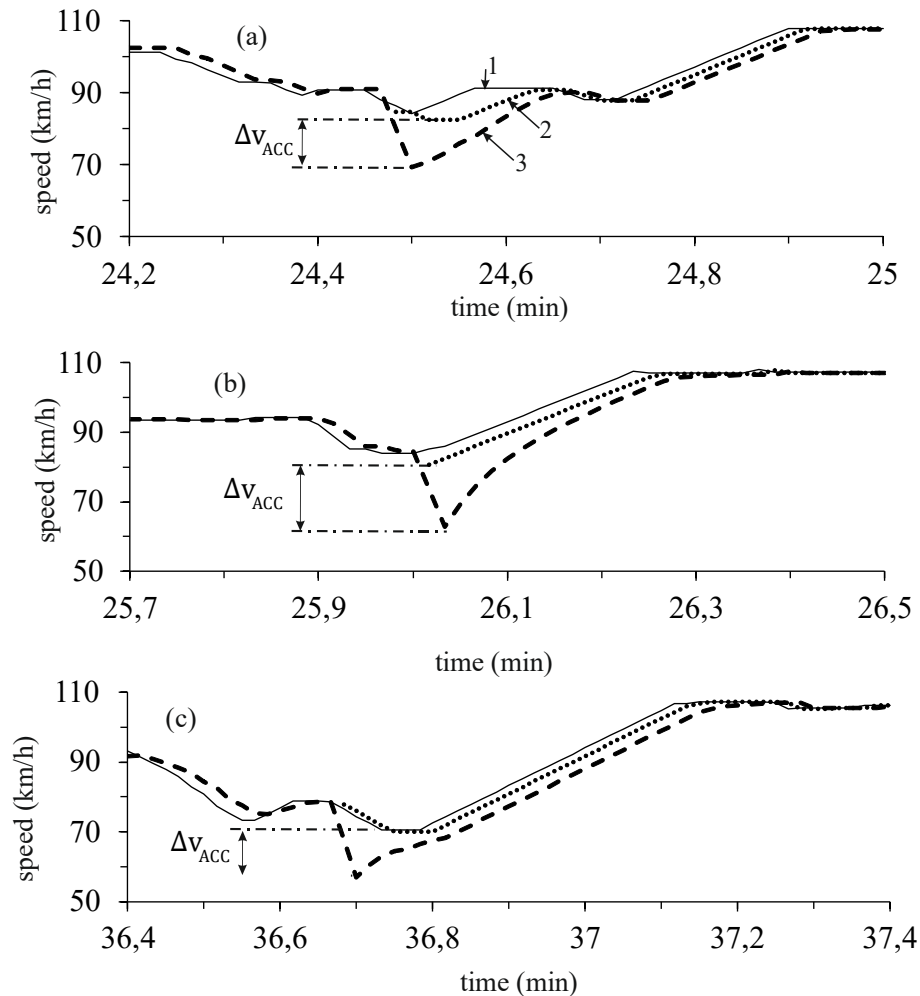


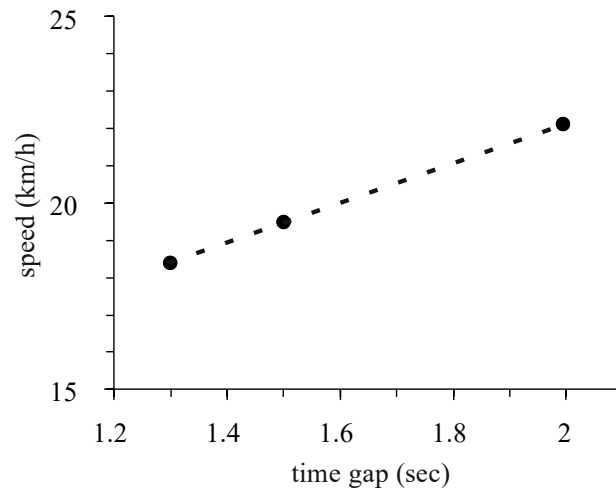
Abbildung 6.2.3.20: Mikroskopische Geschwindigkeit dreier ACC-Fahrzeuge hinter einem von der Auffahrt eingesicherten menschlich gelenkten Fahrzeug für unterschiedliche Werte  $\tau_d^{(ACC)}$ :

(a) Fahrzeuge der Realisation aus Abbildung 6.2.3.18(b) in einer Simulation mit  $\tau_d^{(ACC)} = 1.3$  s

(b) Fahrzeuge der Realisation aus Abbildung 6.2.3.19(b) in einer Simulation mit  $\tau_d^{(ACC)} = 1.5$  s

(c) Fahrzeuge einer weiteren Realisation einer Simulation mit  $\tau_d^{(ACC)} = 2$  s,  $K_2 = 0.5$  s<sup>-1</sup>.

Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz/h. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.



**Abbildung 6.2.3.21: Mittelwerte der Amplituden  $\Delta v_{ACC}$  der örtlichen Geschwindigkeitsreduktion der ACC-Fahrzeuge hinter einem eingescherten, von der Auffahrt kommenden Fahrzeug in Abhängigkeit der geforderten Zeitlücke  $\tau_d^{(ACC)}$  (schwarze Punkte). Die gewählten Werte für  $\tau_d^{(ACC)}$  entsprechen, den in Abbildung 6.2.3.20 verwendeten Werten. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.**

Qualitativ die gleichen Ergebnisse, wie in Abbildung 6.2.3.18 dargestellt, lassen sich in allen Realisationen der Simulationen gemischten Verkehrs mit 2% an ACC-Fahrzeugen finden, bei denen innerhalb des Beobachtungszeitraums von  $T_{ob} = 60$  Minuten kein Verkehrszusammenbruch stattfindet und die gleichzeitig die Bedingung (6.2.3.9) erfüllen, unabhängig davon welche erwünschte Zeitlücke  $\tau_d^{(ACC)}$  innerhalb des Bereichs (6.2.3.6) gewählt wird:

Kommt es zu einem Einscheren eines menschlich gesteuerten Fahrzeugs von der Auffahrt auf die einspurige Straße, dann erfährt das ihm dann folgende ACC-Fahrzeug immer eine große Änderung einer lokalen Reduktion seiner Geschwindigkeit.

Dies wurde in drei Realisationen aus drei Simulationen für die entsprechenden Werte  $\tau_d^{(ACC)} = 1.3$  s,  $\tau_d^{(ACC)} = 1.5$  s und  $\tau_d^{(ACC)} = 2$  s in Abbildung 6.2.3.20 gezeigt.

Dabei nimmt die Amplitude  $\Delta v_{ACC}$  dieser lokalen Reduktion der Geschwindigkeit jeweils einen individuellen Wert in den einzelnen Realisationen jeder der Simulationen ein. Das bedeutet, dass die in Abbildung 6.2.3.20 gezeigten Amplituden  $\Delta v_{ACC}$  der lokalen Geschwindigkeitsstörung nur mit dieser einen Realisation in der entsprechenden Simulation für ein  $\tau_d^{(ACC)}$  assoziiert sind.

Aus diesem Grund, werden die Amplituden der lokalen Geschwindigkeitsstörung statistisch über zufällige, verschiedene und unabhängige Realisationen für jede der gewählten erwünschten Zeitlücken  $\tau_d^{(ACC)}$  (wie in Abbildung 6.2.3.20) betrachtet.

Die Mittelwerte der Amplituden der lokalen Geschwindigkeitsstörung dieser Realisationen werden durch schwarze Punkte in Abbildung 6.2.3.21 gezeigt. Die gestrichelte Linie verdeutlicht dabei, dass die Mittelwerte der Amplituden der Geschwindigkeitsstörung  $\Delta v_{ACC}$  ansteigen, je größer die Werte für die erwünschte Zeitlücke  $\tau_d^{(ACC)}$  gewählt werden.

Gleichzeitig bedeutet eine größere Amplitude bei der örtlichen Geschwindigkeitsstörung (starke Reduktion der Geschwindigkeit) eine größere Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs im metastabilen Zustand des Freiflusses. Dieses Ergebnis erklärt die Steigerung der Wahrscheinlichkeit einen Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle bei einer Erhöhung der erwünschten Zeitlücke  $\tau_d^{(ACC)}$  vor dem ACC-Fahrzeug wie es in Abbildung 6.2.3.17 dargestellt wurde.

### ***6.2.3.10 Auswirkung der dynamischen Regeln des autonomen Fahrens auf Verkehrsstörungen an Engstellen***

Es wurde gezeigt, dass je länger die gewünschte zeitliche Lücke  $\tau_d^{(ACC)}$  des ACC zum vorrausfahrenden Fahrzeug gewählt wird, desto größer wird die mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsstörung, die durch das ACC-Fahrzeug an der Engstelle durch eine Auffahrt verursacht wird (Abbildung 6.2.3.21).

Im Gegensatz zu diesem Merkmal des klassischen ACC konnte festgestellt werden, dass die mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsstörung, welche durch ein TPACC-Fahrzeug am der Engstelle durch eine Auffahrt verursacht wird, nicht annähernd von den Parametern des TPACC innerhalb der Parameterbereiche (6.2.3.7), (6.2.3.8) abhängt.

Aus diesem Grund kann kein Einfluss einzelner TPACC-Fahrzeuge auf die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle durch eine Auffahrt gefunden werden (Kurve 1 in Abbildung 6.2.3.17).

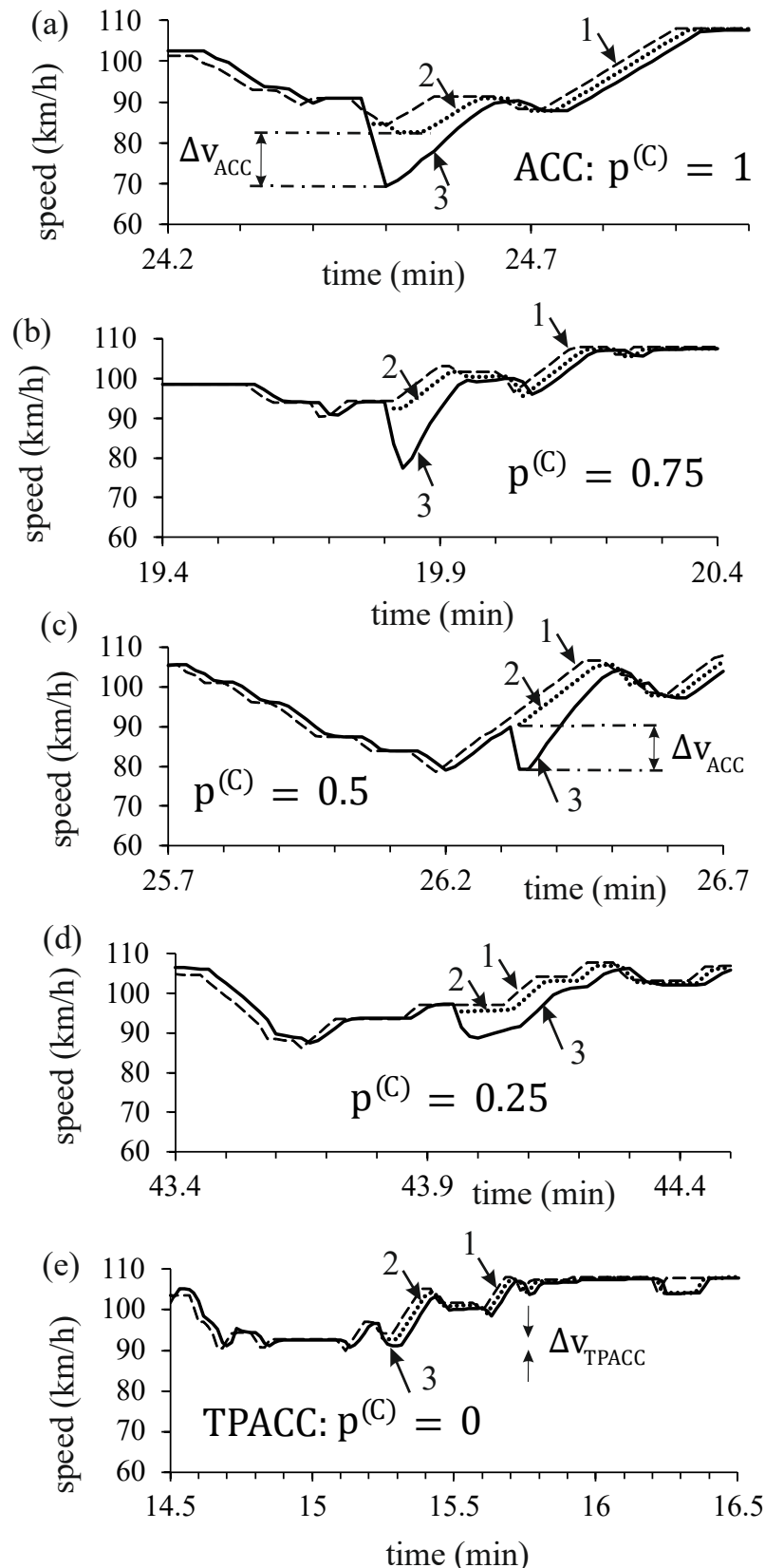


Abbildung 6.2.3.22: Lokale Geschwindigkeitsreduktion, verursacht durch ACC-Fahrzeuge an einer Engstelle durch eine Auffahrt, bezogen auf das ACC-Modell (6.2.3.11)- (6.2.3.17) in einer der Simulationsrealisierungen für fünf verschiedene Werte  $p^{(C)} = 0$  (a); 0,25 (b); 0,5 (c); 0,75 (d) und 1 (e). Fahrzeuge 1 und 2 sind von Menschen gelenkte Fahrzeuge, Fahrzeug 3 ist das ACC-Fahrzeug. Modellparameter sind:  $\tau_G = 1,4$  s,  $\tau_p = 1,3$  s,  $K_1 = 0,3$  s<sup>-2</sup>,  $K_2 = K_{\Delta v} = 0,6$  s<sup>-1</sup>. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11.



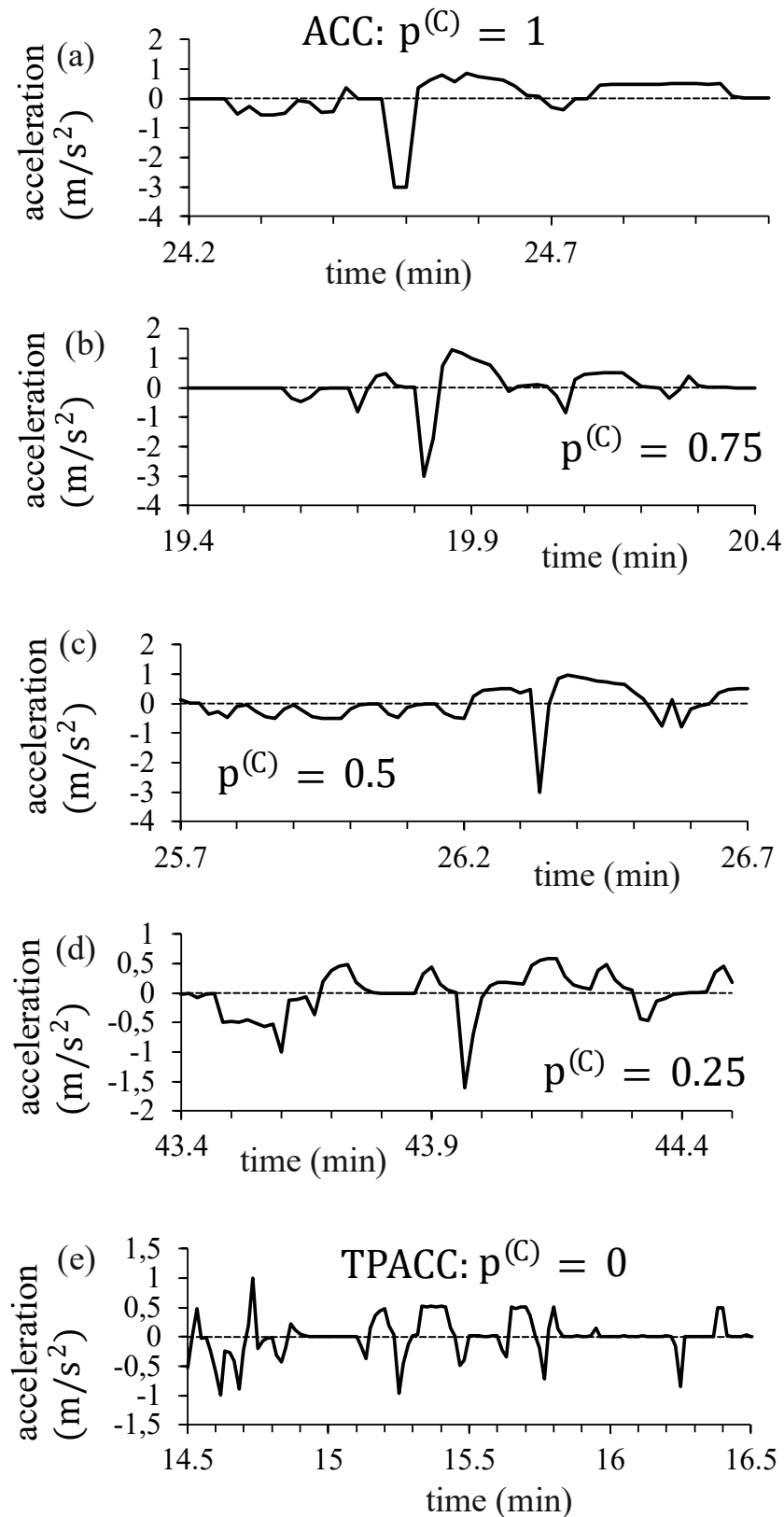
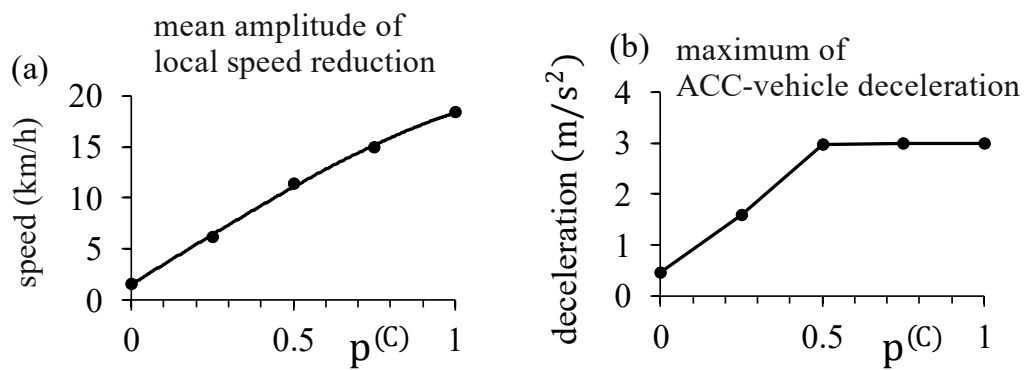


Abbildung 6.2.3.23: Bremsen (Beschleunigen) von ACC-Fahrzeugen in der gleichen Simulationsrealisation wie in Abbildung 6.2.3.22 entsprechend, für fünf verschiedene Werte  $p^{(C)} = 0$  (e); 0,25 (d); 0,5 (c); 0,75 (b) und 1 (a).



**Abbildung 6.2.3.24** Charakteristika lokaler Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC-Fahrzeuge im Bereich einer Engstelle durch eine Auffahrt als Funktion des Wertes  $p^{(C)}$  für Modellparameter der Abbildung 6.2.3.22: (a) Mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung. (b) Mittelwert der maximalen Bremsung des ACC-Fahrzeugs innerhalb der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung.

## Individueller Schlussbericht

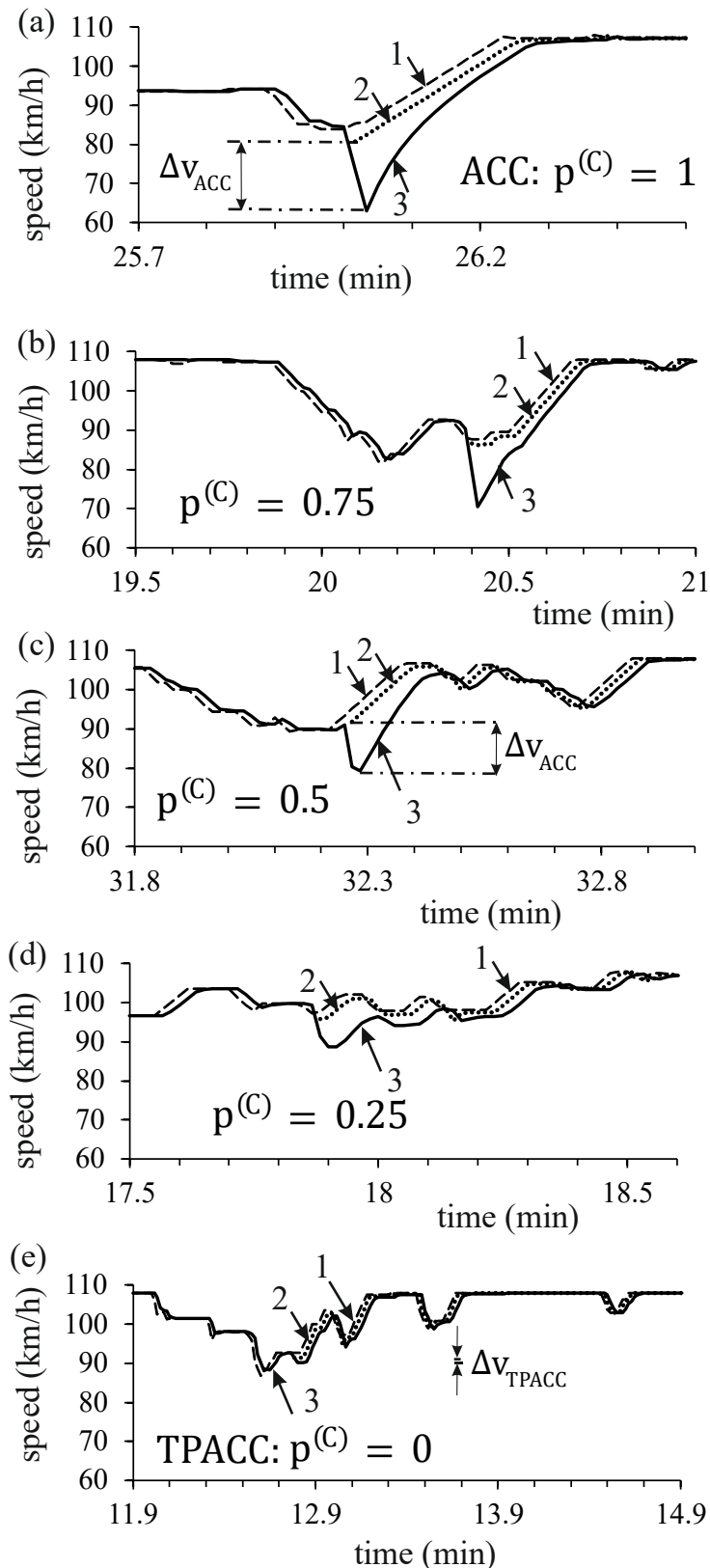
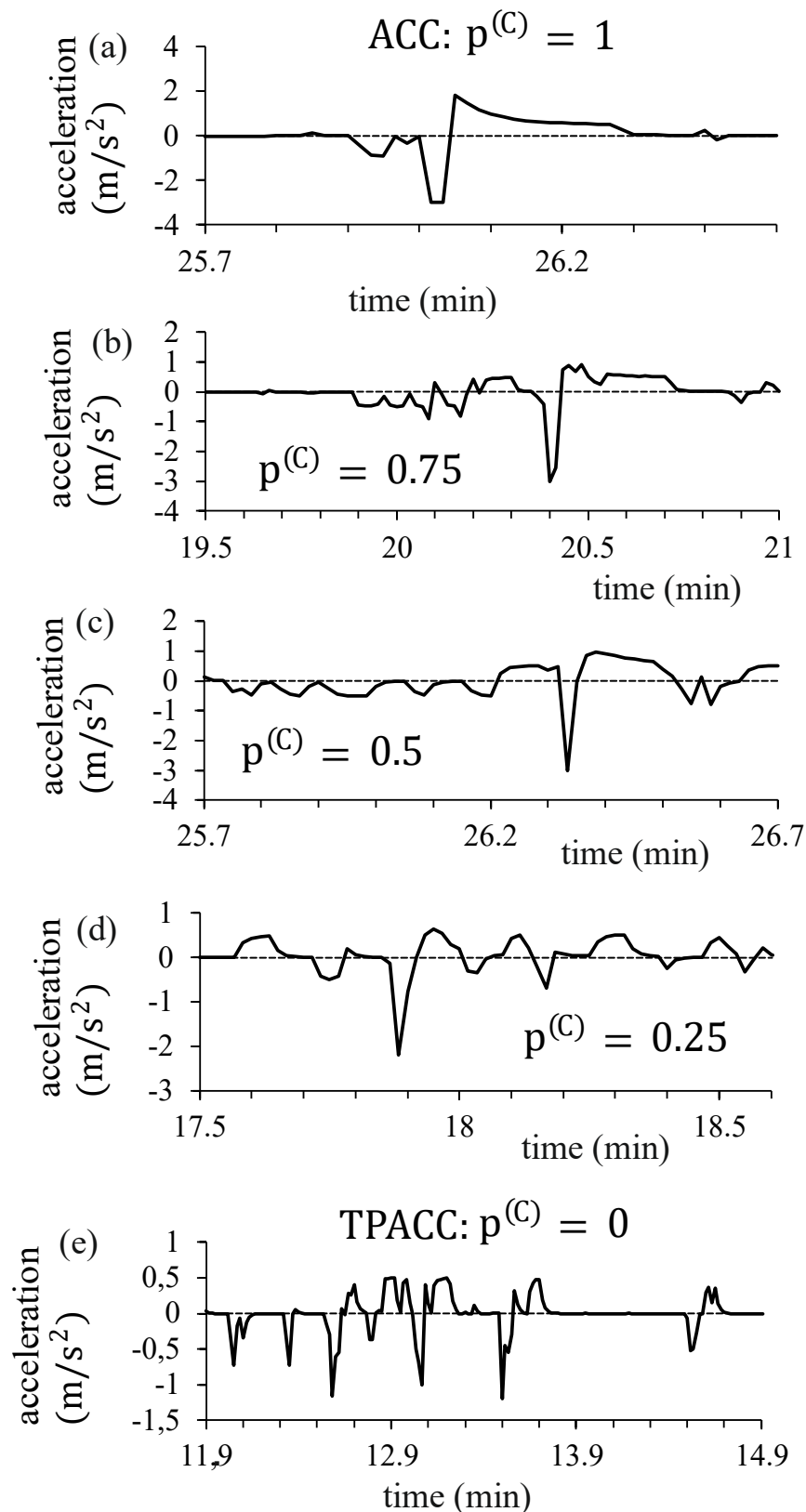
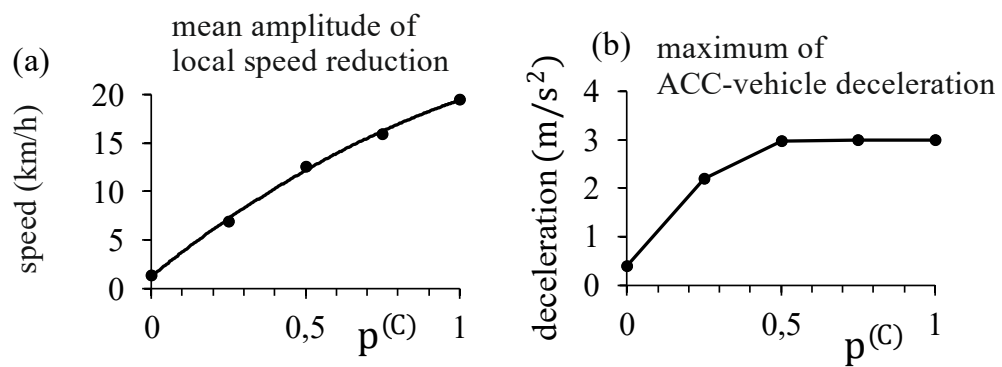


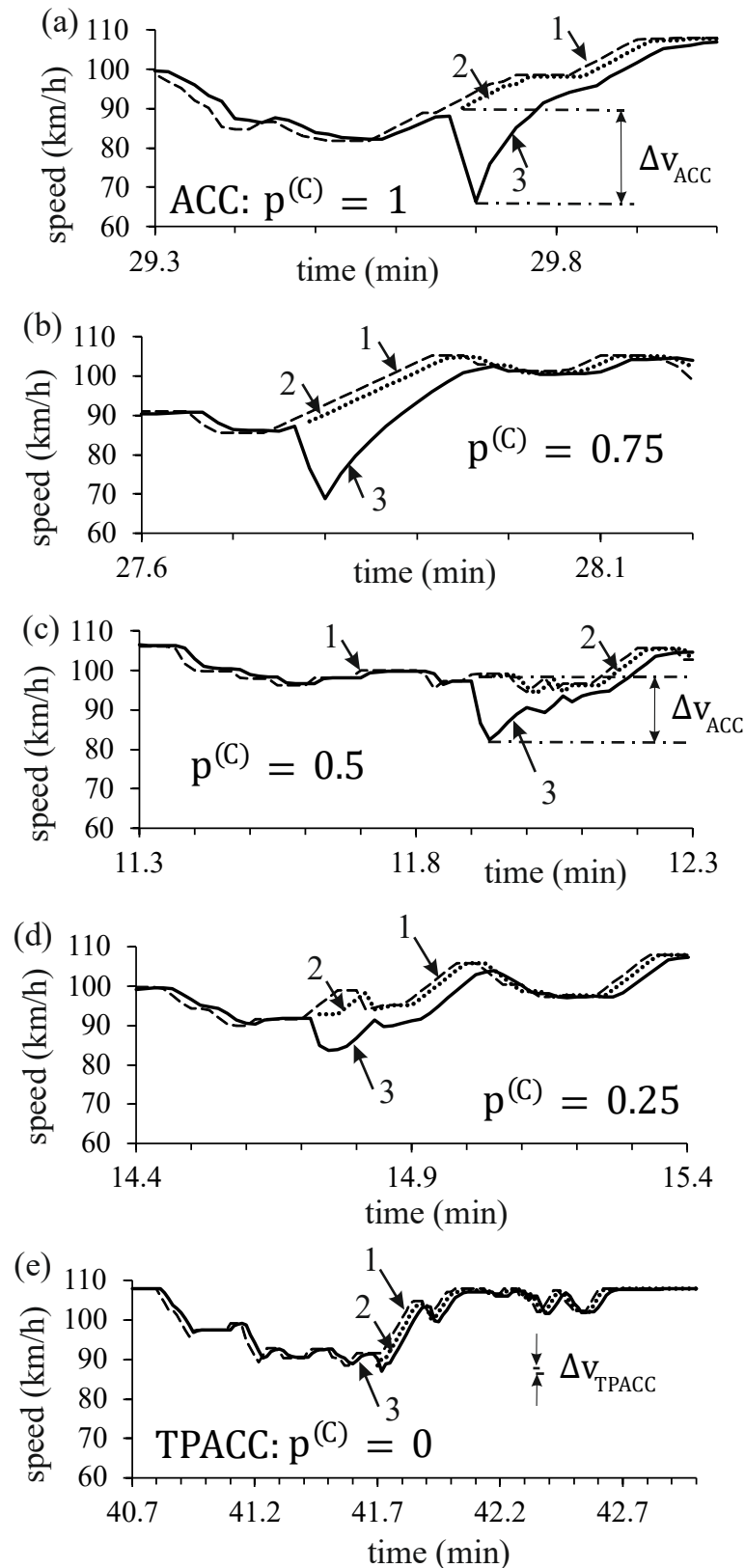
Abbildung 6.2.3.25: Lokale Geschwindigkeitsreduzierung, verursacht durch ACC-Fahrzeug an einer Engstelle an der Auffahrt, bezogen auf ACC-Modell (6.2.3.11)- (6.2.3.17) in einer der Simulationsrealisierungen für fünf verschiedene Werte  $p^{(C)} = 0$  (a); 0,25 (b); 0,5 (c); 0,75 (d); und 1 (e). Fahrzeuge 1 und 2 sind von Menschen gelenkte Fahrzeuge, Fahrzeug 3 ist das ACC-Fahrzeug. Modellparameter sind:  $\tau_G = 1,6$  s;  $\tau_p = 1,5$  s;  $K_1 = 0,3$  s<sup>-2</sup>;  $K_2 = K_{\Delta v} = 0,6$  s<sup>-1</sup>. Weitere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.22.



**Abbildung 6.2.3.26: Verzögerung (Beschleunigung) des ACC-Fahrzeugs in den gleichen Simulationsrealisierungen wie in Abbildung 6.2.3.25 für fünf verschiedene Werte  $p^{(C)} = 0$  (a); 0,25 (b); 0,5 (c); 0,75 (d), und 1 (e).**



**Abbildung 6.2.3.27: Merkmale der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC- Fahrzeuge im Bereich einer Engstelle an der Auffahrt in Abhängigkeit vom Wert  $p^{(C)}$  für Modellparameter der Abbildung 6.2.3.25: (a) Mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduktion. (b) Mittelwert der maximalen Bremsung des ACC-Fahrzeugs innerhalb der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung.**



**Abbildung 6.2.3.28:** Lokale Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC-Fahrzeuge einer Engstelle an der Auffahrt, bezogen auf das ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) in einer der Simulationsrealisierungen für fünf verschiedene Werte  $p^{(C)} = 0$  (e); 0,25 (d); 0,5 (c); 0,75 (b) und 1 (a). Fahrzeuge 1 und 2 sind von Menschen gelenkte Fahrzeuge, Fahrzeug 3 ist das ACC-Fahrzeug. Modellparameter sind:  $\tau_G = 2,2$  s;  $\tau_p = 2$  s;  $K_1 = 0,3$  s<sup>-2</sup>;  $K_2 = K_{\Delta v} = 0,6$  s<sup>-1</sup>. Weitere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.22.

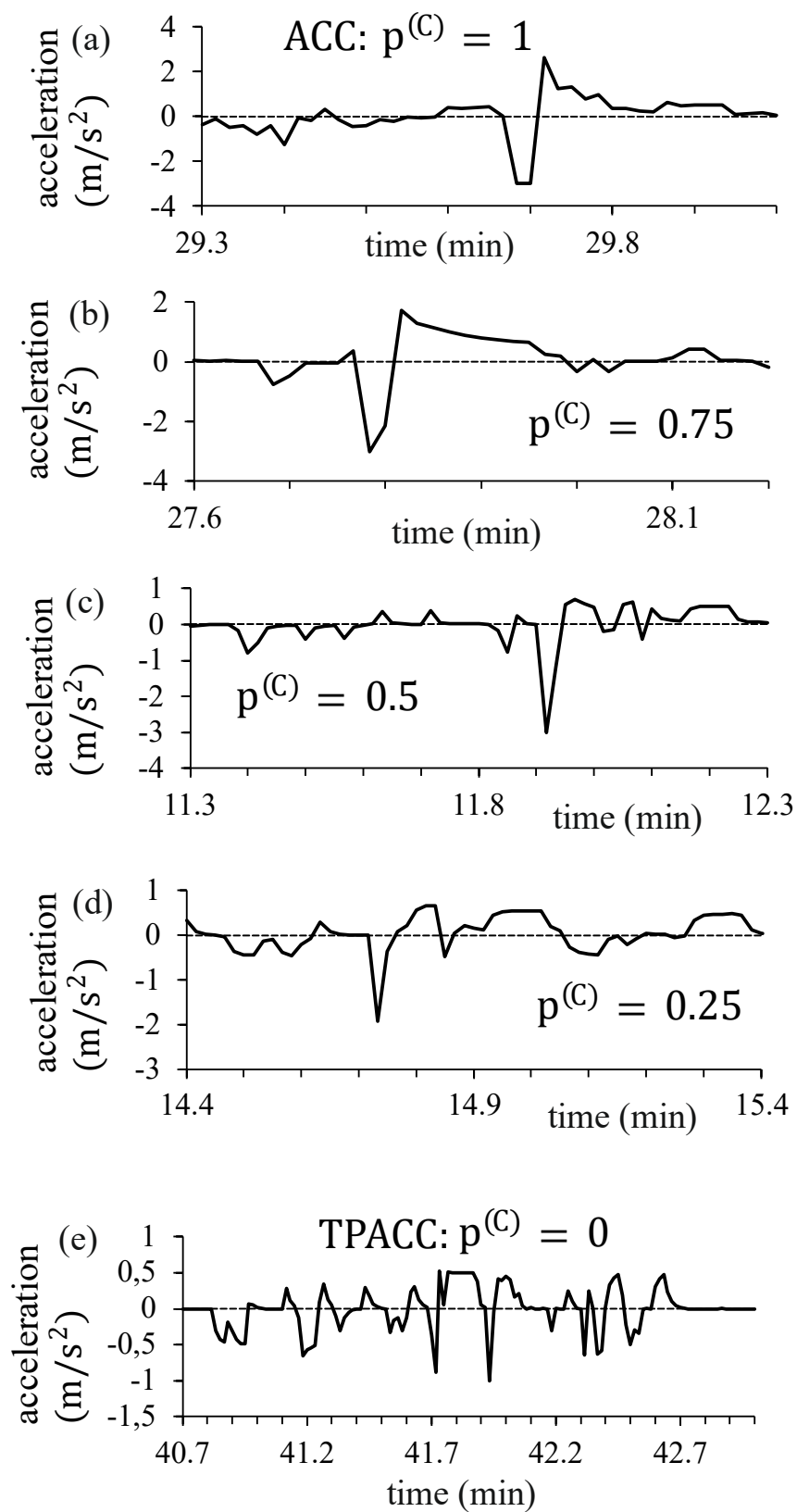
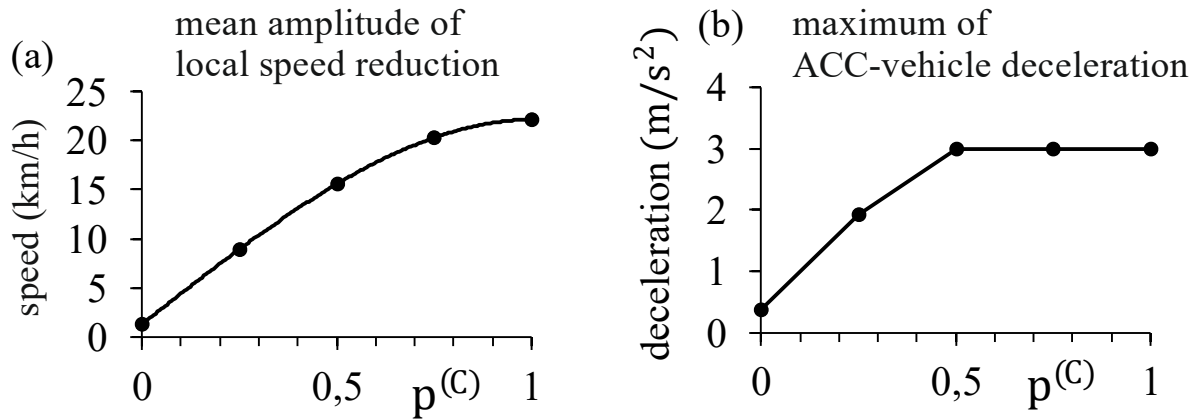


Abbildung 6.2.3.29: Verzögerung (Beschleunigung) des ACC-Fahrzeugs in den gleichen Simulationsrealisierungen wie in Abbildung 6.2.3.28 für fünf verschiedene Werte  $p^{(C)} = 0$  (e); 0,25 (d); 0,5 (c); 0,75 (b) und 1 (a).



**Abbildung 6.2.3.30: Charakteristika lokaler Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC-Fahrzeuge im Bereich einer Engstelle durch eine Auffahrt als Funktion des Wertes  $p^{(C)}$  für Modellparameter der Abbildung 6.2.3.28: (a) Mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung. (b) Mittelwert der maximalen Bremsung des ACC-Fahrzeugs innerhalb der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung.**

Der mathematische Unterschied zwischen den dynamischen Regeln des klassischen ACC (6.2.3.5) und TPACC (6.2.3.1) - (6.2.3.2) scheint gering zu sein. Daher stellt sich die folgende Frage: Wie kann ein solch scheinbar kleiner mathematischer Unterschied zwischen den dynamischen Regeln des klassischen ACC und TPACC zu einer so großen Auswirkung auf die lokalen Geschwindigkeitsstörungen im freien Fluss bzw. zu einer großen Auswirkung auf die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle führen?

Um diese Frage zu beantworten, stellen wir ein mathematisches Modell für die Regeln eines ACC vor, in der statt der klassischen Formel (6.2.3.5) für die ACC-Beschleunigung,

welche mit  $a_n^{(C)}$  bezeichnet wird, nun die Beschleunigung des ACC durch die folgende Formeln gegeben sind:

$$a_n^{(C)} = \begin{cases} \tilde{a}_n^{(C)} & \text{für } g_n \leq G_n^{(C)} \\ a_n^{(ACC)} & \text{für } g_n > G_n^{(C)} \end{cases}, \quad (6.2.3.11)$$

$$\tilde{a}_n^{(C)} = a_n^{(2D)}(1 - p^{(C)}) + a_n^{(ACC)}p^{(C)}, \quad (6.2.3.12)$$

$$a_n^{(2D)} = K_{\Delta v} \Delta v_n, \quad (6.2.3.13)$$

$$a_n^{(ACC)} = K_1(g_n - v_n \tau_p) + K_2 \Delta v_n, \quad (6.2.3.14)$$

$$G_n^{(C)} = G_n (1 - p^{(C)}) + v_n \tau_p p^{(C)}, \quad (6.2.3.15)$$

$\Delta v_n = v_{\ell,n} - v_n$ ,  $G_n = v_n \tau_G$ ,  $\tau_p$ ,  $\tau_G$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ , und  $K_{\Delta v}$  sind konstant;

$$v_{n+1} = \max\left(0, \min\left(v_{free}, v_{c,n}^{(C)}, v_{s,n}^{(cr)}\right)\right), \quad (6.2.3.16)$$

$$v_{c,n}^{(C)} = v_n + \tau \max\left(-b_{max} \min\left(\left|a_n^{(C)}\right|, a_{max}\right)\right), \quad (6.2.3.17)$$

Wobei die kritische sichere Geschwindigkeit  $v_{s,n}^{(cr)}$  mit der kritischen zeitlichen Lücke  $\tau_{safe}^{(cr)} = 1$  s korrespondiert.



## Individueller Schlussbericht

Hervorzuheben ist, dass bei  $p^{(C)} = 1$  und  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p$  das ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) in das klassische Modell für ACC (6.2.3.5) transformiert wird. Im Gegensatz dazu wird bei  $p^{(C)} = 0$  das ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) in das TPACC-Modell (6.2.3.1)-(6.2.3.2) transformiert. Mit anderen Worten, im ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) können durch die Erhöhung des Parameters  $p^{(C)}$  ( $0 \leq p^{(C)} \leq 1$ ) die Regeln für das ACC-Fahrzeugbewegungsmodell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) kontinuierlich von den Regeln für das TPACC-Modell (6.2.3.1)-(6.2.3.2) bei  $p^{(C)} = 0$  zu den Regeln für das klassische ACC-Modell (6.2.3.5) bei  $p^{(C)} = 1$  geändert werden.

Der physikalische Sinn des ACC-Modells (6.2.3.11)-(6.2.3.17) ist wie folgt. Das ACC-Modell simuliert die Reaktion des ACC-Fahrzeugs (Fahrzeug 3 in Abbildung 6.2.3.22, Abbildung 6.2.3.25 und Abbildung 6.2.3.28) auf die Differenz zwischen dem gewünschten zeitlichen Abstand des ACC  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p$  und einem aktuellen zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug (Fahrzeug 2), der auftritt, nachdem Fahrzeug 2 gerade von der Auffahrt auf die Hauptfahrbahn eingeschert ist.

Bei  $p^{(C)} = 0$  ist das ACC-Fahrzeug ein TPACC-Fahrzeug. Innerhalb des Bereichs der Zeitlücke (6.2.3.4), das TPACC-Fahrzeug reagiert es nicht auf einen aktuellen Zeitabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Dies liegt daran, dass es für das TPACC-Fahrzeug unter der Bedingung (6.2.3.4) einen Indifferenz-Bereich in der Fahrzeugfolge gibt.

Bei  $p^{(C)} = 1$  ist das ACC-Fahrzeug das klassische ACC-Fahrzeug. Im Gegensatz zum TPACC-Fahrzeug, weißt das ACC-Modell keinen Indifferenz-Bereich in der Autofolge auf. Daher simuliert das ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) bei  $p^{(C)} = 1$  die Reaktion eines klassischen ACC-Fahrzeugs (Fahrzeug 3 in Abbildung 6.2.3.22, Abbildung 6.2.3.25 und Abbildung 6.2.3.28) auf die Differenz zwischen der gewünschten zeitlichen Lücke des ACC  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p$  und einer aktuellen zeitlichen Lücke zum vorausfahrenden Fahrzeug (Fahrzeug 2).

Für  $0 < p^{(C)} < 1$  berechnet das ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) ein dynamisches Verhalten des ACC-Fahrzeugs auf Grund der Differenz zwischen der angestrebten zeitlichen Lücke des ACC  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p$  und der tatsächlich aktuell bestehende Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug (Fahrzeug 2) in Abhängigkeit des Wertes  $p^{(C)}$ .

Es ist anzunehmen dass für größere Werte von  $p^{(C)}$  die Reaktion des ACC-Fahrzeugs auf eine Differenz zwischen der angestrebten  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p$  und der tatsächlichen Zeitlücke stärker ausfällt. Diese Annahme wird durch Simulationen des ACC-Modells (6.2.3.11)-(6.2.3.17) bestätigt, welche für verschiedene Werte  $p^{(C)}$  und verschiedene Werte  $\tau_p$  (Abbildungen Abbildung 6.2.3.22 - Abbildung 6.2.3.30) durchgeführt wurden.

In der Analyse des dynamischen Verhaltens der Simulation des ACC-Modells (6.2.3.11)-(6.2.3.17) bestimmen wir den Mittelwert der Amplitude einer lokalen Geschwindigkeitsstörung, bezeichnet durch  $\overline{\Delta v_{ACC}}$ , welche durch die ACC-Fahrzeuge an der Engstelle durch eine Auffahrt in verschiedene Simulationsrealisierungen, die bei gegebenen Werten  $p^{(C)}$  untersucht wurden.

Für Parameter des klassischen ACC und TPACC, welche die Bedingungen (6.2.3.7)-(6.2.3.9) erfüllen, lassen sich die folgenden allgemeinen Ergebnisse festhalten:

- (i) Wenn der Parameter  $p^{(C)}$  von  $p^{(C)} = 1$  (klassisches ACC) auf  $p^{(C)} = 0$  (TPACC) abnimmt, so nimmt auch die Amplitude einer lokalen Geschwindigkeitsreduzierung (Störung) (Abbildung 6.2.3.22, Abbildung 6.2.3.25 und Abbildung 6.2.3.28), welche durch das ACC-Fahrzeug (6.2.3.11)-(6.2.3.17) an der Engstelle durch eine Auffahrt verursacht wird, kontinuierlich ab.
- (ii) Wenn der Parameter  $p^{(C)}$  von  $p^{(C)} = 0$  (TPACC) auf  $p^{(C)} = 1$  (klassisches ACC) ansteigt, nimmt die Abbremsung des ACC-Fahrzeugs (6.2.3.11)-(6.2.3.17) innerhalb einer lokalen

## Individueller Schlussbericht

Geschwindigkeitsreduktion im Bereich der Engstelle stark zu. Bei Werten von  $p^{(C)}$ , die nahe 1 liegen, erreicht die Verzögerung des ACC-Fahrzeugs unter üblichen Fahrbedingungen den im Modell gewählten Maximalwert von  $-3 \text{ m s}^{-2}$  (unter den verwendeten Simulationsparametern wurden keine Fälle gefunden, in denen eine sicherheitsbedingte Bremsung, die wesentlich stärker als  $-3 \text{ m s}^{-2}$  sein kann, realisiert wird).

- (iii) Das Auftreten der maximalen Verzögerung für klassisches ACC innerhalb der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung an der Engstelle erklärt die Sättigung der mittleren Maximalverzögerung des ACC-Fahrzeugs auf  $-3 \text{ m s}^{-2}$  (Abbildung 6.2.3.24(b), Abbildung 6.2.3.27(b) und Abbildung 6.2.3.30(b)).
- (iv) Wenn für  $p^{(C)} = 1$  (klassisches ACC) der angestrebte zeitliche Abstand des ACC  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p$  von 1,3 s auf 2 s ansteigt, nimmt gleichzeitig die Dauer des Zeitintervalls, innerhalb dessen die Verzögerung des ACC-Fahrzeugs den Maximalwert  $-3 \text{ m s}^{-2}$  erreicht, erheblich zu (Abbildung 6.2.3.23(c), Abbildung 6.2.3.26(c) und Abbildung 6.2.3.29(c)).
- (v) Die Zunahme der mittleren Amplitude einer lokalen Geschwindigkeitsreduktion ist nahezu linear von der Zunahme des Parameters  $p^{(C)}$  abhängig (Abbildung 6.2.3.24(a), Abbildung 6.2.3.27(a) und Abbildung 6.2.3.30(a)).

Dieser Vergleich von klassischem ACC (6.2.3.5) mit TPACC (6.2.3.1)-(6.2.3.2) bestätigt, dass je stärker die Reaktion des ACC-Fahrzeugs auf die Differenz zwischen dem angestrebten zeitlichen Abstand des ACC  $\tau_d^{(ACC)}$  und einem aktuellen zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ist, desto größer ist die Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung, die durch das ACC-Fahrzeug an der Engstelle verursacht wird, und damit auch die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle.

Tatsächlich reagieren TPACC-Fahrzeuge ( $p^{(C)} = 0$ ) innerhalb des Bereichs der zeitlichen Lücke (6.2.3.4) nicht auf den aktuellen Zeitabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Aufgrund der Existenz eines solchen Indifferenz-Bereichs in der Fahrzeugfolge erzeugt das TPACC-Fahrzeug entweder überhaupt keine lokale Geschwindigkeitsreduzierung am Engpass oder die durch das TPACC-Fahrzeug verursachte lokale Geschwindigkeitsreduzierung ist von sehr geringer Amplitude.

Für  $0 < p^{(C)} < 1$ , gibt es innerhalb des Bereichs des zeitlichen Abstands (6.2.3.4) eine Reaktion des ACC-Fahrzeugs auf die Differenz zwischen dem angestrebten zeitlichen Abstand des ACC-Fahrzeugs  $\tau_d^{(ACC)} = \tau_p$  und einem aktuellen zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.

Solange der Wert  $p^{(C)}$  im ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) deutlich kleiner als 1 ist, fällt auch die Reaktion des ACC-Fahrzeugs klein aus. Daher ist die mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduktion, die durch das ACC-Fahrzeug an der Engstelle verursacht wird, nicht sehr groß.

Für das klassische ACC (6.2.3.5), welches sich auf den Fall bezieht, dass im ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) der Wert  $p^{(C)} = 1$  ist, erreicht die Reaktion des ACC-Fahrzeugs auf die Differenz zwischen dem angestrebten zeitlichen Abstand des ACC  $\tau_d^{(ACC)}$  und einem aktuellen zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug jedoch ihren Maximalwert.

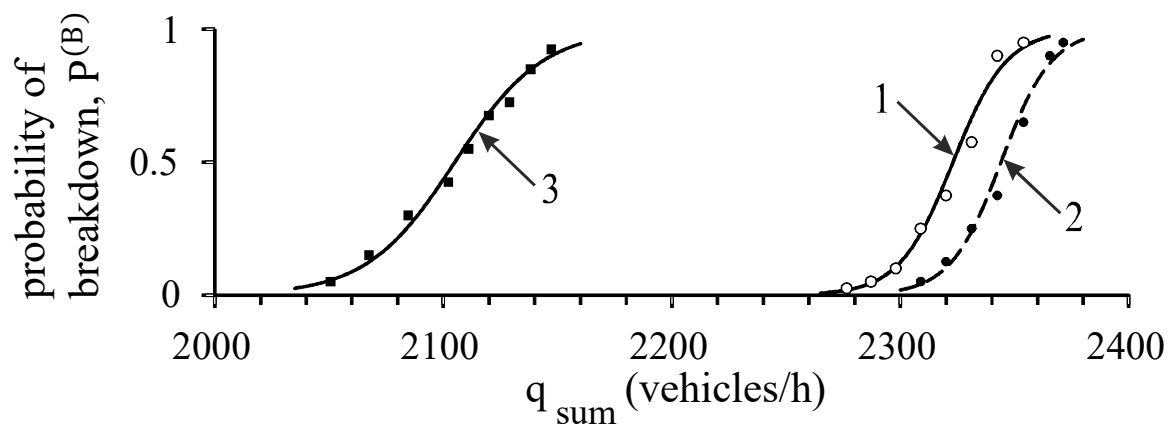
Darüber hinaus ist die Reaktion des ACC-Fahrzeugs auf die Differenz zwischen dem angestrebten zeitlichen Abstand des ACC  $\tau_d^{(ACC)}$  und einem aktuellen zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug umso stärker, je länger der gewünschte zeitliche Abstand des ACC  $\tau_d^{(ACC)}$  im klassischen ACC-Modell (6.2.3.5) ist.

## Individueller Schlussbericht

Aus diesem Grund steigt die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs, der durch ein einzelnes klassisches ACC-Fahrzeug an der Engstelle verursacht wird, umso stärker, je größer der angestrebte zeitliche Abstand des ACC  $\tau_d^{(ACC)}$  gewählt ist.

### 6.2.3.11 Auswirkung von Platoons autonom fahrender Fahrzeuge auf die Wahrscheinlichkeit von Verkehrszusammenbrüchen im gemischten Verkehrsfluss

Für die Zukunft kann man erwarten, dass mehr automatisierte Fahrzeuge im gemischten Verkehr fahren werden. Die Simulationen der Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an Engstellen im gemischten Verkehr mit 20% der automatisierten Fahrzeuge sind auf der Abbildung 6.2.3.31 dargestellt.



**Abbildung 6.2.3.31: Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an Engstellen im gemischtem Verkehr mit 20% der automatisierten Fahrzeuge.**

**Kurve 1: Verkehr mit Fahrzeugen, die durch menschlichen Fahrern gesteuert werden;  
Kurve 2: 20% TPACC (Formeln (6.2.3.1)-(6.2.3.2)), Kurve 3: 20% ACC (Formel (6.2.3.5)). Andere  
Modellparameter sind dieselbe, wie in Abbildung 6.2.3.11.**

Man kann sehen, dass automatisierte Fahrzeuge, die durch die klassische ACC (Formel (6.2.3.5)) gesteuert sind, den Verkehr deutlich verschlechtern, weil die klassischen automatisierten Fahrzeuge die Kapazität der Straße an einer Engstelle stark reduzieren (Abbildung 6.2.3.31, Kurve 3).

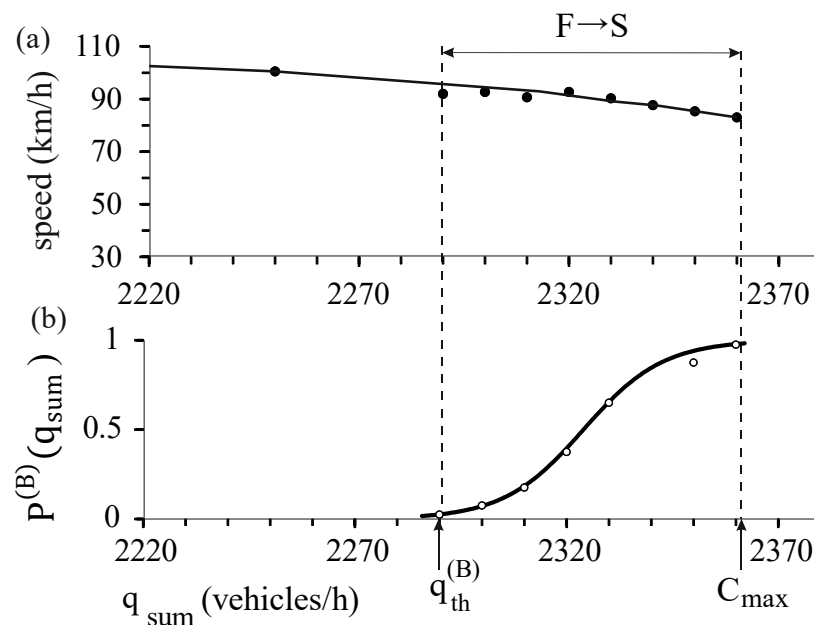
Dagegen können „lernende“ automatisierte Fahrzeuge (TPACC-Modell (6.2.3.1) - (6.2.3.2)) den Verkehr verbessern, weil die „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge die Kapazität der Straße an einer Engstelle erhöhen (Abbildung 6.2.3.31, Kurve 2).

## Individueller Schlussbericht

### 6.2.3.12 Eigenschaften von Verkehrsströmen im gemischten Verkehr

Im Verkehrsingenieurwesen werden die Fluss-Dichte (das Fundamentaldiagramm) und die Geschwindigkeits-Fluss Beziehungen häufig benutzt, um einen Einfluss der Verkehrssteuerung oder des Verkehrsmanagements auf makroskopische Eigenschaften von Verkehrsströmen zu untersuchen.

Um die Frage beantworten zu können, wie der Verkehrsfluss beeinflusst wird, wenn die TPACC-Strategie im Vergleich zur ACC-Strategie angewendet wird, werden in diesem Abschnitt Ergebnisse einer Untersuchung der Verkehrsflusscharakteristika vorgestellt, welche mit den in den Abbildung 6.2.3.11, Abbildung 6.2.3.17 und Abbildung 6.2.3.31 dargestellten Simulationen von gemischten Verkehrsflüssen zusammenhängen. Der Einfachheit halber werden nachstehend makroskopische Verkehrsstromeigenschaften unter Verwendung von Geschwindigkeits-Fluss Beziehungen betrachtet.



**Abbildung 6.2.3.32: Strömungseigenschaften des freien Verkehrsflusses auf einspuriger Straße mit einer Engstellen durch eine Auffahrt im Verkehr ohne autonom fahrende Fahrzeuge und im gemischten Verkehr mit 2% TPACC-Fahrzeugen:**

(a) Teil der Geschwindigkeits-Fluss-Beziehung für größere Flussraten.

(b) Die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs  $P^{(B)}(q_{sum})$ ; Funktion  $P^{(B)}(q_{sum})$  ist Kurve 1 aus Abbildung 6.2.3.11. Weitere Modellparameter entsprechen jenen in Abbildung 6.2.3.11.

Berechnete Werte:  $q_{th, TPACC}^{(B)} = q_{th}^{(B)} = 2290$  und  $C_{max, TPACC} = C_{max} = 2360$  Fahrzeuge/h.

Abbildung 6.2.3.32(a) zeigt einen Teil der Geschwindigkeit-Fluss Beziehung für größere Durchflussmengen im freien Verkehr ohne autonom fahrende Fahrzeuge. Die Fließeigenschaften der Verkehrsströme wurden wie folgt berechnet:

Für jede gegebene Durchflussrate  $q_{sum} = q_{in} + q_{on}$  (schwarze Punkte auf der Kennlinie) wurden über 5 Minuten gemittelte Daten für die Geschwindigkeit, Dichte und Durchflussrate unter Verwendung eines virtuellen Verkehrsdetektors gemessen, der am Ende des Einmündungsbereichs der Auffahrt  $x = 10.3$  km installiert wurde.

Die Daten wurden nur während eines Zeitintervalls gemessen, innerhalb dessen der freie Fluss in einer Simulationsrealisierung beobachtet wurde.

Dann wurden, wie bei der Berechnung von  $P^{(B)}(q_{sum})$  in Abbildung 6.2.3.11,  $N_r = 40$  verschiedene Realisierungen für jede der gewählten Flussraten  $q_{sum}$  simuliert.

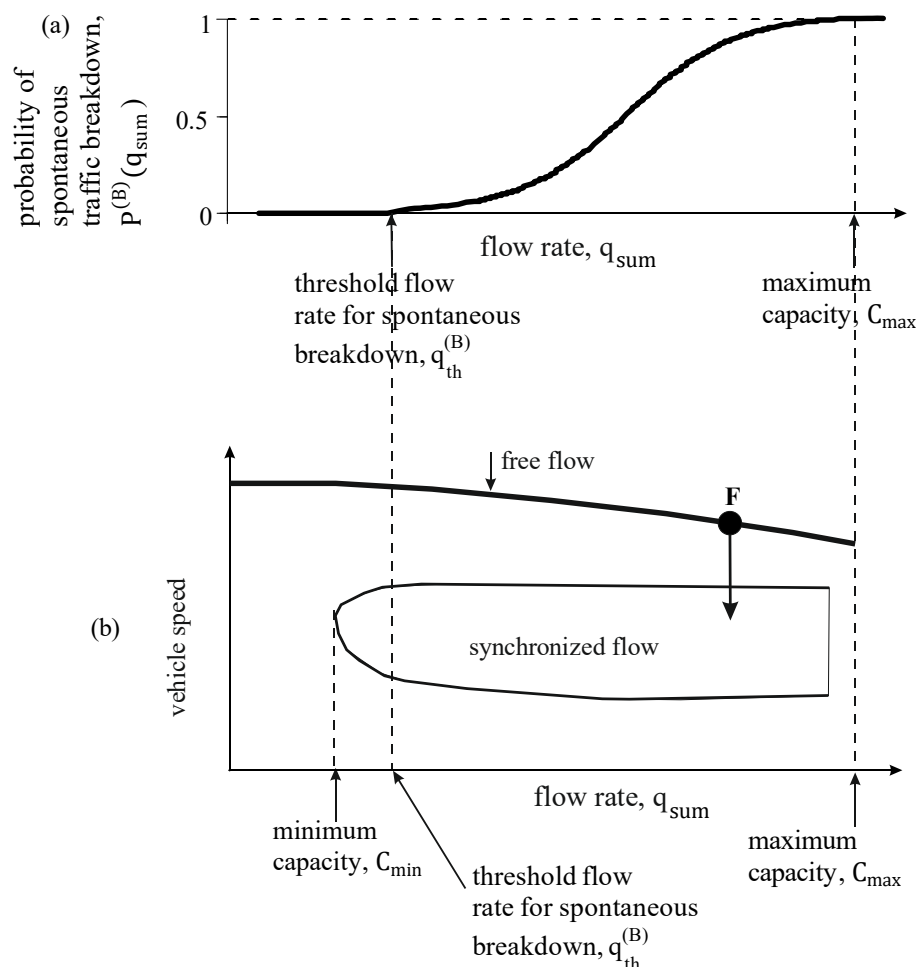
## Individueller Schlussbericht

Dies ermöglicht eine statistische Analyse der durchschnittlichen Geschwindigkeit und Dichte im Verkehrsstrom. Schwarze Punkte auf der Geschwindigkeits-Fluss-Beziehung stehen in Beziehung zu den aus dieser statistischen Analyse abgeleiteten Durchschnittswerten der Geschwindigkeit und Dichte.

Es stellt sich heraus, dass die Fließeigenschaften der Verkehrsströme für den Verkehr ohne autonom fahrende Fahrzeuge und für den gemischten Verkehr mit 2% TPACC-Fahrzeugen identisch sind:

Einzelne TPACC-Fahrzeuge beeinflussen die Fließeigenschaften des Verkehrsstroms im freien Verkehr nicht (Abbildung 6.2.3.32(a)).

Dieses Ergebnis wurde bereits erwähnt, als die in Abbildung 6.2.3.11 und Abbildung 6.2.3.17 gezeigte Kurve 1 für die Flussratenabhängigkeit der Wahrscheinlichkeit von Verkehrsaufteilung  $P^{(B)}(q_{sum})$  diskutiert wurden.



**Abbildung 6.2.3.33: Qualitative Erklärung der Bedingung (6.2.3.18): (a) Qualitative Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs  $P^{(B)}(q_{sum})$  von der Flussrate. (b) Z-Charakteristik des Verkehrszusammenbruchs mit Zuständen für freien Verkehrsfluss und synchronisierten Verkehrsfluss.**

In der Drei-Phasen-Theorie gibt es eine tiefe Verbindung zwischen der von der Flussrate abhängigen Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs  $P^{(B)}(q_{sum})$  (Abbildung 6.2.3.11) und den Gesamtfluss sowie weitere Merkmale des Verkehrsflusses (Abbildung 6.2.3.32). Insbesondere sollte man bei den Flusscharakteristiken von Verkehrsströmen einen Flussratenbereich unterscheiden (Abbildung 6.2.3.32):

$$q_{th}^{(B)} \leq q_{sum} \leq C_{max} \quad (6.2.3.18)$$

## Individueller Schlussbericht

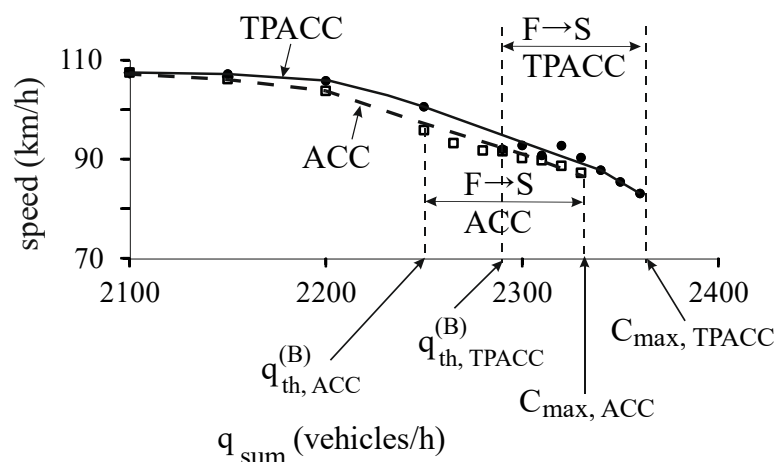
Innerhalb des Durchflussbereichs (6.2.3.18) befindet sich der freie Fluss in einem metastabilen Zustand in Bezug auf den Verkehrszusammenbruch (F→S Übergang) an der Engstelle (Abbildung 6.2.3.33).

Die charakteristische Durchflussrate  $q_{sum} = q_{th}^{(B)}$  in (6.2.3.18) ist eine Schwellen-Durchflussrate für den spontanen Verkehrszusammenbruch an der Engstelle: Bei  $q_{sum} < q_{th}^{(B)}$  ist die Ausfallwahrscheinlichkeit  $P^{(B)}(q_{sum}) = 0$  (Abbildung 6.2.3.33(a)), d.h. während eines Zeitintervalls der Verkehrsflussbeobachtung kann es zu keinem spontanen Verkehrszusammenbruch kommen.

Die charakteristische Durchflussrate  $q_{sum} = C_{max}$  in (6.2.3.18) ist die maximale Straßenkapazität (Abbildung 6.2.3.33): Bei  $q_{sum} > C_{max}$  ist die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs  $P^{(B)}(q_{sum}) = 1$  (Abb. 6.2.3.33 (a)), d.h. es kommt während des Zeitraums der Beobachtung immer zu einem spontanen Verkehrszusammenbruch an der Engstelle.

Je größer die Werte  $q_{th}^{(B)}$  und  $C_{max}$  für den Verkehrsstrom sind, desto größer ist im Durchschnitt der Gesamtfluss. Die charakteristischen Durchflussmengen  $q_{th}^{(B)}$  und  $C_{max}$ , die die Grenzen des Durchflussmengenbereichs (6.2.3.18) bestimmen (Abbildung 6.2.3.33), sind daher im Rahmen der Drei-Phasen Theorie grundlegende statistische Kenngrößen des Gesamtflusses im Verkehrsstrom.

Für die weitere Analyse wird der Durchflussbereich (6.2.3.18) auf den Kennlinien der Verkehrsströme mit dem Pfeil „F→S“ gekennzeichnet (Abbildung 6.2.3.33, Abbildung 6.2.3.34 und Abbildung 6.2.3.35).



**Abbildung 6.2.3.34: Vergleich der Fließeigenschaften von Verkehrsströmen für den freien Fluss auf einer einspurigen Straße mit einer Engstelle durch eine Auffahrt mit gemischtem Verkehr bei 2% an autonom fahrenden Fahrzeugen. Ausschnitt der Geschwindigkeits-Fluss Beziehung für größere Flussraten. Die durchgezogene Kurve „TPACC“ bezieht sich auf TPACC-Fahrzeuge. Die gestrichelte Kurve „ACC“ bezieht sich auf klassische ACC-Fahrzeuge. Weitere Modellparameter entsprechen jenen in Abbildung 6.2.3.11.**

**Berechnete Werte:  $q_{th, TPACC}^{(B)} = q_{th}^{(B)} = 2290$  und  $C_{max, TPACC} = C_{max} = 2360$  Fahrzeuge/h.;  $q_{th, ACC}^{(B)} = 2265$  und  $C_{max, ACC} = 2330$  Fahrzeuge/h.**

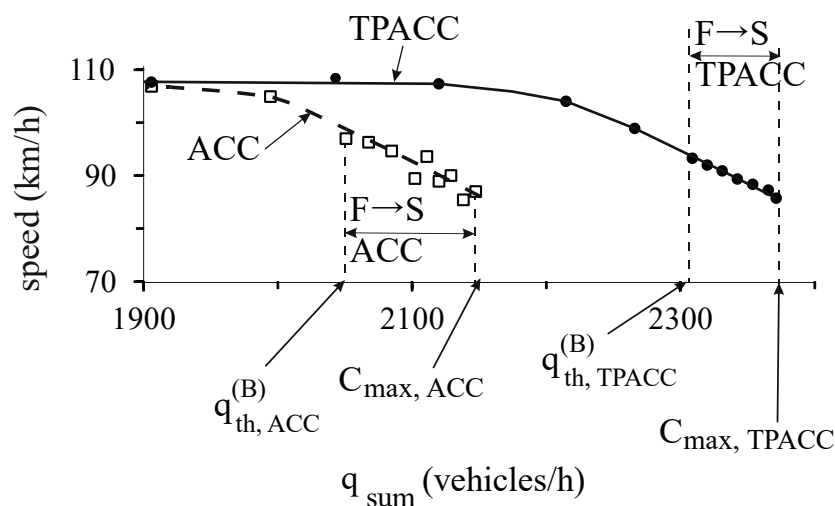
Wir bezeichnen die statistischen Merkmale des Gesamtflusses  $q_{th}^{(B)}$ ,  $C_{max}$  in (6.2.3.18) für den gemischten Verkehrsfluss durch  $q_{th, TPACC}^{(B)}$ ,  $C_{max, TPACC}$ , wenn es sich bei den autonom fahrenden Fahrzeugen um TPACC-Fahrzeuge handelt, bzw. durch  $q_{th, ACC}^{(B)}$ ,  $C_{max, ACC}$  für klassische ACC-Fahrzeuge. Es lässt sich feststellen, dass sich die Gesamtflüsseigenschaften im gemischten Verkehr mit 2% TPACC-Fahrzeugen im Durchschnitt nicht ändern (Abbildung 6.2.3.33):

$$q_{th, TPACC}^{(B)} = q_{th}^{(B)}, C_{max, TPACC} = C_{max} \quad (6.2.3.19)$$

## Individueller Schlussbericht

Im Gegensatz zum gemischten Verkehrsfluss mit 2% der TPACC-Fahrzeuge haben wir festgestellt, dass beide Werte  $q_{th, ACC}^{(B)}$  und  $C_{max, ACC}$  im gemischten Verkehrsfluss mit 2% an klassischen ACC-Fahrzeugen abnehmen (Abbildung 1.2.3.34, Kurve "ACC").

Dies bedeutet, dass bereits 2% der klassischen ACC-Fahrzeuge im Mittel den Gesamtfluss im Verkehrsstrom reduzieren. Dieses Ergebnis ist mit einer großen lokalen Geschwindigkeitsstörung verbunden, welche bereits durch ein klassisches ACC-Fahrzeug an der Engstelle verursacht wird: Innerhalb des Durchflussbereichs (6.2.3.18) kann die große lokale Geschwindigkeitsstörung eine Keimbildung für einen spontanen Verkehrszusammenbruch an der Engstelle auslösen.



**Abbildung 6.2.3.35: Vergleich der Fließeigenschaften von Verkehrsströmen für den freien Fluss auf einer einspurigen Straße mit einer Engstelle durch eine Auffahrt mit gemischtem Verkehr bei 20% autonom fahrenden Fahrzeugen. Ausschnitt der Geschwindigkeits-Fluss Beziehung für größere Flussraten. . Die durchgezogene Kurve „TPACC“ bezieht sich auf TPACC-Fahrzeuge. Die gestrichelte Kurve „ACC“ bezieht sich auf klassische ACC-Fahrzeuge. Für Simulationen bei  $q_{sum} \leq 2000$  Fahrzeuge/h gibt es keinen Zufluss über die Auffahrt ( $q_{on} = 0$ ). Für  $q_{sum} > 2000$  Fahrzeuge/h wird der Anstieg des Gesamtflusses  $q_{sum}$  durch eine Steigerung des Zuflusses  $q_{on}$  an der Auffahrt erreicht, dabei bleibt  $q_{in} = 2000$  Fahrzeuge/h konstant. Weitere Modellparameter entsprechen jenen in Abb. 1.2.3.11. Berechnete Werte:  $q_{th, TPACC}^{(B)} = 2308$ ,  $C_{max, TPACC} = 2371$  Fahrzeuge/h;  $q_{th, ACC}^{(B)} = 2050$  und  $C_{max, ACC} = 2147$  Fahrzeuge/h.**

Man könnte annehmen, dass Fahrzeuge, welche die TPACC-Strategie (6.2.3.1)-(6.2.3.2) anwenden, den Gesamtfluss des Verkehrsstroms aufgrund ihrer unterschiedlichen Nutzung des verfügbaren Raums auf der Straße reduzieren. Die vorgestellten Simulationen zeigen jedoch, dass eine solche nachteilige Wirkung für den Verkehrsstrom nicht auftritt. Anstatt den Gesamtfluss durch den Einsatz von TPACC-Fahrzeugen zu reduzieren, haben wir festgestellt, dass TPACC-Fahrzeuge im Durchschnitt den Gesamtfluss erhöhen (vergleiche Werte  $q_{th, TPACC}^{(B)}$ ,  $C_{max, TPACC}$  in Abbildung 1.2.3.33 mit den entsprechenden Werten in der Bildunterschrift von Abbildung 1.2.3.35).

Im Gegensatz zu TPACC-Fahrzeugen haben wir festgestellt, dass klassische ACC-Fahrzeuge im Mittel den Gesamtfluss im gemischten Straßenverkehr reduzieren (Abbildung 1.2.3.35). Dieser Effekt der durch klassische ACC-Fahrzeuge verursachten Verringerung des Gesamtflusses wird durch das Auftreten großer lokaler Geschwindigkeitsstörungen am Engpass im gemischten Verkehr erklärt.

Die lokalen Geschwindigkeitsstörungen bewirken einen Verkehrszusammenbruch im gemischten Verkehr bei wesentlich geringeren Flussraten im Vergleich zum Verkehrsfluss ohne klassische ACC-Fahrzeuge.

## Individueller Schlussbericht

---

Durch die starke Wirkung von autonom fahrenden Fahrzeugen auf den Verkehrszusammenbruch an der Engstelle lassen sich in Simulationen die Auswirkung der unterschiedlichen Nutzung des verfügbaren Raums auf der Straße durch TPACC-Fahrzeuge und ACC-Fahrzeuge auf den Gesamtfluss nicht auflösen.

### 6.2.3.13 Zusammenfassung

Basierend auf numerischen Simulationen eines einfachen Modells für autonomes Fahren im Rahmen der Drei-Phasen-Theorie (TPACC), welche im Projekt MEC-View entwickelt wurde, haben wir festgestellt, dass Anwendungen der TPACC-Strategie zu folgenden Vorteilen im Vergleich zum klassischen ACC-Ansatz führen können:

1. Das Fehlen von String-Instabilität.
2. Erheblich geringere Geschwindigkeitsstörungen an Engstellen im Straßenverkehr.
3. TPACC-Fahrzeuge können die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle im gemischten Verkehrsfluss verringern. Während im Gegenteil, selbst ein einzelnes autonom fahrendes Fahrzeug, das auf dem klassischen ACC Ansatz basiert, kann im gemischten Verkehr an einer Engstelle einen Verkehrszusammenbruch provozieren.

Diese Vorteile des TPACC sind damit verbunden, dass es in der TPACC-Strategie keinen festen angestrebten zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug gibt: Ein TPACC-Fahrzeug weist daher einen großen Indifferenz-Bereich innerhalb des Zeitabstandsbereichs (6.2.3.4) auf, innerhalb dessen das TPACC-Fahrzeug den Zeitabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht kontrolliert.

Im Rahmen des Projektes MEC-View wurde festgestellt, dass das TPACC-Fahrzeug aufgrund des großen Indifferenz-Bereichs des zeitlichen Abstands (6.2.3.4) nicht unbedingt so stark abbremst wie das vorausfahrende Fahrzeug, wenn eine lokale kurzzeitige Geschwindigkeitsstörung an einem Engstellenbereich der Straße auftritt.

Dieses dynamische Verhalten von TPACC-Fahrzeugen verringert lokale Geschwindigkeitsstörungen im freien Fluss an einem Straßenengpass. Die Abnahme der Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsstörungen an Straßenengpässen führt wiederum zu einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Verkehrszusammenbrüchen im Verkehrsfluss.



### 6.3 AP 6: Automatisiertes Fahrzeug

#### 6.3.1 UAP 6.5 Dynamische Objektprädiktion

##### 6.3.1.1 Einführung

Im Zuge des automatisierten Auffahrens von der nicht-vorfahrtberechtigten Straße („Mähringer Straße“) auf die vorfahrtberechtigte Straße („Loherstraße“) an der Projektkreuzung, ist es von zentraler Bedeutung mit Hilfe der vor Ort installierten Infrastruktursensorik Verkehrsdaten der „Loherstraße“ zu erheben und diese an das automatisch fahrende Fahrzeug weiterzuleiten. Diese Daten umfassen u.a. die Positionen  $x_n$  und Geschwindigkeiten  $v_n$  der auf der „Loherstraße“ fahrenden Fahrzeuge.

Eine möglichst präzise Prädiktion dieser sog. dynamischen Verkehrsteilnehmer ist für den Zeitpunkt des Einschierens des automatisch fahrenden Fahrzeugs von erheblicher Bedeutung. Auf deren Basis wird berechnet, welche Lücke „Headway“  $g_n$  (räumliche Länge; oder  $\tau = g_n/v_n$  zeitliche Lücke; „temporal Headway“) sich für den Einfädelvorgang am besten eignet. Die Geschwindigkeit des automatisch fahrenden Fahrzeugs kann mit dieser Information bereits im Vorfeld auf die Situation auf der „Loherstraße“ angepasst werden. Ein präzises und komfortables Einfahren in die anvisierte Lücke wird somit ermöglicht.

Die Universität Duisburg-Essen hat sich im Rahmen des AP6 daher intensiv mit der Dynamik von menschlich gesteuerten Kraftfahrzeugen beschäftigt und mit Hilfe einer eigens entwickelten Messelektronik zur Prädiktion dieser dynamischen Verkehrsteilnehmer beigetragen. Dieser mehrstufige Prozess wurde in den letzten Zwischenberichten ausführlich dargelegt und soll im Folgenden nochmals erläutert werden.

##### 6.3.1.2 Mikroskopische Simulation

Als Einstieg in die komplexe Materie des mikroskopischen Verkehrsgeschehens, wurde zunächst das etablierte *Kerner-Klenov-Modell* herangezogen. Obwohl es sich dabei um ein mikroskopisches Modell handelt, werden von diesem, üblicherweise makroskopische Verkehrsmuster und –analysen abgeleitet. Die Generierung von mikroskopischen Observablen war jedoch neu und lieferte erste Hinweise darauf, wie sich der Abstand zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge potentiell entwickeln würde. Zu diesem Zweck wurde eine entsprechende Computersimulation mit graphischer Ausgabe aufgesetzt (siehe Abbildung 6.3.1.1).



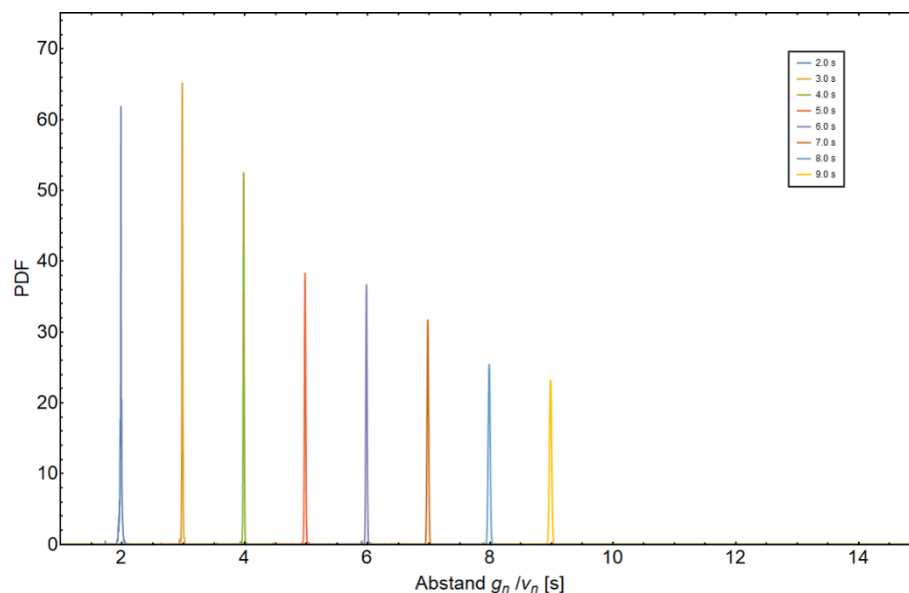
**Abbildung 6.3.1.1: Graphische Ausgabe der Computersimulation zu einem gegebenen Zeitpunkt. Die Projektkreuzung ist in ihrer Topographie stark vereinfacht dargestellt. Die gelben Rechtecke stellen zwei, sich auf der „Loherstraße“ befindlichen Fahrzeuge dar und  $g_n$  den räumlichen Abstand zwischen diesen. Das horizontale Straßenelement ist die nicht-vorfahrtberechtigte „Mähringer Straße“, die später vom automatisch fahrenden Fahrzeug befahren werden soll.**

## Individueller Schlussbericht

Im Laufe vieler Simulationsdurchläufe hat sich gezeigt, dass die Abstände zweier aufeinanderfolgender PKW, ohne das Einbringen einer Störung (z.B. durch einen sog. Bottleneck), über sehr lange Zeiträume ( $> 10s$ ), sowohl zeitlich, als auch räumlich nahezu konstant bleiben. Im Kerner-Klenov Modell wird der Parameter der *Freiflussgeschwindigkeit*  $v_{free}$  für alle PKW gleich gewählt, was letztlich auf *mikroskopischer* Ebene zu dem genannten Effekt führt.

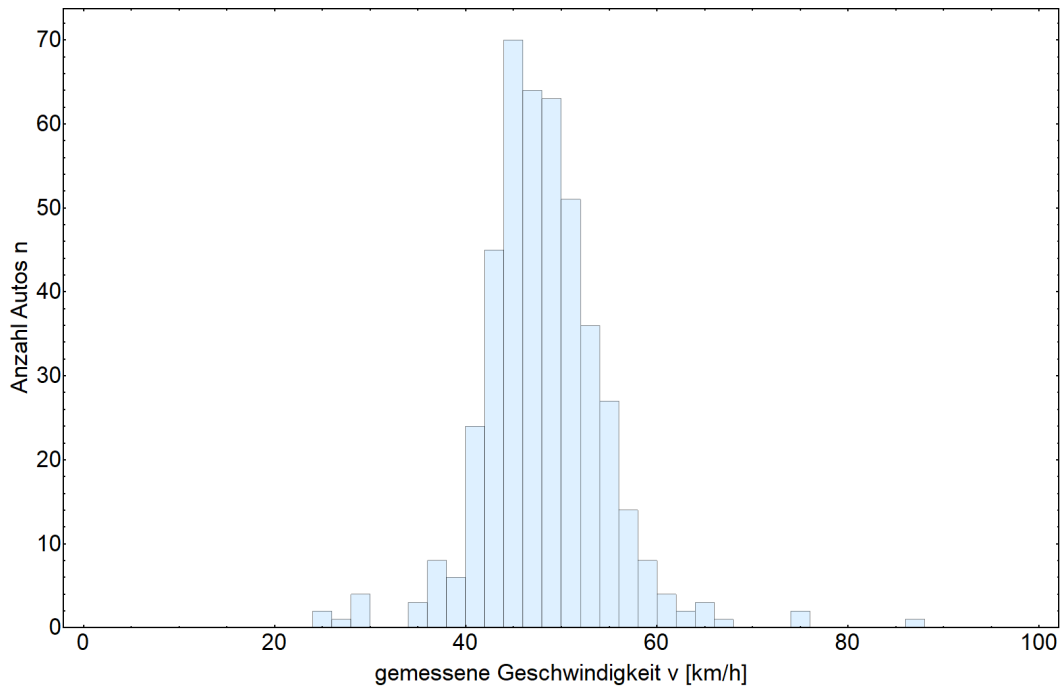
Die aus der Computersimulation resultierende empirische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der zeitlichen Abstände zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge  $g_n/v_n$  ist in Abbildung 6.3.1.2 zu sehen. Ein Peak entspricht dabei jeweils einer Simulation. Die verschiedenen Simulationen unterscheiden sich nur in den für die PKW festgelegten initialen zeitlichen Abstände  $\tau_{init}$ . Ausgewertet wurden diese Abstände schließlich jeweils am Ort der Projektkreuzung  $x_k$ , ca. 100m nach ihrer Initialisierung. Die gewählten 100 m entsprechen in etwa dem durch die Infrastruktursensorik erfassten Bereich der „Loherstraße“. Die scharfen Peaks bestätigen offensichtlich die Konstanz von  $g_n/v_n$  im Falle eines für alle PKW gleich gewählten Modellparameters  $v_{free}$ .

Da es sich bei den untersuchten zeitlichen Abständen, wie bereits erwähnt, um *mikroskopische* Daten handelt und somit um einen neuen Anwendungsfall des Kerner-Klenov Modells, ist eine Anpassung des Modellparameters der *Freiflussgeschwindigkeit*  $v_{free}$  von Nöten.



**Abbildung 6.3.1.2: Gleiche Wahl von  $v_{free}$  für alle PKW: Empirische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen über dem zeitlichen Abstand  $g_n/v_n$  zweier aufeinanderfolgender PKW für verschiedene  $\tau_{init}$  (siehe Legende). Die Auswertung erfolgte ca. 100m nach der Initialisierung der Fahrzeuge. Simulationsdauer jeweils 3600s. Ausgewertet wurden pro Kurve ca. 1000 bis 2000 Messwerte. Die Peaks in der Abbildung deuten auf einen nahezu unveränderten zeitlichen Abstand über diesen Streckenabschnitt hin:  $\tau_{init} \approx g_n/v_n$ .**

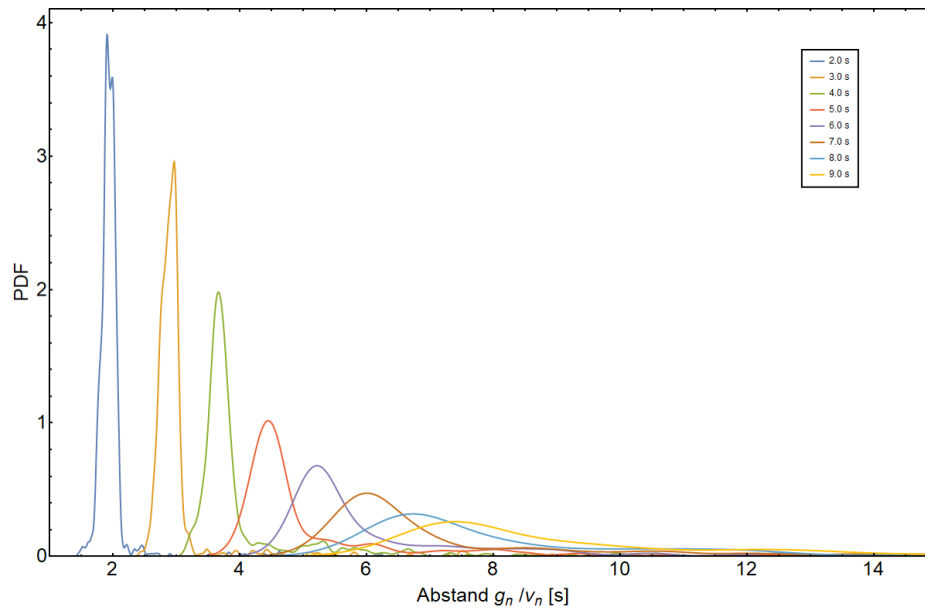
In dem nun verfolgten Ansatz wurde die Freiflussgeschwindigkeit  $v_{free}$  den einzelnen Fahrzeugen statistisch zugeteilt. Als zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wurde hierfür die Normalverteilung verwendet.



**Abbildung 6.3.1.3: Histogramm einer videobasierten Auswertung zur Geschwindigkeitsverteilung von 432 Kraftfahrzeugen bei erlaubtem Tempo 50 auf einer einspurigen Straße. Die Form der Verteilung stützt die These, die Freiflussgeschwindigkeit  $v_{free}$  für die Computersimulation statistisch und nicht wie bisher, konstant zu wählen.**

Im Hinblick auf die geltende Geschwindigkeitsbegrenzung des relevanten Straßenabschnitts der „Loherstraße“ von 30 km/h wurde ein Mittelwert von 33.0 km/h und eine Standardabweichung von 4.5 km/h als Verteilungsparameter gesetzt. Diese Wahl weist eine gute Übereinstimmung mit den empirischen Flottendaten dieses Straßenabschnitts der Daimler AG auf und der eigens initiierten, videobasierten Geschwindigkeitsbestimmung auf einem Straßenabschnitt der *Schweizer Straße* in Duisburg (siehe **Abbildung 6.3.1.3**).

Die Ergebnisse der Fahrzeuge mit der statistisch gewählten Freiflussgeschwindigkeit  $v_{free}$  sind in **Abbildung 6.3.1.4** zu sehen. Hier wurde die gleiche Form der Auftragung gewählt wie bereits in **Abbildung 6.3.1.2**, um den unmittelbaren Vergleich der beiden Abbildungen zu ermöglichen. In **Abbildung 6.3.1.4** ist nun eine deutliche „Aufweichung“ der Peaks zu erkennen. Es fällt auf, dass diese Aufweichung nicht symmetrisch ist, sondern mit einer etwas stärker ausgeprägten Flanke zu größer werdenden Abständen verbunden ist. Dieser Umstand ist im Hinblick auf den Einfädelvorgang des automatisch fahrenden Fahrzeugs tendenziell als positiv zu bewerten. Weiterhin ist der **Abbildung** zu entnehmen, dass für den am häufigsten auftretenden Wert der gemessenen zeitlichen Abstände  $\tau_{mod}$  jeweils gilt:  $\tau_{mod} < \tau_{init}$ .

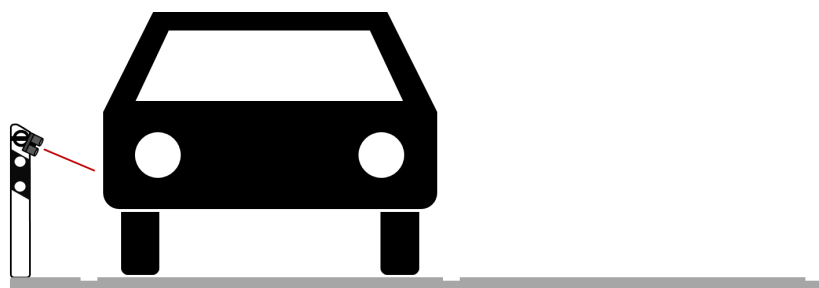


**Abbildung 6.3.1.4: Statistische Wahl von  $v_{free}$ : Empirische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen über dem zeitlichen Abstand  $g_n/v_n$  zweier aufeinanderfolgender PKW für verschiedene  $\tau_{init}$  (siehe Legende). Auswertung erfolgte ca. 100m nach der Initialisierung der Fahrzeuge. Simulationsdauer jeweils 3600s. Ausgewertet wurden pro Kurve ca. 1000 bis 2000 Messwerte. Zu erkennen ist nun eine deutliche Aufweichung der Peaks gegenüber Abbildung 6.3.1.2.**

Die beschriebenen Simulationsergebnisse sind bis dato jedoch nicht empirisch verifiziert oder falsifiziert worden, erscheinen aber zunächst einmal plausibel. Im Rahmen der Fachkonferenz *ICAART 2019 – 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence* wurden diese Zwischenergebnisse daher in Form einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht (siehe Abs. „Veröffentlichungen“).

### 6.3.1.3 Generierung Empirischer Daten

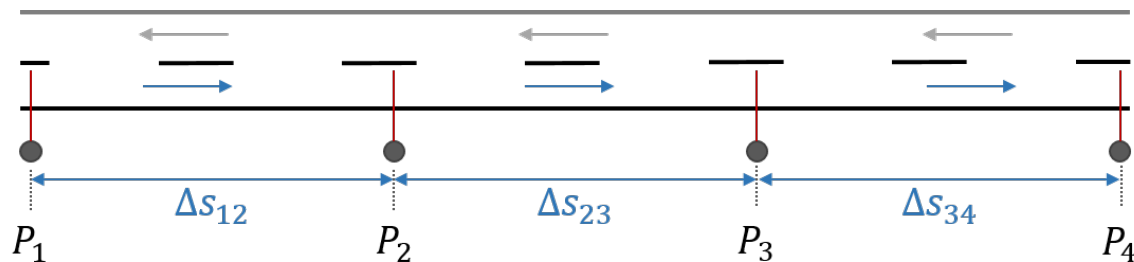
Mit Hilfe des im Laufe des Projektes entwickelten **Messsystems**, bestehend aus vier Messeinheiten ist es möglich Verkehrsdaten aufzuzeichnen. Eine Messeinheit besteht je aus der signalverarbeitenden Elektronik und dem daran angeschlossenen Lidar-Sensor. Die Sensoren werden, wie in Abbildung 6.3.1.5 dargestellt, entlang einer urbanen Straße an Leitpfosten befestigt und anschließend auf die Zielspur ausgerichtet, um die Detektion von Fahrzeugen auf der Gegenfahrbahn zu vermeiden.



**Abbildung 6.3.1.5: Schematische Darstellung der Anbringung eines Sensors an einem Leitpfosten an einer gegebenen Position  $P_i$ . Die rote Linie visualisiert deutet den für das menschliche Auge unsichtbaren Infrarotlaserstrahl des verwendeten Lidar-Sensors an. Zur Vermeidung der Detektion von Fahrzeugen auf der Gegenfahrbahn ist der Sensor nach unten geneigt. Im Bild zu sehen ist die Detektion eines Fahrzeuges auf der Zielspur.**

## Individueller Schlussbericht

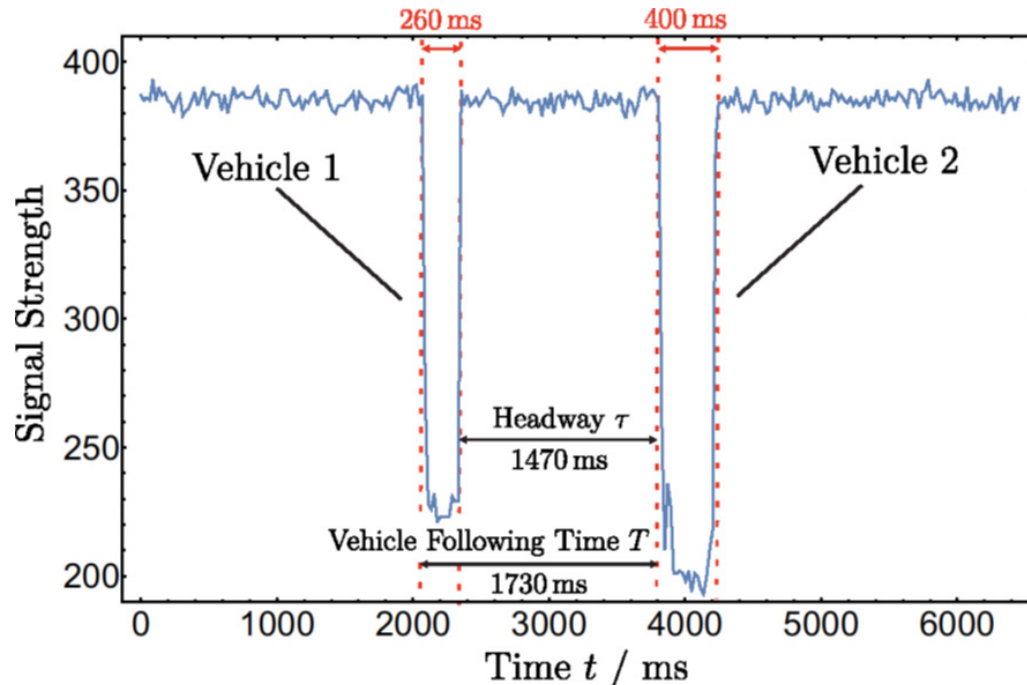
Aufgrund der benachbarten Anordnung dieser vier Positionen entstehen drei Sektoren (siehe **Abbildung 6.3.1.6**) einer Länge von jeweils ca. 25 m.



**Abbildung 6.3.1.6:** Anordnung der vier einzelnen Messeinheiten an Positionen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  zur Erhebung der „Entwicklung der zeitlichen Abstände zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge“. Die einzelnen Sektoren zwischen den Messeinheiten werden als  $\Delta s_{ij}$  bezeichnet. Die roten, vertikalen Linien repräsentieren die Laserstrahlen der einzelnen Lidar-Sensoren der jeweiligen Messeinheit und dienen der Detektion vorbeifahrender Kraftfahrzeuge.

Ein typischer Signalverlauf, ausgelöst durch in dem Fall zwei passierende Fahrzeuge an einem gegebenen Sensor, ist in **Abbildung 6.3.1.7** zu sehen.

Während einer 12-stündigen Messung (Ein Messtag) können in etwa 5000 Fahrzeuge detektiert werden. Aufgrund der in der Auswertung erfolgenden Aufteilung dieser Daten, macht es aber im Zuge des Erreichens einer statistischen Signifikanz Sinn, mindestens fünf Messtage (mit insgesamt 25000 Fahrzeugen) einzubeziehen.



**Abbildung 6.3.1.7:** Typischer Signalverlauf, aufgenommen durch eine der insgesamt vier Messeinheiten. Zu sehen sind die Signalausschläge, ausgelöst durch zwei aufeinanderfolgende Kraftfahrzeuge. Anhand dieser können Fahrzeugfolgezeiten  $T$  (engl. *vehicle following time*), die Zeitlücke  $\tau$  (engl. *temporal headway*), sowie deren Änderung  $\Delta\tau$  – durch den Vergleich mit den entsprechenden Signalen der verbleibenden drei Messeinheiten – abgeleitet werden. Die zeitliche Länge der Fahrzeuge ist außerdem am oberen Bildrand, in roter Schrift dargestellt.

## Individueller Schlussbericht

---

In der anschließenden Auswertung der aufgenommenen Verkehrsdaten lassen sich zunächst folgende, millisekundengenaue Größen an jeder der Positionen  $P_i$  ermitteln:

- Die Echtzeit, zu der ein Fahrzeug den jeweiligen Sensor passiert
- Die Dauer  $d$  eines Passiervorgangs (zeitliche Länge des Fahrzeuges)
- Die Fahrzeugfolgezeit  $T$  (engl. *vehicle following time*)
- Die Zeitlücke  $\tau$  zwischen zwei, aufeinanderfolgenden Fahrzeugen (engl. *temporal headway*)

Zwischen zwei Positionen  $P_i$  und  $P_j$ , also auf den einzelnen Sektoren  $\Delta S_{ij}$ , lassen sich ferner die Größen:

- Geschwindigkeit  $v$
- Änderung der zeitlichen Lücke  $\Delta\tau$  (engl. *change in temporal headway*)

ermitteln.

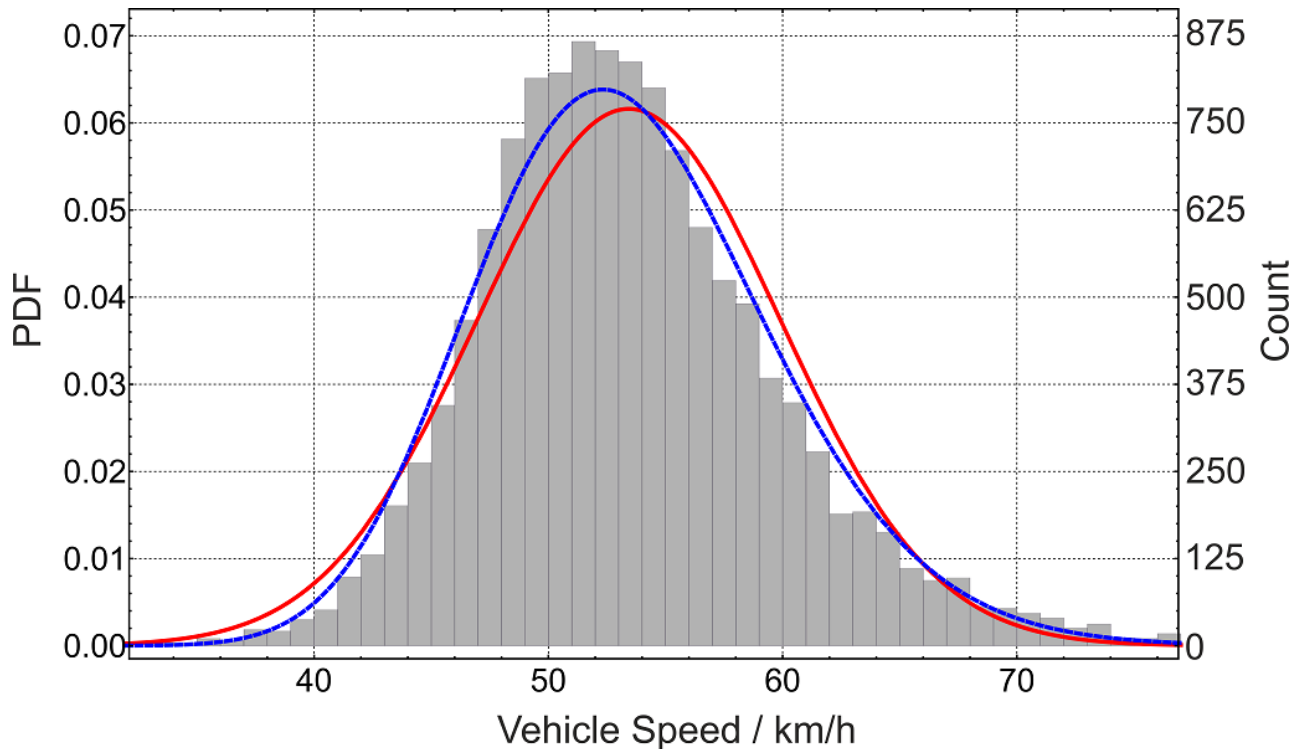
Außerdem lässt sich auf dieser Basis die

- Korrelation  $c$  der Änderung der zeitlichen Lücke  $\Delta\tau$  zwischen zwei benachbarten Sektoren

bestimmen. Letztgenanntes wird in Abhängigkeit verschiedener Zeitlücken  $\tau$  vorgenommen, was mit der o.g. Aufteilung der Daten deckungsgleich ist.

Die ausgewählte und hier vorgestellte Straße, auf die sich sämtliche Messergebnisse beziehen, ist die *Koloniestraße* in Duisburg (Tempolimit 50 km/h). Leider konnte es aufgrund der Covid-19 Krise nicht mehr zu einer entsprechenden Messung auf der *Loherstraße* in Ulm kommen. Die im Rahmen der Arbeit der UDE erzielten Ergebnisse lassen sich nichtsdestotrotz auch auf andere, ähnliche Verkehrssituationen übertragen und liefern so einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrsforschung im Kontext des automatisierten Fahrens.

Im Zuge dieses Abschlussberichtes werden nur für das statistische Prädiktionsmodell relevanten Ergebnisse vorgestellt. Um dem Leser dennoch eine Einschätzung der gefahrenen Geschwindigkeiten zu geben, ist in Abbildung 6.3.1.8 zunächst die Verteilung dieser in Form eines Histogramms gezeigt. Dieses empirische Ergebnis rechtfertigt die Annahme es handle sich bei der Geschwindigkeitsverteilung um eine Normalverteilung in guter Näherung.



**Abbildung 6.3.1.8:** Histogramm der Geschwindigkeitsverteilung eines vierstelligen Datenstammes. Gemessen wurde innerorts, bei einem Tempolimit von 50 km/h. Die zugrundeliegenden Geschwindigkeitsdaten wurden sowohl mit der Normalverteilung (rot), als auch mit der Lognormalverteilung (blau) approximiert. Letztere bildet das Verhalten der zugrundeliegenden Daten besser ab, jedoch ist die Normalverteilung in guter Näherung ebenfalls geeignet; PDF = probability density function (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion).

### 6.3.1.4 Änderung des zeitlichen Abstandes zweier, aufeinanderfolgender Fahrzeuge

Der erste Schritt für ein Prädiktionsmodell ist nun die Feststellung der zeitlichen Änderung des zeitlichen Abstandes  $\Delta\tau$  zweier, aufeinanderfolgender Fahrzeuge über verschiedene Distanzen. Für die vorliegende Messung sind die Abstände benachbarter Sensoren jedoch äquidistant gewählt (28 m), sodass auch die Betrachtung von  $\Delta\tau$  über diejenigen Sektoren, die sich über mehrere Leitpfosten erstrecken, mit in die Auswertung einbezogen werden; dazu zählen:

- $\Delta s_{12}$  (Länge: 28 m)
- $\Delta s_{13}$  (Länge: 56 m)
- $\Delta s_{14}$  (Länge: 84 m).

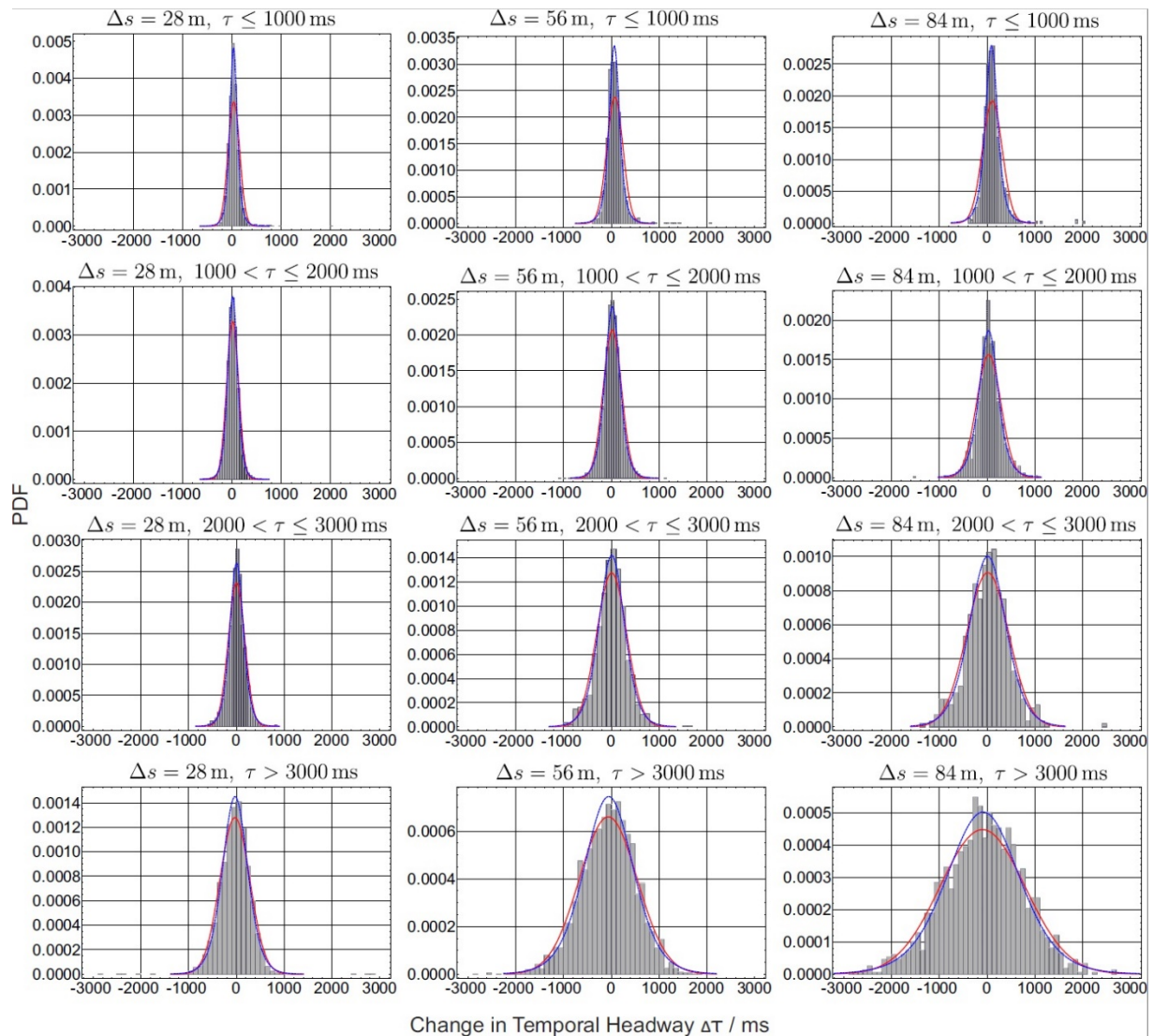
Außerdem wird der komplette Datensatz in die folgenden Subdatensätze mit gemessenen Zeitlücken  $\tau$  von:

- $\tau < 1000$  ms
- $(1000 < \tau < 2000)$  ms
- $(2000 < \tau < 3000)$  ms
- $\tau > 3000$  ms

zerlegt, sodass sich schlussendlich insgesamt 12 Histogramme ergeben, die die Änderung des zeitlichen Abstandes  $\Delta\tau$  visualisieren (siehe Abbildung 6.3.1.9). Dabei entspricht  $\Delta\tau < 0$  einer Verkleinerung und  $\Delta\tau >$

## Individueller Schlussbericht

0 eine Vergrößerung der Nettozeitlücke  $\tau$  um den jeweils angegebenen Wert. Ein dicht auffahrendes Fahrzeug ändert seine Zeitlücke also im Mittel anders als ein Fahrzeug mit wesentlich größerem Abstand zu seinem Vordermann. Wie in der zugehörigen Abbildung 6.3.1.9 zu erkennen ist, ergibt sich für alle ausgewerteten Histogramme eine nahezu symmetrische Verteilung für  $\Delta\tau$  mit „heavy tails“ an den Rändern. Von allen in Frage kommenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDFs), repräsentiert die Studentische t-Verteilung (in blau eingezeichnet) das jeweils zugrundeliegende Histogramm dabei am besten. Zudem wurde jeweils die Normalverteilung (in rot) an die Daten angefitet, da sich diese im Hinblick auf ein Prädiktionsmodell besser eignet.



**Abbildung 6.3.1.9:** Histogramme der Änderung des zeitlichen Abstandes („Change in Temporal Headway“)  $\Delta\tau$  zweier, aufeinanderfolgender Fahrzeuge in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke  $\Delta s$  und des zeitlichen Abstands  $\tau$ . Gemessen wurde innerorts, bei einem Tempolimit von 50 km/h. Die Histogramme wurden sowohl mit der Normalverteilung (rot), als auch mit der Studentischen t-Verteilung (blau) approximiert. Letztere bildet das Verhalten der zugrundeliegenden Daten zwar etwas besser ab (heavy tails), ist im Hinblick auf ein Prädiktionsmodell jedoch ungeeignet; PDF = probability density function (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion).

Diese und weitere Ergebnisse wurden im Zuge der *MT-ITS2019* in Krakau vorgetragen und wurden in der begleitenden, schriftlichen Publikation auf der Plattform *IEEE Xplore Digital Library* veröffentlicht (siehe Abs. „Veröffentlichungen“: „Statistical Analysis of Temporal Headway Development through Empirical Data in Urban Traffic“; in dieser befinden sich außerdem weiterführende, fachliche Details).

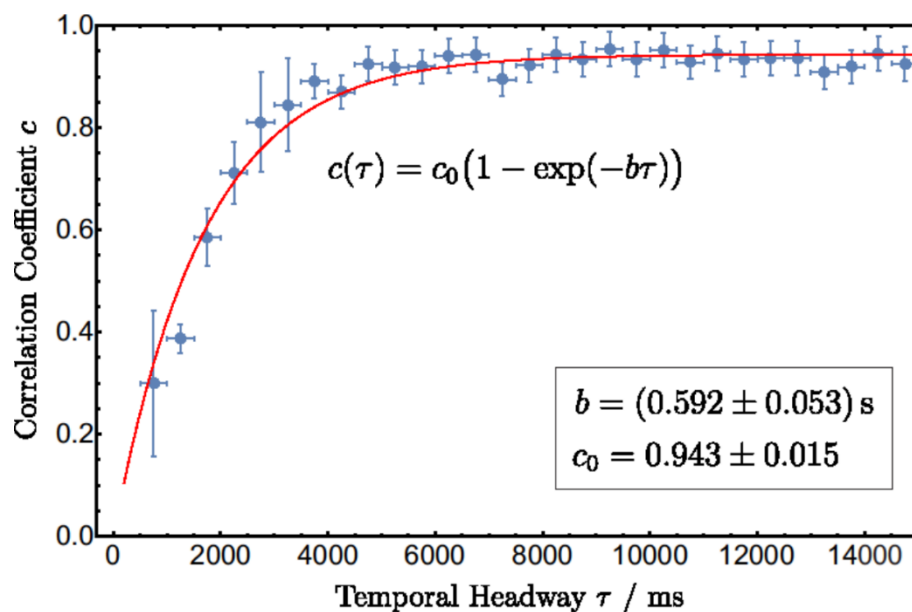


## Individueller Schlussbericht

### 6.3.1.5 Korrelationsanalyse

In den nun nachfolgenden Ergebnissen wird eine Korrelationsanalyse zwischen den Änderungen der zeitlichen Abständen  $\Delta\tau$  zwischen benachbarten Sektoren vorgenommen. Die Anwendung des Pearson'schen Korrelationskoeffizientens  $c \in [-1, 1]$  auf die mikroskopischen Daten stellte sich in diesem Kontext als zweckmäßig heraus. Dabei bedeutet  $c = 1$  perfekte Korrelation,  $c = -1$  perfekte Anti-Korrelation und  $c = 0$  keine Korrelation. Im vorliegenden Fall wurde  $c$  zwischen  $\Delta\tau_{12}$  (Sektor  $\Delta S_{12}$ ) und  $\Delta\tau_{23}$  (Sektor  $\Delta S_{23}$ ) analysiert. Für die in diesem Kontext gewonnenen Resultate gilt jedoch einheitlich  $c > 0$  (positive Korrelation). Aufgrund der zwischenzeitlich geschaffenen, größeren Datenbasis, kann die erfolgte Aufteilung der Subdatensätze für die betrachteten Zeitlücken  $\tau$  nun in feineren, halbsekündigen Schritten erfolgen. In Abhängigkeit dieser initialen Zeitlücke  $\tau$  (an Position  $P_1$ , siehe Abbildung 6.3.1.6), fällt der Betrag des Korrelationskoeffizienten unterschiedlich aus.

Für dicht auffahrende Fahrzeuge (kleines  $\tau$ ) wird dabei eine geringere Korrelation  $c$  festgestellt, als für Fahrzeuge mit erhöhtem Abstand (erhöhtes  $\tau$ ). Die zugehörige Quantifizierung dieser Tatsache, mit einer entsprechenden Fit-Funktion, ist in Abbildung 6.3.1.10 zu sehen. Die Streudiagramme, welche bei der angegebenen Messgenauigkeit (engl. *Accuracy*), die Korrelationen zwischen den beiden Größen  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$  visualisieren, sind außerdem in Abbildung 6.3.1.11 aufgeführt.

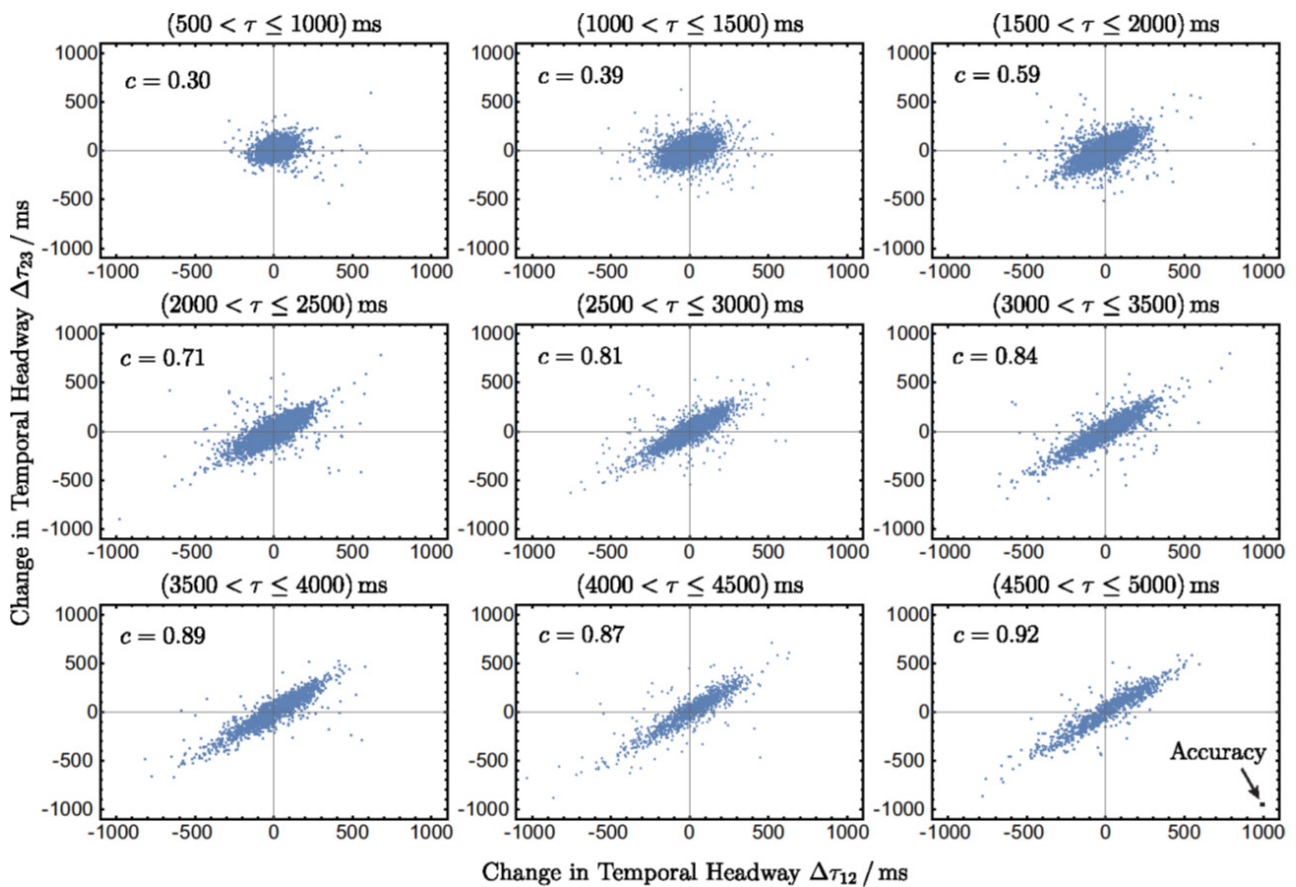


**Abbildung 6.3.1.10:** Entwicklung des Pearson'schen Korrelationskoeffizienten  $c$  der Änderung des zeitlichen Abstandes zweier, aufeinanderfolgender Fahrzeuge zwischen angrenzenden Straßensegmenten, in Abhängigkeit der initialen Zeitlücke  $\tau$ . Es ist deutlich ein deutlich steigender Trend für kleine Zeitlücken  $\tau$  zu erkennen, welcher offenbar in ein asymptotisches Verhalten für große  $\tau$  mündet. Die Anwendung der in der Abbildung angegebenen, exponentiellen Fit-Funktion ist somit aufgrund der Konvergenzkriterien gerechtfertigt. Der Parameter  $c_0$  beschreibt die Obergrenze des Korrelationskoeffizienten für große  $\tau$  und spiegelt, mit einem Wert nahe 1, die sehr starke Korrelation zwischen  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$  wider.

Das Vorhandensein einer Korrelation stellt die Basis im Hinblick auf ein Prädiktionsmodell dar. Über ein geeignetes mathematisches Modell ist es damit möglich, eine statistische Vorhersage über die wahrscheinlichste Entwicklung der zugehörigen Zeitlücke  $\tau$  zu tätigen. Generell gilt: je größer der jeweilige Korrelationskoeffizient  $c$  ist, desto besser lässt sich eine Vorhersage für die Entwicklung der Nettozeitlücke  $\tau$  für den nächsten Sektor treffen.

## Individueller Schlussbericht

Ein Fahrzeug, welches also seinen Abstand zunächst zum Vorausfahrenden vergrößert hat, wird dies mit hoher Wahrscheinlichkeit im sich anschließenden Sektor erneut tun. Die Wahrscheinlichkeit steigt dabei mit dem Betrag des Korrelationskoeffizienten und ist gemäß der Datenlage (vgl. Abbildung 6.3.1.10) für größere zeitliche Abstände  $\tau > 3$  s zwischen den Fahrzeugen besonders hoch. Aufgrund der Tatsache, dass die zugehörige Fit-Funktion allerdings im Bereich  $\tau < 3$  s sehr stark ansteigt, findet man bereits ab zeitlichen Abständen  $\tau > 2$  s einen hinreichend großen Korrelationskoeffizienten  $c > 0,5$  zum Zwecke einer verlässlichen Prädiktion. Die Analyse der zeitlichen Entwicklung von Nettozeitlücken im Bereich  $\tau < 2$  s ist aus wissenschaftlicher Sicht nicht von vorrangigem Interesse, da in diesem Fall die entsprechende Zeitlücke für einen potentiellen Einfädelvorgang zu kurz ausfällt, um den hohen Sicherheitsanforderungen im Kontext des automatisierten Fahrens gerecht zu werden.



**Abbildung 6.3.1.11:** Streudiagramme zur Visualisierung der Korrelation zwischen der Änderung des zeitlichen Abstandes zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge in aufeinanderfolgenden Sektoren für unterschiedliche initiale Zeitlücken  $\tau$ . Während für dicht auffahrende Fahrzeuge (kleines  $\tau$ ) nur eine geringe Korrelation erkennbar ist, erhöht sich diese drastisch für einen steigenden Fahrzeugabstand (steigendes  $\tau$ ). Der jeweils zugehörige Korrelationskoeffizient  $c$  ist links oben in den einzelnen Streudiagrammen dargestellt. Eine entsprechende Auftragung dieses Umstandes ist in Abbildung 6.3.1.10 zu sehen. Die Messgenauigkeit (engl. *Accuracy*) bezieht sich auf alle aufgeführten Streudiagramme.

Die zugehörige wissenschaftliche Veröffentlichung zu der vorgestellten Korrelationsanalyse wurde kürzlich im renommierten Fachjournal „Collective Dynamics“ publiziert (siehe Abs. „Veröffentlichungen“: „Correlations in Spatiotemporal Headway Dynamics of Road Traffic Using Extremely Accurate Microscopic Empirical Data“; in dieser befinden sich außerdem weiterführende, fachliche Details).

## Individueller Schlussbericht

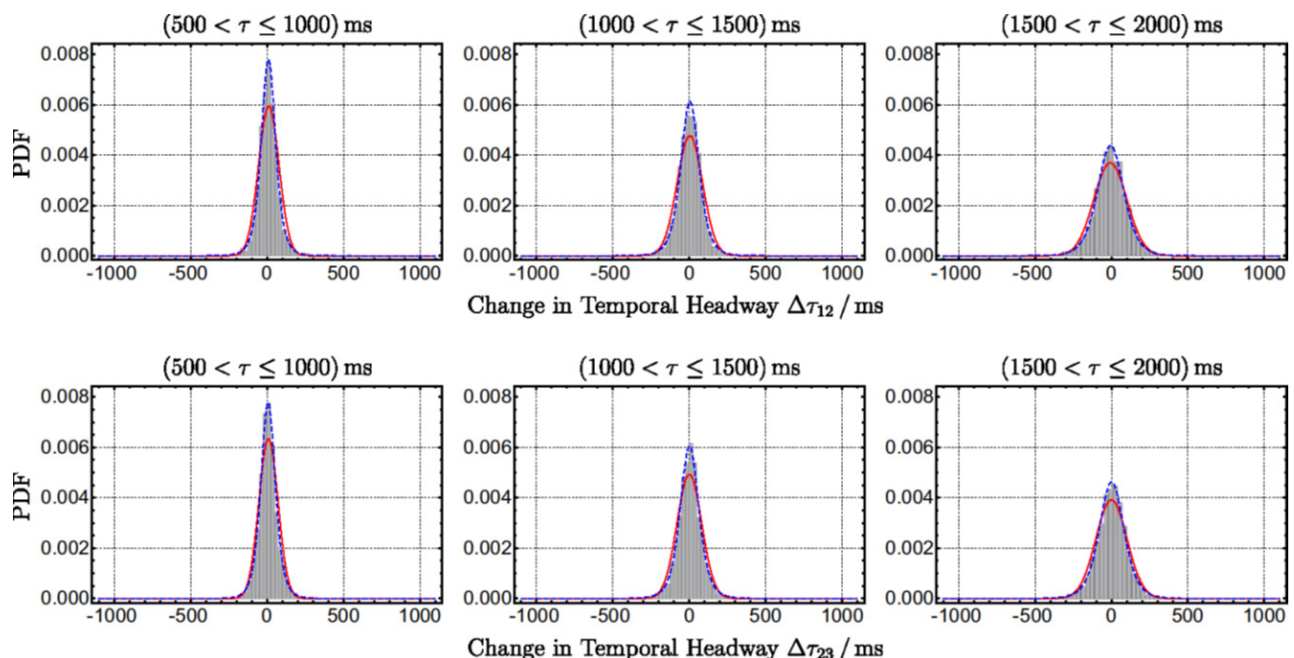
### 6.3.1.6 Statistisch-mikroskopisches Prädiktionsmodell

Mit der Behandlung des entwickelten statistisch-mikroskopischen Prädiktionsmodells (auch als statistisches Prädiktionsmodell bezeichnet) kommen wir nun zum letzten und wichtigsten Abschnitt dieses Abschlussberichts. Das vorgestellte Prädiktionsmodell basiert auf der oben vorgestellten Korrelationsanalyse zwischen der zeitlichen Änderung des Abstandes von aufeinanderfolgender Fahrzeugen über zwei benachbarte Sektoren (Korrelation zwischen  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$ ). Dabei fungieren die entsprechenden Verteilungen (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen) von  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$  als Randverteilungen einer bivariaten Normalverteilung. Zwei Randverteilungen werden zusammengehörig genannt, falls diese für die gleichen Intervalle der zeitlichen Abstände  $\tau$  zwischen zwei, aufeinanderfolgenden Fahrzeugen gelten. Für die Mittelwerte zusammengehöriger Randverteilungen (gleiche) gilt dabei immer  $\mu = \mu_1 = \mu_2 = 0$  und für die Standardabweichungen  $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ . Die Standardabweichung  $\sigma = \sigma(\tau)$  hängt außerdem vom zeitlichen Abstand zwischen den Fahrzeugen  $\tau$  ab. Je größer  $\tau$ , desto größer  $\sigma$  und desto breiter die Verteilung von  $\Delta\tau_{12}$  bzw.  $\Delta\tau_{23}$ . Der Korrelationskoeffizient  $c$  zwischen zwei zusammengehörigen Randverteilungen wird dabei als entsprechender Parameter der bivariaten Normalverteilung eingesetzt. In Abbildung 6.3.1.12 sind für die nähere Erläuterung des statistisch-mikroskopischen Prädiktionsmodells einige der relevanten Randverteilungen zu sehen.

Ausgehend von der weiter oben angesprochenen bivariaten Normalverteilung der Form  $\mathcal{N}(\Delta\tau_{12}, \Delta\tau_{23})$  mit den Parametern  $\sigma$  und  $c$  (zur Erinnerung:  $\mu = 0$ ) erfolgt über eine komplizierte mathematische Berechnung zunächst die Herleitung der vorläufigen Gleichung des statistischen Prognosemodells:

$$s(\Delta) = \operatorname{erf}\left(\frac{\Delta}{\sigma\sqrt{2(1-c^2)}}\right) \quad (6.3.1.1)$$

Dabei beschreibt  $\operatorname{erf}(x)$  die *Gauss'sche Fehlerfunktion* und  $s$  die vorgegebene *Wahrscheinlichkeit* mit der die *Prognoseunsicherheit*  $\Delta$  (in Millisekunden) realisiert wird.



**Abbildung 6.3.1.12:** Randverteilungen von  $\Delta\tau_{12}$  (oben) und  $\Delta\tau_{23}$  (unten) für verschiedene zeitliche Abstände  $\tau$  zwischen zwei, aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Die Randverteilungen geben also die zeitliche Änderung der Zeitlücke auf den beiden Sektoren  $\Delta s_{12}$  und  $\Delta s_{23}$  (siehe Abbildung 6.3.1.6) an. Wie bereits beschrieben, lässt sich ein Korrelationskoeffizient  $c > 0$  zwischen zwei zusammengehörigen Verteilungen  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$  (spaltenweise) feststellen und auf dessen Basis ein statistisch-mikroskopisches Prädiktionsmodell entwickeln (siehe Abbildung 6.3.1.13).

## Individueller Schlussbericht

---

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Abhängigkeit von den Variablen  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$  im Verlaufe der Herleitung herausfällt, sodass lediglich eine Abhängigkeit von der Variable  $\Delta$  bestehen bleibt. Während einer Reihe von empirischen Untersuchungen hat sich jedoch herausgestellt, dass Gleichung (6.3.1.1) eines Korrekturfaktors bedarf. Zu diesem Zweck wird die Transformation  $\Delta \rightarrow 1.3\Delta$  vorgenommen, sodass sich schließlich das nachfolgende Prognosemodells zur Prädiktion der Änderung des zeitlichen Abstandes  $\Delta\tau$  zwischen zwei, aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ergibt:

$$s(\Delta) = \operatorname{erf}\left(\frac{1.3\Delta}{\sigma\sqrt{2(1-c^2)}}\right) \quad (6.3.1.2)$$

Bei einer gegebenen Wahrscheinlichkeit  $s = s(\Delta)$  muss der Ausdruck (6.3.1.2) dann nach  $\Delta$  aufgelöst werden. Da jedoch keine analytische Lösung für dieses mathematische Problem existiert, bedient man sich an dieser Stelle eines iterativen Verfahrens. Dabei wird u.a. das Monotonieverhalten der Fehlerfunktion ausgenutzt. Der angeführte Korrekturfaktor ( $K = 1.3$ ) ist dadurch zu erklären, dass die Verwendung von normalverteilten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen nur eine Approximation an die zugrundeliegenden, empirischen Verteilungen von  $\Delta\tau$  darstellen (siehe rote Kurve in Abbildung 6.3.1.12). Wie bereits erwähnt, liefert die blau gezeichnete Studentische t-Verteilung, aufgrund ihrer *Spitzgipfeligkeit* und sog. *Heavy Tails*, zwar eine bessere Annäherung an die empirischen Daten, ist jedoch mathematisch deutlich schwieriger zu behandeln. Diese Diskrepanz kann jedoch hinreichend durch die Einführung des o.g. Korrekturfaktors sehr gut kompensiert werden, wie der Vergleich mit empirischen Daten in Abbildung 6.3.1.13 zeigt. Diese enthält einige, exemplarische Modellkurvenverläufe für unterschiedliche Parameter  $c = c(\tau)$  und  $\sigma = \sigma(\tau)$ . Anhand des nachfolgenden Beispiels soll die Funktionsweise des statistisch-mikroskopischen Prädiktionsmodells (Gleichung (6.3.1.2)) erläutert werden:

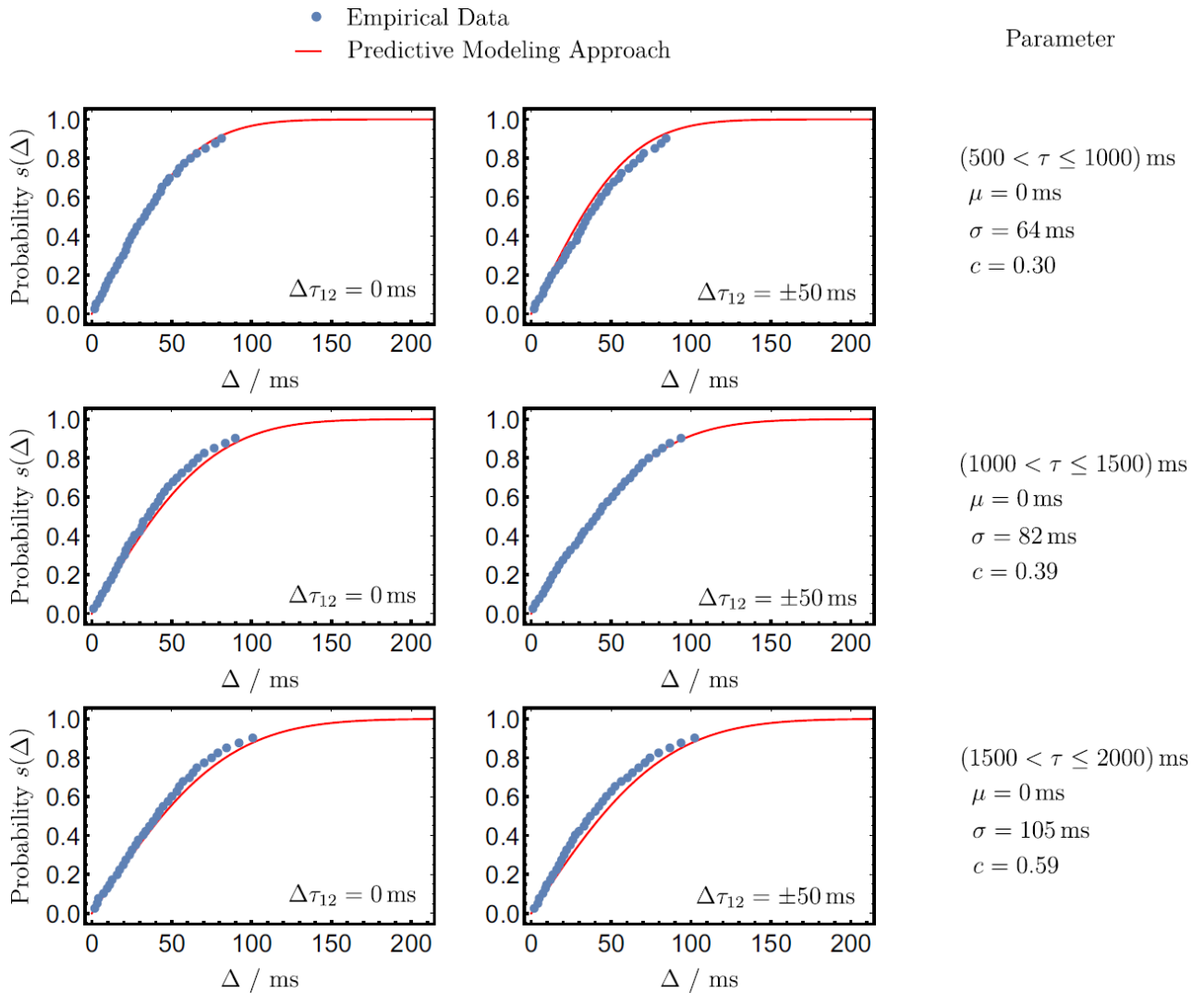
Beispiel zum Prädiktionsmodell:

Zwei Fahrzeuge mit einer Nettozeitlücke von  $\tau = 1300$  ms (gemessen an Position  $P_1$ ) passieren den Sektor  $\Delta s_{12}$ . Dabei wird eine zeitliche Zunahme von  $\Delta\tau_{12} = 50$  ms registriert. Folglich weisen die beiden Fahrzeuge an  $P_2$  eine Nettozeitlücke von  $\tau = 1350$  ms auf.

*Leitfrage:* Wie wird sich die Nettozeitlücke  $\tau$  nun mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit von  $s = 0.9$  an  $P_3$  entwickeln?

Gesucht ist also die Änderung des zeitlichen Abstandes  $\Delta\tau_{23}$  auf dem zugehörigen Sektor  $\Delta s_{23}$ . Der zugehörige Korrelationskoeffizient ist  $c = 0.39$ . Der Vergleich mit Abbildung 6.3.1.13 (zweite Zeile, zweite Spalte) liefert das Ergebnis, in diesem Fall durch Ablesen,  $\Delta = 75$  ms.

Der zu erwartende Wert für  $\Delta\tau_{23}$  liegt entsprechend mit 90%iger Wahrscheinlichkeit ( $s = 0.9$ ) innerhalb der Grenzen  $\Delta\tau_{23} = \Delta\tau_{12} \pm \Delta = (50 \pm 75)$  ms. Folglich gilt an Position  $P_3$  für die Nettozeitlücke  $\tau = (1300 + 50 \pm 75)$  ms =  $(1350 \pm 75)$  ms.



**Abbildung 6.3.1.13: Vorgegebene Wahrscheinlichkeit  $s(\Delta)$  in Abhängigkeit der Prognoseunsicherheit  $\Delta$ . Die rote Linie stellt dabei das Prädiktionsmodell zur Approximation an die empirischen Daten (blaue Punkte) dar. Zeilenweise wurden die gleichen Kurven geplottet, da der zugrundeliegende Ausdruck (6.3.1.2) unabhängig von  $\Delta\tau_{12}$  ist.**

### 6.3.1.7 Fazit

Es lässt sich schlussfolgern, dass die vorgestellten Ergebnisse einen großen wissenschaftlichen Beitrag zur Prädiktion von Fahrzeuglücken liefern. Im Kontext des Mischverkehrs zwischen automatisch fahrenden Fahrzeugen und menschlich gesteuerten Fahrzeugen sind solche und ähnliche Modelle mehr denn je gefragt. Die alltägliche Relevanz ist dadurch unmittelbar erkennbar.

### 7. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

1. Wissenschaftliche Mitarbeiter (MA 1: 41 PM, MA 2: 41 PM, MA 3: 24 PM) =	659.257,84 €
2. Studentische Hilfskräfte (ca. 66 PM) =	62.631,15 €
3. Pauschale Ausgaben (2% der Lohnkosten aus 1. und 2.) =	14.437,78 €
4. Reisekosten (Projekttreffen und Konferenzreisen) =	11.686,86 €
<b>Gesamtsumme der Positionen des zahlenmäßigen Nachweises =</b>	<b>748.013,63 €</b>

### 8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren in ihrem Umfang notwendig und der Aufgabenstellung und in Anbetracht der erreichten Ziele angemessen.

### 9. Voraussichtlicher Nutzen

Die vorgestellten Ergebnisse lassen sich unmittelbar einsetzen. Die Methoden zur Erkennung von bewegten und spontan auftretenden Hindernissen, lassen sich für Verkehrsdienste nutzen. Die Arbeiten zur dynamischen Streckenfreigabe sind prototypisch umgesetzt und können zu einem marktreifen Produkt weiterentwickelt werden.

Die Arbeit zu selbst lernenden Fahrzeugen bilden die Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten. Sie liefert einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage weiter Forschung, z.B. im vom BMWI geförderten Projekt *LUKAS*.

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

Es sind keine Arbeiten anderer Stellen während der Projektlaufzeit bekannt geworden, welche auf dem Gebiet des Vorhabens im Bereich der vorgestellten Arbeiten einen Fortschritt darstellen.

## 11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Eine Liste der erfolgten Veröffentlichungen:

### Monographien:

1. Boris S. Kerner (2017). *Breakdown in Traffic Networks - Fundamentals of Transportation Science*. Berlin: Springer.

### Abschlussarbeiten

2. Dominik Wegerle (2020). *Untersuchung physikalischer Effekte an bewegten und dynamischen Engstellen*. Dissertation an der Fakultät für Physik der Universität Duisburg-Essen. Online-Veröffentlichung: DOI: [10.17185/dupublico/72448](https://doi.org/10.17185/dupublico/72448)

### Beiträge in Fachzeitschriften und Konferenzbänden:

3. Stefan Kaufmann, Boris S. Kerner, Hubert Rehborn, Micha Koller und Sergey L. Klenov. *Aerial Observations of Moving Synchronized Flow Patterns in Over-Saturated City Traffic*. *Transportation Research C*, **86**, 393-406 (2018) DOI: [10.1016/j.trc.2017.11.024](https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.11.024)
4. Sven-Eric Molzahn, Boris S. Kerner und Hubert Rehborn. *Phase based jam warnings: an analysis of synchronized flow with floating car data*. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, (2019) DOI: [10.1080/15472450.2019.1638781](https://doi.org/10.1080/15472450.2019.1638781)
5. Yildirim Dülger, Sven-Eric Molzahn, Hubert Rehborn, Micha Koller, Boris S. Kerner, Dominik Wegerle, Michael Schreckenberg, Michael Menth, und Sergey L. Klenov. *Empirical random phase transitions between free flow and synchronized flow at highway bottlenecks*. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, (2019) DOI: [10.1080/15472450.2019.1615488](https://doi.org/10.1080/15472450.2019.1615488)
6. Boris.S. Kerner. *Statistical physics of synchronized traffic flow: Spatiotemporal competition between  $S \rightarrow F$  and  $S \rightarrow J$  instabilities*. *Phys. Rev. E* **100**, 012303 (2019)
7. Dominik Wegerle, Boris S. Kerner, Michael Schreckenberg, und Sergey L. Klenov. *Prediction of moving bottleneck through the use of probe vehicles: a simulation approach in the framework of three-phase traffic theory*. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, (2019) DOI: [10.1080/15472450.2019.1652825](https://doi.org/10.1080/15472450.2019.1652825)
8. Boris.S. Kerner. *Autonomous Driving in Framework of Three-Phase Traffic Theory*. *Procedia Computer Science*, Volume 130, 2018, Pages 785–790, DOI: [10.1016/j.procs.2018.04.136](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.136)
9. Boris.S. Kerner. *Physics of Automated Driving in Framework of Three-Phase Traffic Theory*, *Physical Review E*, 97, 042303 (2018). DOI: [10.1103/PhysRevE.97.042303](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.042303)
10. Boris.S. Kerner. *Autonomous Driving in Framework of Three-Phase Traffic Theory*, in: B.S. Kerner (Ed.) *Complex Dynamics of Traffic Management*, *Encyclopedia of Complexity and Systems* Springer (Springer, New York, NY, 2019), pp. 343-385. DOI: [10.1007/978-3-642-27737-5\\_724-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_724-1)
11. Boris S. Kerner. *Traffic Breakdown, Modeling Approaches to.* In: B.S. Kerner (Ed.) *Complex Dynamics of Traffic Management*, *Encyclopedia of Complexity and Systems* Springer (Springer, New York, NY, 2019) DOI: [10.1007/978-3-642-27737-5\\_559-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_559-2)

## Individueller Schlussbericht

---

12. Boris S. Kerner und Sergey L. Klenov (2018). *Traffic Breakdown, Mathematical Probabilistic Approaches to*. In: B.S. Kerner (Ed.) *Complex Dynamics of Traffic Management, Encyclopedia of Complexity and Systems* Springer (Springer, New York, NY, 2019)  
DOI: [10.1007/978-3-642-27737-5\\_558-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_558-3)
  
13. Maximilian Kumm und Michael Schreckenberg. *An agent-based approach to a temporal headway development statistics in urban traffic using three-phase theory*. In: ICAART 2019: proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. Prague; Czech Republic; Rocha, Ana Paula; Steels, Luc (Hrsg.), 2019 S. 238 - 243 ISBN: 978-989-758-350-6  
DOI: [10.5220/0007484602380243](https://doi.org/10.5220/0007484602380243)
  
14. Maximilian Kumm und Michael Schreckenberg. *Statistical Analysis of Temporal Headway Development through Empirical Data in Urban Traffic*. In: 2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). IEEE, 2019  
Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8883284>



## Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 6.2.1.1: Schematische Darstellung des Autobahnabschnitts A5-Süd auf dem die FCD-Daten untersucht wurden. ....	11
Abbildung 6.2.1.2: Fahrzeugtrajektorien aus FCD-Daten, welche auf dem Autobahnabschnitt A5-Süd (siehe Abbildung 6.2.1.1) gemessen wurden. Der Unterschied zwischen den drei Verkehrsphasen: Freier Verkehr, Synchronisierter Verkehr, und „Wide Moving Jam“ (bezeichnet als „free flow“, „synchronized flow“, und „moving jams“ in der Abbildung) wurde durch die Methode aus Section 4 des Papers [8] durchgeführt. ....	12
Abbildung 6.2.1.3: Fahrzeuggeschwindigkeit in Abhängigkeit des Ortes abgeleitet aus Fahrzeugtrajektorien von fünf ausgewählten FCD-Fahrzeugen, die mit entsprechenden Nummern von 1 bis 5 in Abbildung 1.2.1.2 markiert wurden. F – „free flow“, S – „synchronized flow“, J – „wide moving jam“ . ....	13
Abbildung 6.2.2.1: Schematische Darstellung des Daimler Verkehrsservice: Fahrzeuge übermitteln per Funk Daten an ein zentrales Datenzentrum, dieses rekonstruiert eine Verkehrslage und übermittelt diese an nachfolgende Fahrzeuge. Adaptiert von [9]. ....	15
Abbildung 6.2.2.2: Schematische Darstellung einer bewegten Engstelle mit $v_{MB}$ auf dem rechten Fahrstreifen einer zweispurigen Straße. $q_{in} = 1375$ Fahrzeuge/(h·Spur). ....	16
Abbildung 6.2.2.3: Qualitative Beschreibung der Effekte eines langsam fahrenden Fahrzeugs (MB) innerhalb restlichen Freiflusses: Die bewegte Engstelle (MB) befindet sich auf der rechten von zwei Fahrspuren. Andere Fahrzeuge überholen, scheren vorher nach links (L) aus und kehren nach dem Manöver auf die rechte Spur zurück (R). Gelingt ihnen dies nicht, so sind sie gezwungen hinter dem MB abzubremsen (BR). Darüber hinaus können spurwechselnde Fahrzeuge die sich von hinten nähernden Fahrzeuge auf der linken Spur ausbremsen (BL). Die Verkehrsphasen des Freiflusses (F), des synchronisierten Verkehrs (S) sind genauso wie die jeweiligen Übergänge $F \rightarrow S$ und $S \rightarrow F$ um die bewegte Engstelle herum in Übereinstimmung mit [10] eingezeichnet. (AV – automatisiert fahrendes Kraftfahrzeug; BR und BL – bremsende Fahrzeuge auf der rechten und linken Fahrspur; L – Fahrzeug bei einem Spurwechsel von der rechten auf die linke Fahrspur; R – Fahrzeug bei einem Spurwechsel von der linken auf die rechte Fahrspur.) ....	16
Abbildung 6.2.2.4: Simulation eines zufällig zeitverzögerten Verkehrszusammenbruchs ( $F \rightarrow S$ Übergang) an einer bewegten Engstelle. Dargestellt sind Profile der Geschwindigkeiten auf der rechten und linken Fahrspur dabei wird die Geschwindigkeit in unterschiedlichen Grauschattierungen dargestellt. Die Schattierung verläuft von hell (108 km/h) zu schwarz (0 km/h). Die rote gestrichelte Linie markiert die Position der bewegten Engstelle. Ähnliche Simulationen einer bewegten Engstelle wurden in [11] durchgeführt. ....	17
Abbildung 6.2.2.5: Darstellung der Ergebnisse der gleichen Simulation wie Abbildung 6.2.2.4, dargestellt in bewegten Systemkoordinaten parallel zur Geschwindigkeit des langsam fahrenden Fahrzeugs mit $v_{MB} = 28,8$ km/h. Die Ortskoordinate $x = 0$ entspricht somit der jeweils aktuellen Position der bewegten Engstelle $x_{MB}(t)$ . Die Geschwindigkeit des Verkehrs ist über beide Fahrspuren (rechte und linke) gemittelt und in Grauschattierungen dargestellt. Die Schattierung verläuft von hell (108 km/h) zu schwarz (0 km/h). ....	17
Abbildung 6.2.2.6: Schematische Darstellung einer spontan auftretenden ortsfesten Engstelle mit $v_{SV} = 0$ km/h auf dem rechten Fahrstreifen einer zweispurigen Straße. $q_{in} = 1259$ Fahrzeuge/(h·Spur). ....	18
Abbildung 6.2.2.7: Simulationsergebnis für eine Realisation des Szenarios mit einem stehen gebliebenen Fahrzeug. Zunächst bildet nach dem Verkehrszusammenbruch zum Zeitpunkt $T_B$ sich ein <i>localised synchronised pattern</i> (LSP) aus, welches zum Zeitpunkt $T_{GP}$ in ein <i>general patter</i> (GP) übergeht. ....	18
Abbildung 6.2.2.8: Betrachtung der Simulation der Ortsfesten Engstelle für den Zeitraum, in dem sich ein Verkehrsmuster des lokalisierten synchronisierten Verkehrs ausbildet. ....	19

## Individueller Schlussbericht

Abbildung 6.2.2.9: Schematische Darstellung von Verkehrsmustern und entsprechenden Phasenübergangspunkten in einzelnen Fahrzeugtrajektorien. [8] .....	20
Abbildung 6.2.2.10: Erkennung von Phasenübergangspunkten in den Geschwindigkeitsprofilen von drei nummerierten Fahrzeugen: 1 (a), 2 (b), und 3 (c). Die Nummerierung entspricht den Zahlen, mit denen die Trajektorien dieser Fahrzeuge in Abbildung 6.2.2.11 markiert sind. Durch die gepunktete, senkrechte Linie ist der Zeitpunkt markiert, an welchem die jeweiligen Fahrzeuge das Hindernis passieren.....	21
Abbildung 6.2.2.11: Fahrzeugtrajektorien in einem ausgewählten Zeitabschnitt im Umfeld der bewegten Engstelle (MB). Hervorgehoben und markiert sind Trajektorien der Fahrzeuge 1, 2 und 3, für welche die Erkennung der <i>FS</i> und <i>SF</i> Phasenübergangspunkte in den Geschwindigkeitsprofilen in Abbildung 6.2.2.10 gezeigt wurde. Diese Trajektorien sind entsprechend der Verkehrsphase farblich gekennzeichnet (grün – Freifluss (F), orange – synchronisierter Verkehr (S)). Die violette mit „L“ gekennzeichnete Trajektorie gehört einem Fahrzeug, welches sehr knapp vor Fahrzeug 1 auf die linke Fahrspur einschert und dieses dadurch zu einem starken Bremsmanöver zwingt. ▼ kennzeichnet <i>FS</i> Phasenübergangspunkte und ▲ kennzeichnet <i>SF</i> Phasenübergangspunkte. $T_{passMB}(1)$ , $T_{passMB}(2)$ und $T_{passMB}(3)$ bezeichnen die Zeitpunkte, zu denen das jeweilige Fahrzeug das MB passiert.....	22
Abbildung 6.2.2.12: <i>FS</i> and <i>SF</i> Phasenübergangspunkte aus Fahrzeugtrajektorien unabhängig von der Fahrspur, (a) im ortsfesten Bezugssystem der Straße, (b) im bewegten Bezugssystem der bewegten Engstelle, (c) statistische Analyse der Anzahl der <i>SF</i> Phasenübergangspunkte aus (a,b) pro Minute. ....	23
Abbildung 6.2.2.13: Fortführung der Abbildung 6.2.2.5 und Abbildung 6.2.2.12(b): (a – c) zeigen zeitabhängige Verläufe der Fahrzeuggeschwindigkeiten (gleitender Mittelwert über drei Fahrzeuge), abgeleitet aus Abbildung 6.2.2.5, an verschiedenen Messpunkten mit relativem Abstand stromaufwärts der bewegten Engstelle an Position $x = 0$ in bewegten Systemkoordinaten. Die Pfeile mit „S“ bezeichnen Bereiche mit synchronisiertem Verkehrsfluss und Pfeile mit „F“ bezeichnen Bereiche mit freiem Verkehrsfluss. Die vertikalen, gestrichelten Linien 1 – 12 in (a) haben, bei gleicher Bezeichnung, die gleiche Bedeutung wie in (d). (d) ist ein Ausschnitt aus Abbildung 6.2.2.12(b) mit schattierter Darstellung der Geschwindigkeit, in dem die gestrichelten Linien 1 – 12 Regionen von sich auflösendem synchronisiertem Verkehr wie in (a) markieren. ....	24
Abbildung 6.2.2.14: Dargestellt ist ein 20-minütiges Zeitfenster ab Minute 9, also für $t > TB$ . Waagerechte graue Linien markieren die Positionen virtueller Detektoren an den Positionen $x = 0$ m, $x = -100$ m, $x = -200$ m und $x = -300$ m. ....	25
Abbildung 6.2.2.15: Der zeitliche Ausschnitt, identisch zu, zeigt ein 20-minütiges Zeitfenster ab Minute 9, also für $t > T(B)$ . Geglättete Zeitreihen für die Position der $S_F$ Phasenübergangspunkte (a), sowie für vier virtuelle Detektoren (b – e) an den Positionen $x = 0$ m, $x = -100$ m, $x = -200$ m und $x = -300$ m, welchen mit der gespiegelten Kurve der $S_F$ Phasenübergangspunkte hinterlegt sind. Die Geschwindigkeit in den Detektoren ist dabei im Vergleich zum Mittelwert $\bar{v}$ der gemessenen Geschwindigkeiten innerhalb der Zeitspanne aufgetragen. ....	26
Abbildung 6.2.2.16: Rekonstruktion der Geschwindigkeit und des Ortes mittels linearer Regression durch die zum jeweiligen Zeitpunkt $t_i$ vorliegenden <i>SF</i> Phasenübergangspunkte, dargestellt für vier verschiedene Zeitpunkte in einer Stichprobe. ....	27
Abbildung 6.2.2.17: Zeitlicher Verlauf der rekonstruierten Geschwindigkeit $v_{rect}$ für das Szenario der bewegten Engstelle und Vergleich mit dem Term $\alpha, K - 21 \cdot \sigma_{recK}$ aus Bedingung (6.2.2.5) für eine Stichprobe bei einer Durchdringungsrate der FCD Fahrzeuge $\gamma = 2\%$ . Dargestellt sind unterschiedliche Konfidenzniveaus: (a) $p\alpha = 0.9$ . (b) $p\alpha = 0.99$ . Gestrichelte Linien zeichnen den Verlauf von $\Delta v = v_{recK} - \alpha, K - 21 \cdot \sigma_{recK}$ (rot für $\Delta v < 0$ und grün für $\Delta v > 0$ ). ....	30

## Individueller Schlussbericht

Abbildung 6.2.2.18: Abhängigkeit der kritischen Anzahl $KSV$ der $SF$ Phasenübergangspunkte und der entsprechenden kritischen Zeiten $tSV$ , die für die Erkennung des stehenden Fahrzeugs (SV) notwendig sind, bei gewählten Parametern $p\alpha$ (a) $p\alpha = 0,9$ ; (b) $p\alpha = 0,99$ für eine Realisation bei einer Durchdringungsrate von $\gamma = 2\%$ und mit einem Toleranzbereich für die Geschwindigkeit von $\Delta SV = 2$ km/h.....	31
Abbildung 6.2.2.19: Histogramme jeweils für die Anzahl $KMB$ der für die Identifikation der bewegten Engstelle benötigten $SF$ Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit $tMB$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus $M=1000$ Stichproben bei einer Durchdringungsrate $\gamma = 5\%$ an FCD Fahrzeugen. Dargestellt sind Histogramme für vier Konfidenzniveaus $p\alpha$ .....	33
Abbildung 6.2.2.20: Vergleich der Wahrscheinlichkeit $PMB(t)$ der Identifikation der bewegten Engstelle anhand Formel (6.2.2.7) für zwei unterschiedliche Durchdringungsraten an FCD-Fahrzeugen: (a) $\gamma = 1\%$ . (b) $\gamma = 5\%$ , abhängig von den gewählten Konfidenzniveaus $p\alpha$ : Kurve 1 für $p\alpha = 0,9$ ; Kurve 2 für $p\alpha = 0,99$ ; Kurve 3 für $p\alpha = 0,999$ und Kurve 4 für $p\alpha = 0,9999$ .....	33
Abbildung 6.2.2.21: Histogramme jeweils für die Anzahl $KMB$ der für die Identifikation der bewegten Engstelle benötigten $SF$ Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit $tMB$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus $M = 1000$ Stichproben bei einem Konfidenzniveau von $p\alpha = 0,999$ . Dargestellt sind Histogramme für vier verschiedene FCD-Durchdringungsraten $\gamma$ .....	34
Abbildung 6.2.2.22: Vergleich der Wahrscheinlichkeit $PMB(t)$ der Identifikation der bewegten Engstelle anhand Formel (6.2.2.7) für zwei unterschiedliche Konfidenzniveaus von $p\alpha = 0,9$ und $p\alpha = 0,999$ , abhängig von den gewählten FCD-Durchdringungsraten $\gamma$ : Kurve 1 für $\gamma = 1\%$ ; Kurve 2 für $\gamma = 2\%$ ; Kurve 3 für $\gamma = 5\%$ und Kurve 4 für $\gamma = 10\%$ .....	34
Abbildung 6.2.2.23: Histogramme jeweils für die Anzahl $KSV$ der für die Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle benötigten $SF$ Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit $tSV$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus $M=1000$ Stichproben bei einer Durchdringungsrate $\gamma = 2\%$ an FCD Fahrzeugen und für das Konfidenzniveau $p\alpha = 0,99$ . Dargestellt sind Histogramme für drei Toleranzbereich $\Delta SV$ für die Geschwindigkeit. ....	36
Abbildung 6.2.2.24: Vergleich der Wahrscheinlichkeit $PSV(t)$ der Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle anhand Formel (6.2.2.8) für zwei unterschiedliche Konfidenzniveaus von $p\alpha = 0,9$ und $p\alpha = 0,999$ und bei einer Durchdringungsrate $\gamma = 2\%$ an FCD-Fahrzeugen in Abhängigkeit von der Wahl für den Toleranzbereich $\Delta SV$ für die Geschwindigkeit: Kurve 1 für $\Delta SV = 3$ km/h; Kurve 2 für $\Delta SV = 2$ km/h; Kurve 3 für $\Delta SV = 2$ km/h. ....	36
Abbildung 6.2.2.25: Histogramme jeweils für die Anzahl $KSV$ der für die Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle benötigten $SF$ Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit $tSV$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus $M=1000$ Stichproben bei einer Durchdringungsrate $\gamma = 5\%$ an FCD Fahrzeugen. Dargestellt sind Histogramme für vier Konfidenzniveaus $p\alpha$ .....	37
Abbildung 6.2.2.26: Vergleich der Wahrscheinlichkeit $PSV(t)$ der Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle anhand Formel (6.2.2.8) für zwei unterschiedliche Durchdringungsraten an FCD-Fahrzeugen: (a) $\gamma = 1\%$ . (b) $\gamma = 5\%$ , abhängig von den gewählten Konfidenzniveaus $p\alpha$ : Kurve 1 für $p\alpha = 0,9$ ; Kurve 2 für $p\alpha = 0,99$ ; Kurve 3 für $p\alpha = 0,999$ und Kurve 4 für $p\alpha = 0,9999$ .....	37
Abbildung 6.2.2.27: Histogramme jeweils für die Anzahl $KSV$ der für die Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle benötigten $SF$ Phasenübergangspunkte und für die entsprechend benötigte Zeit $tSV$ , zu der die Identifikation möglich ist. Histogramme aus $M = 1000$ Stichproben bei einem Konfidenzniveau von $p\alpha = 0,9$ . Dargestellt sind Histogramme für vier verschiedene FCD-Durchdringungsraten $\gamma$ .....	38

## Individueller Schlussbericht

Abbildung 6.2.2.28: Vergleich der Wahrscheinlichkeit $PSV(t)$ der Identifikation der spontanen ortsfesten Engstelle anhand Formel (6.2.2.8) für zwei unterschiedliche Konfidenzniveaus von $p\alpha = 0,9$ und $p\alpha = 0,999$ , abhängig von den gewählten FCD-Durchdringungsraten $\gamma$ : Kurve 1 für $\gamma = 1\%$ ; Kurve 2 für $\gamma = 2\%$ ; Kurve 3 für $\gamma = 5\%$ und Kurve 4 für $\gamma = 10\%$ .....	38
Abbildung 6.2.3.1: Qualitative Erklärung zwei charakteristische Abstände $g$ zwischen einem „lernenden“ automatisierten Fahrzeug (TPACC-Fahrzeug-Model) und dem vorausfahrenden Fahrzeug: $g = G$ ist der Synchronisationsabstand. $g = gsafe$ ist der Sicherheitsabstand.....	43
Abbildung 6.2.3.2: Qualitative Erklärung des dynamischen Verhaltens für ein „lernendes“ automatisiertes Fahrzeug, falls der Abstand $g$ zwischen dem „lernenden“ automatisierten Fahrzeug und dem vorausfahrendem Fahrzeug im Intervall $G \geq g \geq gsafe$ (6.2.3.3) liegt und die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs $v^l$ und der Geschwindigkeit des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs $v$ gleich Null ist: $\Delta v = v^l - v = 0$ .....	44
Abbildung 6.2.3.3: Qualitative Erklärung des dynamischen Verhaltens für ein „lernendes“ automatisiertes Fahrzeug. $a(TPACC)$ ist die Beschleunigung des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs, $K\Delta v$ ist ein dynamischer Koeffizient des „lernenden“ automatisierten Fahrzeugs. ....	44
Abbildung 6.2.3.4: Schema zur Erklärung der Formel (6.2.3.5) zur klassischen Abstandregelung (ACC).....	45
Abbildung 6.2.3.5: Durch Formel (6.2.3.5) wird das automatisierte Fahrzeug auf eine vorgegebene Zeitlücke $\tau dACC$ zum Vordermann automatisch gesteuert ( $gACC = v\tau dACC$ ) .....	45
Abbildung 6.2.3.6: Schema zur Erklärung der Simulationen des gemischten Verkehrs an einer Zufahrt .....	46
Abbildung 6.2.3.7: Kolonneninstabilität der automatisierten Fahrzeuge mit der klassischen Abstandregelung (ACC) (6.2.3.5) (100% ACC-Fahrzeuge).....	47
Abbildung 6.2.3.8: Kolonnenstabilität der „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge (TPACC) (6.2.3.1)-(6.2.3.2) (100% TPACC-Fahrzeuge) .....	47
Abbildung 6.2.3.9: Geschwindigkeitsstörungen an einer Zufahrt, welche die stabilen Kolonnen der automatisierten Fahrzeuge mit der klassischen Abstandregelung (ACC) (6.2.3.5) verursachen (100% ACC-Fahrzeuge) .....	48
Abbildung 6.2.3.10: Geschwindigkeitsstörungen an einer Zufahrt, welche die Kolonnen der „lernenden“ automatisierten Fahrzeuge (TPACC-Modell (6.2.3.1) - (6.2.3.2)) verursachen (100% TPACC-Fahrzeuge) .....	48
Abbildung 6.2.3.11: Effekt eines einzelnen autonom fahrenden Fahrzeugs auf die Wahrscheinlichkeit $P(B)(qsum)$ des Verkehrszusammenbruchs an einer Engstelle durch eine Auffahrt zu einer einspurigen Straße bei gemischtem Verkehr. Die flussratenabhängige Funktionen der Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs $P(B)(qsum)$ (Kurven 1 und 2) wurden mittels Änderung der Zuflussrate $qon$ an der Auffahrt bei feststehendem Verkehrsfluss von $qin = 2000$ Fahrzeugen/h berechnet. Kurve 1 entspricht Berechnungen sowohl bei einem Verkehrsfluss ohne autonome Fahrzeuge als auch einem Mischverkehr mit 2% an TPACC-Fahrzeugen. Kurve 2 entspricht einer Berechnung bei 2% ACC-Fahrzeugen mit $\tau dACC = 1.3$ s. Simulationsparameter für den ACC entsprechend Gleichung (6.2.3.5) und für den TPACC entsprechend Gleichungen (6.2.3.1)-(6.2.3.2) sind: $\tau dACC = \tau p = 1,3$ s, $\tau G = 1,4$ s, $K1 = 0,3$ s - 2 und $K2 = K\Delta v = 0,6$ s - 1, $amax = bmax = 3$ m/s - 2, $vfree = 30$ m/s, (108 km/h), Fahrzeuglänge $d = 7,5$ m. ....	49
Abbildung 6.2.3.12: Erklärung des Ergebnisses dargestellt durch Kurve 1 aus Abbildung 6.2.3.11, dass ein einzelnes TPACC-Fahrzeug keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle durch eine Auffahrt bei gemischtem Verkehr hat. Geschwindigkeitsstörungen, welche an einer Auffahrt als einem Engpass durch ein einzelnes TPACC-Fahrzeug auftreten(a-c): (a) Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b)	

## Individueller Schlussbericht

Ausschnitte aus Fahrzeug Trajektorien. (c) Mikroskopische Geschwindigkeit entlang einzelner, entsprechend wie in (b) beschrifteter, Trajektorien. In (b,c) Fahrzeug 1 und 2 sind menschlich gesteuerte Fahrzeuge, während Fahrzeug 3 ein TPACC-Fahrzeug ist. Gemischter Verkehrsfluss mit 2% an TPACC-Fahrzeugen. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz/h. Die anderen Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. In (a, b) ist der Bereich des Beschleunigungsstreifen der Auffahrt innerhalb des Straßenabschnitts  $x_{on} \leq x \leq x_{on}(e)$  (siehe Appendix D aus [10]) mit „ $\uparrow$ on-ramp $\uparrow$ “ gekennzeichnet. ....50

Abbildung 6.2.3.13: Erklärung des Ergebnisses dargestellt durch Kurve 2 aus Abbildung 6.2.3.11, dass ein einzelnes klassisches ACC-Fahrzeug einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an der Engstelle durch eine Auffahrt bei gemischtem Verkehr hat. Geschwindigkeitsstörungen, welche an einer Auffahrt als einem Engpass durch ein einzelnes ACC-Fahrzeug auftreten(a-c): (a) Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b) Ausschnitte aus Fahrzeug Trajektorien. (c) Mikroskopische Geschwindigkeit entlang einzelner, entsprechend wie in (b) beschrifteter, Trajektorien. In (b,c) Fahrzeug 1 und 2 sind menschlich gesteuerte Fahrzeuge, während Fahrzeug 3 ein klassisches ACC-Fahrzeug ist. Gemischter Verkehrsfluss mit 2% an ACC-Fahrzeugen. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz/h. Die anderen Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. In (a, b) ist der Bereich des Beschleunigungsstreifen der Auffahrt innerhalb des Straßenabschnitts  $x_{on} \leq x \leq x_{on}(e)$  (siehe Appendix D aus [10]) mit „ $\uparrow$ on-ramp $\uparrow$ “ gekennzeichnet. In (a) bezeichnen F – Freifluss und S – synchronisierten Verkehrsfluss. ..51

Abbildung 6.2.3.14: Erklärung der Geschwindigkeitsstörungen, welche durch die Fahrt eines einzelnen autonom fahrenden Fahrzeugs durch die Engstelle verursacht werden. ACC (a, b): Zeitfunktionen der Raumlücke  $g(t)$  (a) und der Beschleunigung (Abbremsung) des ACC-Fahrzeugs (b) bezogen auf die Fahrzeugtrajektorie 3 in Abbildung 6.2.3.13(b, c). TPACC (c, d): Zeitfunktionen der Lücke  $g(t)$  (c) und der Beschleunigung (Verzögerung) des TPACC-Fahrzeugs (d) bezogen auf die Fahrzeugtrajektorie 3 in Abbildung 6.2.3.12(b, c). Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....52

Abbildung 6.2.3.15: Fortsetzung von Abbildung 6.2.3.14(a, b): (a) Bestandteile der Formel (6.2.3.5) als Zeitfunktionen: Die durchgezogene Kurve 1 ist die Zeitabhängigkeit des Terms  $K1(g - v\tau d(ACC))$  und die gestrichelt gepunktete Kurve 2 ist die Zeitabhängigkeit des Terms  $K2(v\ell - v)$ . (b) Relativgeschwindigkeit zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug und dem ACC-Fahrzeug: Es ist zu beachten, dass die durch  $K1(g - v\tau d(ACC))$  in (6.2.3.5) berechnete Verzögerung einen großen negativen Wert von etwa  $-5,2 \text{ m/s} - 2$  annimmt. Man beachte, dass solange  $vt \leq vst$  erfüllt ist, in den ACC- und TPACC-Modellen eine Begrenzung des Bremsvermögens auf den Wert  $-3 \text{ m/s} - 2$  vorliegt. Dies erklärt die maximale Abbremsung des ACC-Fahrzeuges um  $-3 \text{ m/s} - 2$  wie in Abbildung 6.2.3.14(b) dargestellt. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....53

Abbildung 6.2.3.16: Fortsetzung von Abbildung 6.2.3.14(c, d): (a) Zeitfunktion der räumlichen Lücke  $gt$  des TPACC-Fahrzeugs zusammen mit Indifferenz-Bereichen (graue Flächen);  $Gt$  ist der Synchronisationsabstand;  $gsafe(t)$  (gestrichelte Kurven) ist der Sicherheitsabstand; graue Regionen zeigen Zeitintervalle, in denen die Bedingung (6.2.3.3) für den Indifferenz-Bereich erfüllt ist. (b) Relativgeschwindigkeit  $\Delta v = v\ell - v$  zwischen der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs und der Geschwindigkeit des TPACC-Fahrzeugs. (c) Beschleunigung (Abbremsung) des TPACC-Fahrzeugs in einem vergrößerten Maßstab als in Abbildung 6.2.3.14(d). Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....55

Abbildung 6.2.3.17: Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $PB$  eines Verkehrszusammenbruchs an einer Auffahrt zu einer einspurigen Straße bei unterschiedlichen ACC and TPACC Parametern. Funktionen der Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs  $P(B)(q_{sum})$  in Abhängigkeit des Verkehrsflusses (Kurven 1-4) berechnen sich aus Änderungen der Zuflussrate  $q_{on}$  über die Auffahrt und einem festen Fluss auf der einspurigen Straße von  $q_{in} =$

## Individueller Schlussbericht

- 2000 Fhz./h. Kurve 1 bezieht sich sowohl auf Verkehrsfluss ohne autonom fahrende Fahrzeuge als auch auf Mischverkehrsflüsse mit 2% an TPACC-Fahrzeugen mit den Parametern in (6.2.3.7), (6.2.3.8). Die Kurven 2-4 beziehen sich auf Mischverkehr mit 2% an ACC-Fahrzeugen: Kurve 2 ist für  $\tau d_{ACC} = 1.3$  s, Kurve 3 ist für  $\tau d_{ACC} = 1.5$  s, Kurve 4 ist für  $\tau d_{ACC} = 2$  s,  $K2 = 0.5$  s – 1. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....57
- Abbildung 6.2.3.18: Ergebnis einer Realisation der Simulation gemischten Verkehrs bei 2% ACC-Fahrzeugen und  $\tau d_{ACC} = 1.3$  s, bei welcher unter Bedingung (6.2.3.6) innerhalb des Beobachtungszeitraums  $T_{ob} = 60$  Minuten kein Verkehrszusammenbruch stattfindet: (a) Verkehrsgeschwindigkeit als raum-zeitliche Fläche. (b) Ausschnitt aus Fahrzeugtrajektorien im Bereich der Auffahrt. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz/h. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....59
- Abbildung 6.2.3.19: Ergebnis einer Realisation der Simulation gemischten Verkehrs bei 2% ACC-Fahrzeugen und  $\tau d_{ACC} = 1.5$  s, bei welcher unter Bedingung (6.2.3.6) innerhalb des Beobachtungszeitraums  $T_{ob} = 60$  Minuten kein Verkehrszusammenbruch stattfindet: (a) Verkehrsgeschwindigkeit als raum-zeitliche Fläche. (b) Ausschnitt aus Fahrzeugtrajektorien im Bereich der Auffahrt. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz/h. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....60
- Abbildung 6.2.3.20: Mikroskopische Geschwindigkeit dreier ACC-Fahrzeuge hinter einem von der Auffahrt eingescherten menschlich gelenkten Fahrzeug für unterschiedliche Werte  $\tau d_{ACC}$ : (a) Fahrzeuge der Realisation aus Abbildung 6.2.3.18(b) in einer Simulation mit  $\tau d_{ACC} = 1.3$  s (b) Fahrzeuge der Realisation aus Abbildung 6.2.3.19(b) in einer Simulation mit  $\tau d_{ACC} = 1.5$  s (c) Fahrzeuge einer weiteren Realisation einer Simulation mit  $\tau d_{ACC} = 2$  s,  $K2 = 0.5$  s – 1. Zuflussrate der Auffahrt:  $q_{on} = 280$  Fhz./h und Flussrate der einspurigen Straße  $q_{in} = 2000$  Fhz/h. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....61
- Abbildung 6.2.3.21: Mittelwerte der Amplituden  $\Delta v_{ACC}$  der örtlichen Geschwindigkeitsreduktion der ACC-Fahrzeuge hinter einem eingescherten, von der Auffahrt kommenden Fahrzeug in Abhängigkeit der geforderten Zeitlücke  $\tau d_{ACC}$  (schwarze Punkte). Die gewählten Werte für  $\tau d_{ACC}$  entsprechen, den in Abbildung 6.2.3.20 verwendeten Werten. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....62
- Abbildung 6.2.3.22: Lokale Geschwindigkeitsreduktion, verursacht durch ACC-Fahrzeuge an einer Engstelle durch eine Auffahrt, bezogen auf das ACC-Modell (6.2.3.11)- (6.2.3.17) in einer der Simulationsrealisierungen für fünf verschiedene Werte  $p(C) = 0$  (a); 0,25 (b); 0,5 (c); 0,75 (d) und 1 (e). Fahrzeuge 1 und 2 sind von Menschen gelenkte Fahrzeuge, Fahrzeug 3 ist das ACC-Fahrzeug. Modellparameter sind:  $\tau G = 1,4$  s,  $\tau p = 1,3$  s,  $K1 = 0,3$  s – 2,  $K2 = K\Delta v = 0,6$  s – 1. Andere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.11. ....64
- Abbildung 6.2.3.23: Bremsen (Beschleunigen) von ACC-Fahrzeugen in der gleichen Simulationsrealisation wie in Abbildung 6.2.3.22 entsprechend, für fünf verschiedene Werte  $p(C) = 0$  (e); 0,25 (d); 0,5 (c); 0,75 (b) und 1 (a). ....65
- Abbildung 6.2.3.24 Charakteristika lokaler Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC-Fahrzeuge im Bereich einer Engstelle durch eine Auffahrt als Funktion des Wertes  $p(C)$  für Modellparameter der Abbildung 6.2.3.22: (a) Mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung. (b) Mittelwert der maximalen Bremsung des ACC-Fahrzeugs innerhalb der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung. ....66
- Abbildung 6.2.3.25: Lokale Geschwindigkeitsreduzierung, verursacht durch ACC-Fahrzeug an einer Engstelle an der Auffahrt, bezogen auf ACC-Modell (6.2.3.11)- (6.2.3.17) in einer der Simulationsrealisierungen für fünf verschiedene Werte  $p(C) = 0$  (a); 0,25 (b); 0,5 (c); 0,75 (d); und 1 (e). Fahrzeuge 1 und 2 sind von Menschen gelenkte Fahrzeuge, Fahrzeug 3 ist das ACC-Fahrzeug. Modellparameter sind:  $\tau G = 1,6$  s;  $\tau p = 1,5$  s;  $K1 = 0,3$  s – 2;  $K2 = K\Delta v = 0,6$  s – 1. Weitere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.22. ....67

## Individueller Schlussbericht

- Abbildung 6.2.3.26: Verzögerung (Beschleunigung) des ACC-Fahrzeugs in den gleichen Simulationsrealisierungen wie in Abbildung 6.2.3.25 für fünf verschiedene Werte  $p(C) = 0$  (a); 0,25 (b); 0,5 (c); 0,75 (d), und 1 (e). ..... 68
- Abbildung 6.2.3.27: Merkmale der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC- Fahrzeuge im Bereich einer Engstelle an der Auffahrt in Abhängigkeit vom Wert  $p(C)$  für Modellparameter der Abbildung 6.2.3.25: (a) Mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduktion. (b) Mittelwert der maximalen Bremsung des ACC-Fahrzeugs innerhalb der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung. .... 69
- Abbildung 6.2.3.28: Lokale Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC-Fahrzeuge einer Engstelle an der Auffahrt, bezogen auf das ACC-Modell (6.2.3.11)-(6.2.3.17) in einer der Simulationsrealisierungen für fünf verschiedene Werte  $p(C) = 0$  (e); 0,25 (d); 0,5 (c); 0,75 (b) und 1 (a). Fahrzeuge 1 und 2 sind von Menschen gelenkte Fahrzeuge, Fahrzeug 3 ist das ACC-Fahrzeug. Modellparameter sind:  $\tau_G = 2,2$  s;  $\tau_p = 2$  s;  $K1 = 0,3$  s<sup>-2</sup>;  $K2 = K\Delta v = 0,6$  s<sup>-1</sup>. Weitere Modellparameter entsprechen denen aus Abbildung 6.2.3.22. .... 70
- Abbildung 6.2.3.29: Verzögerung (Beschleunigung) des ACC-Fahrzeugs in den gleichen Simulationsrealisierungen wie in Abbildung 6.2.3.28 für fünf verschiedene Werte  $p(C) = 0$  (e); 0,25 (d); 0,5 (c); 0,75 (b) und 1 (a). .... 71
- Abbildung 6.2.3.30: Charakteristika lokaler Geschwindigkeitsreduzierung durch ACC-Fahrzeuge im Bereich einer Engstelle durch eine Auffahrt als Funktion des Wertes  $p(C)$  für Modellparameter der Abbildung 6.2.3.28: (a) Mittlere Amplitude der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung. (b) Mittelwert der maximalen Bremsung des ACC-Fahrzeugs innerhalb der lokalen Geschwindigkeitsreduzierung. .... 72
- Abbildung 6.2.3.31: Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruches an Engstellen im gemischtem Verkehr mit 20% der automatisierten Fahrzeuge. Kurve 1: Verkehr mit Fahrzeugen, die durch menschlichen Fahrern gesteuert werden; Kurve 2: 20% TPACC (Formeln (6.2.3.1)-(6.2.3.2)), Kurve 3: 20% ACC (Formel (6.2.3.5)). Andere Modellparameter sind dieselbe, wie in Abbildung 6.2.3.11. .... 75
- Abbildung 6.2.3.32: Strömungseigenschaften des freien Verkehrsflusses auf einspuriger Straße mit einer Engstellen durch eine Auffahrt im Verkehr ohne autonom fahrende Fahrzeuge und im gemischten Verkehr mit 2% TPACC-Fahrzeugen: (a) Teil der Geschwindigkeits-Fluss-Beziehung für größere Flussraten. (b) Die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs  $PB(qsum)$ ; Funktion  $PB(qsum)$  ist Kurve 1 aus Abbildung 6.2.3.11. Weitere Modellparameter entsprechen jenen in Abbildung 6.2.3.11. Berechnete Werte:  $q_{th}$ ,  $TPACC(B) = q_{th}(B) = 2290$  und  $C_{max}$ ,  $TPACC = C_{max} = 2360$  Fahrzeuge/h. .... 76
- Abbildung 6.2.3.33: Qualitative Erklärung der Bedingung (6.2.3.18): (a) Qualitative Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs  $PB(qsum)$  von der Flussrate. (b) Z-Charakteristik des Verkehrszusammenbruchs mit Zuständen für freien Verkehrsfluss und synchronisierten Verkehrsfluss. .... 77
- Abbildung 6.2.3.34: Vergleich der Fließeigenschaften von Verkehrsströmen für den freien Fluss auf einer einspurigen Straße mit einer Engstelle durch eine Auffahrt mit gemischtem Verkehr bei 2% an autonom fahrenden Fahrzeugen. Ausschnitt der Geschwindigkeits-Fluss Beziehung für größere Flussraten. Die durchgezogene Kurve „TPACC“ bezieht sich auf TPACC-Fahrzeuge. Die gestrichelte Kurve „ACC“ bezieht sich auf klassische ACC-Fahrzeuge. Weitere Modellparameter entsprechen jenen in Abbildung 6.2.3.11. Berechnete Werte:  $q_{th}$ ,  $TPACC(B) = q_{th}(B) = 2290$  und  $C_{max}$ ,  $TPACC = C_{max} = 2360$  Fahrzeuge/h.;  $q_{th}$ ,  $ACC(B) = 2265$  und  $C_{max}$ ,  $ACC = 2330$  Fahrzeuge/h. .... 78
- Abbildung 6.2.3.35: Vergleich der Fließeigenschaften von Verkehrsströmen für den freien Fluss auf einer einspurigen Straße mit einer Engstelle durch eine Auffahrt mit gemischtem Verkehr bei 20% autonom fahrenden Fahrzeugen. Ausschnitt der Geschwindigkeits-Fluss Beziehung für größere Flussraten. Die durchgezogene Kurve „TPACC“ bezieht sich auf TPACC-Fahrzeuge. Die gestrichelte Kurve „ACC“ bezieht sich auf klassische ACC-Fahrzeuge. Für Simulationen bei  $qsum \leq 2000$  Fahrzeuge/h gibt es keinen Zufluss über die Auffahrt ( $qon = 0$ ). Für  $qsum > 2000$  Fahrzeuge/h wird der Anstieg des Gesamtflusses  $qsum$  durch eine Steigerung des Zuflusses  $qon$  an der

## Individueller Schlussbericht

- Auffahrt erreicht, dabei bleibt  $q_{in} = 2000$  Fahrzeuge/h konstant. Weitere Modellparameter entsprechen jenen in Abb. 1.2.3.11. Berechnete Werte:  $q_{th}$ ,  $TPACC(B) = 2308$ ,  $C_{max}$ ,  $TPACC = 2371$  Fahrzeuge/h;  $q_{th}$ ,  $ACC(B) = 2050$  und  $C_{max}$ ,  $ACC = 2147$  Fahrzeuge /h. .... 79
- Abbildung 6.3.1.1: Graphische Ausgabe der Computersimulation zu einem gegebenen Zeitpunkt. Die Projektkreuzung ist in ihrer Topographie stark vereinfacht dargestellt. Die gelben Rechtecke stellen zwei, sich auf der „Loherstraße“ befindlichen Fahrzeuge dar und  $gn$  den räumlichen Abstand zwischen diesen. Das horizontale Straßenelement ist die nicht-vorfahrtberechtigte „Mähringer Straße“, die später vom automatisch fahrenden Fahrzeug befahren werden soll. .... 81
- Abbildung 6.3.1.2: Gleiche Wahl von  $vf_{free}$  für alle PKW: Empirische Wahrscheinlichkeitsdichte-funktionen über dem zeitlichen Abstand  $gn_{vn}$  zweier aufeinanderfolgender PKW für verschiedene  $t_{init}$  (siehe Legende). Die Auswertung erfolgte ca. 100m nach der Initialisierung der Fahrzeuge. Simulationsdauer jeweils 3600s. Ausgewertet wurden pro Kurve ca. 1000 bis 2000 Messwerte. Die Peaks in der Abbildung deuten auf einen nahezu unveränderten zeitlichen Abstand über diesen Streckenabschnitt hin:  $t_{init} \approx gn_{vn}$ . .... 82
- Abbildung 6.3.1.3: Histogramm einer videobasierten Auswertung zur Geschwindigkeitsverteilung von 432 Kraftfahrzeugen bei erlaubten Tempo 50 auf einer einspurigen Straße. Die Form der Verteilung stützt die These, die Freiflussgeschwindigkeit  $vf_{free}$  für die Computersimulation statistisch und nicht wie bisher, konstant zu wählen. .... 83
- Abbildung 6.3.1.4: Statistische Wahl von  $vf_{free}$ : Empirische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen über dem zeitlichen Abstand  $gn_{vn}$  zweier aufeinanderfolgender PKW für verschiedene  $t_{init}$  (siehe Legende). Auswertung erfolgte ca. 100m nach der Initialisierung der Fahrzeuge. Simulationsdauer jeweils 3600s. Ausgewertet wurden pro Kurve ca. 1000 bis 2000 Messwerte. Zu erkennen ist nun eine deutliche Aufweichung der Peaks gegenüber Abbildung 6.3.1.2. .... 84
- Abbildung 6.3.1.5: Schematische Darstellung der Anbringung eines Sensors an einem Leitpfosten an einer gegebenen Position  $P_i$ . Die rote Linie visualisiert deutet den für das menschliche Auge unsichtbaren Infrarotlaserstrahl des verwendeten Lidar-Sensors an. Zur Vermeidung der Detektion von Fahrzeugen auf der Gegenfahrbahn ist der Sensor nach unten geneigt. Im Bild zu sehen ist die Detektion eines Fahrzeuges auf der Zielspur. .... 84
- Abbildung 6.3.1.6: Anordnung der vier einzelnen Messeinheiten an Positionen  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  zur Erhebung der „Entwicklung der zeitlichen Abstände zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge“. Die einzelnen Sektoren zwischen den Messeinheiten werden als  $\Delta s_{ij}$  bezeichnet. Die roten, vertikalen Linien repräsentieren die Laserstrahlen der einzelnen Lidar-Sensoren der jeweiligen Messeinheit und dienen der Detektion vorbeifahrender Kraftfahrzeuge. .... 85
- Abbildung 6.3.1.7: Typischer Signalverlauf, aufgenommen durch eine der insgesamt vier Messeinheiten. Zu sehen sind die Signalausschläge, ausgelöst durch zwei aufeinanderfolgende Kraftfahrzeuge. Anhand dieser können Fahrzeugfolgezeiten  $T$  (engl. *vehicle following time*), die Zeitlücke  $\tau$  (engl. *temporal headway*), sowie deren Änderung  $\Delta\tau$  – durch den Vergleich mit den entsprechenden Signalen der verbleibenden drei Messeinheiten – abgeleitet werden. Die zeitliche Länge der Fahrzeuge ist außerdem am oberen Bildrand, in roter Schrift dargestellt. .... 85
- Abbildung 6.3.1.8: Histogramm der Geschwindigkeitsverteilung eines vierstelligen Datenstammes. Gemessen wurde innerorts, bei einem Tempolimit von 50 km/h. Die zugrundeliegenden Geschwindigkeitsdaten wurden sowohl mit der Normalverteilung (rot), als auch mit der Lognormalverteilung (blau) approximiert. Letztere bildet das Verhalten der zugrundeliegenden Daten besser ab, jedoch ist die Normalverteilung in guter Näherung ebenfalls geeignet; PDF = probability density function (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion). .... 87



## Individueller Schlussbericht

- Abbildung 6.3.1.9: Histogramme der Änderung des zeitlichen Abstandes („Change in Temporal Headway“)  $\Delta\tau$  zweier, aufeinanderfolgender Fahrzeuge in Abhängigkeit der zurückgelegten Strecke  $\Delta s$  und des zeitlichen Abstands  $\tau$ . Gemessen wurde innerorts, bei einem Tempolimit von 50 km/h. Die Histogramme wurden sowohl mit der Normalverteilung (rot), als auch mit der Studentischen t-Verteilung (blau) approximiert. Letztere bildet das Verhalten der zugrundeliegenden Daten zwar etwas besser ab (heavy tails), ist im Hinblick auf ein Prädiktionsmodell jedoch ungeeignet; PDF = probability density function (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion)...88
- Abbildung 6.3.1.10: Entwicklung des Pearson'schen Korrelationskoeffizienten  $c$  der Änderung des zeitlichen Abstandes zweier, aufeinanderfolgender Fahrzeuge zwischen angrenzenden Straßensegmenten, in Abhängigkeit der initialen Zeitlücke  $\tau$ . Es ist deutlich ein steigender Trend für kleine Zeitlücken  $\tau$  zu erkennen, welcher offenbar in ein asymptotisches Verhalten für große  $\tau$  mündet. Die Anwendung der in der Abbildung angegebenen, exponentiellen Fit-Funktion ist somit aufgrund der Konvergenzkriterien gerechtfertigt. Der Parameter  $c_0$  beschreibt die Obergrenze des Korrelationskoeffizienten für große  $\tau$  und spiegelt, mit einem Wert nahe 1, die sehr starke Korrelation zwischen  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$  wider. ....89
- Abbildung 6.3.1.11: Streudiagramme zur Visualisierung der Korrelation zwischen der Änderung des zeitlichen Abstandes zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge in aufeinanderfolgenden Sektoren für unterschiedliche initiale Zeitlücken  $\tau$ . Während für dicht auffahrende Fahrzeuge (kleines  $\tau$ ) nur eine geringe Korrelation erkennbar ist, erhöht sich diese drastisch für einen steigenden Fahrzeugabstand (steigendes  $\tau$ ). Der jeweils zugehörige Korrelationskoeffizient  $c$  ist links oben in den einzelnen Streudiagrammen dargestellt. Eine entsprechende Auftragung dieses Umstandes ist in Abbildung 6.3.1.10 zu sehen. Die Messgenauigkeit (engl. *Accuracy*) bezieht sich auf alle aufgeführten Streudiagramme. ....90
- Abbildung 6.3.1.12: Randverteilungen von  $\Delta\tau_{12}$  (oben) und  $\Delta\tau_{23}$  (unten) für verschiedene zeitliche Abstände  $\tau$  zwischen zwei, aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Die Randverteilungen geben also die zeitliche Änderung der Zeitlücke auf den beiden Sektoren  $\Delta s_{12}$  und  $\Delta s_{23}$  (siehe Abbildung 6.3.1.6) an. Wie bereits beschrieben, lässt sich ein Korrelationskoeffizient  $c > 0$  zwischen zwei zusammengehörigen Verteilungen  $\Delta\tau_{12}$  und  $\Delta\tau_{23}$  (spaltenweise) feststellen und auf dessen Basis ein statistisch-mikroskopischen Prädiktionsmodell entwickeln (siehe Abbildung 6.3.1.13). ....91
- Abbildung 6.3.1.13: Vorgegebene Wahrscheinlichkeit  $s(\Delta)$  in Abhängigkeit der Prognoseunsicherheit  $\Delta$ . Die rote Linie stellt dabei das Prädiktionsmodell zur Approximation an die empirischen Daten (blaue Punkte) dar. Zeilenweise wurden die gleichen Kurven geplottet, da der zugrundeliegende Ausdruck (6.3.1.2) unabhängig von  $\Delta\tau_{12}$  ist. ...93

### Literaturverzeichnis:

- [1] Boris S. Kerner, *The Physics of Traffic*, Springer, Berlin, New York, 2004.
- [2] Boris S. Kerner, *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*, Springer, Berlin, New York, 2009.
- [3] Boris S. Kerner, Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving, *Physica A* (2016) DOI: 10.1016/j.physa.2016.01.034.
- [4] Stefan Kaufmann, Boris S. Kerner, Hubert Rehborn, Micha Koller, Sergey L. Klenov. Aerial Observations of Moving Synchronized Flow Patterns in Over-Saturated City Traffic. *Transportation Research C*, **86**, 393-406 (2018)
- [5] Sven-Eric Molzahn, Boris S. Kerner and Hubert Rehborn. Phase based jam warnings: an analysis of synchronized flow with floating car data. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, (2019) DOI: 10.1080/15472450.2019.1638781
- [6] Yildirim Dülger, Sven-Eric Molzahn, Hubert Rehborn, Micha Koller, Boris S. Kerner, Dominik Wegerle, Michael Schreckenberg, Michael Menth, and Sergey L. Klenov. Empirical random phase transitions between free flow and synchronized flow at highway bottlenecks. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, (2019) DOI: 10.1080/15472450.2019.1615488
- [7] Boris S. Kerner, Statistical physics of synchronized traffic flow: Spatiotemporal competition between  $S \rightarrow F$  and  $S \rightarrow J$  instabilities. *Phys. Rev. E* **100**, 012303 (2019)
- [8] Boris S. Kerner, Hubert Rehborn, Ralf-Peter Schäfer, Sergey Klenov, Jochen Palmer, Stefen Lorkowski, Nikolaus Witte. Traffic Dynamics in Empirical Probe Vehicle Data studied with Three-Phase Theory: Spatiotemporal Reconstruction of Traffic Phases and Generation of Jam Warning Messages. *Physica A*, 392, 221-251 (2013).
- [9] Yildirim Dülger, Sven-Eric Molzahn, Hubert Rehborn, Micha Koller, Boris S. Kerner, Dominik Wegerle, Michael Schreckenberg, Michael Menth & Sergey L. Klenov. „Empirical random phase transitions between free flow and synchronized flow at highway bottlenecks“. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 1297, no. 6 (2019): 1–17
- [10] Boris S. Kerner. „Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science“. Springer, 2017
- [11] Boris S. Kerner und Sergey L. Klenov. „A theory of traffic congestion at moving bottlenecks“. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 43, no. 42 (2010): 425101

### Glossar

AP	Arbeitspaket
BOSCH	Robert Bosch GmbH
CCU	Communication Control Unit
CC	Chassis Systems Control – Geschäftsbereich des Unternehmensbereiches Bosch Mobility Solutions der Robert Bosch GmbH
Converge	öffentlich gefördertes Projekt “Communication Network Vehicle Road Global Extension”
CR	Corporate Research – Zentrale Forschung der Robert Bosch GmbH
DAI	Daimler AG
ENU	East-North-Up – Koordinatensystem
FCD	Floating Car Data
FOSS	Free Open Source Software
GPS	Global Positioning System
GVB	Gesamtvorhabensbeschreibung des Projektes MEC-View
HAF	Hochautomatisiertes Fahren
ITD	IT Designers GmbH
KPI	Key Performance Indicator
LiDAR	Light Detection and Ranging
LTE	Long Term Evolution (Mobilfunkstandard)
MEC	Mobile Edge Computing (nach ETSI Standard auch Multi-access Edge Computing)
MEC-View	Verbundprojekt „Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren“
NOKIA	Nokia Solutions and Networks GmbH & Co. KG
OEM	Original Equipment Manufacturer (Originalausrüstungshersteller)
OSRAM	Osram GmbH
RBCM	Robert Bosch Car Multimedia GmbH
simTD	Forschungsprojekt „Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland“
SITECO	Unterauftragnehmer von OSRAM, Marke der OSRAM Lighting Solutions
SPIES	Unterauftragnehmer von OSRAM, Ingenieurbüro Spies
TOMTOM	TomTom Development Germany GmbH
TRL	Technology Readiness Level
UAP	Unter-Arbeitspaket
UDE	Universität Duisburg-Essen, Institut für Physik von Transport und Verkehr
UULM	Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
WS	Workshop
XFCD	Extended Floating Car Data