

Räumlich-zeitliche Stauphänomene auf Basis von empirischen Verkehrsdaten

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
M.Sc. Yildirim Dülger
aus Tübingen

Tübingen
2020

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen.

Tag der mündlichen Qualifikation: 09.07.2021

Dekan: Prof. Dr. Thilo Stehle

1. Berichterstatter Prof. Dr. Michael Menth

2. Berichterstatter Prof. Dr. Wolfgang Küchlin

Danksagung

Zum Gelingen dieser Dissertation haben viele Menschen einen erheblichen Beitrag geleistet. Für diese Unterstützung bin ich jedem Einzelnen sehr dankbar. Ihr habt es mir ermöglicht mein Promotionsprojekt erfolgreich abzuschließen. Das Lernen und Lehren sind zwei wertvolle Güter einer Gesellschaft, die stets bewahrt werden müssen.

In erster Linie danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Michael Menth für seinen unermüdlischen Einsatz bei der vorbildlichen Betreuung meiner Arbeit. Zu jeder Tageszeit und jedem Wochentag stand er mit seinen konstruktiven Anmerkungen und Ratschlägen stets zur Verfügung. Dies lenkte die Arbeit in die richtige Richtung und verbesserte die Qualität deutlich.

Großer Dank gebührt Prof. Dr. Boris Kerner für die anregenden Diskussionen und der kritischen Auseinandersetzung mit meinen Forschungsergebnissen. Durch seine fachliche Expertise im Bereich des Verkehrswesens ermöglichte er mir relevante wissenschaftliche Ergebnisse von weniger relevanten zu unterscheiden und zu priorisieren. Dr. Sergey Klenov danke ich für die Durchführung von Verkehrssimulationen für ausgewählte Verkehrssituationen.

Dr. Hubert Rehborn und Dr. Micha Koller schulde ich für ihre fachliche und persönliche Unterstützung über die gesamte Projektlaufzeit großen Dank. Ohne ihre Bereitschaft wäre mein Promotionsprojekt nicht zustande gekommen. Außerdem danke ich Prof. Dr. Wolfgang Küchlin, Prof. Dr. Andreas Zell, Dr. Dominik Wegerle, Dr. Sven-Eric Molzahn, Dr. Markus Auer, Dr. Stefan Kaufmann, Dr. Rüdiger-Walter Henn, Dr. Bruce Bernhardt, Dr. Arne Kesting, Ralf-Peter Schäfer und Julian Bock.

Mein Dank gilt auch der Mercedes-Benz AG für die Möglichkeit der Durchführung meiner Arbeit in ihrem Arbeitsumfeld und die Bereitstellung aller nötigen Tools. Den Projektpartnern des Projektes MEC-View (Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren) und TomTom danke ich für die enge Zusammenarbeit. Darüber hinaus danke ich dem Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen, dem hessischen Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen und der Straßenverkehrszentrale Baden-Württemberg für die Bereitstellung von Drohnendaten und Detektordaten.

Mein besonderer Dank geht an meine Mutter, meinen Vater, meine Geschwister, meine Frau und meine Tochter, die mir immer bedingungslos zur Seite standen. Ohne ihre unermüdlische Unterstützung und Geduld wäre diese Arbeit nicht möglich. Die Zuneigung und Liebe der Menschen zueinander und zu sich selbst lassen auch die größten Steine schmelzen und beiseite räumen, und ermöglichen den Blick in die Sonnenstrahlen in voller innerer Zufriedenheit, Dankbarkeit und Glückseligkeit. Sie bilden die voranstehende 1 bei $10^i \forall i \in \mathbb{N}$.

Abstract

The increasing need for mobility of people leads to steady increase of spatiotemporal congestion phenomena in more and more congested road networks when using vehicles. New vehicle technologies and developments such as electromobility and autonomous driving must deal with and master this reality on the roads. A deeper understanding of all congestion phenomena, their causes, origin and spatiotemporal development therefore provides an essential scientific basis. For comprehensive and microscopic traffic detection a variety of technologies have been developed and used to this day. In this work, access to large amounts of traffic data from different data sources (floating car data, drone data and detector data) distributed across Europe and the U.S. enables reliable and detailed investigations of various congestion phenomena on highways.

As a central result, the empirical evidence is provided for the existence and characteristics of spatially bounded and temporally limited traffic disruptions before traffic breakdowns. These traffic disruptions occur in free traffic flow at highway bottlenecks and have been proven based on floating car data. They exhibit general characteristics and common features and can exist as spatiotemporally propagating traffic structures. Hereby, missing evidence is provided for the concepts of traffic flow formulated in traffic theories.

Since floating car data are not lane-specific resolved today, highly accurate and complete drone data are used to prove the occurrence of lane-dependent traffic breakdowns. Congested traffic structures and traffic structures with high traffic density are observed on all three lanes at different points in time and locations. For this purpose, a traffic density method based on moving averages and the spatial distances between consecutive vehicles is revealed.

Moreover, detector data are used to prove the traffic-phase- and lane-dependency of time gaps between vehicles. The probability of merging and lane-changing opportunities on highways also exhibit traffic-phase- and lane-dependent characteristics. The traffic phase of synchronized flow turns out to be the most unsuitable traffic phase for finding a sufficiently large time gap for an (automated) vehicle to merge onto highways or change lanes. In addition, a waiting time model is developed to calculate the waiting time that must pass at a spatial location on the highway to find a sufficiently large time gap to merge onto the highway or change the lane. The waiting time exhibits traffic-phase-dependent characteristics.

The results of this work make an important contribution to the better understanding of traffic breakdowns in real traffic and to the improvement of traffic reconstruction. They can serve as requirements for traffic theories and models and can be used in automated vehicles, driver assistance and navigation systems.

Kurzfassung

Das steigende Mobilitätsbedürfnis der Menschen führt bei der Nutzung von Fahrzeugen zur stetigen Zunahme räumlich-zeitlicher Stauphänomene in mehr und mehr überlasteten Straßennetzen. Neue Fahrzeugtechnologien und -entwicklungen wie die Elektromobilität und das autonome Fahren müssen mit dieser Realität auf den Straßen umgehen und diese beherrschen. Ein vertieftes Verständnis aller Stauphänomene, deren Ursachen, Entstehung und räumlich-zeitlicher Entwicklung liefert deswegen eine wichtige wissenschaftliche Grundlage. Zur flächendeckenden und mikroskopischen Verkehrserfassung wurden bis heute vielfältige Technologien entwickelt und eingesetzt. Der Zugang zu großen Mengen an Verkehrsdaten aus unterschiedlichen Datenquellen (Floating-Car-Daten, Drohnendaten und Detektordaten) verteilt über Europa und den USA ermöglicht es in dieser Arbeit, zuverlässige und detaillierte Untersuchungen verschiedener Stauphänomene auf Autobahnen durchzuführen.

Als zentrales Ergebnis erfolgt der empirische Nachweis der Existenz und der Eigenschaften von räumlich begrenzten und zeitlich befristeten Verkehrsstörungen zeitlich vor Verkehrszusammenbrüchen. Diese Verkehrsstörungen entstehen im freien Verkehr an Autobahnengstellen und wurden auf Basis von Floating-Car-Daten nachgewiesen. Sie weisen allgemeine Eigenschaften und Gemeinsamkeiten auf und können als sich räumlich-zeitlich ausbreitende Verkehrsstrukturen vorliegen. Hiermit werden fehlende Nachweise zu den in Verkehrstheorien formulierten Vorstellungen über den Verkehrsablauf erbracht.

Da Floating-Car-Daten heute noch nicht fahrspurgenau aufgelöst sind, werden hochgenaue und vollständige Drohnendaten für den Nachweis der Entstehung von fahrspurabhängigen Verkehrszusammenbrüchen verwendet. Es werden gestaute Verkehrsstrukturen und Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte auf allen drei Fahrspuren zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Orten festgestellt. Hierzu wird eine Verkehrsdichte-Methode auf Basis von gleitenden Mittelwerten und den räumlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen vorgestellt.

Des Weiteren werden anhand von Detektordaten die Verkehrsphasen- und Fahrspurabhängigkeit von Zeitlücken zwischen Fahrzeugen nachgewiesen. Die Wahrscheinlichkeit von Einscher- und Spurwechsellmöglichkeiten auf Autobahnen weisen ebenfalls verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Eigenschaften auf. Die Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs stellt sich zum Finden einer ausreichend großen Zeitlücke für einen Einscher- oder Spurwechsellvorgang eines (automatisierten) Fahrzeugs als ungeeignetste Verkehrsphase heraus. Außerdem wird ein Wartezeit-Modell zur Ermittlung der Wartezeit, die an einer räumlichen Position der Autobahn vergehen muss um eine ausreichend große Zeitlücke für einen Einscher- oder Spurwechsellvorgang zu finden, entwickelt. Die Wartezeit weist verkehrsphasenabhängige Eigenschaften auf.

Die Ergebnisse dieser Arbeit leisten einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis von Verkehrszusammenbrüchen im realen Verkehr und zur Verbesserung der Abbildung des Verkehrs. Sie können als Anforderungen an Verkehrstheorien und Verkehrsmodelle dienen und in automatisierten Fahrzeugen, der Fahrerassistenz und Navigationssystemen genutzt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen von Verkehrsdatenmessungen	5
2.1	Arten von Verkehrsmessungen: Makro-, mikro- und mesoskopisch	5
2.2	Empirische Verkehrsdaten	7
2.2.1	Detektordaten	7
2.2.2	Floating-Car-Daten	8
2.2.3	Drohnendaten	10
2.3	Datengrundlage dieser Arbeit	11
2.4	Vergleich der Verkehrsdaten	15
3	Stand der Wissenschaft	17
3.1	Räumlich-zeitliche Darstellung von mikroskopischen Verkehrsdaten	17
3.2	Einführung in die Verkehrstheorien	18
3.2.1	Verkehrsmodelle und Verkehrstheorien	22
3.2.2	Empirische Verkehrszusammenbrüche und Drei-Phasen-Verkehrstheorie	24
3.3	Verkehrsphasen in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie	25
3.3.1	Definition der Verkehrsphasen	25
3.3.2	Definition von Verkehrsphasen- und Verkehrszustandsübergängen	29
3.4	Verkehrszusammenbrüche und Arten von gestautem Verkehr	30
3.4.1	Spontaner Verkehrszusammenbruch	31
3.4.2	Induzierter Verkehrszusammenbruch	32
3.4.3	Mega-Stau	34
3.5	Räumlich lokale Verkehrsstörungen an Autobahnengstellen vor Verkehrszusammenbrüchen in Verkehrssimulationsdaten	36
3.6	Eigenschaften von Zeitlücken zwischen Fahrzeugen und der Dauer von Spurwechselforgängen	41
3.7	Einschränkungen existierender Systeme und Bedarf neuer Lösungen	44
4	Eigenschaften von Verkehrsphänomenen im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen	47
4.1	Verkehrsphasenerkennung basierend auf Floating-Car-Daten	49

4.2	Infrastrukturen der Autobahnengstellen	51
4.3	Allgemeine Eigenschaften von Verkehrsphänomenen vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen	55
4.3.1	Verkehrsphänomene an Zufahrten	56
4.3.2	Verkehrsphänomene an Abfahrten	60
4.3.3	Verkehrsphänomene an Fahrbahnsteigungen	62
4.4	Komplexität von sich auflösenden Verkehrsphänomenen	65
4.5	Deskriptive Analyse der Zeitintervalle empirischer Verkehrsphänomene	68
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	70
5	Methode zur lokalen Dichtebestimmung durch mikroskopische Verkehrsdaten	73
5.1	Räumlich-zeitliche Darstellung von Drohnenmessungen	74
5.2	Fahrspurabhängigkeit von mikroskopischem gestautem Verkehr auf Autobahnen	75
5.3	Verkehrsdichte-Methode basierend auf mikroskopischen Verkehrsdaten	80
5.3.1	Methoden der gleitenden Mittelwerte angewandt auf Fahrzeugpositionsdaten	81
5.3.2	Lokale Verkehrsdichte-Methode basierend auf gemittelten Fahrzeugabständen	84
5.3.3	Statistische Eigenschaften von gemittelten Fahrzeugabständen	89
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	92
6	Verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken zwischen Fahrzeugen	95
6.1	Einteilung von Zeitlücken zwischen Fahrzeugen in Verkehrsphasen basierend auf Detektordaten	96
6.2	Verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken zwischen Fahrzeugen auf Basis von Detektordaten	98
6.2.1	Statistische Eigenschaften und Spurwechsellmöglichkeiten	99
6.2.2	Wartezeit-Modell	103
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	106
7	Zusammenfassung und Ausblick	107
7.1	Ergebnisse dieser Arbeit	107
7.2	Ausblick und mögliche Anwendungen	108
7.3	Veröffentlichungen	109
A	Anhang	113
A.1	Empirische Beispiele von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen an Autobahnengstellen	113
	Abkürzungs- und Definitionsverzeichnis	117
	Literaturverzeichnis	121

1 Einführung

1.1 Motivation

Während in Deutschland im Jahr 2010 die Zahl der gemeldeten Verkehrsstaus auf Autobahnen 185 000 betrug mit einer Gesamtlänge von ca. 400 000 km, wurden im Jahr 2019 insgesamt 708 500 Verkehrsstaus gemeldet mit einer Gesamtlänge von ca. 1 423 000 km und einer Gesamtdauer von ca. 521 000 Stunden [1, 2]. Dies entspricht einem Anstieg der gemeldeten Verkehrsstaus um das 3.8-fache und der Gesamtlänge um das 3.6-fache. Die Gesamtlänge der gemeldeten Verkehrsstaus im Jahr 2019 entspricht der ca. 36-fachen Länge des Äquatorumfangs. Die Gesamtdauer der gemeldeten Verkehrsstaus im Jahr 2019 hingegen entspricht ca. 59.5 Jahren.

Die Auswirkungen von Verkehrsstaus betreffen drei wichtige und hochaktuelle Themen: Umwelt, Zeit und Wirtschaft. Es ist unumstritten, dass Verkehrsstaus einen höheren Energieverbrauch der Fahrzeuge verursachen. Durch die dominante Menge an Fahrzeugen mit Verbrennermotoren folgt ein deutlich höherer Schadstoffausstoß [3]. Daher wird die Umwelt stärker belastet mit langfristigen Folgen für den Klimawandel und die globale Erwärmung. Auf Basis von empirischen Verbrauchswerten von Verbrennungsmotoren ergibt sich auf Autobahnen im Vergleich zum frei fließenden Verkehr ein streckenbezogener Kraftstoffmeherverbrauch durch Verkehrsstaus von ca. 40–230 % [4]. Die Werte für den Kraftstoffmeherverbrauch hängen von der Ausprägung des Verkehrsstaus ab. Im innerstädtischen Verkehr liegt der streckenbezogene Kraftstoffmeherverbrauch durch Verkehrsstaus (z. B. Warteschlangen vor Lichtsignalanlagen) im Vergleich zum frei fließenden Verkehr bei ca. 200–290 % [4].

Neben den Folgen für die Umwelt, haben Verkehrsstaus eine direkte Auswirkung auf zwei der höchsten Güter der Menschen: die Zeit und die Gesundheit. Durch Verkehrsstaus geht sehr viel wertvolle Zeit verloren [2]. Außerdem verursacht ein Verkehrsstau häufig Stress, der den Körper und die Psyche ernsthaft belasten kann [5, 6]. Neben Panik und Angst, reagiert der Mensch bei einem Verkehrsstau auch mit erhöhtem Blutdruck, Muskelverspannung und dem Anstieg des Adrenalinpiegels. Darüber hinaus ist der volkswirtschaftliche Schaden in Deutschland durch Verkehrsstaus enorm und wird für das Jahr 2013 auf 25.2 Milliarden Euro geschätzt. Eine Prognose für das Jahr 2030 ergibt 33 Milliarden Euro [3]. Zwei wesentliche Faktoren, die in die Berechnung des volkswirtschaftlichen Schadens einfließen, sind die verlorene Arbeitszeit und der verschwendete Kraftstoff durch Verkehrsstaus. Letzteres wird in Deutschland für das Jahr 2013 auf ca. 1.2 Milliarden Liter geschätzt [3].

Aus der Reduzierung von Verkehrsstaus würde unmittelbar die Reduzierung des Kraftstoffmeherverbrauchs, der Umweltbelastung, des Zeitverlusts und des volkswirtschaftlichen Schadens folgen. Um die Reduzierung von Verkehrsstaus jedoch zu erreichen, muss zunächst verstanden werden, wie es zur Entstehung eines Verkehrsstaus kommt, welche Verkehrsphänomene

zu einem Verkehrsstau führen und welche Verkehrsphänomene sich in der Umgebung der Verkehrsstautentstehung ereignen. In dieser Arbeit wird anhand umfangreicher und vielfältiger realer Verkehrsmessungen an Autobahnen das räumlich-zeitliche Verkehrsgebiet vor und bei einem Verkehrszusammenbruch untersucht. Eine zentrale Leitfrage lautet:

Wie kommt es zu einem empirischen Verkehrszusammenbruch auf Autobahnen und was passiert in der räumlich-zeitlichen Umgebung eines Verkehrszusammenbruchs?

Zur Verkehrserfassung existieren viele Technologien wie beispielsweise Detektorschleifen, die den Gesamtverkehrsfluss messen, oder Fahrzeuge, die ihre Positionsdaten über eine zentrale Kommunikation an einen Server senden (Floating-Car-Daten). Eine Technologie, die in den letzten Jahren an Aufmerksamkeit gewonnen hat, sind Drohnen. Drohnenmessungen erfassen die Fahrzeugtrajektorien eines Streckenabschnittes fahrspurabhängig und vollständig. Dadurch können neue Erkenntnisse über die fahrspurabhängigen Eigenschaften des Verkehrs auf Autobahnen gewonnen werden.

Aktuelle Forschungsprojekte wie beispielsweise *MEC-View* ([7]) und *LUKAS* ([8]) zeigen, dass es einige technische Herausforderungen beim Einscheren von automatisierten Fahrzeugen gibt. Im Projekt MEC-View ist das Ziel in eine Vorfahrtsstraße im autonomen Fahrbetrieb einzuscheren [7]. Eine Randbedingung beim Einscheren von automatisierten Fahrzeugen ist es eine ausreichend große Zeitlücke zu finden, die einen sicheren Einschervorgang ermöglicht. Eine ausreichend große Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ist auch erforderlich beim sicheren Spurwechsel auf Autobahnen oder beim sicheren Einscheren von Autobahnzufahrten auf die Autobahn. Die bislang erfolgten Untersuchungen von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen lassen vermuten, dass Zeitlücken sehr stark von der Verkehrsinfrastruktur und dem Verkehrszustand abhängen. Erkenntnisse über verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken würden einen Beitrag zur technischen Machbarkeit, eine ausreichend große Zeitlücke für den Einschere- oder Spurwechselforgang auf Autobahnen zu finden, liefern. Mit dieser Herausforderung werden automatisierte Fahrzeuge im realen Verkehr konfrontiert sein.

1.2 Ziele der Arbeit

Der Zugang zu großen Mengen an Verkehrsdaten aus unterschiedlichen Datenquellen (Floating-Car-Daten, Drohnen- und Detektordaten) verteilt über Europa und den USA ermöglicht es in dieser Arbeit, zuverlässige und detaillierte Verkehrsuntersuchungen auf Autobahnen durchzuführen. Das räumlich-zeitliche Verkehrsgebiet vor und bei einem empirischen Verkehrszusammenbruch wird untersucht. Es werden neue Verkehrsphänomene nachgewiesen und existierende Verkehrsphänomene auf Basis neuer Daten bestätigt. Die Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis von Verkehrszusammenbrüchen im realen Verkehr und zur Verbesserung der Abbildung des Verkehrs.

Verkehrstheorien formulieren abstrakte und theoretische Vorstellungen über den Verkehrsablauf. Die Aussagen der Verkehrstheorien über den Verkehr müssen mit empirischen Verkehrsdaten verifiziert werden. In dieser Arbeit werden die fehlenden empirischen Nachweise zu der folgenden Aussage erbracht: Es existieren vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen räumlich-zeitliche Verkehrsgebiete mit höherer Verkehrsdichte und geringerer mittlerer

Geschwindigkeit als außerhalb des Verkehrsgebietes. Diese Verkehrsgebiete werden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete genannt. Es werden zusätzlich die Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten untersucht.

Des Weiteren ermöglichen Drohnenmessungen auf Autobahnen eine vollständige Erfassung aller Fahrzeugtrajektorien des Autobahnabschnittes, der von der Kamera der Drohne erfasst wird. Insbesondere können Fahrzeuge fahrspurgenau aufgelöst und Spurwechselvorgänge erkannt werden. Anhand von Floating-Car-Daten ist die fahrspurgenaue Auflösung heute noch nicht möglich. Mit sowohl Detektordaten als auch Floating-Car-Daten können Spurwechselvorgänge nicht erkannt werden. Es existieren zu realen fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen auf Autobahnen bisher kaum empirische Untersuchungen basierend auf einer so hochgenauen Datengrundlage wie Drohnenmessungen. In dieser Arbeit wird der Verkehr auf Autobahnen anhand einiger Beispiele mit Drohnen Daten untersucht. Die Heterogenität und Komplexität von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen des gestauten Verkehrs auf Autobahnen werden nachgewiesen.

Da das automatisierte Fahren auf Autobahnen relevant ist und dafür sichere Einscher- und Spurwechselvorgänge auf Autobahnen gewährleistet werden müssen, sind Erkenntnisse über verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken essenziell. Es werden verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen auf Autobahnen basierend auf Detektordaten untersucht.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird die verwendete empirische Datengrundlage dieser Arbeit beschrieben. Anhand verschiedener Technologien und Methoden werden Verkehrsdaten erhoben, die sehr unterschiedliche Eigenschaften und Einschränkungen aufweisen. Beispiele hierfür sind Detektordaten, Floating-Car-Daten und Drohnen Daten. Die Eigenschaften und Einschränkungen dieser unterschiedlichen Verkehrsdaten werden miteinander verglichen und diskutiert.

In Kapitel 3 werden zentrale Begriffe und Aussagen der Verkehrstheorien mit Fokus auf der Drei-Phasen-Verkehrstheorie diskutiert. Hierzu werden die Begriffe Verkehrsphasen, Verkehrszusammenbrüche, Verkehrsphasenübergänge und Verkehrszustandsübergänge definiert und anhand von qualitativen und empirischen Beispielen beschrieben. Außerdem werden verschiedene Stabilitäten und Instabilitäten des Verkehrs erklärt. Es wird zusätzlich auf den theoretischen Hintergrund von Verkehrsstörungen an Autobahnengstellen vor Verkehrszusammenbrüchen eingegangen. Darüber hinaus wird eine Übersicht über die Eigenschaften von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen gegeben.

Kapitel 4, 5 und 6 bilden den Hauptteil dieser Arbeit. In Kapitel 4 werden neue Erkenntnisse über die empirischen Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen basierend auf Floating-Car-Daten gewonnen. Zunächst wird ein Algorithmus zur Verkehrsphasenerkennung auf Basis von Floating-Car-Daten vorgestellt. Es werden unterschiedliche Autobahninfrastrukturen und die zugehörigen Autobahnengstellen beschrieben und die allgemeinen Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten vor Verkehrszusammenbrüchen herausgearbeitet. Die Komplexität von sich auflösenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten wird diskutiert und eine deskriptive Analyse der Zeitintervalle von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten durchgeführt.

Kapitel 5 befasst sich mit der Untersuchung der Heterogenität und Komplexität von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen des gestauten Verkehrs auf Autobahnen basierend auf Drohnen- und Detektordaten. Es wird die räumlich-zeitliche Darstellung von Drohnenmessungen beschrieben. Zur Ermittlung von Verkehrsstrukturen auf Autobahnen mit hoher Verkehrsdichte wird eine Verkehrsdichte-Methode entwickelt, die auf den räumlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen und auf Methoden der gleitenden Mittelwerte basiert. Es werden statistische Eigenschaften zu den mit der Verkehrsdichte-Methode berechneten Werten dargestellt.

In Kapitel 6 werden Erkenntnisse über verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken basierend auf Detektordaten gewonnen. Es werden die aus Detektordaten ermittelten Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen auf Autobahnen beschrieben und in Verkehrsphasen eingeteilt. Statistische Eigenschaften der verkehrsphasen- und fahrspurabhängigen Zeitlücken werden herausgearbeitet und Einscher- und Spurwechsellmöglichkeiten diskutiert. Darüber hinaus wird ein Wartezeit-Modell entwickelt zur Untersuchung von Zeitintervallen, in denen die Durchführung von sicheren Einscher- oder Spurwechsellvorgängen aufgrund von zu kleinen Zeitlücken zwischen Fahrzeugen nicht möglich ist.

Das Kapitel 7 fasst alle zentralen Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder und mögliche Anwendungen.

2 Grundlagen von Verkehrsdatenmessungen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von empirischen Verkehrsmessungen vorgestellt. Anhand verschiedener Technologien und Methoden werden Verkehrsdaten erhoben, die sehr unterschiedliche Eigenschaften und Einschränkungen aufweisen. Beispiele hierfür sind Detektordaten, Floating-Car-Daten und Drohnendaten (Kapitel 2.2). Empirische Verkehrsmessungen sind zum Verständnis und für die Rekonstruktion des realen Verkehrsablaufs wesentlich. Sie sind außerdem für die Verbesserung und Entwicklung von Verkehrsmodellen nötig. In Kapitel 2.3 wird die in dieser Arbeit verwendete Datengrundlage ausführlich beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 2.4 die Eigenschaften und Einschränkungen der unterschiedlichen Verkehrsdaten miteinander verglichen und diskutiert.

2.1 Arten von Verkehrsmessungen: Makro-, mikro- und mesoskopisch

Zunächst werden der Begriff *Verkehrsvariable* und die Berechnungen von elementaren Verkehrsvariablen des Verkehrs beschrieben.

Definition 2.1. Verkehrsvariable: Eine Verkehrsvariable ist eine Eigenschaft des Verkehrs über ein räumlich-zeitliches Verkehrsgebiet. Beispiele für Verkehrsvariablen sind folgende: die mittlere Verkehrsgeschwindigkeit, der (Gesamt-) Verkehrsfluss (die Verkehrsstärke), die Verkehrsdichte, der zeitliche und räumliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen, die Geschwindigkeit einzelner Fahrzeuge, die Anzahl der Fahrspuren, der prozentuale Anteil an LKWs.

Die *mittlere Verkehrsgeschwindigkeit* \bar{v} ergibt sich aus dem Mittelwert der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge innerhalb eines Zeitintervalls T an einer räumlichen Position s_0 . Sei N die Anzahl der Fahrzeuge innerhalb des Zeitintervalls T und v_1, \dots, v_N die Geschwindigkeiten dieser Fahrzeuge. Dann gilt an der Position s_0 :

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i.$$

Eine alternative mittlere Verkehrsgeschwindigkeit kann aus dem Mittelwert der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge innerhalb eines *Streckenabschnittes* S berechnet werden. Seien hierzu v_1^S, \dots, v_N^S die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge innerhalb des Streckenabschnittes S . Dann gilt:

$$\bar{v}^S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^S.$$

Der *Verkehrsfluss* (die Verkehrsstärke) q gibt an wie viele Fahrzeuge innerhalb eines Zeitintervalls T eine räumliche Position s_0 passieren. Daher gilt an der Position s_0 :

$$q = \frac{N}{T}.$$

Für das Zeitintervall T wird häufig 1-Minute- oder 1-Stunde-Intervalle verwendet. Meistens wird der Verkehrsfluss q in der Einheit *Fahrzeuge pro Stunde* angegeben.

Die *Verkehrsdichte* ρ gibt die Anzahl der Fahrzeuge innerhalb eines Streckenabschnittes S zu einem Zeitpunkt t_0 an. Daher gilt zum Zeitpunkt t_0 :

$$\rho = \frac{N}{S}.$$

Darüber hinaus kann die Verkehrsdichte ρ anhand der mittleren Verkehrsgeschwindigkeit \bar{v} und des Verkehrsflusses q wie folgt geschätzt werden [9]:

$$\rho = \frac{q}{\bar{v}}. \quad (2.1)$$

Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass q und \bar{v} innerhalb eines Zeitintervalls T an einer *festen räumlichen Position* s_0 berechnet werden, während ρ innerhalb eines Streckenabschnittes S zu einem *festen Zeitpunkt* t_0 ermittelt wird. Insbesondere bei kleinen mittleren Verkehrsgeschwindigkeiten \bar{v} kann die Berechnung der Verkehrsdichte ρ durch Gleichung (2.1) zu großen Fehlerwerten führen. Die Verkehrsdichte ρ wird häufig in der Einheit *Fahrzeuge pro Kilometer* angegeben.

Die durch empirische Verkehrsmessungen erhobenen Verkehrsdaten können in makroskopische, mikroskopische und mesoskopische Verkehrsdaten eingeteilt werden [9–13].

Makroskopische Verkehrsmessungen

Bei einer makroskopischen Verkehrsmessung werden über Raum oder Zeit *gemittelte* Verkehrsdaten erhoben. Daher müssen bei der Messung größere Strecken- oder Zeitabschnitte erfasst werden. Die erhobenen Daten werden *makroskopische Verkehrsdaten* genannt. Folgende Verkehrsvariablen können durch makroskopische Verkehrsmessungen erhoben werden: die mittlere Verkehrsgeschwindigkeit, der Verkehrsfluss (die Verkehrsstärke), die Verkehrsdichte und die Anzahl der Fahrspuren. Häufig verwendete Verkehrsdaten, die durch makroskopische Verkehrsmessungen erhoben werden, sind beispielsweise makroskopische Detektordaten, die aus gemittelten detektierten Werten bestehen (Kapitel 2.2.1) [9–13].

Mikroskopische Verkehrsmessungen

Bei einer mikroskopischen Verkehrsmessung werden Verkehrsdaten bezogen auf *einzelne Fahrzeuge* erhoben. Daher muss die Messung einzelne Fahrzeuge über Raum und Zeit voneinander unterscheiden können. Die erhobenen Daten werden *mikroskopische Verkehrsdaten* genannt. Im Gegensatz zu makroskopischen Verkehrsdaten setzen sich mikroskopische Verkehrsdaten aus *keinen* über Raum oder Zeit gemittelten Verkehrsdaten zusammen. Folgende Verkehrsvariablen können durch mikroskopische Verkehrsmessungen erhoben werden: die Geschwindigkeit und Beschleunigung einzelner Fahrzeuge, der zeitliche und räumliche Abstand zwischen zwei

aufeinanderfolgenden Fahrzeugen und die Fahrzeuglänge. Beispiele für Verkehrsdaten, die durch mikroskopische Verkehrsmessungen erhoben werden, sind folgende: Floating-Car-Daten, Drohnen- und mikroskopische Detektordaten, die nach einzelnen Fahrzeugen aufgelöst sind (Kapitel 2.2.1, 2.2.2 und 2.2.3) [9–13].

Mesoskopische Verkehrsmessungen

Die mesoskopische Verkehrsmessung ist eine Kombination aus der mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsmessung. Daher können sich *mesoskopische Verkehrsdaten* sowohl aus mikroskopischen als auch makroskopischen Verkehrsdaten zusammensetzen [9, 13].

2.2 Empirische Verkehrsdaten

Es werden drei Arten von Verkehrsdaten diskutiert, die anhand verschiedener Technologien und Methoden erhoben werden.

2.2.1 Detektordaten

Für die Verkehrsbehörde und für Verkehrsuntersuchungen ist die Kenntnis über die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen an bestimmten Streckenabschnitten eine sehr wichtige Verkehrsgröße. *Dauerzählstellen* ermöglichen es über sehr lange Zeit (z. B. über mehrere Monate oder Jahre) automatisiert und dauerhaft an festen räumlichen Positionen den gesamten Verkehr zu messen [14–17]. Dauerzählstellen bestehen aus mit Sensoren ausgestatteten *Detektoren*, die neben dem Zählen der vorbeifahrenden Fahrzeuge auch weitere Eigenschaften wie z. B. die Fahrzeuggeschwindigkeiten und -längen ermitteln können. Für die dauerhafte Messung des gesamten Verkehrs auf Autobahnen kommen heute verschiedene Detektoren zum Einsatz, wie z. B. *Induktionsschleifen* (siehe Abbildung 2.1), Radar-, Infrarot-, Ultraschalldetektoren, Lichtschranken oder Videosysteme [14–17]. Induktionsschleifen sind die am häufigsten verwendeten Detektoren auf Autobahnen. Mögliche Gründe hierfür sind die relativ zuverlässige Erfassung der Daten, der geringe Instandhaltungsaufwand und die flexible und kostengünstige Installation von Induktionsschleifen. In dieser Arbeit werden *durch Induktionsschleifen gemessene Detektordaten* verwendet.

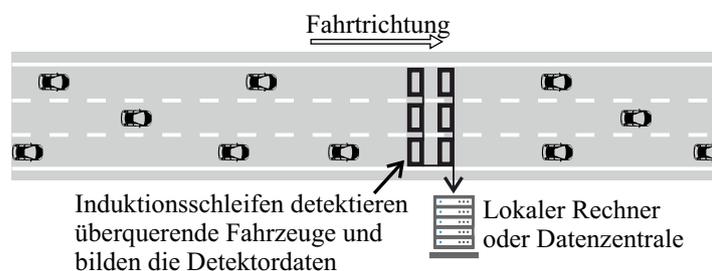


Abbildung 2.1: Qualitative Darstellung von Induktionsschleifen auf einem Autobahnabschnitt. Die Induktionsschleifen detektieren überquerende Fahrzeuge. Die an den Induktionsschleifen gemessenen Daten werden in einem lokalen Rechner gespeichert oder an eine Datenzentrale gesendet. Die gemessenen Daten werden als Detektordaten bezeichnet.

Eine Induktionsschleife wird auch als Kontaktschleife, Ringschleife oder Induktivschleife bezeichnet. Sie besteht aus einer Drahtschleife, die in die Fahrbahn verbaut ist, und detektiert ein überquerendes Fahrzeug mit Hilfe der *elektromagnetischen Induktion*. In Abbildung 2.1 sind Induktionsschleifen auf einem Autobahnabschnitt durch schwarze Rechtecke qualitativ dargestellt. Die an den Induktionsschleifen gemessenen Daten werden in einem lokalen Rechner gespeichert oder an eine Datenzentrale gesendet. Anhand der fahrspurgenauen Detektierung von Fahrzeugen durch Induktionsschleifen können folgende Verkehrseigenschaften ermittelt werden: Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{Fzg}^D , Fahrzeuglängen und Zeitlücken τ_{Fzg} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen (Definition 2.2). Diese ermittelten Detektordaten beziehen sich auf einzelne Fahrzeuge und sind daher *mikroskopische Verkehrsdaten*. Jedoch können Detektordaten auch ausschließlich aus Daten bestehen, die über ein bestimmtes Zeitintervall (z. B. eine Minute oder eine Stunde) gemittelt wurden. Beispiele hierfür sind die Anzahl und die mittlere Geschwindigkeit von passierenden Fahrzeugen in 1-Minute-Intervallen. Bei den gemittelten Detektordaten handelt es sich dann um *makroskopische Verkehrsdaten*. Detektordaten können daher als sowohl mikroskopische als auch makroskopische Verkehrsdaten vorliegen. In Kapitel 6 werden mikroskopische Detektordaten verwendet.

Definition 2.2. Zeitlücke: *Der zeitliche Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen (engl. time headway) wird als τ_{Fzg} bezeichnet und Zeitlücke genannt. Die Zeitlücke eines Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug entspricht daher ebenfalls τ_{Fzg} . Die Zeitlücke τ_{Fzg} zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen an einer festen räumlichen Position x_D berechnet sich aus der Differenz zwischen dem Zeitpunkt, an dem das Fahrzeugheck des vorausfahrenden Fahrzeugs x_D passiert, und dem Zeitpunkt, an dem die Fahrzeugfront des hinterherfahrenden Fahrzeugs x_D passiert. Darüber hinaus wird die Fahrzeuggeschwindigkeit des detektierten Fahrzeugs als v_{Fzg}^D bezeichnet.*

2.2.2 Floating-Car-Daten

Floating-Car-Daten sind Fahrzeugpositionsdaten, die anhand des globalen Navigationssatellitensystems (engl. global navigation satellite system, kurz GNSS) bestimmt werden. Das globale Navigationssatellitensystem dient zur Positionsbestimmung und für die Navigation. Ein häufig genutztes System für GNSS ist das *Globale Positionsbestimmungssystem* (engl. Global Positioning System, kurz GPS). In dieser Arbeit werden für Floating-Car-Daten ausschließlich GPS-Positionsdaten verwendet, die zum größten Teil vom GPS-Gerät des im Fahrzeug verbauten Navigationssystems generiert werden. Neben den räumlichen Fahrzeugpositionen (GPS-Positionen) gehören auch die zugehörigen Zeitstempel zu den Floating-Car-Daten. Fahrzeugpositionen und Zeitstempel werden einer bestimmten Fahrt durch anonyme IDs zugeordnet ohne Rückschlüsse auf das Fahrzeug ziehen zu können. Positionsdaten, die während der Fahrt über Smartphones erhoben werden, werden auch als Floating-Car-Daten genutzt. Allgemein werden Positionsdaten, die durch das Smartphone generiert werden, als *Floating-Phone-Daten (FPD)* bezeichnet. Floating-Car-Daten werden im Englischen neben floating car data auch als *probe vehicle data* bezeichnet. Im Deutschen kann alternativ der Begriff *Fahrzeug-Bewegungsdaten* anstelle von Floating-Car-Daten benutzt werden.

Zur Generierung und Nutzung von Floating-Car-Daten basierend auf GPS-Positionen benötigt ein Fahrzeug ein GPS-Gerät, eine Mobilfunkanlage und ein Gerät, das für die Aufbereitung der generierten und an eine Datenzentrale zu versendenden Floating-Car-Daten zuständig ist und die von einer Datenzentrale hineinkommenden Verkehrsinformationen verarbeitet. In Abbildung 2.2 ist die Datenerfassung von Floating-Car-Daten qualitativ dargestellt. Fahrzeuge senden ihre Fahrzeugpositionsdaten an eine Datenzentrale. In der Datenzentrale werden diese Fahrzeugpositionsdaten mit anderen Floating-Car-Daten aggregiert und die daraus resultierenden Verkehrsinformationen wieder an die Fahrzeuge gesendet. Relevante Verkehrsinformationen können dem Fahrer anschließend visuell oder akustisch im Fahrzeug verfügbar gemacht werden.

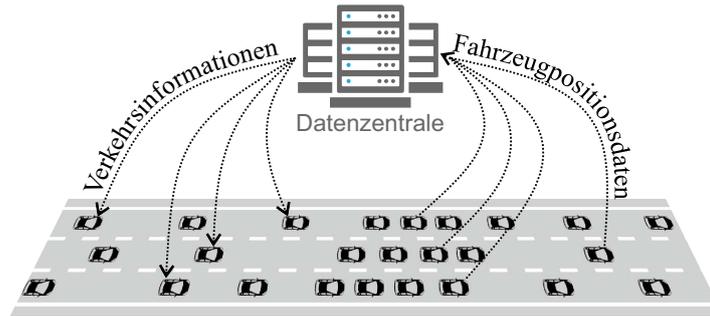


Abbildung 2.2: Qualitative Darstellung der Datenerfassung von Floating-Car-Daten. Fahrzeugpositionsdaten werden an eine Datenzentrale gesendet. Diese Fahrzeugpositionsdaten können genutzt werden, um den Verkehr räumlich-zeitlich zu rekonstruieren.

Die Fahrzeugpositionen (GPS-Positionen) der Floating-Car-Daten werden in bestimmten Zeitschritten erhoben, z. B. in 10-Sekunden-Schritten. Durch diese Fahrzeugpositionsdaten lässt sich der Verkehr an Streckenabschnitten räumlich-zeitlich auflösen. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse von Verkehrsphänomenen. Die Fahrzeugpositionen der Floating-Phone-Daten werden im Vergleich zu Floating-Car-Daten, die über das GPS-Gerät des im Fahrzeug verbauten Navigationssystems generiert werden, in der Regel in deutlich kürzeren Zeitschritten erhoben, z. B. in 1-Sekunde-Schritten. In dieser Arbeit werden *ausschließlich anonymisierte* Floating-Car-Daten verwendet (Kapitel 4). Dadurch ist gesichert, dass durch die Fahrzeugpositionsdaten keine Rückschlüsse auf das Fahrzeug und damit auch auf den Fahrer möglich sind.

Im Zusammenhang mit Floating-Car-Daten ist ein wichtiger Begriff die *Durchdringungsrate* von Floating-Car-Daten:

Definition 2.3. Durchdringungsrate: Die Durchdringungsrate von Floating-Car-Daten ist der prozentuale Anteil der Fahrzeuge aus den Floating-Car-Daten von der Gesamtanzahl aller Fahrzeuge zu einem bestimmten Zeitpunkt über einen Streckenabschnitt. Alternativ kann sie an einer bestimmten räumlichen Position eines Streckenabschnittes über einen Zeitraum bestimmt werden. Die Durchdringungsrate wird auch als *Ausstattungsrate* und im Englischen als *penetration rate* bezeichnet.

Beispielsweise ist eine Durchdringungsrate von ca. 1,5–2% von Floating-Car-Daten an einem Autobahnabschnitt eine relativ hohe Menge und ausreichend für die Rekonstruktion der meisten räumlich-zeitlich großen Verkehrsphänomene [18–20].

2.2.3 Drohnen Daten

Die erste vollständige Verkehrsmessung *aller* Fahrzeuge an einem Streckenabschnitt über mehrere Minuten erfolgte im Jahr 1967 durch Treiterer [21]. Hierfür wurden Kamerabilder aus einem Helikopter aufgenommen. Diese empirischen Verkehrsdaten leisteten einen großen Beitrag zum besseren Verständnis des Verkehrs und lieferten neue Erkenntnisse, wie z. B. die Beobachtung von sich entgegen der Fahrtrichtung bewegenden Stauwellen. Im Projekt *Next Generation Simulation (NGSIM)* wurden im Jahr 2006 in den USA Verkehrsmessungen durch fest installierte Videokameras durchgeführt [22–24]. Die Videokameras wurden z. B. an hohen Gebäuden installiert und erfassten den Verkehr auf Autobahnen und den innerstädtischen Verkehr. Eine in den letzten Jahren immer mehr an Aufmerksamkeit gewonnene Technologie sind *Drohnen* (unbemannte Luftfahrzeuge, engl. unmanned aerial vehicles). Die Drohne ist häufig mit einer Videokamera ausgestattet. Dies ermöglicht die Aufnahme des Verkehrs eines Streckenabschnittes (siehe Abbildung 2.3). In den Jahren 2017 und 2018 wurde der innerstädtische Verkehr an Lichtsignalanlagen in Deutschland anhand von Drohnenmessungen durch Kaufmann untersucht [25–27]. Des Weiteren wurde in den Jahren 2017 und 2018 der umfangreiche Drohnen Datensatz *highD dataset* von Autobahnabschnitten in Deutschland erhoben [28].

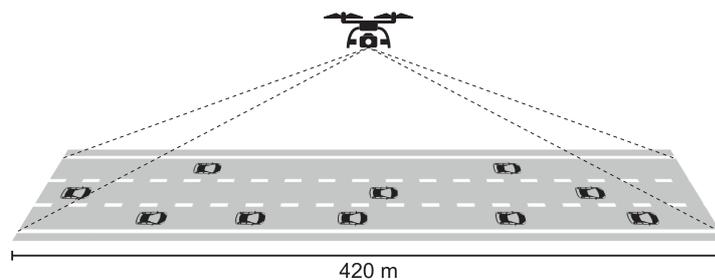


Abbildung 2.3: Qualitative Darstellung einer Drohnenmessung von einem Autobahnabschnitt. Alle Fahrzeugtrajektorien, die diesen Abschnitt passieren, werden von der Drohne von einer Höhe von mehr als 100 Metern erfasst. Der erfasste Autobahnabschnitt hat eine Länge von ca. 420 Metern.

Drohnenmessungen auf Autobahnen ermöglichen eine vollständige und hochgenaue räumlich-zeitliche Erfassung aller Fahrzeugtrajektorien des Autobahnabschnittes, der von der Videokamera der Drohne erfasst wird. Insbesondere können Fahrzeuge fahrspurgenau gemessen und Spurwechselvorgänge erkannt werden. Zusätzlich können sowohl die zeitlichen als auch räumlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ermittelt werden. Die Erkennung und die räumlich-zeitliche Rekonstruktion des Verkehrs an Autobahnabschnitten mit allen Fahrzeugtrajektorien und deren mikroskopischen Eigenschaften sind von großem Interesse zum besseren Verständnis des Verkehrsablaufs. Eine Einschränkung der Drohnenmessung ist jedoch, dass die räumliche Erfassung von Videokameras stark limitiert ist und nur einen kurzen Streckenabschnitt erfasst (ca. 400–600 m). Außerdem ist die Aufnahmezeit der Drohnenmessung durch die Akkulaufzeit der Drohne auf bis zu ca. 20 min begrenzt. Im Vergleich zu Drohnen Daten decken Floating-Car-Daten nicht alle Fahrzeugtrajektorien eines Autobahnabschnittes ab und sind nicht fahrspurgenau aufgelöst (Kapitel 2.2.2). Detektordaten wiederum geben keinen Aufschluss über die räumliche Fortbewegung von Fahrzeugtrajektorien, da sie nur an festen Detektorpositionen erhoben werden (Kapitel 2.2.1). In Kapitel 5 werden Drohnen Daten verwendet.

2.3 Datengrundlage dieser Arbeit

Die empirische Datengrundlage dieser Arbeit setzt sich aus folgenden Verkehrsdaten zusammen: Detektordaten aus den Bundesländern Hessen und Baden-Württemberg; Floating-Car-Daten aus Fahrzeugflotten verteilt über Europa und den USA; Drohnendaten von Autobahnabschnitten in Deutschland.

Detektordaten

In Kapitel 2.2.1 wurden Detektordaten beschrieben. Die in dieser Arbeit verwendeten Detektordaten wurden auf den folgenden Autobahnen in Deutschland an verschiedenen Wochentagen in den folgenden Monaten erhoben:

- Auf der zwei- und dreispurigen Autobahn A81 bei Stuttgart, Böblingen und Ludwigsburg im Oktober und November 2016.
- Auf der dreispurigen Autobahn A8 bei Stuttgart und Esslingen im Juni 2019.
- Auf der dreispurigen Autobahn A5 bei Frankfurt am Main (Hessen) im Dezember 1995, Juni 1996 und November 2017.

Es werden Detektordaten zwischen ca. 6:00–20:00 Uhr betrachtet. In diesem Zeitintervall befinden sich auf den Autobahnabschnitten, an denen die Detektordaten erhoben wurden, durchgehend eine gewisse Menge an Fahrzeugen. Daher ergibt sich für die verwendeten Detektordaten durchgehend ein Verkehrsfluss größer als Null, außer wenn sich die Fahrzeuge im Stillstand befinden. Die zulässigen Fehler der Detektormessungen auf Autobahnen sind folgende [29]:

- Verkehrsfluss: für $q \leq 10$ Fahrzeuge/min ist der Fehler $< 20\%$ und für $q > 10$ Fahrzeuge/min ist der Fehler $< 10\%$.
- Geschwindigkeit: für $v \leq 100$ km/h ist der Fehler < 3 km/h und für $v > 100$ km/h ist der Fehler $< 3\% \cdot v$.

In Kapitel 6 werden durch Induktionsschleifen gemessene *mikroskopische* Detektordaten verwendet. Deshalb ist eine Untersuchung der Verkehrseigenschaften der detektierten Fahrzeuge, wie z. B. die Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen, möglich.

Floating-Car-Daten

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben bestehen Floating-Car-Daten aus räumlichen Fahrzeugpositionsdaten (GPS-Positionen) mit den zugehörigen Zeitstempel, die einer bestimmten Fahrt durch anonyme IDs zugeordnet werden. Floating-Car-Daten stellen häufig nur einen kleinen Anteil der Fahrzeuge des Gesamtverkehrsflusses dar. Die GPS-Positionsdaten sind in Längen- und Breitengraden (engl. longitude bzw. latitude) gegeben. Für ein Fahrzeug liegen die GPS-Positionen mit den zugehörigen Zeitstempeln in den Floating-Car-Daten zunächst ohne Zuordnung zu einem bestimmten Streckenabschnitt einer Karte vor. Diese räumliche Zuordnung der GPS-Positionen zu einem Streckenabschnitt einer digitalen Karte erfolgt durch *Map Matching Verfahren* [30–34]. Das Verfahren wird auch als Kartenabgleich oder Karteneinpassung bezeichnet. In dieser

Arbeit werden Floating-Car-Daten verwendet, die durch das Map Matching Verfahren aus [34] den jeweiligen Streckenabschnitten zugeordnet werden.

Die GPS-Positionen der verwendeten *anonymisierten* Floating-Car-Daten werden abhängig von den im Fahrzeug verbauten Navigationssystemen in 5- oder 10-Sekunden-Schritten erhoben. Aus Gründen der Performance im Fahrzeug werden Positionsdaten über 2-Minuten zusammengefasst und als Datenpaket an eine Datenzentrale gesendet (Abbildung 2.2). Daher besteht ein Datenpaket aus 12 oder 24 GPS-Positionsdaten mit den zugehörigen Zeitstempel. Anhand dieser Datenpakete lässt sich der Verkehr räumlich-zeitlich darstellen. In Abbildung 3.1 sind Fahrzeugtrajektorien basierend auf Floating-Car-Daten über Raum und Zeit qualitativ dargestellt. Die räumlich-zeitliche Auflösung der Floating-Car-Daten ermöglicht eine detaillierte Untersuchung des Verkehrs.

In den Floating-Car-Daten liegen die räumlichen Positionen einer Fahrt mit den Zeitstempel vor. Da die Geschwindigkeit des Fahrzeugs nicht vorliegt, wird sie wie folgt aus der Änderung der räumlichen Position des Fahrzeugs über die Zeit berechnet. Sei eine Fahrt mit n erhobenen Datenpunkten gegeben. Seien x_1, x_2, \dots, x_n die räumlichen Positionen, die durch ein Map Matching Verfahren ermittelt wurden, und seien t_1, t_2, \dots, t_n die zugehörigen Zeitpunkte. Dann werden die Geschwindigkeiten $v(t_1), v(t_2), \dots, v(t_n)$ nach folgender Vorschrift berechnet:

$$\begin{aligned} v(t_1) &= (x_2 - x_1)/\Delta t, \\ v(t_i) &= (x_{i+1} - x_{i-1})/(2 \cdot \Delta t) \text{ für } i = 2, \dots, n-1, \\ v(t_n) &= (x_n - x_{n-1})/\Delta t, \end{aligned} \tag{2.2}$$

wobei Δt entweder 5 oder 10 Sekunden entspricht abhängig von dem im Fahrzeug verbautem Navigationssystem der jeweiligen Fahrt.

Der räumliche Fehler bei der Positionsbestimmung durch GPS kann bis zu 10–15 m betragen [35–37]. Bei GPS-Positionsdaten, die in 5- oder 10-Sekunden-Schritten erhoben werden, kann sich dadurch ein Fehler in der Geschwindigkeit, die nach Gleichung (2.2) berechnet wird, von 1–3 m/s ergeben. Jedoch hindert diese GPS-Ungenauigkeit nicht empirische Verkehrsphänomene räumlich-zeitlich zu rekonstruieren und zu analysieren.

Die Datengrundlage der verwendeten Floating-Car-Daten aus Europa und den USA ist in Tabelle 2.1 aufgelistet. Die Daten sind aufgeteilt nach Zeiträumen, an denen die Daten erhoben wurden, und nach der räumlichen Abdeckung. Außerdem ist die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugpositionen (GPS-Positionen) pro Tag angegeben. Die Daten wurden in den Jahren 2015 bis 2019 an ca. 120 unterschiedlichen Tagen erhoben. Die meisten europäischen Länder sind abgedeckt. In Abbildung 2.4 sind Floating-Car-Daten aus Europa von einem Datenausschnitt aus den in Tabelle 2.1 aufgelisteten Daten von über 100 Mio. Fahrzeugpositionen durch blaue Punkte auf der Europakarte dargestellt [38]. Hieraus ist ersichtlich, dass die Datendichte und Datenmenge in manchen Ländern wie Deutschland, England, Niederlande oder Belgien deutlich höher bzw. größer ist als in anderen europäischen Ländern wie Polen, Ungarn oder Spanien. Darüber hinaus wurden Floating-Car-Daten aus den USA aus den Umgebungen der Städte Los Angeles und Chicago erhoben. Die Floating-Car-Daten aus Tabelle 2.1 bestehen in Summe aus ca. 42 Mrd. Fahrzeugpositionen. Der durchschnittliche zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen der in dieser Arbeit verwendeten Floating-Car-Daten beträgt ca. 34 Sekunden. Die Durchdringungsrate (Definition 2.3) der Floating-Car-Daten der un-

tersuchten Streckenabschnitte beträgt ca. 2.1 – 3.6 %. Zur Bestimmung der Durchdringungsrate wurden die Streckenabschnitte betrachtet, an denen neben den Floating-Car-Daten zusätzlich die Gesamtanzahl aller Fahrzeuge bekannt war (z. B. durch Detektordaten).

Tabelle 2.1: Datengrundlage der verwendeten Floating-Car-Daten aus Europa und den USA. Die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugpositionen (GPS-Positionen) pro Tag sind angegeben und aufgeteilt nach der räumlichen Abdeckung und nach den Zeiträumen, an denen die Daten erhoben wurden.

Zeitraum	Räumliche Abdeckung	Anzahl an GPS-Positionen pro Tag
05.10.2015 – 19.10.2015	Deutschland	70 Mio.
25.11.2015 – 22.12.2015	Deutschland	90 Mio.
01.04.2016 – 11.04.2016	Deutschland, Großbritannien, Italien, Frankreich,	240 Mio.
25.10.2016 – 22.11.2016	Deutschland, Großbritannien, Italien, Frankreich, Niederlande, Belgien, Luxemburg, Spanien, Portugal, Andorra, Österreich, Nordirland, Schweden, Schweiz, Polen, Ungarn	530 Mio.
20.04.2017 – 19.05.2017	Deutschland, Großbritannien, Italien, Frankreich, Niederlande, Belgien, Luxemburg, Spanien, Portugal, Andorra, Österreich, Nordirland, Schweden, Schweiz, Polen, Ungarn	660 Mio.
23.06.2019, 24.06.2019	Deutschland	2 Mio.
25.06.2019, 18.12.2019, 04.02.2020	Los Angeles (USA) und Umgebung	1.2 Mio.
08.04.2019	Chicago (USA) und Umgebung	1 Mio.

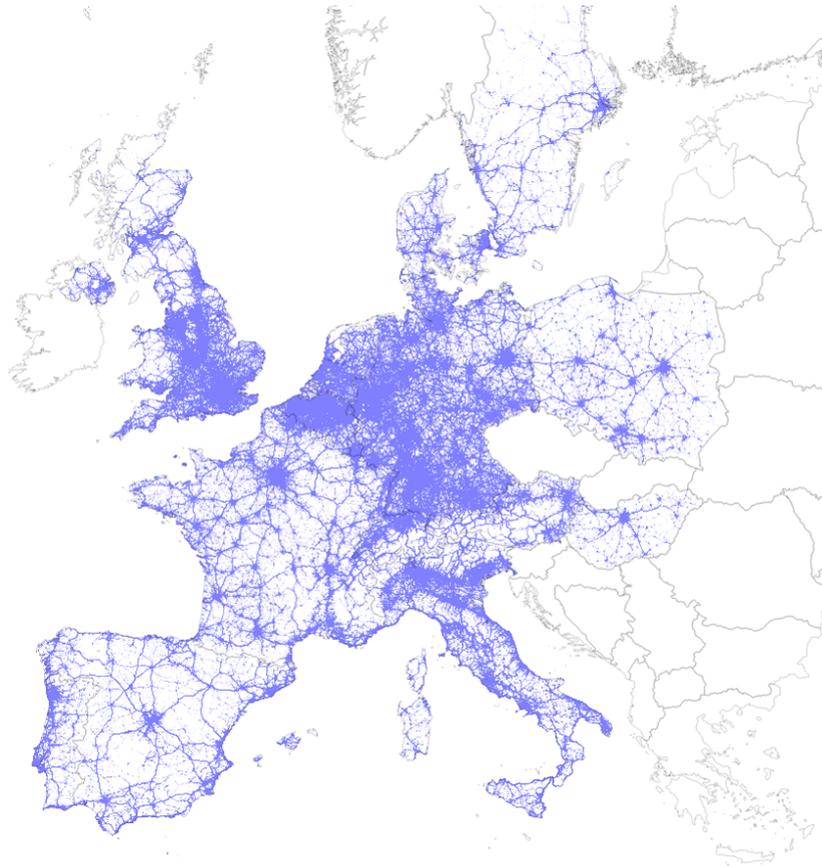


Abbildung 2.4: Verteilung von Floating-Car-Daten aus Europa von einem Datenausschnitt aus den in Tabelle 2.1 aufgelisteten Daten von über 100 Mio. Fahrzeugpositionen (GPS-Positionen). Die Daten sind durch blaue Punkte auf der Europakarte markiert. Angepasst aus [38].

Die für diese Arbeit verwendeten anonymisierten Floating-Car-Daten stellen eine große Menge an Daten mit umfangreicher räumlicher Abdeckung dar. Der Verkehr kann an den unterschiedlichsten Streckenabschnitten und Wochentagen untersucht werden. Diese solide empirische Datengrundlage ermöglicht es auch Verkehrsphänomene, die sich nur über ein kleines räumlich-zeitliches Gebiet ausbreiten, zu analysieren.

Drohrendaten

In dieser Arbeit wird der umfangreiche Drohrendatensatz *Highway Drone Dataset (highD dataset)* verwendet [28]. Diese Drohrendaten wurden an sechs unterschiedlichen Autobahnabschnitten der Autobahnen A4, A44, A46 und A61 im Bundesland Nordrhein-Westfalen in der Umgebung von Köln (Deutschland) an insgesamt 60 verschiedenen Wochentagen in den Jahren 2017 und 2018 erhoben. Es wurde an zwei und dreispurigen Autobahnabschnitten gemessen. Die Drohrendaten umfassen in Summe 110 500 verschiedene Fahrzeugtrajektorien, 44 500 gefahrene Kilometer und 147 gefahrene Stunden [28]. Die Drohne befand sich zum Zeitpunkt der Videoaufnahmen des Verkehrs in Höhen von mehr als 100 m. Bei diesen Höhen ist die Drohne für die Fahrer auf dem Autobahnabschnitt nahezu nicht sichtbar. Daher wird angenommen, dass das Fahrverhalten der Fahrer durch die Drohne nicht beeinflusst wurde. Die Videokamera der Drohne erfasst ein Autobahnabschnitt der Länge von ca. 420 m mit einer durchschnittlichen

Aufnahmenzeit von ca. 17 min (Abbildung 2.3). Der räumliche Fehler bei der Fahrzeugpositionsbestimmung ist relativ gering mit Fehlerwerten häufig kleiner als 10–20 cm [28]. Darüber hinaus beträgt die Framerate (Bildrate) der Videoaufnahme der Drohne 25 Frames pro Sekunde (fps). Es erfolgt also in 40-Millisekunden-Schritten je eine Frameaufnahme (Bildaufnahme). Der beschriebene hochaufgelöste Drohnendatensatz bildet eine solide empirische Verkehrsdatengrundlage für fahrspurabhängige und hochgenaue Verkehrsuntersuchungen auf Autobahnen.

2.4 Vergleich der Verkehrsdaten

In Tabelle 2.2 sind die Eigenschaften und Einschränkungen von Detektordaten, Floating-Car-Daten und Drohnendaten aufgelistet [10, 14–20, 25–29, 39–41].

Tabelle 2.2: Eigenschaften und Einschränkungen von Detektordaten, Floating-Car-Daten und Drohnendaten [10, 14–20, 25–29, 39–41].

<i>Eigenschaft</i>	<i>Detektordaten</i>	<i>Floating-Car-Daten</i>	<i>Drohnendaten</i>
Art der Verkehrsmessung	Makroskopisch oder mikroskopisch	Mikroskopisch	Mikroskopisch
Technologie	Induktionsschleifen	Globales Navigationssatellitensystem (z. B. GPS)	Videokamera der Drohne
Einsatz für die Verkehrsmessung und -untersuchung	Seit ca. 50 Jahren	Seit ca. 10–25 Jahren	Seit ca. 1–3 Jahren
Erfassung aller Fahrzeugtrajektorien	Ja	Nein	Ja
Räumliche Einschränkung	Nur an Detektorpositionen	Keine	< 400–600 m
Zeitliche Einschränkung	Keine	Keine	< 20 min
Zeitschrittweite der erfassten Daten	Zeitpunkt jeder Fahrzeug-Detektierung <i>oder</i> Zeitintervall-Schrittweite	5- oder 10-Sekunden-Schritte	40-Millisekunden-Schritte
Räumlicher Fehler bei der Fahrzeugpositionsbestimmung	Fixe räumliche Detektorpositionen	< 10–15 m	< 10–20 cm
Fehler bei der Geschwindigkeitsbestimmung	< 3km/h für $v \leq 100\text{km/h}$ < $3\% \cdot v$ für $v > 100\text{km/h}$	< 1–3 m/s	< 0.2–0.4 m/s
Fahrspurgenaue Daten	Ja	Nein	Ja
Räumlicher Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen	Nein	Nein	Ja
Zeitlicher Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen	Ja	Nein	Ja
Fahrzeuglänge	Ja	Nein	Ja
Beschleunigungswerte	Nein	Nein	Ja

3 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden zentrale Begriffe und Aussagen der Verkehrstheorien mit Fokus auf der Drei-Phasen-Verkehrstheorie diskutiert [9–11, 42–54]. Hierzu werden Verkehrsphasen, Verkehrszusammenbrüche, Verkehrsphasenübergänge und Verkehrszustandsübergänge definiert und anhand von qualitativen und empirischen Beispielen beschrieben (Kapitel 3.2, 3.3 und 3.4). Außerdem werden verschiedene Stabilitäten und Instabilitäten des Verkehrs erklärt (Kapitel 3.4 und 3.5). Es wird zusätzlich auf den theoretischen Hintergrund von Verkehrsstörungen an Autobahnengstellen vor Verkehrszusammenbrüchen eingegangen (Kapitel 3.5). Darüber hinaus wird eine Übersicht über Eigenschaften von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen gegeben (Kapitel 3.6).

Für die untersuchten Autobahnabschnitte wird die Notation *Name-Richtung* verwendet, wobei *Name* für die Bezeichnung der jeweiligen Autobahn steht und *Richtung* die Fahrtrichtung der jeweiligen Autobahn anhand einem der vier Haupthimmelsrichtungen (Nord, Ost, Süd oder West) angibt. Die Bezeichnung der Autobahn ist länderspezifisch. Beispielsweise wird in England eine Autobahn als *motorway* bezeichnet und in den USA als *Interstate Highway*. Daher ergeben sich z. B. folgende Notationen für Autobahnabschnitte: A8-Ost in Deutschland, M42-Nord in England und I405-Süd in den USA (siehe auch Abbildungen 3.9 und 3.12).

3.1 Räumlich-zeitliche Darstellung von mikroskopischen Verkehrsdaten

Es wird die räumlich-zeitliche Darstellung von mikroskopischen Floating-Car-Daten in einem Weg-Zeit-Diagramm beschrieben. In Abbildung 3.1 sind mehrere Fahrzeugtrajektorien über Weg und Zeit abgebildet. Die Fahrzeugtrajektorien entstehen durch das lineare Verbinden der räumlich-zeitlichen Fahrzeugpositionen, die aus GPS-Positionen und den zugehörigen Zeitstempeln bestehen. Diese Fahrzeugpositionen sind in Abbildung 3.1 durch schwarze Punkte dargestellt. Da Floating-Car-Daten aus GPS-Positionen bestehen, können aufgrund der unzureichenden Genauigkeit von GPS die räumlichen Fahrzeugpositionen heute noch nicht fahrspurgenau ermittelt werden. Daher können sich Fahrzeugtrajektorien basierend auf Floating-Car-Daten im Weg-Zeit-Diagramm schneiden, wie in Abbildung 3.1 erkennbar ist.

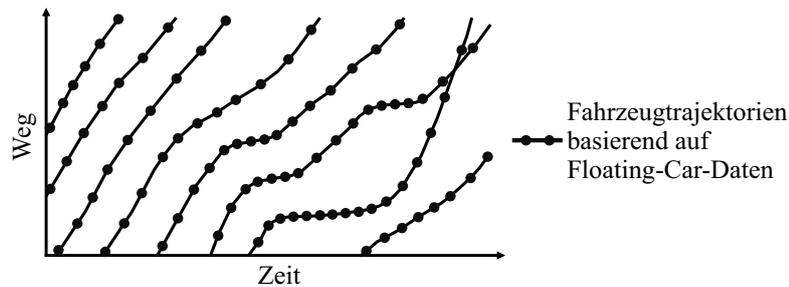


Abbildung 3.1: Räumlich-zeitliche Darstellung von Fahrzeugtrajektorien in einem Weg-Zeit-Diagramm basierend auf mikroskopischen Floating-Car-Daten. Die schwarzen Punkte auf den Fahrzeugtrajektorien stellen die räumlich-zeitlichen Fahrzeugpositionen dar, die aus GPS-Positionen und den zugehörigen Zeitstempeln bestehen.

3.2 Einführung in die Verkehrstheorien

In diesem Unterkapitel werden Eigenschaften der Geschwindigkeiten und der zurückgelegten Strecken von einzelnen Fahrzeugen an einem Streckenabschnitt über die Zeit allgemein betrachtet und daraus beobachtete räumlich-zeitliche Verkehrsphänomene diskutiert. Hierzu werden relevante Begriffe für die Verkehrstheorien definiert. Darüber hinaus wird eine kurze Übersicht über Verkehrstheorien gegeben. Die für diese Arbeit relevanten Merkmale der Verkehrstheorien werden beschrieben und miteinander verglichen.

Zunächst wird die Entstehung eines gestauten Verkehrs beispielhaft an einer Autobahnzufahrt und einer Autobahnabfahrt beschrieben. Mögliche Ursachen zur Entstehung eines gestauten Verkehrs können neben viel befahrenen Autobahnzufahrten oder -abfahrten auch z. B. Fahrspurverengungen, Straßenbauarbeiten, Verkehrsunfälle oder schlechte Witterungsbedingungen sein. Im Laufe dieses Kapitels wird auf den gestauten Verkehr und deren Entstehung ausführlicher eingegangen. In Abbildung 3.2 (a) und (b) ist ein dreispuriger Autobahnabschnitt mit einer Zufahrt bzw. Abfahrt qualitativ dargestellt. Für den Fahrspurwechsel der sich auf der Zufahrt befindenden Fahrzeuge müssen ausreichend große räumliche Lücken zwischen den Fahrzeugen auf der rechten Fahrspur der Hauptfahrbahn entstehen (Abbildung 3.2 (a)). Hierdurch kommt es zu Geschwindigkeitsreduzierungen und weiteren Fahrspurwechselvorgängen von Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn. Dies kann schließlich zu einem gestauten Verkehr führen. Durch die Fahrspurwechselvorgänge der Fahrzeuge, die von der Hauptfahrbahn auf die Abfahrt wechseln wollen, müssen ebenfalls ausreichend große räumliche Lücken zwischen den Fahrzeugen auf der mittleren und rechten Fahrspur und auf der Abfahrt entstehen (Abbildung 3.2 (a)). Dies führt zu Geschwindigkeitsreduzierungen von Fahrzeugen auf der Hauptfahrbahn und kann schließlich gestauten Verkehr auslösen.

In Abbildung 3.3 (a) – (c) sind drei Fahrzeugtrajektorien in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen qualitativ abgebildet. Diese drei Fahrzeugtrajektorien sind in Abbildung 3.3 (d) in einem Weg-Zeit-Diagramm für dasselbe Zeitintervall wie in Abbildung 3.3 (a) – (c) dargestellt. Es können drei unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen beobachtet werden: eine hohe, mittelhohe und sehr geringe Geschwindigkeit. Diese drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten können auch anhand der Steigung der Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 3.3 (d) erkannt werden. Wenn beispielsweise ein Fahrzeug über eine gewisse Zeit t_{Stau} im Stau stand und

keine Strecke zurückgelegt hat, ergibt sich im Weg-Zeit-Diagramm eine zur Zeitachse parallele und zur Wegachse senkrechte Linie mit der Länge t_{Stau} .

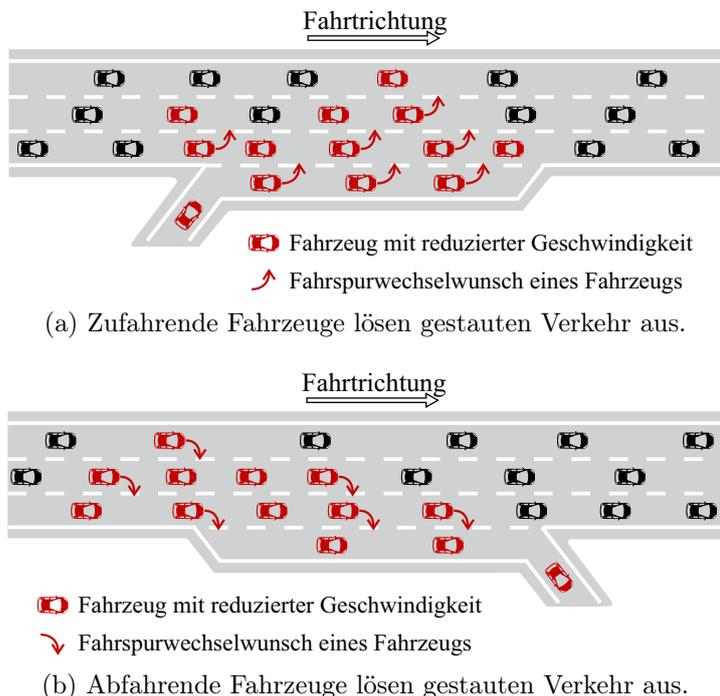


Abbildung 3.2: Qualitative Darstellung eines Autobahnabschnittes mit einer Zufahrt in (a) und einer Abfahrt in (b). Gestauter Verkehr kann durch zufahrende oder abfahrende Fahrzeuge ausgelöst werden.

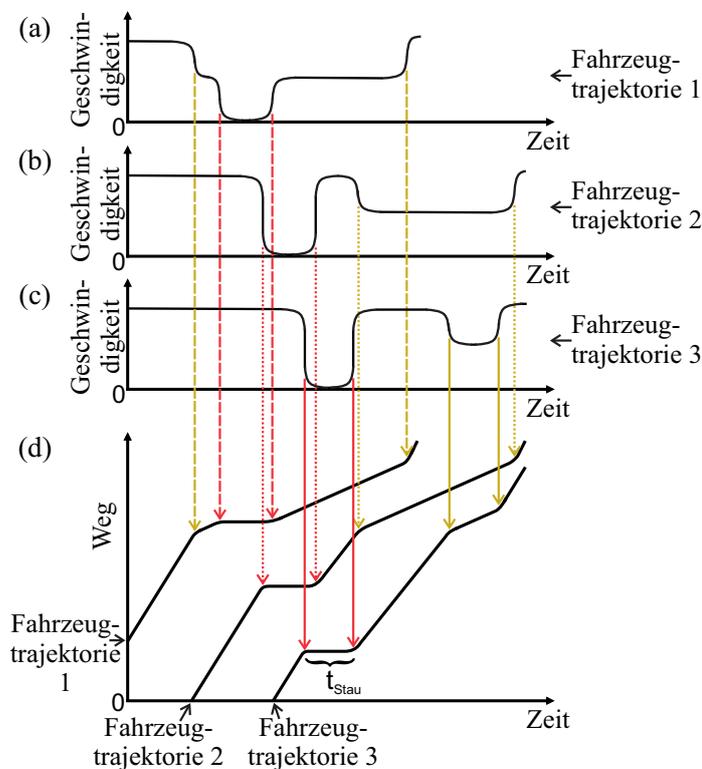


Abbildung 3.3: Qualitative Darstellung von drei Fahrzeugtrajektorien in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen in (a)–(c) und im dazu korrespondierenden Weg-Zeit-Diagramm (d).

In den Verkehrstheorien und bei der Betrachtung von empirischen Beispielen des Verkehrs sind die Begriffe *Verkehrsphase* und *Verkehrszustand* wesentlich. Diese werden im Folgenden allgemein definiert.

Definition 3.1. Verkehrszustand: *Der Verkehrszustand ergibt sich aus den Eigenschaften der Verkehrsvariablen (Definition 2.1) des Verkehrs an einem bestimmten räumlich-zeitlichen Ort oder Gebiet [9]. Beispiele von betrachteten Eigenschaften sind die mittlere Verkehrsgeschwindigkeit, der Verkehrsfluss und die Verkehrsdichte. Durch diese Eigenschaften unterscheidet sich ein Verkehrszustand von anderen Verkehrszuständen. Ein Verkehrszustand kann sich auf eine einzelne Fahrzeugtrajektorie beziehen oder auf mehrere aufeinanderfolgende Fahrzeugtrajektorien.*

Definition 3.2. Verkehrsphase: *Eine Verkehrsphase kennzeichnet die Aggregation von Verkehrszuständen (Definition 3.1), die in einem bestimmten räumlich-zeitlichen Verkehrsgebiet gewisse Eigenschaften von Verkehrsvariablen (Definition 2.1) aufweisen [9]. Die Eigenschaften sind charakteristisch für die jeweiligen Verkehrsphasen. Beispielsweise kann ein räumlich-zeitliches Gebiet im Mittel eine geringe mittlere Geschwindigkeit, einen sehr geringen Verkehrsfluss und eine sehr hohe Verkehrsdichte aufweisen. Eine Verkehrsphase kann sich über ein großes räumlich-zeitliches Verkehrsgebiet ausbreiten.*

Es ist zu beachten, dass die Wertebereiche der Verkehrsvariablen zur Erkennung einer Verkehrsphase, die ein räumlich-zeitliches Verkehrsgebiet umfasst, keine konstanten Werte sind, da sie viele Einflussfaktoren haben wie z. B. die Beschaffenheit und Eigenschaften des jeweiligen Streckenabschnittes. Beispielsweise kann ein räumlich-zeitliches Verkehrsgebiet an einem Streckenabschnitt mit einer Fahrbahnsteigung bei einem bestimmten Verkehrsfluss pro Fahrspur eine geringere mittlere Geschwindigkeit haben als an einem anderen Streckenabschnitt ohne Fahrbahnsteigung und trotzdem der gleichen Verkehrsphase zugeordnet werden.

Es wird nun angenommen, dass neben den drei Fahrzeugtrajektorien aus Abbildung 3.3 (d) alle weiteren Fahrzeugtrajektorien auf dem Streckenabschnitt gegeben sind. Wie bereits beschrieben ist ein Beispiel für eine Verkehrsvariable die mittlere Geschwindigkeit. Hieraus ergeben sich beispielsweise drei unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen: eine hohe, mittelhohe und sehr geringe mittlere Geschwindigkeit. Es werden zusätzlich die Verkehrsvariablen Verkehrsdichte und Verkehrsfluss in verschiedene Klassen eingeteilt. Wenn nun diese unterteilten Verkehrsvariablen den räumlich-zeitlichen Verkehrsgebieten zugeordnet werden, ergeben sich qualitativ räumlich-zeitliche Verkehrsgebiete, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Diese Verkehrsgebiete werden als Verkehrsphasen (Definition 3.2) bezeichnet und sind in Abbildung 3.4 beispielhaft in drei Verkehrsphasen unterteilt, die als grünes, gelbes und rotes Gebiet dargestellt sind. Die unterschiedlichen Eigenschaften sind charakteristisch für diese Verkehrsphasen. Es ist zu beachten, dass die in Abbildung 3.4 markierten Verkehrsphasenfronten eine gewisse räumlich-zeitliche Unschärfe haben.

Es werden nun die folgenden drei im Verkehr auftretenden Effekte definiert: *Geschwindigkeitsanpassung* (engl. speed-adaptation), *erhöhte Beschleunigung* (engl. over-acceleration) und *verstärktes Bremsen* (engl. over-deceleration). Diese sind zum Verständnis der Änderungen im Verkehr und der Entstehung von bestimmten Verkehrsphänomenen wichtig.

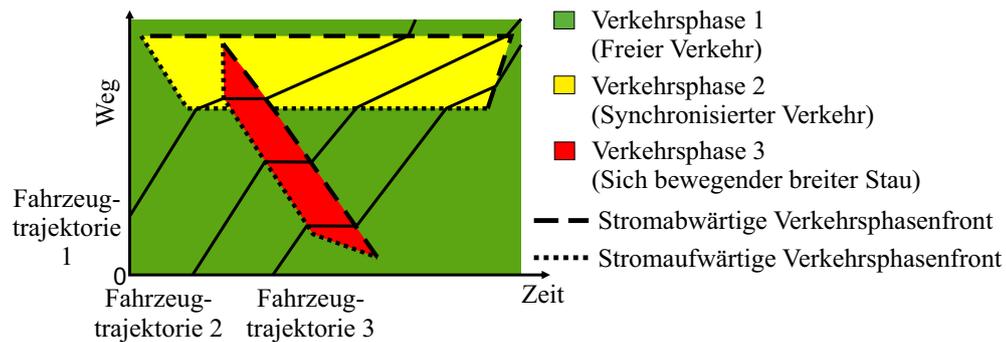


Abbildung 3.4: Qualitative Darstellung von drei Verkehrsphasen im Weg-Zeit-Diagramm als grüne, gelbe und rote Gebiete. Die drei Fahrzeugtrajektorien aus Abbildung 3.3 sind im Weg-Zeit-Diagramm mit den Verkehrsphasen abgebildet. Die stromabwärtigen und stromaufwärtigen Verkehrsphasenfronten der Verkehrsphasen sind durch gestrichelte bzw. gepunktete Linien markiert.

Definition 3.3. Geschwindigkeitsanpassung (engl. speed-adaptation): Die Geschwindigkeitsanpassung ist die Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit durch den Fahrer an die Fahrzeuggeschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Dies passiert häufig wenn ein Fahrzeug das vorausfahrende Fahrzeug, welches langsamer fährt, nicht überholen kann. Die Geschwindigkeitsanpassung erfolgt vorwiegend bei erhöhter Verkehrsdichte und ist der gegensätzliche Effekt zur erhöhten Beschleunigung (Definition 3.4) [43].

Definition 3.4. Erhöhte Beschleunigung (engl. over-acceleration): Die erhöhte Beschleunigung ist die Erhöhung der Fahrzeugbeschleunigung und der Fahrzeuggeschwindigkeit durch den Fahrer von seiner geringeren Anfangsgeschwindigkeit, wobei die geringere Anfangsgeschwindigkeit durch das vorausfahrende Fahrzeug verursacht wird. Dies passiert häufig bei einem Überholvorgang eines Fahrzeugs. Erhöhte Beschleunigungen erfolgen vorwiegend bei nicht hohen Verkehrsdichten. Die erhöhte Beschleunigung ist der gegensätzliche Effekt zur Geschwindigkeitsanpassung (Definition 3.3) [43]. Wenn der Effekt der erhöhten Beschleunigung bei weiteren nachfolgenden Fahrzeugen auftritt, entsteht eine mit der Zeit immer stärker steigende Geschwindigkeitszunahme-Welle (siehe Abbildung 3.15 (b)).

Definition 3.5. Verstärktes Bremsen (engl. over-deceleration): Der Effekt des verstärkten Bremsens wird durch einen plötzlichen Bremsvorgang eines Fahrzeugs ausgelöst. Das nachfolgende Fahrzeug beginnt ebenfalls einen Bremsvorgang. Jedoch erfolgt der Bremsvorgang des nachfolgenden Fahrzeugs aufgrund der Reaktionszeit mit einer Zeitverzögerung. Dadurch bremst das nachfolgende Fahrzeug stärker als das vorausfahrende Fahrzeug und erreicht eine geringere Fahrzeuggeschwindigkeit. Wenn dieser Effekt des verstärkten Bremsens bei weiteren nachfolgenden Fahrzeugen auftritt, entsteht eine mit der Zeit immer stärker fallende Geschwindigkeitsabnahme-Welle (siehe Abbildung 3.15 (a)) [43].

Zur Beschreibung von Verkehrsphänomenen, die sich über Raum und Zeit ausbreiten, werden die Begriffe *stromabwärtige* und *stromaufwärtige Verkehrsphasenfronten* definiert. In Abbildung 3.4 sind sie durch gestrichelte bzw. gepunktete Linien markiert.

Definition 3.6. Stromabwärts und stromaufwärts: Sei s_0 eine feste Position auf einem Streckenabschnitt. Dann liegen alle Positionen s_{ab} mit $s_{ab} > s_0$ stromabwärts (in Fahrtrichtung) von s_0 und alle Positionen s_{auf} mit $s_{auf} < s_0$ stromaufwärts (gegen die Fahrtrichtung) von s_0 (siehe Abbildung 3.6 (a)).

Definition 3.7. Verkehrsphasenfront: Als Verkehrsphasenfront einer Verkehrsphase wird der räumlich-zeitliche Übergangsbereich zwischen zwei Verkehrsphasen bezeichnet (siehe Abbildungen 3.4 und 3.6 (b)). Die räumliche Ausbreitung des Übergangsbereiches ist sehr gering. Die Bestimmung des Übergangsbereiches beinhaltet eine gewisse räumlich-zeitliche Unschärfe.

Definition 3.8. Stromabwärtige und stromaufwärtige Verkehrsphasenfront: Die Verkehrsphasenfront wird als stromabwärtige bzw. stromaufwärtige Verkehrsphasenfront bezeichnet, wenn an der Verkehrsphasenfront einer Verkehrsphase die Fahrzeuge aus der Verkehrsphase hinausfahren bzw. in die Verkehrsphase hineinfahren (siehe Abbildungen 3.4 und 3.6 (b)).

Da die räumliche Ausbreitung des Übergangsbereiches von Verkehrsphasenfronten sehr gering ist, werden die Verkehrsphasenfronten in den Abbildungen dieser Arbeit als Linien gekennzeichnet (siehe z. B. Abbildungen 3.4 und 3.6 (b)).

3.2.1 Verkehrsmodelle und Verkehrstheorien

Seit 1953 wird in der Verkehrswissenschaft an vielen verschiedenen mathematischen Verkehrsmodellen und Verkehrstheorien geforscht und entwickelt mit dem Ziel die Komplexität des Verkehrs und der Verkehrsphänomene zu verstehen [10, 40, 55–83]. Für die Verkehrsmodelle und Verkehrstheorien ist es essenziell Verkehrsphänomene, die im realen Verkehr beobachtet werden, und deren empirische Eigenschaften erklären und abbilden zu können. Hierbei spielen empirische Beobachtungen von Änderungen der Eigenschaften des Verkehrs, die zu Verkehrsübergängen *zum* gestauten Verkehr und *im* gestauten Verkehr führen, eine sehr bedeutende Rolle.

Angefangen mit der Arbeit von Greenshields [44] aus dem Jahr 1935 wurden zahlreiche Verkehrsmodelle und Verkehrstheorien aus den letzten 70 Jahren auf Basis des *Fundamentaldiagramms des Verkehrsflusses* (siehe Abbildung 3.5 (c)) entwickelt [10, 11, 45–54]. Das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses ist ein Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramm und gibt den Wert des Verkehrsflusses zu einem bestimmten Wert der Verkehrsdichte anhand einer stetigen Kurve an. Das Fundamentaldiagramm basiert unter anderem auf den empirischen Beobachtungen, dass mit steigender Verkehrsdichte die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrs abnimmt. In Abbildung 3.5 (a) und (b) sind Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramme auf Basis von empirischen Daten pro Fahrspur einer Autobahn dargestellt [9, 84]. In Abbildung 3.5 (c) und (d) sind wiederum die Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramme pro Fahrspur einer Autobahn *qualitativ* dargestellt, die aus empirischen Verkehrsbeobachtungen wie aus Abbildung 3.5 (a) bzw. (b) entstanden sind [9, 84]. Hierbei stellt Abbildung 3.5 (c) das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses dar und Abbildung 3.5 (d) ein Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramm, das auf der Drei-Phasen-Verkehrstheorie ([9, 42, 43]) basiert.

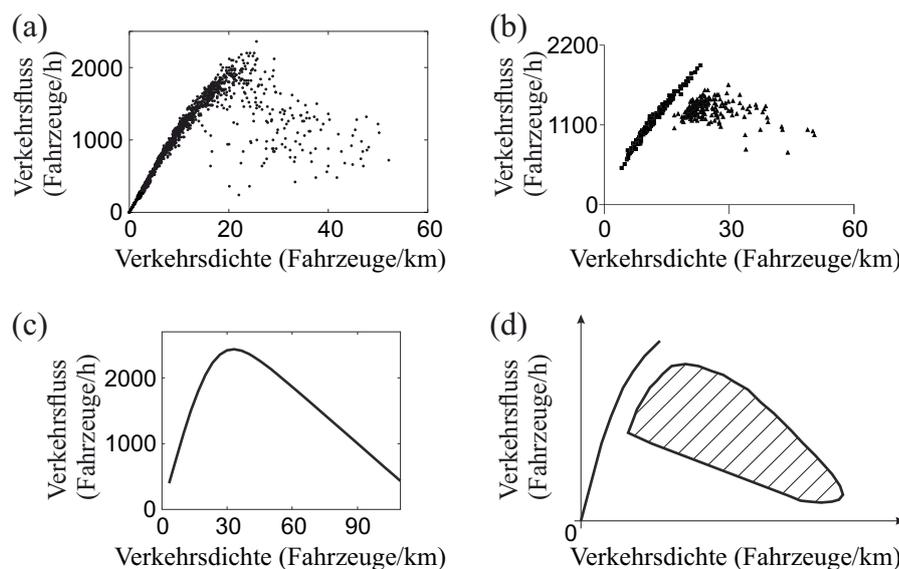


Abbildung 3.5: Empirische und qualitative Darstellungen von Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagrammen pro Fahrspur einer Autobahn: (a) Über 1-Minute-Intervalle gemittelte empirische Daten pro Fahrspur, die auf der Autobahn A5 bei Frankfurt gemessen wurden (angepasst aus Abbildung 4.12 von [84]). (b) Verkehrsdaten, die über 1-Minute-Intervalle pro Fahrspur gemittelt und an einer räumlichen Position einer Autobahn gemessen wurden (angepasst aus Abbildung 2.2 von [9]). (c) Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses: Qualitative Darstellung des Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramms, das durch empirische Verkehrsbeobachtungen wie aus (a) entstanden ist (angepasst aus Abbildung 4.10 von [84]). (d) Qualitative Darstellung des Verkehrsfluss-Verkehrsdichte-Diagramms, das auf der Drei-Phasen-Verkehrstheorie ([9, 42, 43]) basiert und durch empirische Verkehrsbeobachtungen wie aus (b) entstanden ist (angepasst aus Abbildung 3.3 von [9]).

Die Verkehrsmodelle, die auf Basis des Fundamentaldiagramms des Verkehrsflusses (Abbildung 3.5 (c)) entwickelt wurden, können in die folgenden zwei Klassen eingeteilt werden:

- Die erste Klasse der Verkehrsmodelle bezieht sich auf das *Lighthill-Whitham-Richards (LWR)* Modell, das in den Jahren 1955 und 1956 eingeführt wurde [56, 57]. Die Grundidee des LWR Modells ist, dass der maximale Verkehrsfluss, welches dem Maximum der im Fundamentaldiagramm dargestellten Kurve entspricht (Abbildung 3.5 (c)), die Verkehrskapazität des freien Verkehrs an einer verkehrlichen Autobahnengstelle bestimmt. Wenn der Verkehrsfluss an einem Autobahnabschnitt diese Verkehrskapazität überschreitet, kommt es zu einem Verkehrszusammenbruch [9].
- Die zweite Klasse der Verkehrsmodelle bezieht sich auf das *General Motors (GM)* Modell, das in den Jahren 1959, 1960 und 1961 eingeführt wurde [58, 59]. Die Grundidee des GM Modells ist, dass es ab einem bestimmten kritischen Wert der Verkehrsdichte zu einer Instabilität der Verkehrszustände im Fundamentaldiagramm kommt, wobei diese Instabilität durch die Reaktionszeit der Fahrer verursacht wird [9].

In den häufig verwendeten Verkehrstheorien findet eine Unterteilung des Verkehrs auf Autobahnen in freien Verkehr und gestauten Verkehr statt. Der gestaute Verkehr wird beispielsweise in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie in zwei weitere Verkehrsphasen unterteilt: synchronisierter Verkehr und sich bewegender breiter Stau [9, 42, 43]. In der Literatur lassen sich für den Verkehr neben dem freien Verkehr folgende Unterteilungen finden:

- teilgebundener und gebundener Verkehr [85],
- zähfließender Verkehr (homogen oder oszillierend), Stop-and-go Verkehr, stromaufwärts verlaufende Stauwellen, sich nicht bewegende Staus [86–88],
- teilgebundener, synchroner, stockender, gestauter und stehender Verkehr [89],
- synchronisierter Verkehr und sich bewegender breiter Stau [9, 42, 43].

Die Unterteilung des gestauten Verkehrs in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie in zwei unterschiedliche Verkehrsphasen beruht auf zahlreichen Untersuchungen des real gemessenen gestauten Verkehrs. Diese umfangreichen Verkehrsmessungen wurden an verschiedenen Autobahnabschnitten und in unterschiedlichen Ländern erhoben und analysiert. Es wurden im gestauten Verkehr empirische Verkehrsphänomene beobachtet, die grundsätzlich verschiedene räumlich-zeitliche Ausbreitungen und wesentlich unterschiedliche Werte der Verkehrsvariablen (Definition 2.1) aufweisen. Hieraus ergeben sich zwei unterschiedliche charakteristische Eigenschaften des gestauten Verkehrs und somit folgende drei Verkehrsphasen [9, 42, 43]: *freier Verkehr*, *synchronisierter Verkehr* und *sich bewegender breiter Stau*. In Kapitel 3.2.2 und 3.3 wird näher auf die Drei-Phasen-Verkehrstheorie mit den drei Verkehrsphasen eingegangen.

3.2.2 Empirische Verkehrszusammenbrüche und Drei-Phasen-Verkehrstheorie

Bei einem Verkehrszusammenbruch kommt es zu einer abrupten Geschwindigkeitsreduzierung der Fahrzeuge. Daher wird ein Verkehrszusammenbruch auch als *Geschwindigkeitszusammenbruch* (engl. speed breakdown) bezeichnet [10, 11, 45–54]. Jedoch kann der Verkehrsfluss nach einem Verkehrszusammenbruch erhalten bleiben und im Gegensatz zur Geschwindigkeit keine Reduzierung zur Folge haben (siehe z. B. Abbildung 1 (d) aus [90]) [46–54, 90]. Im Jahr 1995 wurde die wichtige Erkenntnis erlangt, dass Verkehrszusammenbrüche an verkehrlichen Autobahnengstellen probabilistische Eigenschaften aufweisen [49, 53, 54]. Das bedeutet, dass im freien Verkehr an einer verkehrlichen Autobahnengstelle bei einem bestimmten Verkehrsfluss ein Verkehrszusammenbruch entstehen kann, aber nicht zwingend entstehen muss. Beispielsweise kann an dem gleichen Autobahnabschnitt beim gleichen Verkehrsfluss zu einer bestimmten Uhrzeit ein Verkehrszusammenbruch entstehen, aber zu einer anderen Uhrzeit nicht.

Die Entstehung von empirischen Verkehrszusammenbrüchen an verkehrlichen Autobahnengstellen zu verstehen ist eine Grundvoraussetzung, um zuverlässige Anwendungen für die Verkehrstelematik und Verkehrsregelung zu entwickeln. Deshalb ist es bei Untersuchungen von Verkehrsmessungen unabdingbar auf eine Verkehrstheorie zu greifen, die in der Lage ist fundamentale Verkehrsphänomene wie empirische Verkehrszusammenbrüche an verkehrlichen Autobahnengstellen zu erklären. In dieser Arbeit werden basierend auf unterschiedlichen Verkehrsmessungen empirische Verkehrsphänomene analysiert. Beispielsweise wird die Entstehung von Verkehrsphänomenen, die eine kleine räumlich-zeitliche Ausbreitung aufweisen, vor Verkehrszusammenbrüchen an unterschiedlichen Autobahninfrastrukturen und deren Eigenschaften untersucht (Kapitel 4). Daher ist es essenziell, dass eine Verkehrstheorie, die empirische Verkehrszusammenbrüche an verkehrlichen Autobahnengstellen abbilden und erklären kann, den verkehrstheoretischen Hintergrund dieser Arbeit bildet.

Aufgrund der Wichtigkeit, empirische Verkehrszusammenbrüche an verkehrlichen Autobahnengstellen zu verstehen, und aufgrund von fehlenden Verkehrstheorien, die die Entstehung von empirischen Verkehrszusammenbrüchen erklären konnten, wurden Verkehrszusammenbrüche in den Jahren 1996–2002 auf Basis von umfangreichen realen Verkehrsmessungen auf unterschiedlichen Autobahnen ausführlich untersucht [91–99]. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse führten schließlich zur Einführung der *Drei-Phasen-Verkehrstheorie* [9, 42, 43, 93–99]. In den Kapiteln 3.4 und 3.5 wird näher auf die Entstehung von Verkehrszusammenbrüchen und die daraus resultierenden gestauten Verkehrsphänomene eingegangen.

In der Drei-Phasen-Verkehrstheorie ist der Ursprung eines Verkehrszusammenbruchs begründet durch folgende zwei konkurrierende Prozesse, die durch eine lokale Verkehrsstörung entstehen, in der die mittleren Verkehrsgeschwindigkeiten geringer und die Verkehrsdichten größer sind als im ursprünglichen freien Verkehr [9, 42, 100]:

- die Entstehung des gestauten Verkehrs aus dem freien Verkehr aufgrund der *Geschwindigkeitsanpassung* (engl. speed-adaptation, Definition 3.3) von Fahrern,
- die Entstehung des freien Verkehrs aus dem gestauten Verkehr aufgrund von *erhöhter Beschleunigung* (engl. over-acceleration, Definition 3.4) von Fahrern.

Der Ursprung von Verkehrszusammenbrüchen aufgrund der Geschwindigkeitsanpassung oder der erhöhten Beschleunigung von Fahrern wird in Kapitel 3.5 diskutiert.

Die ersten Verkehrsmodelle, die auf drei Verkehrsphasen basieren und gestaute Verkehrsphänomene der Drei-Phasen-Verkehrstheorie abbilden, wurden in [98, 99] eingeführt. Im Laufe der Zeit wurden zahlreiche weitere auf drei Verkehrsphasen basierende Verkehrsmodelle entwickelt [101–114].

Die Besonderheit der Drei-Phasen-Verkehrstheorie ist es, dass sie basierend auf empirischen Verkehrsmessungen entwickelt wurde [9, 42, 43, 98, 99]. Dies ist wesentlich für die Abbildung des realen Verkehrs. Der Ursprung der Definitionen der Verkehrsphasen in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie liegt *nur* in den räumlich-zeitlichen empirischen Eigenschaften von Verkehrsmessungen und die Definitionen der Verkehrsphasen sind *nicht* als Folgerung aus dieser Theorie entstanden. Da die Drei-Phasen-Verkehrstheorie außerdem bekannte Verkehrsmerkmale und Verkehrsphänomene, die im realen Verkehr auf Autobahnen zu beobachten und für diese Arbeit relevant sind, erklären kann, bildet sie eine zuverlässige Grundlage und den verkehrstheoretischen Hintergrund der empirischen Verkehrsuntersuchungen dieser Arbeit [9, 42, 43].

3.3 Verkehrsphasen in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie

In diesem Unterkapitel werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Drei-Phasen-Verkehrstheorie diskutiert [9, 42, 43].

3.3.1 Definition der Verkehrsphasen

Aus der Betrachtung von zahlreichen empirischen Beispielen des Verkehrs und von vielen Verkehrssimulationen, ergeben sich drei Klassen des Verkehrs mit physikalisch unterschiedlichen

Eigenschaften. Diese Klassen werden als *Verkehrsphasen* bezeichnet. Die beobachteten unterschiedlichen Eigenschaften sind charakteristisch für diese Verkehrsphasen. Es werden im Folgenden drei verschiedene Verkehrsphasen, die in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie eingeführt wurden, definiert [9, 42, 43, 93–96, 115].

Definition 3.9. *Sich bewegender Stau:* *Als ein sich bewegender Stau wird im Verkehr ein räumlich-zeitliches Verkehrsmuster bezeichnet, das räumlich durch zwei stromaufwärts verlaufende Verkehrsphasenfronten (Definition 3.7) beschränkt ist (siehe Abbildung 3.6 (b)). Zwischen diesen Verkehrsphasenfronten ist die Verkehrsdichte sehr hoch und die mittlere Geschwindigkeit sehr gering. An der stromaufwärtigen Verkehrsphasenfront (Definition 3.8) bremsen Fahrzeuge bis zur geringen Geschwindigkeit des sich bewegenden Staus oder bis zum Stillstand ab. An der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront beschleunigen die Fahrzeuge, um den sich bewegenden Stau zu verlassen [9]. Ein sich bewegender Stau wird im Englischen als *moving jam* bezeichnet.*

Definition 3.10. *Verkehrsphase – Sich bewegender breiter Stau (J):* *Ein sich bewegender breiter Stau (J) ist ein sich stromaufwärts bewegender Stau (Definition 3.9) mit der folgenden charakteristischen Eigenschaft: Die mittlere Geschwindigkeit der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront (Definition 3.8) von J wird über die Zeit beibehalten, auch wenn sich der Stau durch andere Verkehrsphasen oder verkehrliche Autobahnengstellen (Definition 3.14) fortbewegt (siehe Abbildungen 3.4, 3.6 und 3.7) [9]. Außerdem wird der Verkehrsfluss durch die Verkehrsphasenfronten von J unterbrochen. J definiert einen der drei Verkehrsphasen und wird im Englischen als *wide moving jam* bezeichnet.*

Da die charakteristische Eigenschaft der Verkehrsphase des sich bewegenden breiten Staus J wichtig zum Verständnis der Verkehrsphasen ist, wird diese näher erläutert [9]. Hierzu wird die stromabwärtige Verkehrsphasenfront von J betrachtet. Die Fahrzeuge, die sich an der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront in J befinden, beschleunigen aus dem Stillstand (oder aus sehr geringen Geschwindigkeiten) zu höheren Geschwindigkeiten und verlassen die Verkehrsphase J in stromabwärtige Fahrtrichtung. Die mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_{ab}^J der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront von J stellt eine charakteristische Größe von J dar. Zur näheren Erläuterung werden folgende Variablen definiert: Sei $\bar{\tau}_{ab}^J$ die mittlere Reaktionszeit, die ein Fahrer beim Anfahren im Mittel benötigt, nachdem das vordere Fahrzeug aus dem Stillstand losgefahren ist. Sei ρ_{max}^J die maximale Fahrzeugdichte in einem sich bewegenden Stau. Aus ρ_{max}^J ergibt sich die Mindestdistanz zwischen den Fahrzeugmittelpunkten von aufeinanderfolgenden Fahrzeugen in sich bewegenden Staus durch $d_{Fzg}^J = \frac{1}{\rho_{max}^J}$ (in m). Dann lässt sich die mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_{ab}^J der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront von J wie folgt berechnen:

$$\bar{v}_{ab}^J = -\frac{1}{\rho_{max}^J \cdot \bar{\tau}_{ab}^J} = -\frac{d_{Fzg}^J}{\bar{\tau}_{ab}^J}. \quad (3.1)$$

Basierend auf empirischen Untersuchungen ergeben sich für die Variablen folgende Werte [9, 116]: $\bar{\tau}_{ab}^J \approx 1.5 - 2.0$ s, $\rho_{max}^J \approx 140$ Fahrzeuge/km und $d_{Fzg}^J \approx 7.14$ m. Damit ergibt sich für die mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_{ab}^J der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront von J näherungsweise folgender Wert:

$$\bar{v}_{ab}^J \approx -15 \text{ km/h}. \quad (3.2)$$

Die charakteristische Eigenschaft der Verkehrsphase J ist, dass die mittlere Geschwindigkeit $\bar{v}_{ab}^J \approx -15$ km/h der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront von J aus den Gleichungen (3.1) und (3.2) über die Zeit beibehalten wird, auch wenn sich J durch andere Verkehrsphasen oder verkehrliche Autobahnengstellen fortbewegt (siehe Abbildung 3.6 (b) und 3.7) [9].

Der Begriff *breit* für die Verkehrsphase des sich bewegenden breiten Staus J bezieht sich darauf, dass die räumliche Gesamtlänge dieses Staus deutlich größer ist als der räumliche Abstand zwischen den stromaufwärtigen und stromabwärtigen Verkehrsphasenfronten. Wenn außerdem die Fahrzeuge innerhalb dieser Verkehrsphasenfronten bis zum Stillstand abbremsen, wird dieser sich bewegender Stau die charakteristische Eigenschaft von J, die mittlere Geschwindigkeit der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront beizubehalten, aufweisen. Daher spiegelt der Begriff *breit* für einen sich bewegenden Stau die charakteristische Eigenschaft von J wider.

Definition 3.11. Verkehrsphase – Synchronisierter Verkehr (S): *Der synchronisierte Verkehr (S) ist ein räumlich-zeitliches Verkehrsmuster, das die charakteristische Eigenschaft der Verkehrsphase J (Definition 3.10) nicht aufweist trotz erhöhter Verkehrsdichte und reduzierter mittlerer Geschwindigkeit. Also wird die mittlere Geschwindigkeit der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront (Definition 3.8) von S über die Zeit nicht beibehalten und S bewegt sich nicht ungehindert durch andere verkehrliche Autobahnengstellen (Definition 3.14) oder Verkehrsmuster fort. Stattdessen ist die stromabwärtige Verkehrsphasenfront von S häufig an einer räumlichen Position fixiert, die als effektiver Ort der Autobahnengstelle (Definition 3.15) bezeichnet wird (siehe Abbildungen 3.4, 3.6 und 3.7) [9]. S definiert einen der drei Verkehrsphasen und wird im Englischen als *synchronized flow* bezeichnet.*

Definition 3.12. Gestauter Verkehr: *Der gestaute Verkehr fasst die zwei Verkehrsphasen von sich bewegenden breiten Staus (Definition 3.10) und des synchronisierten Verkehrs (Definition 3.11) zusammen.*

Die zwei Verkehrsphasen des synchronisierten Verkehrs (S) und von sich bewegenden breiten Staus (J) bilden also den gestauten Verkehr. Wenn der Verkehr weder dem synchronisierten Verkehr noch sich bewegenden breiten Staus zugeordnet werden kann, wird dieser Verkehr der Verkehrsphase *freier Verkehr* zugeordnet. Diese Verkehrsphase, die den nicht gestauten Verkehr wiedergibt, wird wie folgt definiert.

Definition 3.13. Verkehrsphase – Freier Verkehr (F): *Der freie Verkehr (F) weist weder die Eigenschaften von J noch von S auf und tritt häufig bei einer geringen Verkehrsdichte auf. Dadurch beeinträchtigen sich die Fahrzeuge in F gegenseitig nicht wesentlich und können ihre Geschwindigkeiten frei wählen. Mit steigender Verkehrsdichte sinkt zum einen die mittlere Geschwindigkeit von F und zum anderen steigt der Verkehrsfluss von F (siehe Abbildungen 3.4, 3.6 und 3.7) [9]. F definiert einen der drei Verkehrsphasen und wird im Englischen als *free flow* bezeichnet.*

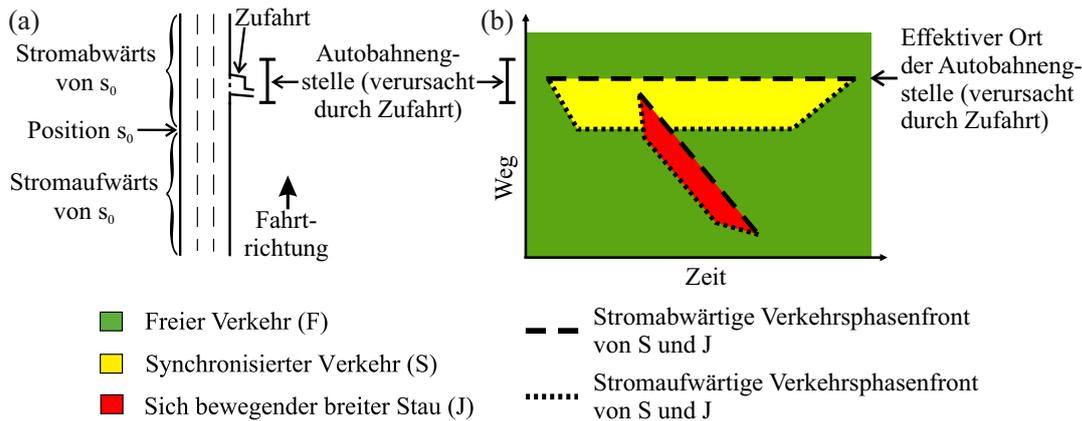


Abbildung 3.6: (a) Veranschaulichung der Bereiche, die sich stromabwärts und stromaufwärts relativ zu einem Ort s_0 befinden. (b) Qualitative Darstellung der drei Verkehrsphasen im Weg-Zeit-Diagramm: Freier Verkehr (F) in Grün (Definition 3.13), synchronisierter Verkehr (S) in Gelb (Definition 3.11) und sich bewegender breiter Stau (J) in Rot (Definition 3.10). Die räumliche Position vom effektiven Ort der Autobahnstelle (Definition 3.15) ist mit einem Pfeil markiert. Die Wegachse von (b) korrespondiert zum Streckenabschnitt aus (a). In (a) und (b) ist der räumliche Bereich der Autobahnengstelle (Definition 3.14) durch Linien gekennzeichnet. Darüber hinaus sind die stromabwärtigen und stromaufwärtigen Verkehrsphasenfronten von S und J als gestrichelte bzw. gepunktete Linien markiert.

Nun werden zwei weitere in den Verkehrstheorien wichtige Begriffe definiert: die *verkehrliche Autobahnengstelle* und der *effektive Ort der Autobahnengstelle*.

Definition 3.14. Verkehrliche Autobahnengstelle: Eine verkehrliche Autobahnengstelle ist der räumliche Bereich eines Autobahnabschnittes, an der sich regelmäßig an vielen verschiedenen Tagen gestauter Verkehr (Definition 3.12) bildet und über eine gewisse Zeit andauert (siehe Abbildung 3.6). Die Bestimmung dieses Bereiches hat eine gewisse räumliche Unschärfe. Beispiele für häufige Ursachen von verkehrlichen Autobahnengstellen sind folgende: Autobahnzufahrten, Autobahnabfahrten, Fahrspurreduzierung, Straßenbauarbeiten oder Fahrbahnsteigungen. Eine verkehrliche Autobahnengstelle wird in Kurzform als *Autobahnengstelle* und im Englischen als *highway bottleneck* bezeichnet.

Es ist zu beachten, dass das Wort *Engstelle* im Begriff *Autobahnengstelle* sich nicht auf die räumliche Verengung oder auf die Reduzierung von Fahrspuren der Autobahn bezieht, sondern auf den verkehrlichen Aspekt der Engstelle, der einen gestauten Verkehr zur Folge hat.

Die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs an einer Autobahnengstelle ist deutlich größer als außerhalb der Autobahnengstelle. Weitere Beispiele für Ursachen von Autobahnengstellen neben den in Definition 3.14 genannten Beispielen sind folgende: Fahrspurverengung, Straßenkurven, Verkehrsunfälle, schlechte Witterungsbedingungen (z. B. Starkregen), Verkehrsschilder, Verkehrsbeeinflussungsanlagen oder Wechselverkehrszeichen.

Definition 3.15. Effektiver Ort der Autobahnengstelle: Ein effektiver Ort der Autobahnengstelle ist die räumliche Position an einer verkehrlichen Autobahnengstelle (Definition 3.14), an der die stromabwärtige Verkehrsphasenfront (Definition 3.8) des sich gebildeten gestauten Verkehrs räumlich fixiert ist (siehe Abbildung 3.6 (b)). Die Bestimmung dieser Position hat eine gewisse räumliche Unschärfe. Der effektive Ort der Autobahnengstelle wird im Englischen als *effective location of the bottleneck* bezeichnet.

Der effektive Ort der Autobahnengstelle, an der sich gestauter Verkehr über eine gewisse Zeit bildet, kann sich von der räumlichen Position des Verkehrszusammenbruchs (Definition 3.20) des jeweiligen gestauten Verkehrs unterscheiden. Jedoch zeigen untersuchte empirische Beispiele, dass der effektive Ort der Autobahnengstelle und die räumliche Position des Verkehrszusammenbruchs häufig übereinstimmen (siehe z. B. Abbildung 3.9).

3.3.2 Definition von Verkehrsphasen- und Verkehrszustandsübergängen

Es werden die Begriffe *Verkehrsphasenübergang* und *Verkehrszustandsübergang* definiert und in Abbildung 3.7 dargestellt.

Definition 3.16. Verkehrsphasenübergang: Ein Verkehrsphasenübergang ist die räumlich-zeitliche Position, an der ein Übergang von einer Verkehrsphase zu einer anderen stattfindet (siehe Abbildung 3.7). Die Bestimmung dieser Position hat eine gewisse räumlich-zeitliche Unschärfe. Bei der Bestimmung der Verkehrsphasenübergänge wird der gesamte räumlich-zeitliche Verkehr betrachtet und nicht nur einzelne Fahrzeugtrajektorien. Ein Verkehrsphasenübergang wird in Kurzform als Phasenübergang bezeichnet.

Definition 3.17. Verkehrszustandsübergang: Ein Verkehrszustandsübergang einer Fahrzeugtrajektorie ist die räumlich-zeitliche Position der Fahrzeugtrajektorie, an dem das Fahrzeug eine Verkehrsphasenfront (Definition 3.7) kreuzt (siehe Abbildung 3.7). Im Vergleich zum Verkehrsphasenübergang (Definition 3.16) entsteht ein Verkehrszustandsübergang ausschließlich entlang einzelner Fahrzeugtrajektorien. Ein Verkehrszustandsübergang wird in Kurzform als Zustandsübergang bezeichnet.

Aus den Definitionen 3.16 und 3.17 folgt, dass ein einzelnes Fahrzeug keinen Verkehrsphasenübergang erleben kann, sondern nur einen Verkehrszustandsübergang.

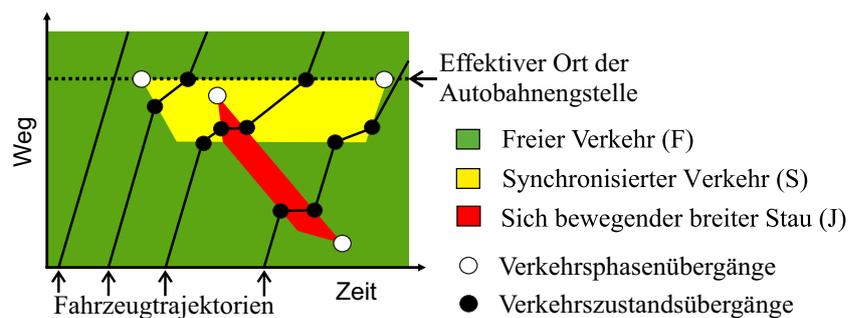


Abbildung 3.7: Qualitative Darstellung von Verkehrsphasen- und Verkehrszustandsübergängen. Die räumlich-zeitlichen Positionen der Verkehrsphasenübergänge sind durch weiße Kreise markiert. Die räumlich-zeitlichen Positionen der Verkehrszustandsübergänge von Fahrzeugtrajektorien sind durch schwarze Kreise markiert.

3.4 Verkehrszusammenbrüche und Arten von gestautem Verkehr

In Kapitel 3.2.2 wurden bereits empirische Verkehrszusammenbrüche an verkehrlichen Autobahnengstellen historisch eingeführt und deren Wichtigkeit betont. Zur Entwicklung von zuverlässigen Anwendungen für die Verkehrstelematik und Verkehrsregelung und zur Weiterentwicklung von Verkehrsmodellen und Verkehrstheorien ist es notwendig empirische Verkehrszusammenbrüche zu verstehen und abbilden zu können.

In diesem Unterkapitel wird der Verkehrszusammenbruch an einer verkehrlichen Autobahnengstelle definiert und die sogenannte *Metastabilität* des freien Verkehrs beschrieben. Es werden Beispiele von unterschiedlichen Verkehrszusammenbrüchen mit den daraus resultierenden gestauten Verkehrsphänomenen basierend auf Floating-Car-Daten über Raum und Zeit dargestellt.

Definition 3.18. Kritische Verkehrsstörung: *Eine kritische Verkehrsstörung ist die Änderung von Verkehrsvariablen (Definition 2.1) eines räumlich-zeitlichen Verkehrsgebietes eines Autobahnabschnittes, die die Reduzierung oder Unterbrechung des Verkehrsflusses und einen Verkehrsphasenübergang (Definition 3.16) zur Folge haben kann. Beispielsweise führt eine abrupte Geschwindigkeitsreduzierung oder Erhöhung der Verkehrsdichte häufig zu einem Verkehrsphasenübergang. Je größer die Verkehrsstörung ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Verkehrsphasenübergang eintritt. Bei Verkehrsstörungen, die kleiner als eine bestimmte kritische Größe sind, tritt im Verkehr kein Verkehrsphasenübergang ein, da der Verkehrsfluss vernachlässigbar gering beeinflusst wird [9, 42, 43].*

Nach Definition 3.18 nimmt mit zunehmender Größe der kritischen Verkehrsstörung im Verkehr die Wahrscheinlichkeit zu, dass ein Verkehrsphasenübergang eintritt. Hier ist anzumerken, dass unterhalb einer kritischen Größe der Verkehrsstörung der Verkehr im *stabilen* Zustand vorliegt und es zu keinem Verkehrsphasenübergang kommt. Oberhalb der kritischen Größe der Verkehrsstörung liegt der Verkehr hingegen im *metastabilen* Zustand vor und es kann ein Verkehrsphasenübergang eintreten [9, 42, 43, 93–96].

Definition 3.19. Metastabilität des freien Verkehrs: *Der freie Verkehr (Definition 3.13) ist im metastabilen Zustand, wenn die Verkehrsstörungen oberhalb einer kritischen Größe sind, d. h. wenn kritische Verkehrsstörungen (Definition 3.18) vorliegen können. Dann können Verkehrsphasenübergänge vom freien Verkehr in den synchronisierten Verkehr (Definition 3.11) eintreten. Die Eigenschaft des freien Verkehrs im metastabilen Zustand vorliegen zu können, wird als die Metastabilität des freien Verkehrs bezeichnet [9, 42, 43]. Daher wird der freie Verkehr auch als metastabiler freier Verkehr bezeichnet.*

Definition 3.20. Verkehrszusammenbruch: *Ein Verkehrszusammenbruch entsteht im metastabilen freien Verkehr (Definition 3.19). Er ist ein $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergang, aus dem ein großes gestautes Verkehrsmuster resultiert, das sich räumlich-zeitlich häufig mindestens über 3 km und 30 min ausbreitet (Definition 3.11, 3.12, 3.13 und 3.16) [9, 42, 43]. Ein $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergang, der nach relativ kurzer Zeit von einem $S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergang gefolgt wird und aus dem ein gestautes Verkehrsmuster resultiert, das sich räumlich-zeitlich*

häufig bis maximal 2 km und 25 min ausbreitet, ist ein $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrszusammenbruch (Definition 3.26). Verkehrszusammenbrüche sind in den Abbildungen 3.8, 3.9, 3.10 und 3.17 (b) mit „Verkehrszusammenbruch“ gekennzeichnet. Verkehrszusammenbruch wird mit Vz abgekürzt.

Aus den Definitionen 3.18, 3.19 und 3.20 folgt, dass ein Verkehrszusammenbruch an einer verkehrlichen Autobahnengstelle ein Verkehrsphasenübergang vom metastabilen freien Verkehr (F) in den synchronisierten Verkehr (S) ist. Ein Verkehrszusammenbruch kann *nicht* im stabilen freien Verkehr entstehen, sondern *nur* im metastabilen freien Verkehr. Kritische Verkehrsstörungen, die auf Änderungen von verschiedenen Verkehrsvariablen (wie z. B. Geschwindigkeit, Verkehrsdichte oder Verkehrsfluss) zurückzuführen sind, können im metastabilen freien Verkehr zu einem Verkehrszusammenbruch führen.

Ein Verkehrszusammenbruch wird in zwei Klassen unterteilt: Spontaner und induzierter Verkehrszusammenbruch. Diese werden in Kapitel 3.4.1 bzw. 3.4.2 beschreiben.

3.4.1 Spontaner Verkehrszusammenbruch

Ein *spontaner Verkehrszusammenbruch* im freien Verkehr ist ein Verkehrszusammenbruch, und damit ein $F \rightarrow S$ Phasenübergang, an einer verkehrlichen Autobahnengstelle, wobei die Umgebung der räumlich-zeitlichen Position des $F \rightarrow S$ Phasenüberganges folgende Eigenschaft aufweist: Zeitlich vor der räumlich-zeitlichen Position des $F \rightarrow S$ Phasenüberganges liegt sowohl stromaufwärts als auch stromabwärts freier Verkehr vor [43]. Ein spontaner Verkehrszusammenbruch wird auch als *spontaner $F \rightarrow S$ Phasenübergang* bezeichnet.

In Abbildung 3.8 ist ein spontaner Verkehrszusammenbruch in einem Weg-Zeit-Diagramm qualitativ abgebildet. In Abbildung 3.9 wiederum ist ein empirisches Beispiel eines spontanen Verkehrszusammenbruchs basierend auf Floating-Car-Daten, die am 25. Oktober 2016 am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen gemessen wurden, dargestellt. Zeitlich vor der Position der $F \rightarrow S$ Phasenübergänge aus Abbildung 3.8 und 3.9 liegt sowohl stromaufwärts als auch stromabwärts freier Verkehr vor.

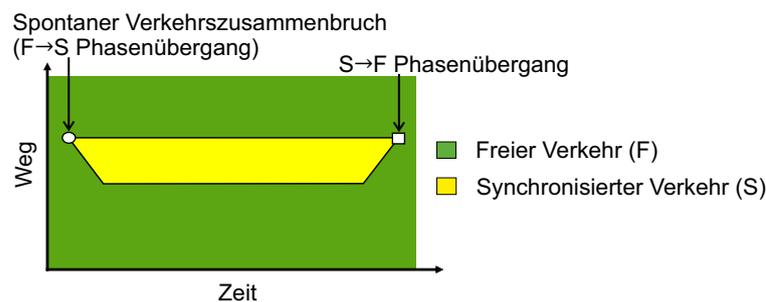


Abbildung 3.8: Qualitative Darstellung eines spontanen Verkehrszusammenbruchs (spontanen $F \rightarrow S$ Phasenüberganges) in einem Weg-Zeit-Diagramm.

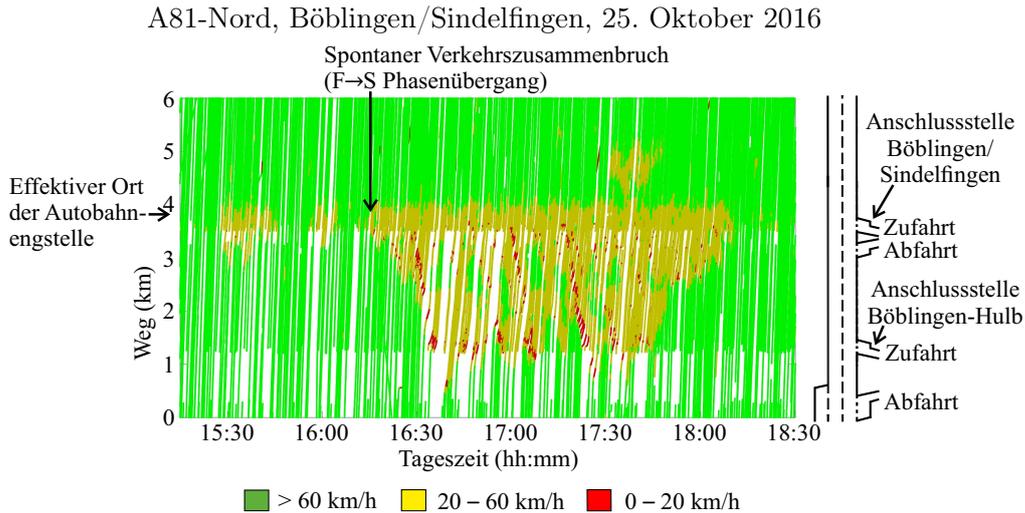


Abbildung 3.9: Empirisches Beispiel für einen spontanen Verkehrszusammenbruch basierend auf Floating-Car-Daten, die am 25. Oktober 2016 am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen gemessen wurden.

3.4.2 Induzierter Verkehrszusammenbruch

Ein *induzierter Verkehrszusammenbruch* im freien Verkehr an einer verkehrlichen Autobahnengstelle ist ein Verkehrszusammenbruch, der an der verkehrlichen Autobahnengstelle durch eine sich räumlich-zeitlich bewegende gestaute Verkehrsstruktur ausgelöst wird. Diese sich bewegende gestaute Verkehrsstruktur entsteht zu einem früheren Zeitpunkt und an einer anderen räumlichen Position als die räumlich-zeitliche Position des Verkehrszusammenbruchs [43]. Beispielsweise kann die sich bewegende gestaute Verkehrsstruktur an einer räumlich entfernteren Autobahnengstelle entstehen und sich stromaufwärts bis zur nächsten Autobahnengstelle ausbreiten und dort einen Verkehrszusammenbruch auslösen (siehe z. B. Abbildungen 3.10 bis 3.13).

Ein induzierter Verkehrszusammenbruch wird wiederum unterteilt in einen induzierten Verkehrszusammenbruch, der durch einen sich bewegenden breiten Stau (J) ausgelöst wird (Abbildungen 3.10 und 3.13), und einen induzierten Verkehrszusammenbruch, der durch eine stromaufwärts verlaufende Welle aus synchronisiertem Verkehr (engl. moving synchronized flow pattern) ausgelöst wird (Abbildungen 3.11 und 3.12).

In Abbildung 3.10 ist ein induzierter und spontaner Verkehrszusammenbruch qualitativ dargestellt. In Abbildung 3.11 sind basierend auf Detektordaten ein induzierter und zwei spontane Verkehrszusammenbrüche abgebildet. Die Abbildungen 3.12 und 3.13 stellen auf Basis von mikroskopischen Floating-Car-Daten induzierte Verkehrszusammenbrüche dar, die durch gepunktete Kreise markiert sind. Die in Abbildung 3.12 verwendeten Floating-Car-Daten wurden am 10. November 2016 am Autobahnabschnitt A8-West bei der Anschlussstelle Wendlingen am Neckar gemessen. Die Floating-Car-Daten aus Abbildung 3.13 wurden am 16. November 2017 am Autobahnabschnitt A5-Nord bei der Anschlussstelle Friedberg gemessen. Es wird angemerkt, dass es in dem Gebiet, das in Abbildung 3.13 durch einen gestrichelten Kreis gekennzeichnet ist, zu keinem induzierten Verkehrszusammenbruch kommt, da der sich bewe-

gende breite Stau in dem Gebiet keinen Verkehrszusammenbruch auslöst und damit sich kein räumlich-zeitlich ausbreitender gestauter Verkehr bildet.

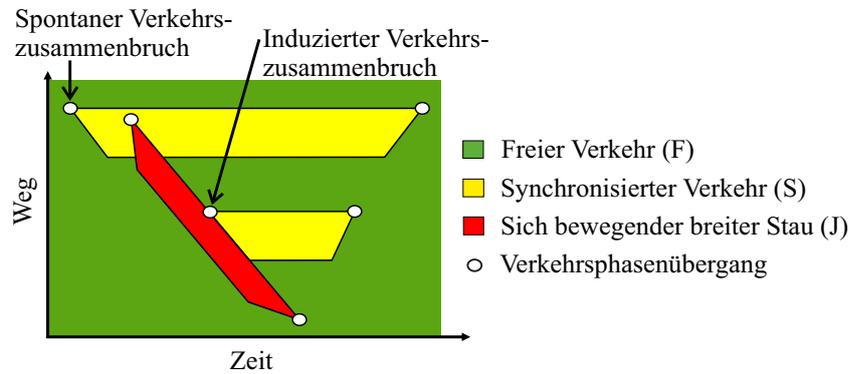


Abbildung 3.10: Qualitative Darstellung eines spontanen und induzierten Verkehrszusammenbruchs in einem Weg-Zeit-Diagramm. Der induzierte Verkehrszusammenbruch ist ausgelöst durch einen sich bewegenden breiten Stau J.

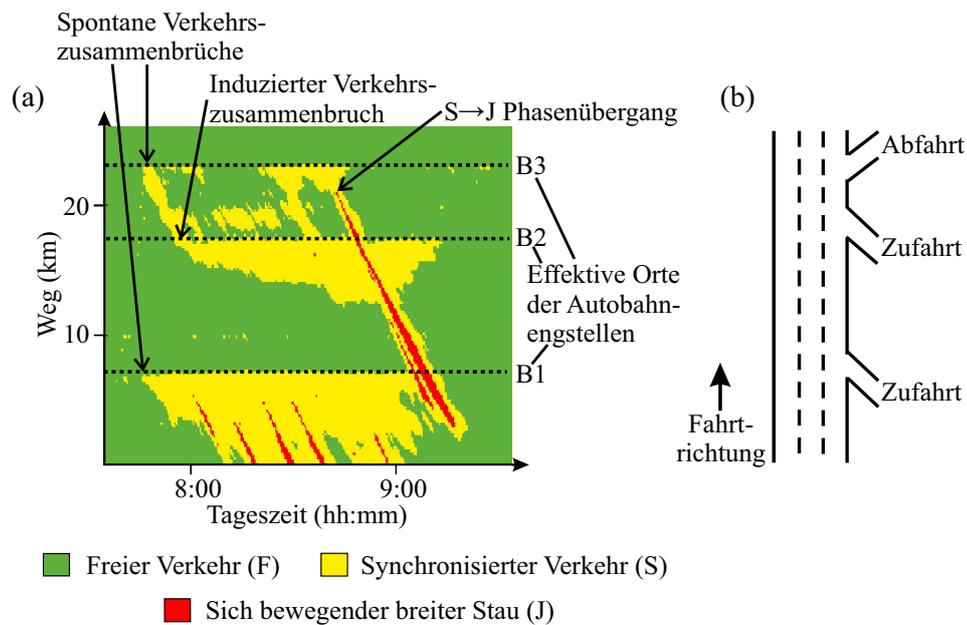


Abbildung 3.11: Empirisches Beispiel für spontane und induzierte Verkehrszusammenbrüche basierend auf Detektordaten [42, 117]. Der gekennzeichnete induzierte Verkehrszusammenbruch bei ca. 18 km und 8:00 Uhr ist durch eine stromaufwärts verlaufende Welle aus synchronisiertem Verkehr (engl. moving synchronized flow pattern) ausgelöst worden.

A8-West, Wendlingen am Neckar, 10. November 2016

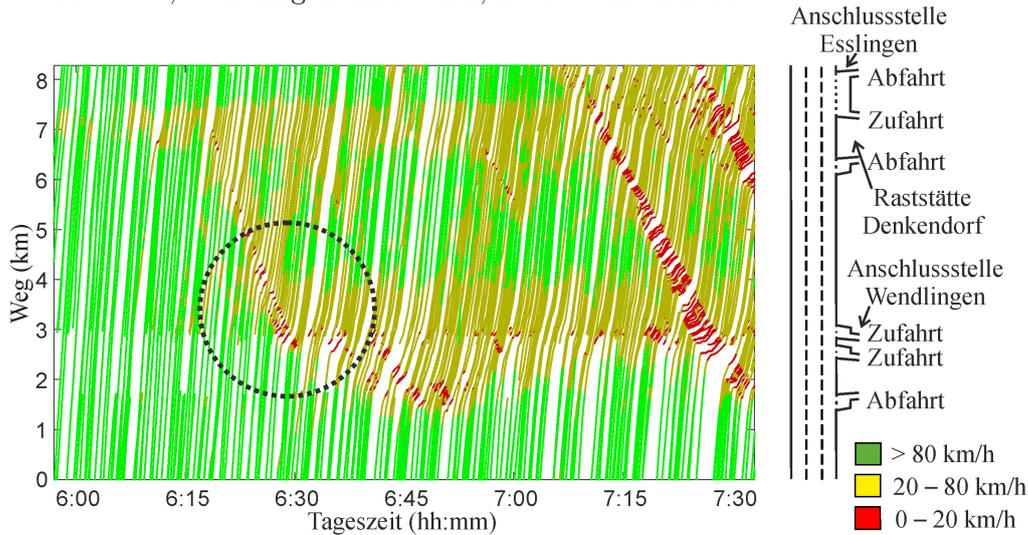


Abbildung 3.12: Empirisches Beispiel für einen induzierten Verkehrszusammenbruch, der durch eine stromaufwärts verlaufende Welle aus synchronisiertem Verkehr (engl. moving synchronized flow pattern) bei ca. 3.5 km und 6:30 Uhr ausgelöst wurde (im Gebiet, das durch einen gepunkteten Kreis markiert ist). Die verwendeten Floating-Car-Daten wurden am 10. November 2016 am Autobahnabschnitt A8-West bei der Anschlussstelle Wendlingen am Neckar gemessen.

A5-Nord, Friedberg, 16. November 2017

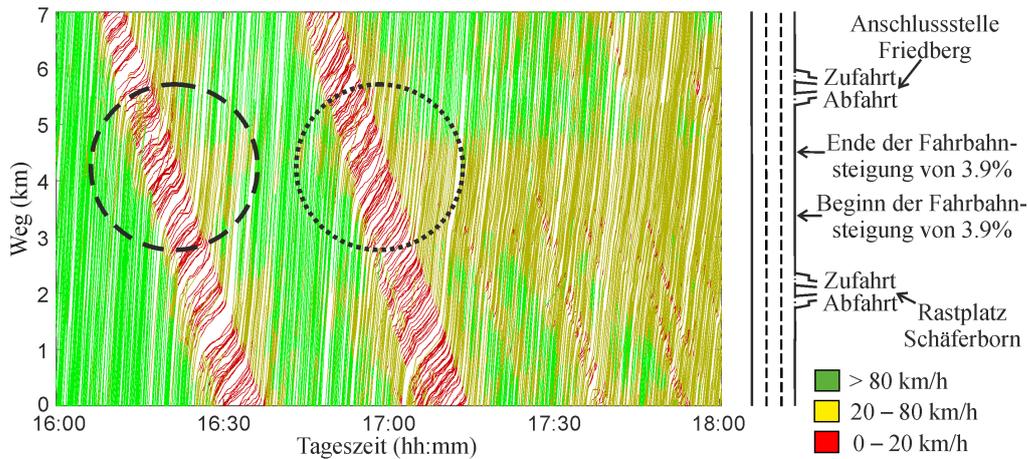


Abbildung 3.13: Empirisches Beispiel eines induzierten Verkehrszusammenbruchs, der durch einen sich bewegenden breiten Stau J bei ca. 4.5 km und 17:00 Uhr ausgelöst wurde (im Gebiet, das durch einen gepunkteten Kreis markiert ist). Im durch einen gestrichelten Kreis gekennzeichneten Gebiet wird kein Verkehrszusammenbruch ausgelöst. Die verwendeten Floating-Car-Daten wurden am 16. November 2017 am Autobahnabschnitt A5-Nord bei der Anschlussstelle Friedberg gemessen.

3.4.3 Mega-Stau

Nun werden die Verkehrsphänomene *sich bewegende schmale Staus* und *Mega-Staus* definiert und beschrieben.

Definition 3.21. *Sich bewegendes schmaler Stau (NJ):* Ein sich bewegendes schmaler Stau ist ein sich stromaufwärts bewegendes Stau (Definition 3.9), der nur aus Verkehrsphasenfronten besteht. Der Verkehrsfluss wird durch die Verkehrsphasenfronten nicht unterbrochen.

Daher weist ein sich bewegendes schmaler Stau die charakteristische Eigenschaft von J (Definition 3.10) nicht auf, d. h. die mittlere Geschwindigkeit der Verkehrsphasenfront wird nicht beibehalten. Deshalb wird er der Verkehrsphase S (Definition 3.11) zugeordnet. Ein sich bewegendes schmaler Stau wird im Englischen als *narrow moving jam* bezeichnet.

Definition 3.22. Mega-Stau (MJ): Ein Mega-Stau wird der Verkehrsphase J (Definition 3.10) zugeordnet. Es ist ein sich bewegendes breiter Stau J mit einer sehr großen räumlich-zeitlichen Ausbreitung und wird daher auch als sich bewegendes breiter Mega-Stau bezeichnet (siehe Abbildung 3.14). Nach Beginn der Entstehung eines Mega-Staus nimmt dessen räumliche Ausdehnung mit der Zeit zu, während der Großteil der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront (Definition 3.8) des Mega-Staus häufig an einer räumlichen Position fixiert ist. Ein Mega-Stau wird im Englischen als *mega wide moving jam* (kurz *mega-jam*) bezeichnet.

In Abbildung 3.14 sind zwei empirische Beispiele von Mega-Staus in Weg-Zeit-Diagrammen dargestellt. Die Floating-Car-Daten aus Abbildung 3.14 (a) wurden am 27. Oktober 2016 am Autobahnabschnitt A8-West bei der Anschlussstelle Wendlingen erhoben. Aus Abbildung 3.14 (b) wurden die Floating-Car-Daten am 6. November 2016 am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Pledelsheim erhoben.

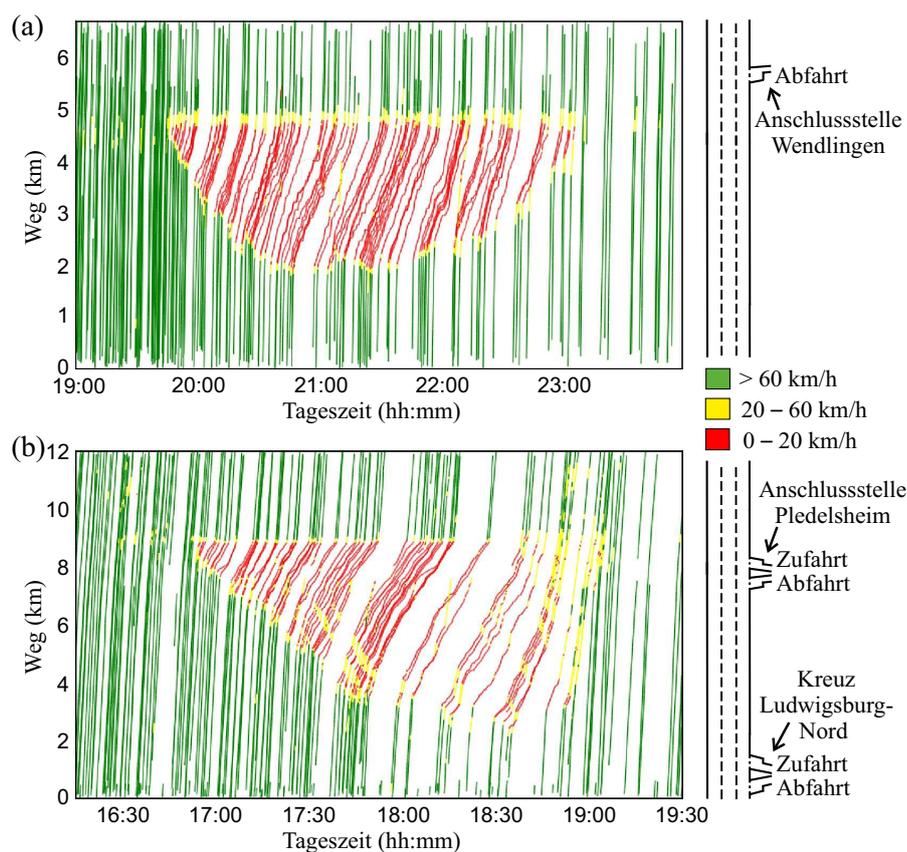


Abbildung 3.14: Empirische Beispiele von Mega-Staus, die basierend auf Floating-Car-Daten in Weg-Zeit-Diagrammen dargestellt sind. In (a) wurden die Daten am 27. Oktober 2016 am Autobahnabschnitt A8-West bei der Anschlussstelle Wendlingen erhoben und in (b) am 6. November 2016 am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Pledelsheim.

Eine mögliche Ursache von Mega-Staus sind Verkehrsunfälle, die häufig eine oder mehrere Fahrbahnsperren über längere Zeit zur Folge haben. Dadurch beginnt sich in sehr kurzer Zeit gestauter Verkehr an einer räumlich lokalen Position über längere Zeit zu bilden. In Abbildung 3.14 (a) und (b) beginnt der gestaute Verkehr sich bei $x^{(a)} \approx 4.75$ km und $t^{(a)} \approx 19:45$ Uhr bzw. $x^{(b)} \approx 8.9$ km und $t^{(b)} \approx 16:55$ Uhr zu bilden.

Die Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Zusammenhänge zwischen sich bewegenden breiten Staus (Definition 3.10), sich bewegenden schmalen Staus (Definition 3.21) und Mega-Staus (Definition 3.22) sind folgende:

- Alle drei sind dem gestauten Verkehr zugeordnet.
- Sich bewegende schmale Staus (NJ) sind der Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs zugeordnet, während Mega-Staus (MJ) der Verkehrsphase der sich bewegenden breiten Staus zugeordnet sind.
- Ein sich bewegendes schmaler Stau (NJ) kann durch zunehmende räumliche Ausbreitung über die Zeit in ein sich bewegendes breiten Stau (J) übergehen.
- Die Entstehung eines sich bewegenden schmalen Staus (NJ) im synchronisierten Verkehr ist häufig die Ursache der Entstehung eines sich bewegenden breiten Staus (J).
- Mehrere sich bewegende breite Staus (J), deren räumlich-zeitliche Ausbreitungen sich verstärken, können gemeinsam in ein Mega-Stau (MJ) übergehen.
- Ein Mega-Stau (MJ) weist eine wesentlich größere räumlich-zeitliche Ausbreitung auf als ein sich bewegendes breiter Stau (J) oder ein sich bewegendes schmaler Stau (NJ).
- Im Vergleich zu sich stromaufwärts bewegenden breiten Staus (J), die durch zwei zeitlich nah aufeinanderfolgenden Verkehrsphasenfronten beschränkt sind (siehe Abbildungen 3.4, 3.6 (b) und 3.7), weist ein Mega-Stau (MJ) eine relativ große zeitliche Ausdehnung auf.
- Der Verkehrsfluss wird durch die Verkehrsphasenfronten eines sich bewegenden breiten Staus (J) unterbrochen, jedoch nicht durch die Verkehrsphasenfronten eines sich bewegenden schmalen Staus (NJ).

3.5 Räumlich lokale Verkehrsstörungen an Autobahnengstellen vor Verkehrszusammenbrüchen in Verkehrssimulationsdaten

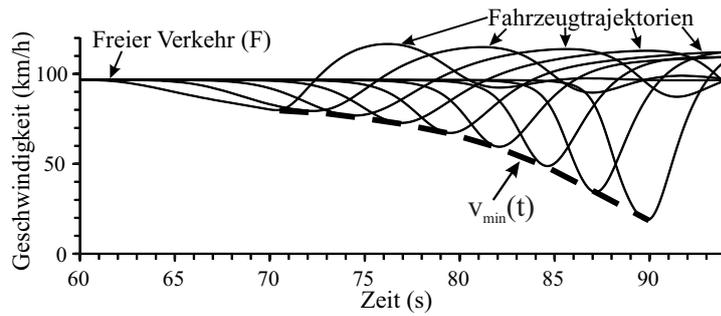
Um den verkehrstheoretischen Hintergrund von räumlich lokalen Verkehrsstörungen an Autobahnengstellen vor Verkehrszusammenbrüchen zu verstehen, ist es zunächst wichtig auf zwei Typen der *Verkehrsflussinstabilitäten des synchronisierten Verkehrs* einzugehen.

Definition 3.23. $S \rightarrow J$ Verkehrsflussinstabilität: Die $S \rightarrow J$ Verkehrsflussinstabilität ist eine Instabilität des synchronisierten Verkehrs (S), die zur Entstehung von sich bewegenden breiten Staus (J) führen kann. Sie führt zu einer fallenden Geschwindigkeitsabnahme-Welle aufgrund von verstärktem Bremsen (engl. *over-deceleration*, Definition 3.5) von Fahrern. $S \rightarrow J$ Verkehrsflussinstabilität wird in Kurzform als $S \rightarrow J$ Instabilität bezeichnet.

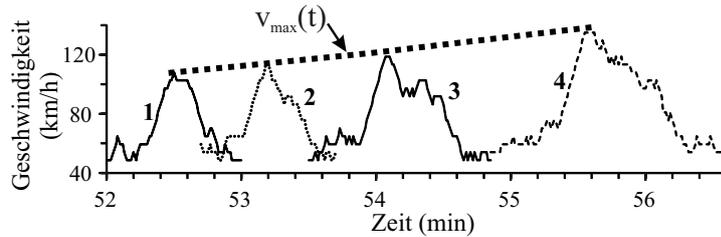
Definition 3.24. $S \rightarrow F$ Verkehrsflussinstabilität: Die $S \rightarrow F$ Verkehrsflussinstabilität ist eine Instabilität des synchronisierten Verkehrs (S), die zur Entstehung des freien Verkehrs (F) führen kann. Sie führt zu einer steigenden Geschwindigkeitszunahme-Welle aufgrund von erhöhter Beschleunigung (engl. over-acceleration, Definition 3.4) von Fahrern. $S \rightarrow F$ Verkehrsflussinstabilität wird in Kurzform als $S \rightarrow F$ Instabilität bezeichnet.

Eine häufig verwendete Verkehrsflussinstabilität *des freien Verkehrs* wird in [58, 59, 118, 119] eingeführt und beschrieben. Sie führt zu einer fallenden *Geschwindigkeitsabnahme-Welle* aufgrund von verstärktem Bremsen (engl. over-deceleration, Definition 3.5) von Fahrern [58, 59]. In Abbildung 3.15 (a) ist eine fallende Geschwindigkeitsabnahme-Welle im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm dargestellt und gekennzeichnet durch die gestrichelte Linie $v_{\min}(t)$. Die gestrichelte Linie $v_{\min}(t)$ ist durch das Verbinden der zeitlich lokalen Minima der Fahrzeuggeschwindigkeiten der Fahrzeugtrajektorien, die mit durchgezogenen Linien in Abbildung 3.15 (a) dargestellt sind, entstanden. Die $S \rightarrow J$ Verkehrsflussinstabilität (Definition 3.23) ist eine Instabilität *des synchronisierten Verkehrs* (S) und kann *im* synchronisierten Verkehr zu einer fallenden Geschwindigkeitsabnahme-Welle führen. Diese Geschwindigkeitsabnahme führt zu einem Verkehrsphasenübergang vom synchronisierten Verkehr zu sich bewegenden breiten Staus (J) ($S \rightarrow J$ Verkehrsphasenübergang) [42]. In Abbildung 3.16 ist die $S \rightarrow J$ Instabilität in einem Geschwindigkeit-Verkehrsdichte-Diagramm durch einen nach unten gerichteten Pfeil qualitativ dargestellt.

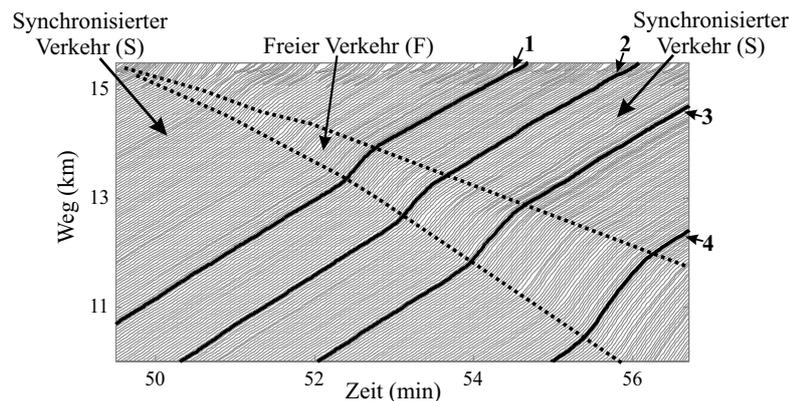
Die $S \rightarrow F$ Verkehrsflussinstabilität ist eine Instabilität *des synchronisierten Verkehrs* und wurde in der Drei-Phasen-Verkehrstheorie eingeführt [42, 100]. Sie kann *im* synchronisierten Verkehr zu einer steigenden *Geschwindigkeitszunahme-Welle* aufgrund von erhöhter Beschleunigung (engl. over-acceleration, Definition 3.4) von Fahrern führen [100]. In Abbildung 3.15 (b) ist eine steigende Geschwindigkeitszunahme-Welle im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm dargestellt und gekennzeichnet durch die gepunktete Linie $v_{\max}(t)$. Die gepunktete Linie $v_{\max}(t)$ ist durch das Verbinden der zeitlich lokalen Maxima der Fahrzeuggeschwindigkeiten der vier Fahrzeugtrajektorien, die im Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 3.15 (c) gekennzeichnet sind, entstanden. Die Geschwindigkeitszunahme von $v_{\max}(t)$ führt zu einem Verkehrsphasenübergang vom synchronisierten Verkehr in den freien Verkehr ($S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergang) [100]. Dadurch entsteht freier Verkehr, der sich, wie in Abbildung 3.15 (c) dargestellt, räumlich-zeitlich ausbreitet. In Abbildung 3.16 ist die $S \rightarrow F$ Instabilität in einem Geschwindigkeit-Verkehrsdichte-Diagramm durch einen nach oben gerichteten Pfeil qualitativ abgebildet.



(a) Häufig verwendete Verkehrsflussinstabilität des freien Verkehrs: fallende Geschwindigkeitsabnahme-Welle.



(b) S→F Verkehrsflussinstabilität des synchronisierten Verkehrs: steigende Geschwindigkeitszunahme-Welle.



(c) Simulierte Fahrzeugtrajektorien in einem Weg-Zeit-Diagramm.

Abbildung 3.15: (a) Darstellung einer häufig verwendeten Verkehrsflussinstabilität des freien Verkehrs im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm. Eine fallende Geschwindigkeitsabnahme-Welle entsteht aufgrund von verstärktem Bremsen (engl. over-deceleration, Definition 3.5) von Fahrern [58, 59]. (b) Darstellung der Verkehrsflussinstabilität des synchronisierten Verkehrs im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm. Eine steigende Geschwindigkeitszunahme-Welle entsteht aufgrund von erhöhter Beschleunigung (engl. over-acceleration, Definition 3.4) von Fahrern. (c) Darstellung von simulierten Fahrzeugtrajektorien in einem Weg-Zeit-Diagramm, das die S→F Verkehrsflussinstabilität beschreibt. Angepasst aus [100].

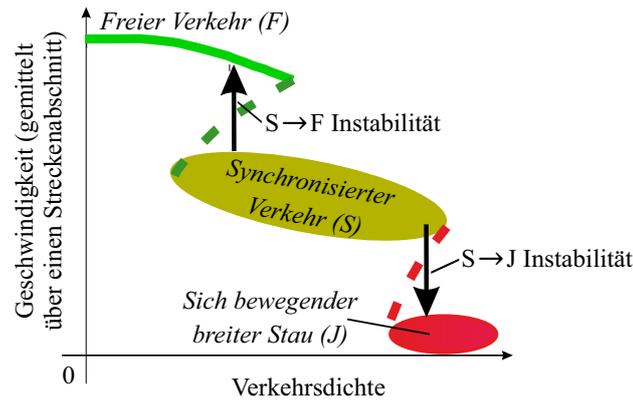


Abbildung 3.16: Qualitative Darstellung der zwei Instabilitäten des synchronisierten Verkehrs in einem Geschwindigkeit-Verkehrsdichte-Diagramm: $S \rightarrow J$ Instabilität und $S \rightarrow F$ Instabilität. Angepasst aus [100].

Es folgen zwei Definitionen über ein Verkehrsphänomen, das für die empirischen Untersuchungen dieser Arbeit eine wesentliche Rolle einnehmen wird.

Definition 3.25. $F \rightarrow S \rightarrow F$ *Verkehrsphasenübergänge:* Eine Abfolge der Verkehrsphasenübergänge vom freien Verkehr in den synchronisierten Verkehr und nach kurzer Zeit wieder vom synchronisierten Verkehr in den freien Verkehr zurück innerhalb eines räumlich begrenzten Gebietes wird als $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge bezeichnet. Die Zeit für diese Abfolge beträgt häufig zwischen 1 und 24 Minuten. Die Abfolge kann vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen eintreten und als räumlich begrenzte und zeitlich befristete Verkehrsstörung betrachtet werden. Ein $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergang wird in Kurzform als $F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergang bezeichnet.

Definition 3.26. $F \rightarrow S \rightarrow F$ *Gebiet:* Durch $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge (Definition 3.25) entsteht ein sich räumlich-zeitlich ausbreitendes Gebiet des synchronisierten Verkehrs. Dieses Gebiet wird als $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet bezeichnet. Es können mehrere $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete zeitlich nacheinander vor Verkehrszusammenbrüchen innerhalb eines räumlich begrenzten Gebietes an Autobahnengstellen eintreten.

In Verkehrssimulationen wurden 2015 vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen eine Abfolge von $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergängen beobachtet, die alle von $S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen gefolgt wurden [100]. Die $S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge werden verursacht durch die $S \rightarrow F$ Instabilität (Definition 3.24). Die Abfolge von $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergängen mit den darauffolgenden $S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen bilden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge (Definition 3.25) und die sich daraus räumlich-zeitlich ausbreitenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete des synchronisierten Verkehrs (Definition 3.26). Es wurden vor einem Verkehrszusammenbruch an Autobahnengstellen ein oder mehrere $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete beobachtet. In Abbildung 3.17 (b) und (c) sind die $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete mit gestrichelten Linien markiert.

Im freien Verkehr tritt zunächst ein $F \rightarrow S$ Phasenübergang an einer Autobahnengstelle ein. Dadurch entsteht synchronisierter Verkehr (siehe Abbildung 3.17 (b) und (c)). Die stromaufwärtige Verkehrsphasenfront des entstandenen synchronisierten Verkehrs breitet sich stromaufwärts aus. Durch die $S \rightarrow F$ Instabilität des synchronisierten Verkehrs wird die weitere Ausbrei-

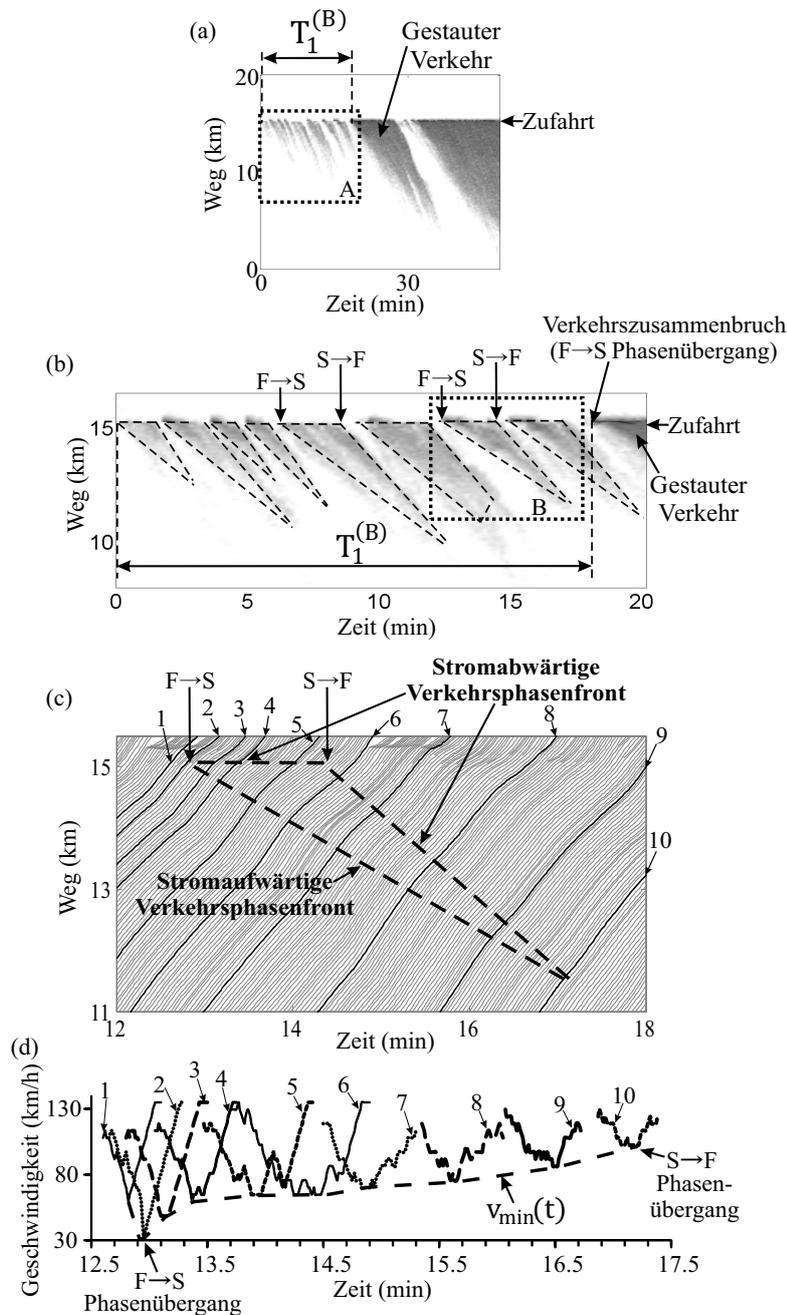


Abbildung 3.17: Verkehrssimulationen mit einer dauerhaften Geschwindigkeitsstörung an einer Autobahnengstelle (Zufahrt) zeigen eine Abfolge von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen vor einem Verkehrszusammenbruch [100]. (a) Alle Fahrzeugtrajektorien sind im Weg-Zeit-Diagramm abgebildet und nach den Fahrzeuggeschwindigkeiten wie folgt gefärbt: unter 20 km/h in Schwarz, zwischen 20–100 km/h in heller werdenden Graustufen und über 100 km/h in Weiß. (b) Datenausschnitt aus (a), der durch das Rechteck A markiert ist. In (a) und (b) ist die Zeitverzögerung bis zum Verkehrszusammenbruch durch $T_1^{(B)}$ gekennzeichnet. (c) Datenausschnitt aus (b), der durch das Rechteck B markiert ist. In (b) und (c) markieren gestrichelte Linien die $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete. (d) Fahrzeugtrajektorien, die durch die Zahlen 1–10 wie in (c) gekennzeichnet sind, sind in einem Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm abgebildet. Angepasst aus [100].

tung des gestauten Verkehrsmusters, das aus dem $F \rightarrow S$ Phasenübergang resultiert, unterbrochen. Es kommt zu *keinem* Verkehrszusammenbruch (Definition 3.20), aus dem ein großes gestautes Verkehrsmuster resultiert. Stattdessen entsteht wieder freier Verkehr. Deshalb löst sich der synchronisierte Verkehr auf. In Abbildung 3.17 (b) und (c) sind die sich auflösenden Gebiete des synchronisierten Verkehrs ($F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete) mit gestrichelten Linien markiert. Solange die Ausbreitung der gestauten Verkehrsmuster, die aus den $F \rightarrow S$ Phasenübergängen resultieren, an den Autobahnengstellen durch die $S \rightarrow F$ Instabilität unterbrochen wird, entstehen Abfolgen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergängen und es kommt zu keinem Verkehrszusammenbruch. Daher können $F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergänge zu einer Zeitverzögerung des Verkehrszusammenbruchs an Autobahnengstellen führen [100]. In Abbildung 3.17 (a) und (b) ist diese Zeitverzögerung mit $T_1^{(B)}$ gekennzeichnet.

In [100, 120] wurden anhand von Verkehrssimulationen an Autobahnengstellen beobachtet, dass innerhalb einer Abfolge von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergängen der $F \rightarrow S$ Phasenübergang und der darauffolgende $S \rightarrow F$ Phasenübergang zu nicht vorhersagbaren Zeitpunkten entstehen. Es wurden jedoch bisher keine allgemeinen Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten auf Basis empirischer Verkehrsdaten untersucht.

Zur Untersuchung von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergängen und Gebieten ist eine solide empirische Datengrundlage nötig. Hierfür wurden Floating-Car-Daten aus Europa und den USA mit über 42 Mrd. Fahrzeugpositionen (GPS-Positionen) aus den Jahren 2015 bis 2019 an ca.120 Tagen erhoben (siehe Tabelle 2.1 und Abbildung 2.4). Basierend auf dieser mikroskopischen Datengrundlage werden in Kapitel 4 allgemeine empirische Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten untersucht. Es werden Erkenntnisse gewonnen, wie sich $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete an verschiedenen Autobahnengstellen, an verschiedenen Autobahnabschnitten und an verschiedenen Tagen desselben Autobahnabschnittes verhalten.

Erkenntnisse über empirische Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen können in zukünftigen Anwendungen für die Verkehrstelematik und Verkehrsregelung genutzt werden. Zum Beispiel kann ein dynamisches Fahrverhalten in der Umgebung von Autobahnengstellen zur Reduzierung oder Verhinderung von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten entwickelt werden.

3.6 Eigenschaften von Zeitlücken zwischen Fahrzeugen und der Dauer von Spurwechselforgängen

In diesem Unterkapitel wird auf die Eigenschaften von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen eingegangen. Außerdem werden Eigenschaften von Einschervorgängen von Fahrzeugen bei Autobahnzufahrten und Eigenschaften von Spurwechselforgängen auf Autobahnen beschrieben. Ein Einschervorgang ist insbesondere ein Spurwechselforgang. Für einen Einschervorgang oder Spurwechselforgang eines Fahrzeugs ist die Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen eine sehr bedeutende Größe.

In [121] wurden Einschervorgänge von Fahrzeugen bei Autobahnzufahrten auf Basis von empirischen Daten, die anhand einer Kamera erhoben wurden, analysiert. Die Kamera wurde an einem Helikopter installiert. Es wurde festgestellt, dass die räumliche Position, an der der Einschervorgang stattfindet, vom Verkehrsfluss abhängt, der entweder gestauter Verkehr oder

freier Verkehr ist. Jedoch ist zu beachten, dass der in [121] verwendete Datensatz nur ein Zeitintervall von 35 Minuten und einen Autobahnabschnitt von 400 Metern umfasst. Daher konnten die folgenden zwei wichtigen Aspekte von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen nicht untersucht werden: statistische Eigenschaften und die Abhängigkeit des Verkehrs über verschiedene Tageszeiten.

Es gibt folgende zwei Arten von Spurwechselforgängen, die aus unterschiedlichen Gründen vorgenommen werden [122–128]:

- *Obligatorischer Spurwechsel* (engl. mandatory lane change): Beispielsweise ein Einschervorgang von einer Zufahrt auf eine Autobahn.
- *Diskretionärer Spurwechsel* (engl. discretionary lane change): Beispielsweise ein Spurwechsel auf die äußerste linke Fahrspur um schneller zu fahren.

Es wird erwartet, dass ein Spurwechsel, der zwingend durchgeführt werden muss, im Durchschnitt in kürzerer Zeit abgeschlossen wird als ein Spurwechsel, der nicht zwingend durchgeführt werden muss [129]. Außerdem werden obligatorische Spurwechsel auch bei relativ kleinen Raumlücken zwischen Fahrzeugen durchgeführt im Vergleich zu den Raumlücken, bei denen diskretionäre Spurwechsel durchgeführt werden [121, 123, 130–133].

Nun wird auf den Sicherheitsabstand zwischen zwei Fahrzeugen näher eingegangen. Die Straßenverkehrsordnung regelt den räumlichen Sicherheitsabstand eines Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht anhand von konkreten Werten sondern nur allgemein [134, 135]. Nach der gängigen Regel ergibt sich der minimale räumliche Sicherheitsabstand aus dem halben Tachowert in Metern. Dies entspricht einer Sicherheitszeitlücke von 1.8 Sekunden. Auf Autobahnen ist eine Sicherheitszeitlücke von 1.5 Sekunden nach der aktuellen Rechtsprechung grundsätzlich ausreichend [134]. Die Unterschreitung der Sicherheitszeitlücke wird als Ordnungswidrigkeit gewertet, außer wenn es sich um eine zeitlich *schnell vorübergehende* Unterschreitung handelt. Zu einem Bußgeld kommt es, wenn der räumliche Sicherheitsabstand 50 % des halben Tachowertes in Metern unterschreitet und es sich um keine zeitlich *schnell vorübergehende* Unterschreitung handelt [134]. Damit wird ein Bußgeld verhängt, wenn die Sicherheitszeitlücke weniger als 0.9 Sekunden beträgt.

Seit einigen Jahren wird in die Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen viel investiert. Das Ziel ist es ein Fahrzeug zu entwickeln, das in der Lage ist ohne ein Eingreifen eines Menschen im realen Verkehr sicher zu fahren. Daher muss ein automatisiertes Fahrzeug auch in der Lage sein einen Spurwechselforgang auf der Autobahn und einen Einschervorgang bei einer Autobahnzufahrt sicher und nach allen Verkehrsregeln durchzuführen. Beispielsweise muss die Sicherheitszeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt vom automatisierten Fahrzeug eingehalten werden. Jedoch wird die Sicherheitszeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug von Menschen im realen Verkehr auf Autobahnen oft nicht eingehalten. In Abbildung 3.18 ist eine relative und kumulierte Häufigkeitsverteilung von Zeitlücken von realen Fahrern zu den vorausfahrenden Fahrzeugen dargestellt [136]. Der verwendete Datensatz umfasst ein Zeitintervall von 9 Stunden und wurde von 24 Fahrern auf Autobahnen erhoben. Es wurden nur Zeitlücken betrachtet, die bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von mehr als 60 km/h gemessen wurden. Dadurch wird der zusätzliche Einfluss von gestautem Verkehr auf das Fahrverhalten und somit auf die Zeitlückenverteilung vermieden. Die Zeitlücke eines betrachteten

Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug wird berechnet durch den räumlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug geteilt durch die Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs. Aus Abbildung 3.18 ergibt sich, dass die Sicherheitszeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug häufig nicht eingehalten wird. Mehr als 80 % der Zeitlücken unterschreiten die Sicherheitszeitlücke von 1.5 Sekunden. Daher könnte ein Fahrzeug, das die Sicherheitszeitlücke zu jedem Zeitpunkt einhält wie beispielsweise ein automatisiertes Fahrzeug, große Schwierigkeiten im realen Verkehr und insbesondere bei Spurwechsel- und Einschervorgängen haben.

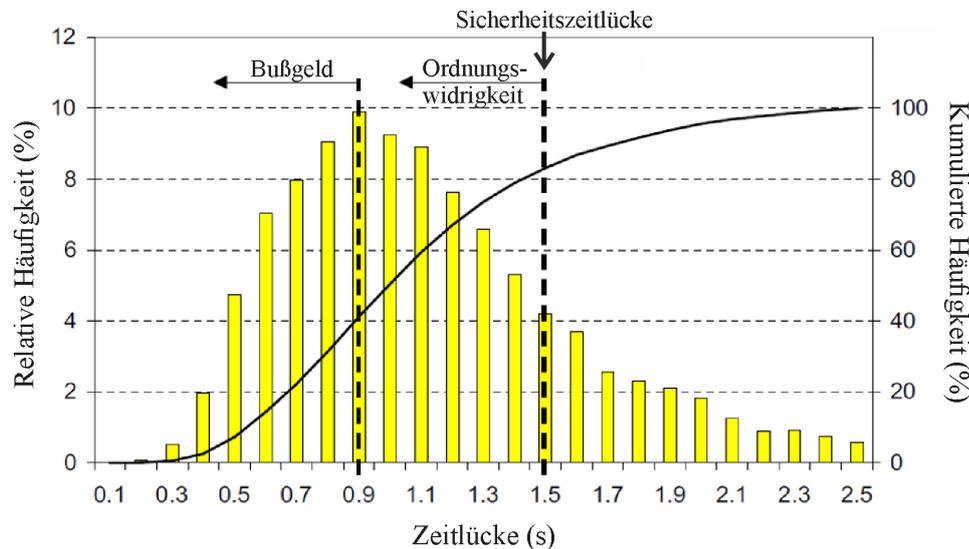


Abbildung 3.18: Relative und kumulierte Häufigkeitsverteilung von Zeitlücken von realen Fahrern zu den vorausfahrenden Fahrzeugen. Der verwendete Datensatz umfasst ein Zeitintervall von 9 Stunden und wurde von 24 Fahrern auf Autobahnen erhoben. Es wurden nur Zeitlücken betrachtet, die bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von mehr als 60 km/h gemessen wurden. Die Sicherheitszeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug wird häufig nicht eingehalten. Angepasst aus [136].

Zusätzlich zu den Zeitlückenverteilungen wird nun der Spurwechselvorgang näher betrachtet. Eine wichtige Größe beim Spurwechselvorgang auf Autobahnen ist die *Dauer eines Spurwechselvorganges*, die ein Fahrzeug für einen vollständigen Spurwechselvorgang benötigt. Für einen *sicheren* Spurwechselvorgang ist jedoch nicht nur die Dauer eines Spurwechselvorganges relevant, sondern auch Sicherheitszeitlücken zum vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeug. Die Dauer eines Spurwechselvorganges zusammen mit den Sicherheitszeitlücken wird als *Dauer eines sicheren Spurwechselvorganges* bezeichnet. Da es sich bei einem Einschervorgang bei Autobahnzufahrten ebenfalls um einen Spurwechsel handelt, bezieht sich die Dauer eines sicheren Spurwechselvorganges auch auf einen Einschervorgang. Es ist zu beachten, dass die Dauer eines sicheren Spurwechselvorganges viele Einflussfaktoren hat, wie z. B. die Verkehrslage, der Straßenzustand, die Fahrbahnsteigung oder die Wetterbedingung.

In [137] wurde die Dauer von Spurwechselvorgängen anhand von real gemessenen NGSIM-Daten ([22]) detailliert untersucht. Die NGSIM-Daten wurden durch Kameras erhoben und bestehen aus realen Fahrzeugtrajektorien auf mehrspurigen Autobahnen. Die Ergebnisse aus [137] zeigen, dass die häufigste Dauer eines Spurwechselvorganges ca. 3 Sekunden beträgt. Aus der Häufigkeitsverteilung der Dauer der gemessenen Spurwechselvorgänge ergibt sich der Mittelwert und die Standardabweichung von 4.01 bzw. 2.31 Sekunden. Wenn jedoch zusätzlich

die Vorbereitung eines Spurwechselforganges berücksichtigt wird, wird für die durchschnittliche Dauer eines Spurwechselforganges der Wertebereich von 5–6 Sekunden als realistischer betrachtet [137]. Unter der Annahme, dass bei den gemessenen Spurwechselforgängen die Sicherheitszeitlücken befolgt wurden, gelten die angegebenen Werte für die Dauer eines Spurwechselforganges auch für die Dauer eines *sicheren* Spurwechselforganges.

Mit zunehmenden Verkehrsmessungen des realen Verkehrs ist auch die Verfügbarkeit von gemessenen Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen gestiegen. Detektordaten (Kapitel 2.2.1) sind fahrspurgenau aufgelöst und werden durch Induktionsschleifen erhoben, die an bestimmten räumlichen Positionen auf Autobahnen installiert sind. Mit Detektordaten ist es möglich Zeitlücken zwischen zwei aufeinanderfolgenden und durch die Induktionsschleifen detektierten Fahrzeugen zu ermitteln, jedoch nur an bestimmten räumlichen Positionen [138]. Anhand von Floating-Car-Daten (Kapitel 2.2.2) können *keine* Zeitlücken oder räumlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ermittelt werden. Durch Drohnen Daten (Kapitel 2.2.3) sind sehr detaillierte Eigenschaften von Fahrzeugtrajektorien fahrspurgenau verfügbar. Diese Eigenschaften umfassen die räumlichen Abstände und Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. In [28] und [137] wurden Häufigkeitsverteilungen von Zeitlücken und räumlichen Abständen zwischen Fahrzeugen basierend auf empirischen Verkehrsdaten von Autobahnabschnitten und vom Stadtverkehr untersucht.

3.7 Einschränkungen existierender Systeme und Bedarf neuer Lösungen

Empirischer Nachweis der Eigenschaften von Verkehrsgebieten vor Verkehrszusammenbrüchen

Verkehrstheorien formulieren abstrakte und theoretische Vorstellungen über den Verkehrsablauf. Die Aussagen der Verkehrstheorien über den Verkehr müssen mit empirischen Verkehrsdaten verifiziert werden. In der Drei-Phasen-Verkehrstheorie existierten theoretische Aussagen über den Verkehr, die jedoch noch nicht ausreichend empirisch nachgewiesen wurden (siehe Kapitel 3.5). In dieser Arbeit werden die fehlenden empirischen Nachweise zu der folgenden Aussage erbracht: Es existieren vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen räumlich-zeitliche Verkehrsgebiete mit höherer Verkehrsdichte und geringerer mittlerer Geschwindigkeit als außerhalb des Verkehrsgebietes (siehe Kapitel 4). Diese Verkehrsgebiete werden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete genannt. Darüber hinaus existierten bisher keine empirischen Nachweise der Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten.

$F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete liefern neue Erkenntnisse über die Eigenschaften von empirischen Verkehrszusammenbrüchen. Da ein Verkehrszusammenbruch und die daraus resultierende Staubildung im realen Verkehr und in den Verkehrstheorien eine zentrale Rolle spielen, ist eine neue Erkenntnis über ein Verkehrsphänomen vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen ein wichtiger Schritt zum besseren Verständnis dieser Verkehrszusammenbrüche. Das empirisch nachgewiesene Verkehrsphänomen ($F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet) und dessen Eigenschaften können auch als Anforderungen an Verkehrstheorien und Verkehrsmodelle dienen und zur Verbesserung der Abbildung des realen Verkehrs beitragen.

Lange Zeit waren für zuverlässige Verkehrsrekonstruktionen keine ausreichenden Mengen an Floating-Car-Daten verfügbar. Durch die Nutzung der Navigation in Fahrzeugen und auf Smartphones wurden immer mehr Floating-Car-Daten im Verkehr erhoben. In dieser Arbeit wird auf Basis einer großen Menge an Floating-Car-Daten räumlich-zeitliche Verkehrsphänomene auf verschiedenen Autobahnabschnitten und an unterschiedlichen Tagen detailliert untersucht. Die Durchdringungsrate der Floating-Car-Daten der untersuchten Streckenabschnitte beträgt ca. 2.1 – 3.6 % und ermöglicht auch die Erkennung und Rekonstruktion von Verkehrsphänomenen, die sich nur über ein kleines räumlich-zeitliches Gebiet ausbreiten. Die Untersuchung des Verkehrs unter Verwendung einer derartigen großen Datengrundlage von Floating-Car-Daten verteilt über Europa und den USA dient der Erkennung von neuen und der Bestätigung von existierenden Verkehrsphänomenen mit hoher Zuverlässigkeit.

Fahrspurabhängige Verkehrsstrukturen auf Autobahnen basierend auf Drohnen-daten

Zur Verkehrserfassung existieren viele Technologien wie beispielsweise Detektorschleifen, die den Gesamtverkehrsfluss messen, oder Fahrzeuge, die ihre Positionsdaten über eine zentrale Kommunikation an einen Server senden (Floating-Car-Daten). Eine Technologie, die in den letzten Jahren an Aufmerksamkeit gewonnen hat, sind Drohnen. Drohnenmessungen auf Autobahnen ermöglichen eine vollständige Erfassung aller Fahrzeugtrajektorien des Autobahnabschnittes, der von der Kamera der Drohne erfasst wird. Insbesondere können Fahrzeuge fahrspurgenau aufgelöst und Spurwechsellvorgänge erkannt werden. Anhand von Floating-Car-Daten ist die fahrspurgenaue Auflösung heute noch nicht möglich. Mit sowohl Detektordaten als auch Floating-Car-Daten können Spurwechsellvorgänge nicht erkannt werden. Es existieren zu realen fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen auf Autobahnen bisher kaum empirische Untersuchungen basierend auf einer so hochgenauen Datengrundlage wie Drohnenmessungen. In dieser Arbeit wird der Verkehr auf Autobahnen anhand einiger Beispiele mit Drohnen-daten untersucht (siehe Kapitel 5). Die Daten zeigen vielfältige Verkehrsstrukturen im realen Verkehr auf Autobahnen. Die Heterogenität und Komplexität von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen des gestauten Verkehrs auf Autobahnen werden nachgewiesen. Gestaute und dichte Verkehrsstrukturen können auf allen Fahrspuren zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen und sich räumlich-zeitlich unterschiedlich ausbreiten.

Es werden neue Erkenntnisse über die fahrspurabhängigen Eigenschaften des Verkehrs auf Autobahnen beschrieben. Eine Verkehrsuntersuchung basierend auf vollständigen und hoch aufgelösten Drohnen-daten ist ein wichtiger Schritt zum besseren Verständnis des Verkehrsablaufs auf Autobahnen. Außerdem tragen die fahrspurabhängig beobachteten Verkehrsstrukturen zur Verbesserung der Abbildung des realen Verkehrs bei.

Analyse der Wahrscheinlichkeiten von Einscher- und Spurwechsellvorgängen durch die Betrachtung von verkehrsphasenabhängigen Zeitlücken zwischen Fahrzeugen

Aktuelle Forschungsprojekte wie beispielsweise *MEC-View* ([7]) zeigen, dass es einige technische Herausforderungen beim Einscheren von automatisierten Fahrzeugen gibt. Im Projekt *MEC-View* ist das Ziel in eine Vorfahrtsstraße im autonomen Fahrbetrieb einzuscheren [7].

Eine Randbedingung beim Einscheren von automatisierten Fahrzeugen ist es, eine ausreichend große Zeitlücke zu finden, die einen sicheren Einschervorgang ermöglicht. Eine ausreichend große Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ist auch erforderlich beim sicheren Spurwechsel auf Autobahnen oder beim sicheren Einscheren von Autobahnzufahrten auf die Autobahn. Die bislang erfolgten Untersuchungen von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen lassen vermuten, dass Zeitlücken sehr stark von der Verkehrsinfrastruktur und dem Verkehrszustand abhängen. Ein wichtiges Szenario für das automatisierte Fahren sind Autobahnen. In dieser Arbeit werden Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen auf Autobahnen untersucht (siehe Kapitel 6). Es werden empirische Nachweise zu verkehrsphasen- und fahrspurabhängigen Zeitlücken auf Autobahnen basierend auf Detektordaten geliefert. Darüber hinaus werden Wahrscheinlichkeiten von Einschere- und Spurwechsellmöglichkeiten auf Basis von verkehrsphasenabhängigen Zeitlücken untersucht.

Da das automatisierte Fahren auf Autobahnen relevant ist und dafür sichere Einschere- und Spurwechsellvorgänge auf Autobahnen gewährleistet werden müssen, liefern die Erkenntnisse über verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken einen Beitrag zur technischen Machbarkeit eine ausreichend große Zeitlücke für den Einschere- oder Spurwechsellvorgang auf Autobahnen zu finden. Mit dieser Herausforderung werden automatisierte Fahrzeuge im realen Verkehr konfrontiert sein. Die Erkenntnisse dienen dazu, das Einschere- und Spurwechsellverhalten von automatisierten Fahrzeugen besser zu verstehen und zu verbessern. Außerdem tragen die Eigenschaften von verkehrsphasen- und fahrspurabhängigen Zeitlücken zum besseren Verständnis des Verkehrsablaufs auf Autobahnen bei.

4 Eigenschaften von Verkehrsphänomenen im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen

Seit vielen Jahrzehnten wurden räumlich-zeitliche Eigenschaften des realen Verkehrs überwiegend anhand von Detektordaten untersucht (Kapitel 2.2.1) [10]. Ein Vorteil von Detektordaten ist, dass der Gesamtverkehr über einen langen Straßenabschnitt, an dem ausreichend viele Detektoren installiert sind, durch gemittelte Werte gemessen werden kann. In Abbildung 4.1 sind empirische Beispiele von gestauten Verkehrsphänomenen in Weg-Zeit-Diagrammen an verschiedenen Autobahnabschnitten dargestellt, die anhand von Detektormessungen und den Verkehrsmodellen *ASDA* und *FOTO* rekonstruiert wurden [20]. Jedoch ist ein wesentlicher Nachteil von Detektordaten, dass räumlich-zeitliche Verkehrsphänomene *zwischen* den Detektorpositionen nicht direkt gemessen werden können. Detaillierte Messungen zwischen den Detektorpositionen sind notwendig zur Erkennung und Rekonstruktion von dynamischen Verkehrsphänomenen, die sich insbesondere in Raum und Zeit über ein kleines Gebiet ausbreiten.

Der Vorteil von Verkehrsdaten aus Messungen mit Videokameras ist die sehr hohe Auflösung des Verkehrs mit der Detektierung aller einzelnen Fahrzeugtrajektorien. Der entscheidende Nachteil ist jedoch, dass die räumliche Erfassung von Videokameras stark limitiert ist und nur einen kurzen Streckenabschnitt erfasst. Im bekannten *NGSIM-Datensatz* ([22]) werden beispielsweise nur maximal 600–700 Meter eines Straßenabschnittes erfasst. Gestauter Verkehr, der sich über mehrere Kilometer ausbreitet, kann damit nicht rekonstruiert werden. Da für die Verkehrsbeobachtungen in diesem Kapitel Verkehrsdaten von Autobahnabschnitten über mehrere Kilometer notwendig sind, sind die empirischen Verkehrsdaten aus dem *NGSIM-Datensatz* ([22]) für die Untersuchungen dieses Kapitels ungeeignet.

Für eine zuverlässige Rekonstruktion und Analyse von räumlich-zeitlichen Verkehrsphänomenen waren lange Zeit keine ausreichenden Mengen an Floating-Car-Daten aus vernetzten Fahrzeugen verfügbar. Dies änderte sich aber mit der Zeit. Durch die Nutzung einer über eine zentrale Kommunikation verbundener Navigation in Fahrzeugen oder durch Smartphones wurden immer mehr anonymisierte Fahrzeugpositionsdaten (Floating-Car-Daten) erhoben (Kapitel 2.2.2). Der Zugang zu diesen empirischen Verkehrsdaten ermöglicht es räumlich-zeitliche Verkehrsphänomene auf verschiedenen Autobahnabschnitten und an unterschiedlichen Tagen detailliert zu untersuchen. Neben Verkehrsphänomene, die sich über viele Kilometer ausbreiten, ist es mit Floating-Car-Daten insbesondere auch möglich Verkehrsphänomene, die sich nur über ein kleines räumlich-zeitliches Gebiet ausbreiten, zu erkennen und über Raum und Zeit zu rekonstruieren.

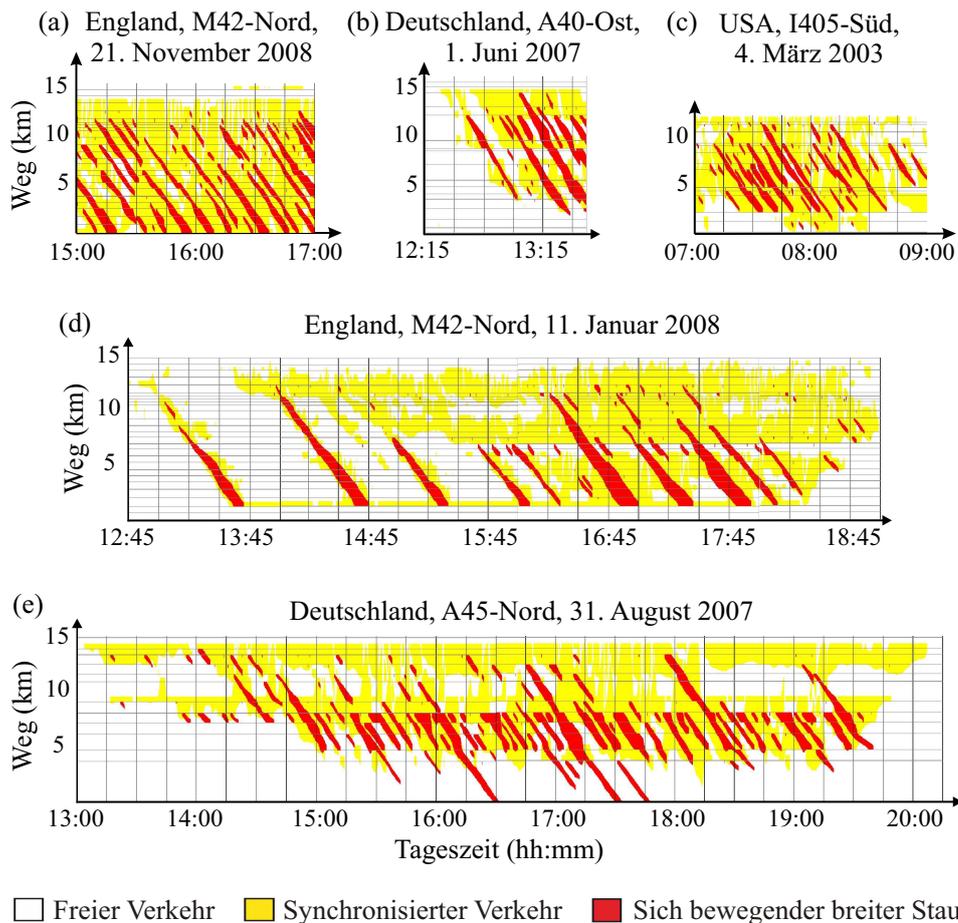


Abbildung 4.1: Empirische Beispiele von gestauten Verkehrsphänomenen in Weg-Zeit-Diagrammen an verschiedenen Autobahnabschnitten, die anhand von Detektormessungen und den Verkehrsmodellen *ASDA* und *FOTO* rekonstruiert wurden [20]. (a) und (d): England, M42-Nord. (b) und (e): Deutschland, A40-Ost bzw. A45-Nord. (c): USA, I405-Süd. Angepasst aus [20].

Eine Abfolge der Verkehrsphasenübergänge vom freien Verkehr in den synchronisierten Verkehr und wieder vom synchronisierten Verkehr in den freien Verkehr zurück wird als $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge bezeichnet (Definition 3.25). Das daraus resultierende und sich räumlich-zeitlich ausbreitende Gebiet des synchronisierten Verkehrs wird $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet genannt (Definition 3.26).

Durch Navigationsgeräte und das Navigieren über Smartphones in Fahrzeugen sind Floating-Car-Daten von einer großen Fahrzeugflotte verfügbar. Die vermutlich erste Studie zu empirischen Verkehrszusammenbrüchen ($F \rightarrow S$ Phasenübergängen, Definition 3.20) basierend auf Floating-Car-Daten erfolgte in [20]. Jedoch war die Menge an Floating-Car-Daten in [20] eher als zu gering einzuschätzen, um räumlich-zeitliche Verkehrsphänomene zu erkennen und zu rekonstruieren, die sich nur über ein kleines räumlich-zeitliches Gebiet ausbreiten wie z. B. $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen. Deshalb wurde in dieser Arbeit eine große Menge an Floating-Car-Daten aus Europa und den USA verwendet mit einem durchschnittlichen Zeitabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen von weniger als 34 Sekunden. Die Durchdringungsrate der Floating-Car-Daten der untersuchten Streckenabschnitte beträgt ca. 2.1 – 3.6%. Dies ermöglicht es, im freien Verkehr vor Verkehrszusammen-

brüchen mit hoher Genauigkeit $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete an Autobahnengstellen zu erkennen und zu rekonstruieren.

In diesem Kapitel werden neue Erkenntnisse über die empirischen Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen basierend auf Floating-Car-Daten gewonnen. Anfangs wird ein Algorithmus zur Verkehrsphasenerkennung auf Basis von Floating-Car-Daten vorgestellt. Anschließend werden unterschiedliche Autobahninfrastrukturen und die zugehörigen Autobahnengstellen beschrieben. Kapitel 4.3 handelt von den allgemeinen Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten vor Verkehrszusammenbrüchen. Danach wird die Komplexität von sich auflösenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten diskutiert. In Kapitel 4.5 wird eine deskriptive Analyse der Zeitintervalle von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten gemacht. Abschließend werden die Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst.

4.1 Verkehrsphasenerkennung basierend auf Floating-Car-Daten

Um den Verkehr und die darin beobachteten $F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergänge basierend auf Floating-Car-Daten untersuchen zu können, müssen zunächst die Verkehrsphasen ermittelt werden. Dies erfolgt mit einer Methode zur Verkehrszustandserkennung der Fahrzeugtrajektorien, die in Raum und Zeit durch Floating-Car-Daten verfügbar sind [20]. Dadurch werden die Verkehrszustandsübergänge und Verkehrsphasenübergänge mit einer gewissen räumlich-zeitlichen Unschärfe ermittelt (Definition 3.16 und 3.17).

Ein Verkehrszustandsübergang einer Fahrzeugtrajektorie ist die räumlich-zeitliche Position der Fahrzeugtrajektorie, an dem das Fahrzeug eine Verkehrsphasenfront kreuzt (Definition 3.7). Ein Verkehrszustandsübergang einer Fahrzeugtrajektorie vom freien Verkehr in den synchronisierten Verkehr wird als F_S Verkehrszustandsübergang bezeichnet. Mit den Verkehrsphasen freier Verkehr (F), synchronisierter Verkehr (S) und sich bewegender breiter Stau (J) ergeben sich daher sechs Arten von Verkehrszustandsübergängen:

F_S , F_J , S_F , S_J , J_F und J_S Verkehrszustandsübergänge.

In Abbildung 4.2 sind alle Arten der Verkehrszustandsübergänge und Verkehrsphasenübergänge dargestellt. In diesem Kapitel wird der Fokus auf F_S und S_F Zustandsübergängen liegen.

Der Unterschied zwischen einem $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergang und einem F_S Verkehrszustandsübergang ist wie folgt. Im freien Verkehr entsteht aufgrund eines $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergangs synchronisierter Verkehr an einer Autobahnengstelle. Die stromaufwärtige Verkehrsphasenfront des synchronisierten Verkehrs breitet sich stromaufwärts aus. Ein Fahrzeug, das nachdem ein $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergang aufgetreten ist die stromaufwärtige Verkehrsphasenfront des synchronisierten Verkehrs kreuzt, erlebt nicht den $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergang an der Autobahnengstelle, sondern einen Übergang von der Verkehrsphase freier Verkehr in die Verkehrsphase synchronisierter Verkehr an der stromaufwärtigen Verkehrsphasenfront des synchronisierten Verkehrs. In Abbildung 4.2 ist der Unterschied zwischen einem $F \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergang und einem F_S Verkehrszustandsübergang anhand der eingezeichneten Fahrzeugtrajektorien illustriert. Aufgrund dieses Unterschieds werden für die Übergänge verschiedene Bezeichnungen verwendet: $F \rightarrow S$ für den Verkehrsphasenübergang und F_S für den Verkehrszustandsübergang.

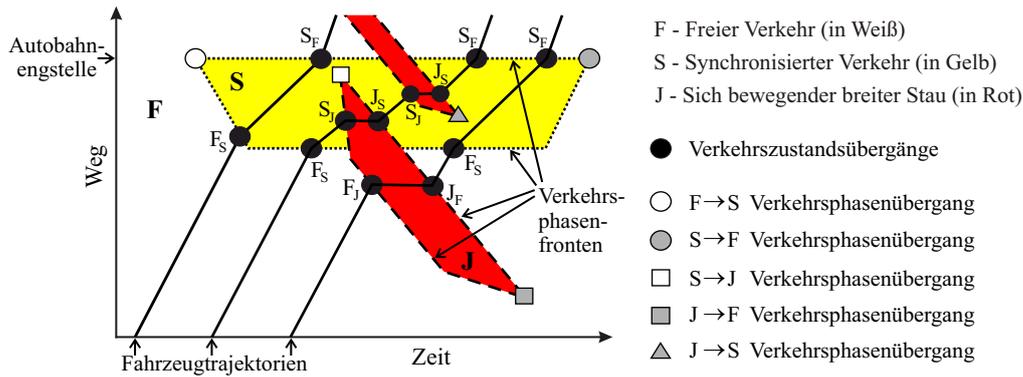


Abbildung 4.2: Veranschaulichung aller Arten der Verkehrszustandsübergänge und Verkehrsphasenübergänge an einer Autobahnengstelle im Weg-Zeit-Diagramm mit drei abgebildeten Fahrzeugtrajektorien: F_S , F_J , S_F , S_J , J_F , J_S Verkehrszustandsübergänge und $F \rightarrow S$, $S \rightarrow F$, $S \rightarrow J$, $J \rightarrow F$, $J \rightarrow S$ Verkehrsphasenübergänge.

Zur räumlich-zeitlich approximativen Erkennung aller Verkehrszustandsübergänge einer Fahrzeugtrajektorie anhand von Floating-Car-Daten werden Bedingungen sowohl an die Fahrzeuggeschwindigkeit als auch an die Zeit gestellt. Wenn das Fahrzeug länger als ein vorgegebenes Zeitintervall schneller oder langsamer als eine vorgegebene Geschwindigkeit fährt, wird ein Verkehrszustandsübergang erkannt. In Tabelle 4.1 sind die Bedingungen an die Geschwindigkeit und die Zeit einer Fahrzeugtrajektorie für alle Verkehrszustandsübergänge aufgelistet. Die Geschwindigkeitsschwellenwerte und Zeit-Schwellenwerte, die in diesem Kapitel verwendet werden, sind ebenfalls angegeben. Diese Werte haben sich aus empirischen Untersuchungen von mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsdaten und aus der Verkehrsmodellierung aus [20] ergeben. Beispielsweise wird ein F_S Zustandsübergang für ein sich im freien Verkehr befindendes Fahrzeug erkannt, wenn das Fahrzeug länger als 15 s (t_{FS}) unter 60 km/h (v_{FS}) fährt. Die räumlich-zeitliche Position des erkannten Verkehrszustandsüberganges der Fahrzeugtrajektorie befindet sich zeitlich am Anfang des Zeit-Schwellenwertes mit der zugehörigen räumlichen Position. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Fahrzeugpositionen der in diesem Kapitel verwendeten Floating-Car-Daten in 5- oder 10-Sekunden-Schritten erhoben wurden. Diese räumlich-zeitliche Auflösung ist für die beschriebene Methode zur Erkennung der Verkehrszustandsübergänge zu niedrig. Deshalb werden durch lineare Interpolation zwischen zwei auf-

Tabelle 4.1: Modell zur approximativen Erkennung von Verkehrszustandsübergängen entlang von Fahrzeugtrajektorien basierend auf Schwellenwerte für Geschwindigkeitsintervalle und Zeitintervalle [20].

Verkehrszustandsübergänge	Bedingung an die Geschwindigkeit	Bedingung an das Zeitintervall
F_S Zustandsübergang	$v < v_{FS} = 60 \text{ km/h}$	$t > t_{FS} = 15 \text{ s}$
S_F Zustandsübergang	$v > v_{SF} = 65 \text{ km/h}$	$t > t_{SF} = 10 \text{ s}$
S_J Zustandsübergang	$v < v_{SJ} = 10 \text{ km/h}$	$t > t_{SJ} = 25 \text{ s}$
J_S Zustandsübergang	$v > v_{JS} = 20 \text{ km/h}$	$t > t_{JS} = 20 \text{ s}$
F_J Zustandsübergang	$v < v_{FJ} = 15 \text{ km/h}$	$t > t_{FJ} = 25 \text{ s}$
J_F Zustandsübergang	$v > v_{JF} = 60 \text{ km/h}$	$t > t_{JF} = 10 \text{ s}$

einanderfolgenden Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten die räumlichen Positionen und Geschwindigkeiten in 1-Sekunde-Schritten ermittelt. Auf diese höher aufgelösten Daten wird die in Abbildung 4.2 und der Tabelle 4.1 beschriebene Methode zur Erkennung der Verkehrszustandsübergänge angewandt.

Es wird angemerkt, dass die Methode zur Erkennung der Verkehrszustandsübergänge *nicht* den initialen Verkehrszustand einer Fahrzeugtrajektorie ermittelt, sondern nur die Zustandsübergänge zwischen den Verkehrsphasen. Daher wird die Methode durch die Bestimmung der initialen Verkehrsphase der Fahrzeugtrajektorien wie folgt erweitert. Sei v_0 und v_1 der erste (initiale) bzw. zweite Geschwindigkeitswert einer Fahrzeugtrajektorie und seien die Verkehrsphasen freier Verkehr, synchronisierter Verkehr und sich bewogender breiter Staus abgekürzt durch F, S bzw. J. Dann wird die initiale Verkehrsphase I_{Phase} dieser Fahrzeugtrajektorie mit Verwendung der Schwellenwerte aus Tabelle 4.1 durch folgende Bedingungen bestimmt:

- (i) Wenn $v_0 > v_{\text{SF}}$ ($= 65 \text{ km/h}$), dann gilt: $I_{\text{Phase}} = \text{F}$.
- (ii) Wenn $v_0 > v_{\text{FS}}$ ($= 60 \text{ km/h}$) und $v_0 \leq v_{\text{SF}}$ ($= 65 \text{ km/h}$), dann gilt:
 - a) $I_{\text{Phase}} = \text{F}$ für $v_1 - v_0 \leq 0$ und
 - b) $I_{\text{Phase}} = \text{S}$ für $v_1 - v_0 > 0$.
- (iii) Wenn $v_0 > v_{\text{JS}}$ ($= 20 \text{ km/h}$) und $v_0 \leq v_{\text{FS}}$ ($= 60 \text{ km/h}$), dann gilt: $I_{\text{Phase}} = \text{S}$.
- (iv) Wenn $v_0 > v_{\text{SJ}}$ ($= 10 \text{ km/h}$) und $v_0 \leq v_{\text{JS}}$ ($= 20 \text{ km/h}$), dann gilt:
 - a) $I_{\text{Phase}} = \text{S}$ für $v_1 - v_0 \leq 0$ und
 - b) $I_{\text{Phase}} = \text{J}$ für $v_1 - v_0 > 0$.
- (v) Wenn $v_0 \leq v_{\text{SJ}}$ ($= 10 \text{ km/h}$), dann gilt: $I_{\text{Phase}} = \text{J}$.

Durch die Erkennung der Verkehrszustandsübergänge der Fahrzeugtrajektorien anhand von Floating-Car-Daten können mögliche $\text{F} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{F}$ Verkehrsphasenübergänge vor Verkehrszusammenbrüchen erkannt und untersucht werden. In Abbildung 4.6 (b) und (c) ist ein erstes empirisches Beispiel basierend auf Floating-Car-Daten mit den erkannten F_S und S_F Zustandsübergängen der Fahrzeugtrajektorien gegeben. Durch die Zustandsübergänge werden $\text{F} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{F}$ Gebiete in Abbildung 4.6 (a) und (b) erkannt.

4.2 Infrastrukturen der Autobahnengstellen

Da die unterschiedlichen Autobahnabschnitte für die untersuchten empirischen Beispiele und für die Erkenntnisse dieser Arbeit eine wichtige Rolle spielen, wird in diesem Unterkapitel näher auf die Autobahnabschnitte und deren Infrastruktur eingegangen.

Eine Autobahnzufahrt (kurz *Zufahrt*) und eine Autobahnausfahrt (kurz *Ausfahrt*) ermöglichen Fahrzeugen in die Autobahn einzufahren bzw. sie zu verlassen. Die Autobahnzufahrt und Autobahnausfahrt werden auch als Autobahnauffahrt bzw. Autobahnabfahrt bezeichnet.

Definition 4.1. Autobahninfrastruktur: Als Autobahninfrastruktur wird die bauliche Infrastruktur eines Autobahnabschnittes mit der Anzahl an Fahrspuren und der räumlichen Lage der Zufahrten und Ausfahrten bezeichnet. Die Autobahnabschnitte werden meist in der Draufsicht abgebildet (siehe Abbildung 4.3). Mögliche Fahrbahnsteigungen an den Autobahnabschnitten werden auch dargestellt (siehe Abbildung 4.4). Eine Autobahninfrastruktur wird in Kurzform als Infrastruktur bezeichnet.

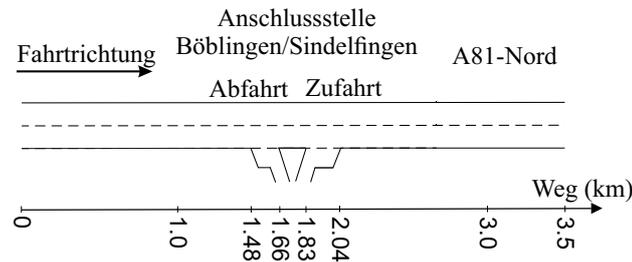
Eine Autobahnanschlussstelle (kurz *Anschlussstelle*) an einem Autobahnabschnitt besteht aus Zufahrten und Abfahrten in beide Fahrtrichtungen und dient als Knotenpunkt zwischen der Autobahn und einem weiteren Straßennetz (siehe Abbildungen 4.3 und 4.4 (a)). Ein Autobahnkreuz (kurz *Kreuz*) und ein Autobahndreieck sind Anschlussstellen von einer bestimmten Bauform.

Eine *Verkehrsbeeinflussungsanlage* (kurz VBA) ist eine dynamische Anzeige von Verkehrsinformationen an Verkehrszeichenbrücken (kurz VZB) und ist fast ausschließlich an Autobahnen installiert. Sie soll in erster Linie die Verkehrssicherheit erhöhen und Staus reduzieren. Eine *Streckenbeeinflussungsanlage* (kurz SBA) ist eine bestimmte Art einer Verkehrsbeeinflussungsanlage. Sie kann durch fahrspurgenaue Anzeige von Wechselverkehrszeichen die Geschwindigkeit an Autobahnabschnitten beschränken oder sogar einzelne Fahrspuren als gesperrt schalten.

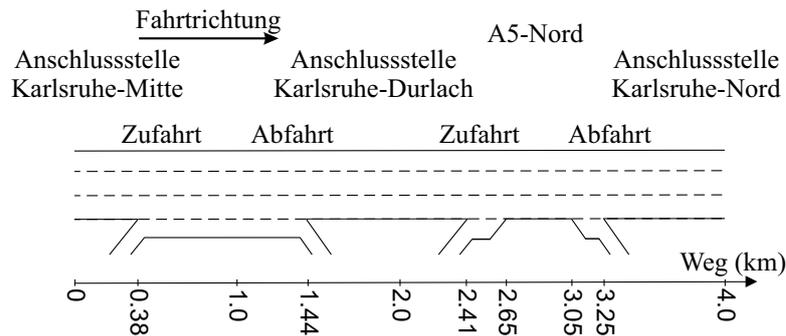
Die *Höhe über dem Meeresspiegel* ist eine absolute Höhenangabe mit dem mittleren Meeresspiegel als Nullniveau. Sie dient der Höhenangabe von Erdoberflächen. Daraus lassen sich Fahrbahnsteigungen leicht ermitteln (siehe Abbildung 4.4 (b)).

Nun werden ein paar Autobahnabschnitte und Autobahninfrastrukturen von den in diesem Kapitel untersuchten Beispielen näher beschrieben. Die empirische Datengrundlage der Untersuchungen sind Floating-Car-Daten. In Abbildung 4.3 (a) ist die Autobahninfrastruktur des zweispurigen Autobahnabschnittes A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen abgebildet [139]. Sie erstreckt sich über 3.5 km und besteht aus einer Abfahrt und einer Zufahrt. Die untersuchten Floating-Car-Daten an dieser Autobahninfrastruktur sind in den Abbildungen 4.6, 4.7 und 4.12 (a) dargestellt. In Abbildung 4.3 (b) ist die Autobahninfrastruktur des dreispurigen Autobahnabschnittes A5-Nord bei den Anschlussstellen Karlsruhe-Mitte, Karlsruhe-Durlach und Karlsruhe-Nord abgebildet [139]. Sie erstreckt sich über 4 km und besteht aus der Zufahrt der Anschlussstelle Karlsruhe-Mitte, der Abfahrt und der Zufahrt der Anschlussstelle Karlsruhe-Durlach und der Abfahrt der Anschlussstelle Karlsruhe-Nord. Der Beschleunigungstreifen bei der Zufahrt der Anschlussstelle Karlsruhe-Mitte geht über in den Verzögerungstreifen bei der Abfahrt der Anschlussstelle Karlsruhe-Durlach, sodass zwischen 0.38 km und 1.44 km der Autobahnabschnitt vierspurig ist. Die untersuchten Floating-Car-Daten an dieser Autobahninfrastruktur sind in den Abbildungen 4.8, 4.9 und 4.12 (c) dargestellt. In Abbildung 4.4 (a) ist die Autobahninfrastruktur des dreispurigen Autobahnabschnittes A81-Nord bei der Anschlussstelle Stuttgart-Feuerbach abgebildet [139]. Sie erstreckt sich über 4 km und besteht aus einer Abfahrt und einer Zufahrt. Zusätzlich gibt es eine Fahrbahnsteigung von 1.0 % zwischen 1.5 km und 2 km und eine Fahrbahnsteigung von 3.8 % zwischen 2 km und 3.04 km. Darüber hinaus ist eine Verkehrsbeeinflussungsanlage bei 3.04 km installiert. In Abbildung 4.4 (b) ist das genaue Höhenprofil des Autobahnabschnittes dargestellt. Die untersuchten Floating-Car-Daten an dieser Autobahninfrastruktur sind in den Abbildungen 4.5,

4.10, 4.11, 4.12 (b) und A.6 dargestellt. Weitere Beispiele für Autobahninfrastrukturen sind im Anhang A.1 in den Abbildungen A.1 und A.2 dargestellt.



(a) Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen.

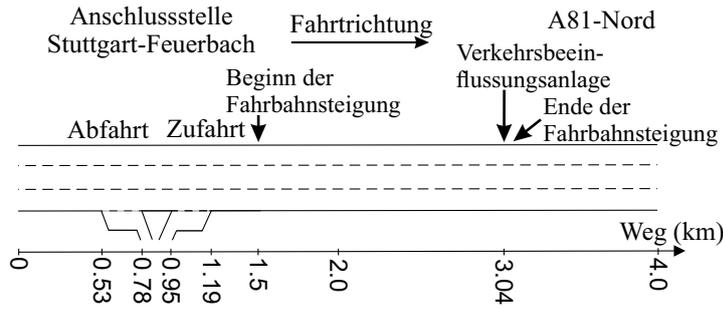


(b) Autobahnabschnitt A5-Nord bei der Anschlussstelle Karlsruhe-Nord.

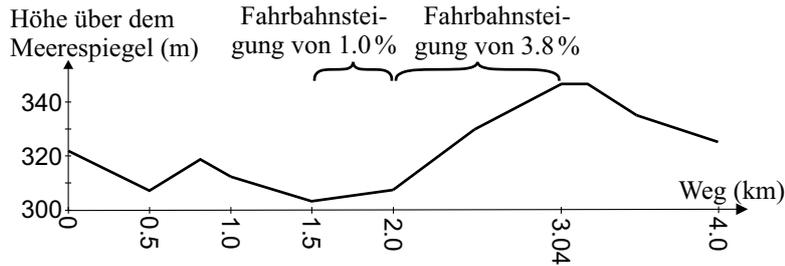
Abbildung 4.3: Autobahninfrastrukturen der Autobahnabschnitte A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen in (a) und A5-Nord bei der Anschlussstelle Karlsruhe-Nord in (b) in Deutschland. Floating-Car-Daten werden an den in (a) und (b) dargestellten Autobahninfrastrukturen in den Abbildungen 4.6, 4.7 und 4.12 (a) bzw. in den Abbildungen 4.8, 4.9 und 4.12 (c) untersucht. Angepasst aus [139].

Abbildung 4.5 zeigt die Darstellung der Autobahninfrastruktur (Abbildung 4.4 (a)) entlang der Wegachse rechts neben dem Weg-Zeit-Diagramm. Im Weg-Zeit-Diagramm sind die zur Autobahninfrastruktur korrespondierenden Floating-Car-Daten über Raum und Zeit abgebildet. Die Floating-Car-Daten wurden am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Stuttgart-Feuerbach am 11. November 2016 erhoben. Diese Darstellung der Autobahninfrastruktur rechts neben dem Weg-Zeit-Diagramm wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet.

Verkehrersphänomene und deren Eigenschaften im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen werden an den Autobahninfrastrukturen aus Abbildung 4.3 und 4.4 und für viele weitere Beispiele in den Kapiteln 4.3, 4.4 und 4.5 auf Basis von Floating-Car-Daten detailliert untersucht. Im Anhang A.1 sind weitere empirische Beispiele mit den zugehörigen Autobahninfrastrukturen dargestellt (Abbildungen A.1 bis A.6). Es wird angemerkt, dass die in diesem Kapitel beschriebenen Beispiele nur einen kleinen Teil der Beispiele ausmachen, die auf Basis von Floating-Car-Daten untersucht wurden.



(a) Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Stuttgart-Feuerbach mit den Fahrbahnsteigungen aus (b).



(b) Höhenprofil des Autobahnabschnittes A81-Nord aus (a) mit den Fahrbahnsteigungen.

Abbildung 4.4: Autobahninfrastruktur des Autobahnabschnittes A81-Nord (Deutschland) in (a) und das korrespondierende Höhenprofil mit den Fahrbahnsteigungen in (b). Floating-Car-Daten wurden an dieser Autobahninfrastruktur untersucht und sind in den Abbildungen 4.5, 4.10, 4.11, 4.12 (b) und A.6 dargestellt. Angepasst aus [139].

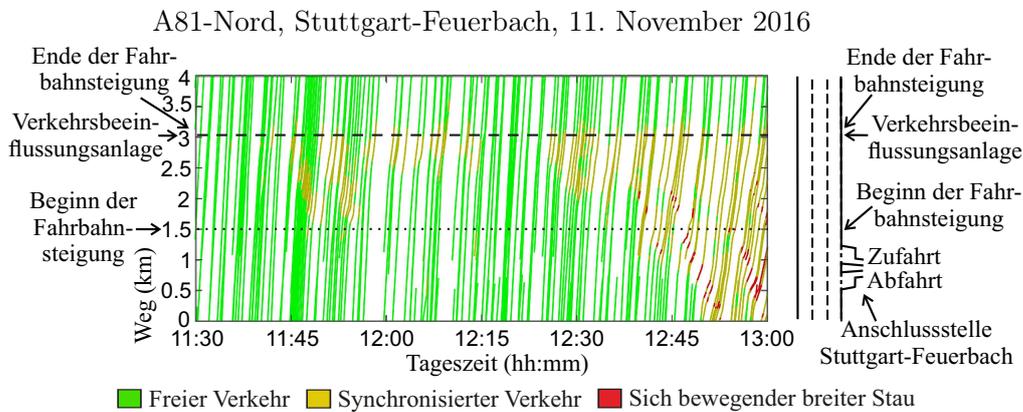


Abbildung 4.5: Darstellung der Autobahninfrastruktur (Abbildung 4.4 (a)) entlang der Wegachse rechts neben dem Weg-Zeit-Diagramm. Die über Raum und Zeit abgebildeten Floating-Car-Daten werden am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Stuttgart-Feuerbach am 11. November 2016 erhoben. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

4.3 Allgemeine Eigenschaften von Verkehrsphänomenen vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen

Es werden allgemeine Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen untersucht. Zur Rekonstruktion der Verkehrsphänomene werden Floating-Car-Daten an verschiedenen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen und an unterschiedlichen Wochentagen verwendet. Zunächst werden zwei wichtige Definitionen zu $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten formuliert und eine Hypothese aufgestellt.

Definition 4.2. Zeitintervall eines $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes: Das Zeitintervall eines $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes ist definiert durch den zeitlichen Abstand zwischen dem zugehörigen $F \rightarrow S$ Phasenübergang zum Zeitpunkt $t_1^{F \rightarrow S}$ und dem darauffolgenden $S \rightarrow F$ Phasenübergang zum Zeitpunkt $t_1^{S \rightarrow F}$ und entspricht $T_S^{FSF}(1)$ (siehe Abbildung 4.6 (a)). Es gilt $T_S^{FSF}(1) = t_1^{S \rightarrow F} - t_1^{F \rightarrow S}$.

Definition 4.3. Zeitintervall zwischen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten: Das Zeitintervall zwischen zwei $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten ist definiert durch den zeitlichen Abstand zwischen dem $S \rightarrow F$ Phasenübergang des ersten $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes zum Zeitpunkt $t_1^{S \rightarrow F}$ und dem $F \rightarrow S$ Phasenübergang des zweiten $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes zum Zeitpunkt $t_2^{F \rightarrow S}$ und entspricht $T_F^{FSF}(1, 2)$ (siehe Abbildung 4.6 (a)). Es gilt $T_F^{FSF}(1, 2) = t_2^{F \rightarrow S} - t_1^{S \rightarrow F}$. Der zeitliche Abstand zwischen dem $S \rightarrow F$ Phasenübergang des zeitlich letzten (n -ten) $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes zum Zeitpunkt $t_n^{S \rightarrow F}$ und dem darauffolgenden Verkehrszusammenbruch ($F \rightarrow S$ Phasenübergang) zum Zeitpunkt $t_{Vz}^{F \rightarrow S}$ entspricht $T_F^{FSF}(n, Vz)$. Hierfür gilt $T_F^{FSF}(n, Vz) = t_{Vz}^{F \rightarrow S} - t_n^{S \rightarrow F}$.

Aus den Definitionen 4.2 und 4.3 ergeben sich für eine Beobachtung von insgesamt n zeitlich aufeinanderfolgenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten vor einem Verkehrszusammenbruch folgende Variablen für $n \geq 1$:

$$\begin{aligned} T_S^{FSF}(i) &= t_i^{S \rightarrow F} - t_i^{F \rightarrow S} \quad \text{für } i = 1, \dots, n, \\ T_F^{FSF}(i, i+1) &= t_{i+1}^{F \rightarrow S} - t_i^{S \rightarrow F} \quad \text{für } i = 1, \dots, n-1, \\ T_F^{FSF}(n, Vz) &= t_{Vz}^{F \rightarrow S} - t_n^{S \rightarrow F}. \end{aligned}$$

Anhand der empirischen Ergebnissen dieses Kapitels wird folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese 4.1. *Im freien Verkehr können sich vor Verkehrszusammenbrüchen räumlich begrenzte und zeitlich befristete Verkehrsphänomene an Autobahnengstellen bilden, die als $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete bezeichnet werden. Diese Gebiete weisen allgemeine Eigenschaften und Gemeinsamkeiten an verschiedenen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen und an unterschiedlichen Wochentagen auf.*

Die Untersuchung der Hypothese 4.1 setzt eine solide empirische Verkehrsdatengrundlage voraus. Floating-Car-Daten aus Fahrzeugflotten verteilt über Europa und den USA, die in dieser Arbeit verwendet wurden (Kapitel 2.3), erfüllen diese Voraussetzung.

Es werden einzelne Beispiele zu $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten mit Weg-Zeit-Diagrammen und Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen einzelner Fahrzeugtrajektorien auf Basis von Floating Car-Daten an verschiedenen Wochentagen analysiert. Folgende Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen werden in diesem Kapitel betrachtet:

- An der in Abbildung 4.3 (a) dargestellten Autobahninfrastruktur entsteht eine durch eine *Zufahrt* verursachte Autobahnengstelle (Abbildungen 4.6 und 4.7).
- An der in Abbildung 4.3 (b) dargestellten Autobahninfrastruktur entsteht eine durch eine *Abfahrt* verursachte Autobahnengstelle (Abbildungen 4.8 und 4.9).
- An der in Abbildung 4.4 (c) dargestellten Autobahninfrastruktur entsteht eine durch eine *Fahrbahnsteigung* (Abbildung 4.4 (d)) und eine Streckenbeeinflussungsanlage verursachte Autobahnengstelle (Abbildungen 4.10 und 4.11).

Hierbei erfolgt die approximative Erkennung der Verkehrszustandsübergänge der Fahrzeugtrajektorien basierend auf Floating-Car-Daten nach dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Verfahren. Damit werden die Verkehrsphasenübergänge und die Verkehrsphasen freier Verkehr (F), synchronisierter Verkehr (S) und sich bewegender breiter Stau (J) mit einer gewissen räumlich-zeitlichen Unschärfe ermittelt. In diesem Kapitel wird der Fokus auf den Verkehrsphasenübergängen $F \rightarrow S$ und $S \rightarrow F$ und auf den Verkehrszustandsübergängen F_S und S_F liegen.

4.3.1 Verkehrssphänomene an Zufahrten

In Abbildung 4.6 (a) sind Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen für die in Abbildung 4.3 (a) dargestellte Autobahninfrastruktur in einem Weg-Zeit-Diagramm abgebildet. Die Daten wurden am 25. Oktober 2016 erhoben. Die Autobahnengstelle ist durch die *Zufahrt* bei 1.83–2.04 km verursacht worden. Die approximative Erkennung der Verkehrszustandsübergänge der Fahrzeugtrajektorien und die daraus resultierenden Verkehrsphasen wurden nach dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Verfahren ermittelt. Die abgebildeten Fahrzeugtrajektorien sind entsprechend in Grün für freien Verkehr, in Gelb für synchronisierten Verkehr und in Rot für sich bewegende breite Staus gefärbt. Abbildung 4.6 (b) ist ein Datenausschnitt aus Abbildung 4.6 (a), der durch das Rechteck A markiert ist. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Verkehrsphasenfronten zwischen freiem Verkehr und synchronisiertem Verkehr. In Abbildung 4.6 (c) sind einzelne Fahrzeugtrajektorien, die mit den Zahlen 1–6 gekennzeichnet sind, in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen dargestellt. Diese Fahrzeugtrajektorien sind auch im Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 4.6 (b) markiert.

Der Verkehrszusammenbruch, aus dem ein großes räumlich-zeitliches gestautes Verkehrsmuster resultiert, entsteht in Abbildung 4.6 (a) stromabwärts von der Zufahrt bei $x_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 2.3$ km und $t_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 16:13:45$ Uhr und ist durch „Verkehrszusammenbruch ($F \rightarrow S$ Phasenübergang)“ gekennzeichnet. Das in Abbildung 4.6 (a) beobachtete Verkehrsmuster mit dem Verkehrszusammenbruch und dem daraus resultierenden gestauten Verkehr ist ein typisches Beispiel für viele weitere Autobahnengstellen, die basierend auf Floating-Car-Daten aus den Jahren 2015 bis 2019 untersucht wurden.

Zeitlich bevor der Verkehrszusammenbruch in Abbildung 4.6 (a) entsteht, bilden sich zwei Abfolgen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen. Die erste Abfolge bildet sich durch einen $F \rightarrow S$ Phasenübergang bei $t_1^{F \rightarrow S} \approx 15:28$ Uhr und einen nach kurzer Zeit darauffolgenden $S \rightarrow F$ Phasenübergang bei $t_1^{S \rightarrow F} \approx 15:44:30$ Uhr. Die zweite Abfolge der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge entsteht durch einen $F \rightarrow S$ Phasenübergang bei $t_2^{F \rightarrow S} \approx 15:56$ Uhr und einen nach

A81-Nord, Böblingen/Sindelfingen, 25. Oktober 2016

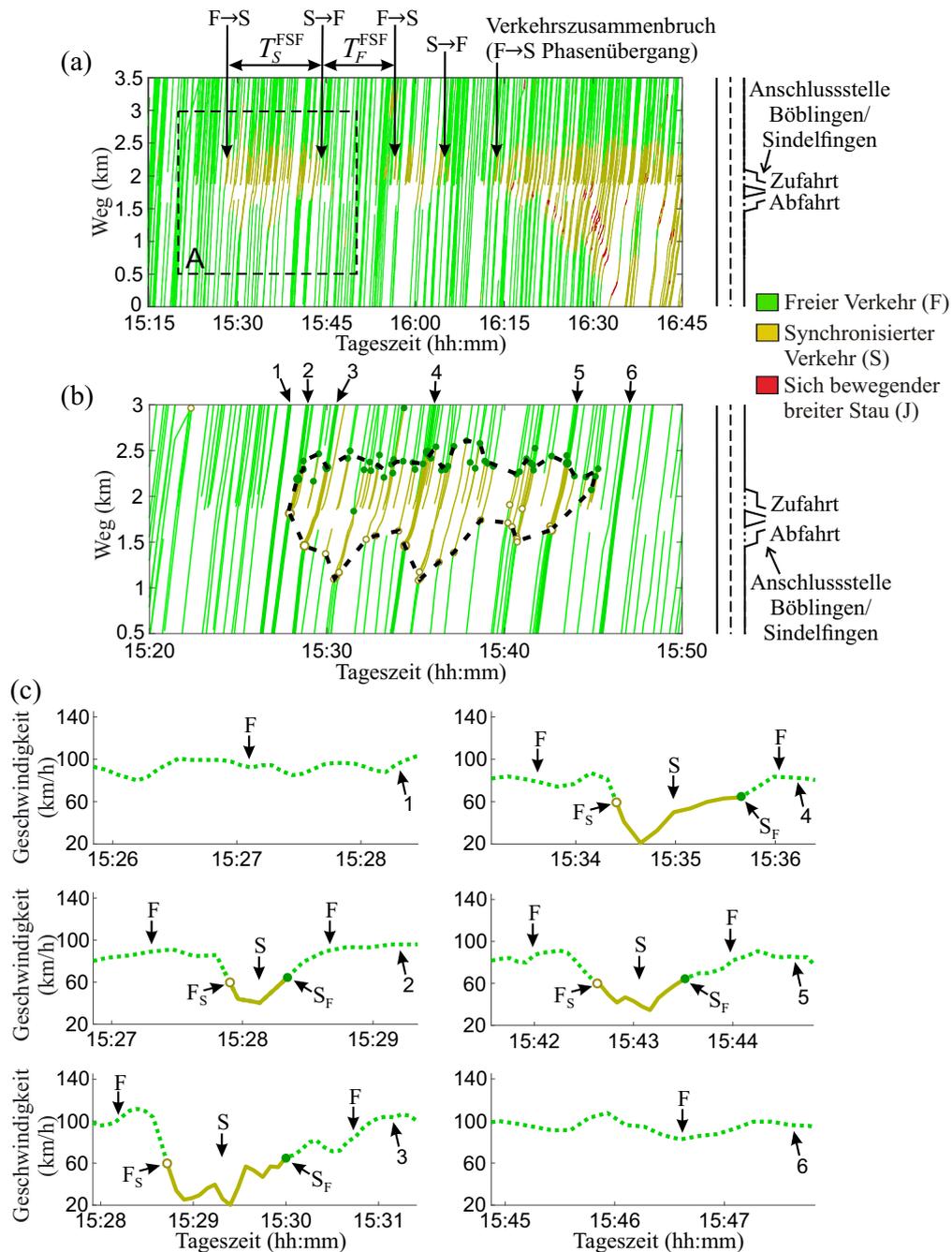


Abbildung 4.6: Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen vom 25. Oktober 2016. (a) Darstellung in einem Weg-Zeit-Diagramm an der in Abbildung 4.3 (a) dargestellte Autobahninfrastruktur. Verkehrsphasenübergänge und Zeitintervalle von F \rightarrow S \rightarrow F Gebieten (Definitionen 4.2 und 4.3) sind gekennzeichnet. Eine Zufahrt verursacht die Autobahnengstelle. (b) Datenausschnitt aus (a), der durch das Rechteck A markiert ist. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Verkehrsphasenfronten. (c) Fahrzeugtrajektorien sind in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen mit den Verkehrszustandsübergängen und Verkehrsphasen abgebildet und durch die gleichen Zahlen 1–6 aus (b) markiert. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

kurzer Zeit darauffolgenden $S \rightarrow F$ Phasenübergang bei $t_2^{S \rightarrow F} \approx 16:04$ Uhr. In Abbildung 4.6 (a) sind die Phasenübergänge durch „ $F \rightarrow S$ “ und „ $S \rightarrow F$ “ gekennzeichnet. Die räumlich-zeitlichen Gebiete des synchronisierten Verkehrs, die durch die $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge entstanden sind, werden als $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete bezeichnet. In Abbildung 4.6 (b) ist das erste der beiden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete durch gestrichelte Linien markiert.

In Abbildung 4.6 (a) kann beobachtet werden, dass die durch die $F \rightarrow S$ Phasenübergänge bei $t_1^{F \rightarrow S} \approx 15:28$ Uhr, $t_2^{F \rightarrow S} \approx 15:56$ Uhr und $t_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 16:13:45$ Uhr entstandenen synchronisierten Verkehrsgebiete sich stromaufwärts bewegen. Darüber hinaus sind die stromabwärtigen Verkehrsphasenfronten (Definition 3.8) der synchronisierten Verkehrsgebiete unter Berücksichtigung der GPS-Genauigkeit der Floating-Car-Daten bei $x_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 2.3$ km fixiert und befindet sich ca. 0.3 km stromabwärts vom Ende der Zufahrt. Diese räumliche Position wird als der effektive Ort der Autobahnengstelle bezeichnet (Definition 3.15). Der effektive Ort der Autobahnengstelle stimmt für dieses empirische Beispiel mit der räumlichen Position des Verkehrszusammenbruchs mit einer gewissen räumlichen Unschärfe überein.

Die $F \rightarrow S$ Phasenübergänge führen zu sich stromaufwärts bewegenden Gebieten des synchronisierten Verkehrs. Wie in Abbildung 4.6 (b) beobachtet werden kann, breitet sich von der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront des synchronisierten Verkehrsgebietes bei $x_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 2.3$ km die stromaufwärtige Verkehrsphasenfront nur ca. 1.3 km stromaufwärts bis zu $x \approx 1.0$ km aus. Die räumlich relativ kurze Ausbreitung dieses Gebietes des synchronisierten Verkehrs liegt am nach kurzer Zeit folgenden $S \rightarrow F$ Phasenübergang bei $t_1^{S \rightarrow F} \approx 15:44:30$ Uhr. Dieser $S \rightarrow F$ Phasenübergang führt zur Auflösung des synchronisierten Verkehrs. Diese Abfolge der Entstehung des synchronisierten Verkehrs durch einen $F \rightarrow S$ Phasenübergang, die stromaufwärtige Ausbreitung des synchronisierten Verkehrs und die Auflösung des synchronisierten Verkehrs nach kurzer Zeit durch einen $S \rightarrow F$ Phasenübergang bildet ein $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet.

In Abbildung 4.6 (c) sind Fahrzeugtrajektorien in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen abgebildet. Die Verkehrszustandsübergänge sind durch F_S oder S_F gekennzeichnet. Die Geschwindigkeiten dieser Fahrzeugtrajektorien zeigen ein qualitativ unterschiedliches Geschwindigkeitsverhalten der Fahrzeuge beim Durchqueren des $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes (Abbildung 4.6 (b)). Das bedeutet, dass anstelle eines homogenen synchronisierten Verkehrs, in welchem das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrzeuge relativ einheitlich ist, ein räumlich-zeitlicher inhomogener synchronisierter Verkehr beobachtet wird. Das kann auch der Grund für die räumliche Streuung der S_F Verkehrszustandsübergänge in der Umgebung der Autobahnengstelle sein, wie in Abbildung 4.6 (b) bei $x_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 2.3$ km erkennbar ist.

Nun werden Abfolgen der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen aus Abbildung 4.6 (a) und Abbildung 4.7 (a) an derselben Autobahninfrastruktur (Abbildung 4.3 (a)) und an zwei unterschiedlichen Tagen betrachtet und verglichen. Beide Autobahnengstellen werden durch die Zufahrt bei 1.83–2.04 km verursacht.

In Abbildung 4.7 (a) entsteht der Verkehrszusammenbruch bei $x_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 2.3$ km und $t_{V_z}^{F \rightarrow S} \approx 15:30$ Uhr und ist durch „Verkehrszusammenbruch ($F \rightarrow S$ Phasenübergang)“ gekennzeichnet. Wie auch bereits in Abbildung 4.6 (a) beobachtet werden kann, entstehen in Abbildung 4.7 (a) vor dem Verkehrszusammenbruch zwei Abfolgen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen, die durch „ $F \rightarrow S$ “ und „ $S \rightarrow F$ “ gekennzeichnet und in Abbildung 4.7 (b) durch gestrichelte Linien markiert sind. Jedoch unterscheiden sich die zeitlichen Abstände sowohl zwischen den $F \rightarrow S$

A81-Nord, Böblingen/Sindelfingen, 25. November 2015

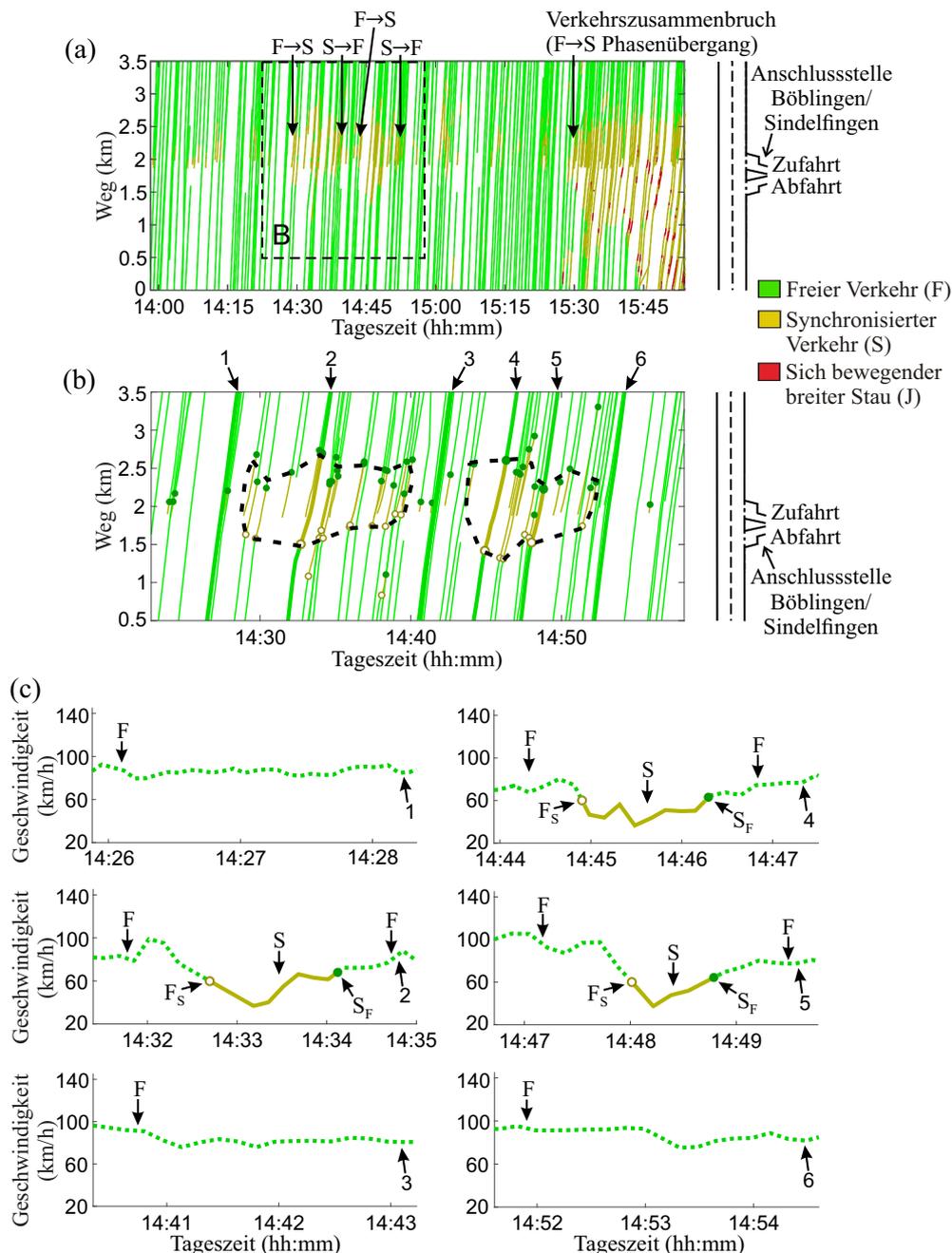


Abbildung 4.7: Floating-Car-Daten von der gleichen Autobahninfrastruktur (Abbildung 4.3 (a)) wie in Abbildung 4.6 am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Böblingen/Sindelfingen vom 25. November 2015. (a) Darstellung in einem Weg-Zeit-Diagramm mit gekennzeichneten Verkehrsphasenübergängen. Eine Zufahrt verursacht die Autobahngestelle. (b) Datenausschnitt aus (a), der durch das Rechteck B markiert ist. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Verkehrsphasenfronten. (c) Fahrzeugtrajektorien sind in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen mit den Verkehrszustandsübergängen und Verkehrsphasen abgebildet und durch die gleichen Zahlen 1–6 aus (b) markiert. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

und den darauffolgenden S→F Phasenübergängen als auch zwischen den S→F und den darauffolgenden F→S Phasenübergängen von den zeitlichen Abständen aus Abbildung 4.6 (a) deutlich. Nach Definition 4.2 wird der zeitliche Abstand zwischen einem F→S und dem darauffolgenden S→F Phasenübergang als Zeitintervall eines F→S→F Gebietes bezeichnet und ist in Abbildung 4.6 (a) durch T_S^{FSF} markiert. Wohingegen der zeitliche Abstand zwischen einem S→F und dem darauffolgenden F→S Phasenübergang nach Definition 4.3 als Zeitintervall zwischen F→S→F Gebieten bezeichnet wird und in Abbildung 4.6 (a) durch T_F^{FSF} markiert ist. Die Erkenntnis, dass an derselben Autobahninfrastruktur an verschiedenen Tagen sehr unterschiedliche Zeitintervalle von F→S→F Gebieten (T_S^{FSF}) und zwischen F→S→F Gebieten (T_F^{FSF}) beobachtet werden kann, ergibt sich aus Untersuchungen von zahlreichen Beispielen basierend auf Floating-Car-Daten aus den Jahren 2015–2019. Eine quantitative Betrachtung der Zeitintervalle T_S^{FSF} und T_F^{FSF} mit den zugehörigen bedingten Häufigkeitsverteilungen erfolgt in Kapitel 4.5 (Tabelle 4.2 und Abbildung 4.13).

Es werden weitere empirische Beispiele von F→S→F Gebieten an anderen Wochentagen *und* an anderen Autobahnengstellen und Autobahninfrastrukturen untersucht (Abbildungen 4.8 bis 4.11) und mit den bereits beschriebenen Beispielen (Abbildungen 4.6 und 4.7) verglichen.

4.3.2 Verkehrsphänomene an Abfahrten

In Abbildung 4.8 (a) sind Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A5-Nord bei der Anschlussstelle Karlsruhe-Nord in einem Weg-Zeit-Diagramm abgebildet. Die Daten wurden am 8. November 2016 an der in Abbildung 4.3 (b) dargestellten Autobahninfrastruktur erhoben. Die Autobahnengstelle ist durch die *Abfahrt* bei 3.05–3.25 km verursacht worden. Abbildung 4.8 (b) ist ein Datenausschnitt aus Abbildung 4.8 (a), der durch das Rechteck C markiert ist. Abbildung 4.9 (a) ist ein Datenausschnitt aus Abbildung 4.8 (b), der durch das Rechteck D markiert ist. In Abbildung 4.9 (b) sind einzelne Fahrzeugtrajektorien, die mit den Zahlen 1–4 gekennzeichnet sind, in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen abgebildet. Die Verkehrszustandsübergänge dieser Fahrzeugtrajektorien sind durch F_S oder S_F gekennzeichnet. Diese Fahrzeugtrajektorien sind auch im Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 4.9 (a) dargestellt.

Der Verkehrszusammenbruch, aus dem ein ausreichend großes räumlich-zeitliches gestautes Verkehrsmuster resultiert, entsteht in Abbildung 4.8 (a) bei $x_{Vz}^{\text{F→S}} \approx 3.1$ km und $t_{Vz}^{\text{F→S}} \approx 14:14$ Uhr und ist durch „Verkehrszusammenbruch (F→S Phasenübergang)“ gekennzeichnet. Bevor der Verkehrszusammenbruch entsteht, bildet sich eine Abfolge von F→S→F Verkehrsphasenübergängen aufgrund eines F→S Phasenüberganges bei $t_1^{\text{F→S}} \approx 13:53:30$ Uhr und eines nach kurzer Zeit darauffolgenden S→F Phasenüberganges bei $t_1^{\text{S→F}} \approx 13:59$ Uhr. Die Phasenübergänge sind in Abbildung 4.8 (a) und (b) durch „F→S“ und „S→F“ markiert.

Qualitativ werden dieselben Verkehrsphänomene (F→S→F Gebiete) vor Verkehrszusammenbrüchen an einer Autobahnengstelle, die durch eine *Abfahrt* verursacht wurde (Abbildungen 4.8 und 4.9), wie an einer Autobahnengstelle, die durch eine *Zufahrt* verursacht wurde (Abbildungen 4.6 und 4.7), beobachtet. Zudem entsteht, wie bereits in Abbildung 4.6 (a) und (b) beobachtet werden konnte, ein sich stromaufwärts bewegendes Gebiet des synchronisierten Verkehrs, das sich nach kurzer Zeit aufgrund des S→F Phasenüberganges auflöst (Abbildung 4.9 (a)).

A5-Nord, Karlsruhe-Nord, 8. November 2016

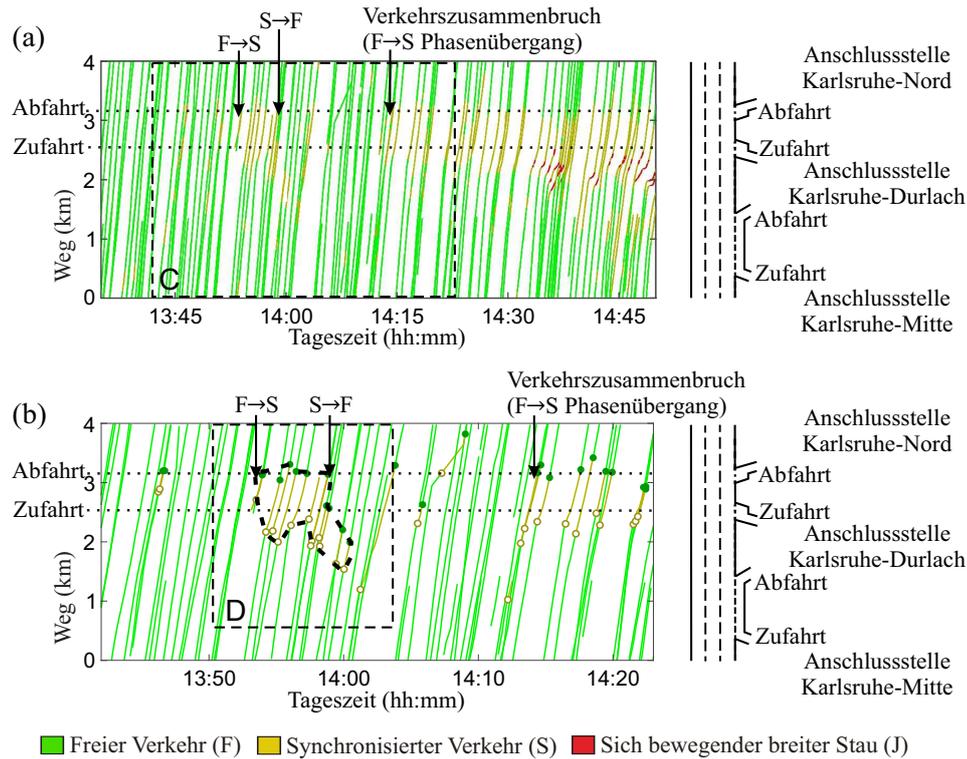


Abbildung 4.8: Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A5-Nord bei der Anschlussstelle Karlsruhe-Nord vom 8. November 2016. (a) Darstellung in einem Weg-Zeit-Diagramm an der in Abbildung 4.3 (b) dargestellte Autobahninfrastruktur mit gekennzeichneten Verkehrsphasenübergängen. Eine Abfahrt verursacht die Autobahnenengstelle. (b) Datenausschnitt aus (a), der durch das Rechteck C markiert ist. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Verkehrsphasenfronten. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

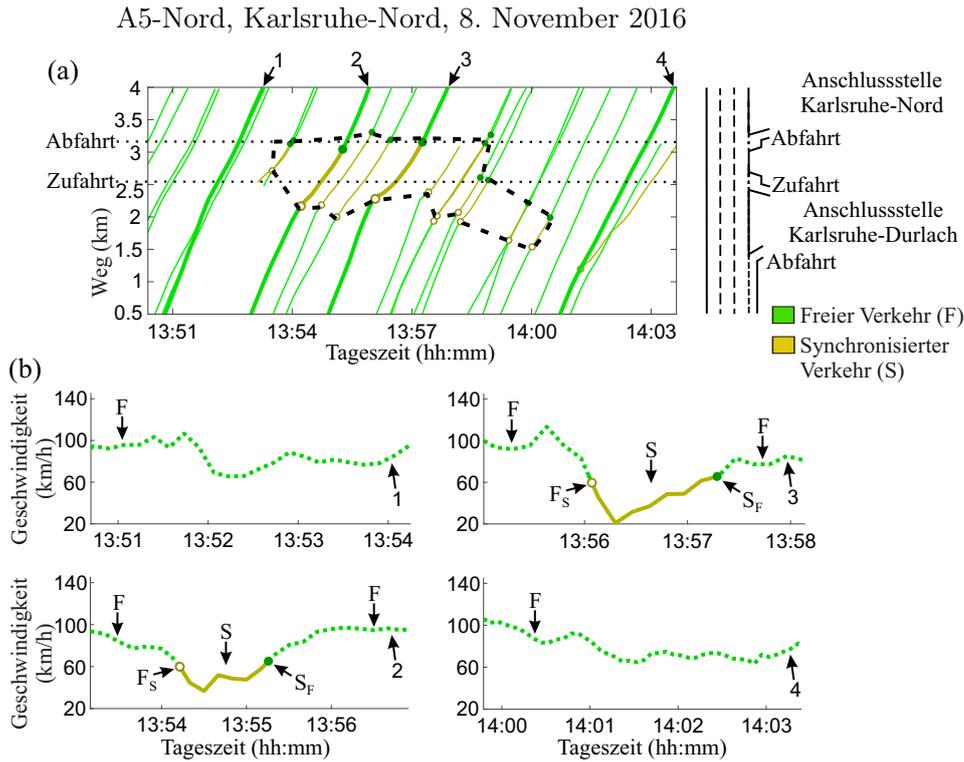


Abbildung 4.9: (a) Datenausschnitt aus Abbildung 4.8 (b), der durch das Rechteck D markiert ist, an der Autobahninfrastruktur aus Abbildung 4.3 (b). Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Verkehrsphasenfronten. (b) Fahrzeugtrajektorien sind in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen mit den Verkehrszustandsübergängen und Verkehrsphasen abgebildet und durch die gleichen Zahlen 1–4 aus (a) markiert. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

4.3.3 Verkehrsphänomene an Fahrbahnsteigungen

Zur Verdeutlichung, dass $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge vor Verkehrszusammenbrüchen allgemeine Eigenschaften an verschiedenen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen aufweisen, werden Floating-Car-Daten an einer *Fahrbahnsteigung* und einer Verkehrsbeeinflussungsanlage betrachtet.

In Abbildung 4.10 (a) sind Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Stuttgart-Feuerbach in einem Weg-Zeit-Diagramm abgebildet. Die Daten wurden am 11. November 2016 an der in Abbildung 4.4 (a) dargestellten Autobahninfrastruktur erhoben. Die Autobahnengstelle ist durch die *Fahrbahnsteigung* bei 1.5–3.04 km und die Verkehrsbeeinflussungsanlage bei 3.04 km verursacht worden. Das Höhenprofil dieses Autobahnabschnittes ist in Abbildung 4.4 (b) dargestellt. Aus dem Höhenprofil ergibt sich eine Fahrbahnsteigung von 1% zwischen 1.5–2.0 km und von 3.8% zwischen 2.0–3.04 km. Abbildung 4.10 (b) ist ein Datenausschnitt aus Abbildung 4.10 (a), der durch das Rechteck E markiert ist. Abbildung 4.11 (a) ist ein Datenausschnitt aus Abbildung 4.10 (b), der durch das Rechteck F markiert ist. In Abbildung 4.11 (b) sind einzelne Fahrzeugtrajektorien, die mit den Zahlen 1–8 gekennzeichnet sind, in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen abgebildet. Die Verkehrszustandsübergänge dieser Fahrzeugtrajektorien sind durch F_S oder S_F gekennzeichnet. Diese Fahrzeugtrajektorien sind auch im Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 4.11 (a) dargestellt.

A81-Nord, Stuttgart-Feuerbach, 11. November 2016

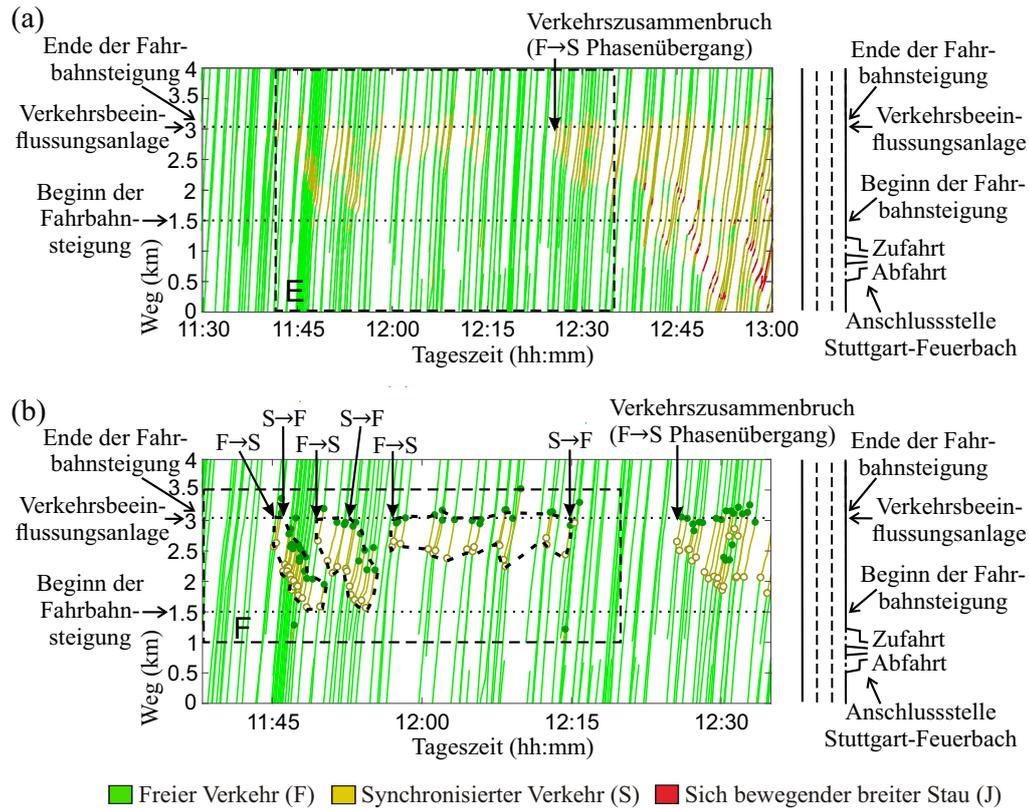


Abbildung 4.10: Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Stuttgart-Feuerbach vom 11. November 2016. (a) Darstellung in einem Weg-Zeit-Diagramm an der in Abbildung 4.4 (a) dargestellte Autobahninfrastruktur. Die in Abbildung 4.4 (b) dargestellte Fahrbahnsteigung und eine Verkehrsbeeinflussungsanlage verursachen die Autobahnengstelle. (b) Datenausschnitt aus (a), der durch das Rechteck E markiert ist. Die Verkehrsphasenübergänge sind durch „F→S“ oder „S→F“ markiert. Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Verkehrsphasenfronten. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

Der Verkehrszusammenbruch entsteht in Abbildung 4.10 (a) bei $x_{Vz}^{F \rightarrow S} \approx 3.0$ km und $t_{Vz}^{F \rightarrow S} \approx 12:26$ Uhr und ist durch „Verkehrszusammenbruch (F→S Phasenübergang)“ gekennzeichnet. Bevor der Verkehrszusammenbruch entsteht, bilden sich *drei* Abfolgen von F→S→F Verkehrsphasenübergängen aufgrund von F→S und S→F Phasenübergängen zu den jeweils folgenden drei Zeitpaaren: $t_1^{F \rightarrow S} \approx 11:45:30$ Uhr und $t_1^{S \rightarrow F} \approx 11:46:30$ Uhr für die *erste* Abfolge, $t_2^{F \rightarrow S} \approx 11:49:30$ Uhr und $t_2^{S \rightarrow F} \approx 11:52:00$ Uhr für die *zweite* Abfolge und $t_3^{F \rightarrow S} \approx 11:57:30$ Uhr und $t_3^{S \rightarrow F} \approx 12:15:00$ Uhr für die *dritte* Abfolge. In Abbildung 4.10 (b) sind die Phasenübergänge durch „F→S“ und „S→F“ gekennzeichnet und die durch die F→S→F Verkehrsphasenübergänge entstandenen F→S→F Gebiete durch gestrichelte Linien markiert.

Eine detaillierte Darstellung der drei F→S→F Gebiete, die in Abbildung 4.10 beobachtet wurden, erfolgt in dem Datenausschnitt in Abbildung 4.11. Es werden an einer Autobahnengstelle, die durch eine *Fahrbahnsteigung* und eine Verkehrsbeeinflussungsanlage verursacht wurde (Abbildungen 4.10 und 4.11), qualitativ dieselben F→S→F Gebiete vor Verkehrszusammenbrüchen beobachtet, wie an einer Autobahnengstelle, die durch eine *Zufahrt* (Abbildungen 4.6 und 4.7) oder eine *Abfahrt* (Abbildungen 4.8 und 4.9) verursacht wurde. Die in den Geschwindig-

keit-Zeit-Diagrammen in Abbildung 4.11 (b) abgebildeten Fahrzeugtrajektorien 3 und 4 fahren zunächst im freien Verkehr. Während sie sich dem effektiven Ort der Autobahnengstelle bei $x_{Vz}^{F \rightarrow S} \approx 3.0$ km nähern, bremsen sie zweimal ab und durchqueren zweimal den synchronisierten Verkehr. Dies liegt daran, dass durch die zwei $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge zwei sich stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr bilden. In Kapitel 4.4 wird auf diese Art von Wellen näher eingegangen.

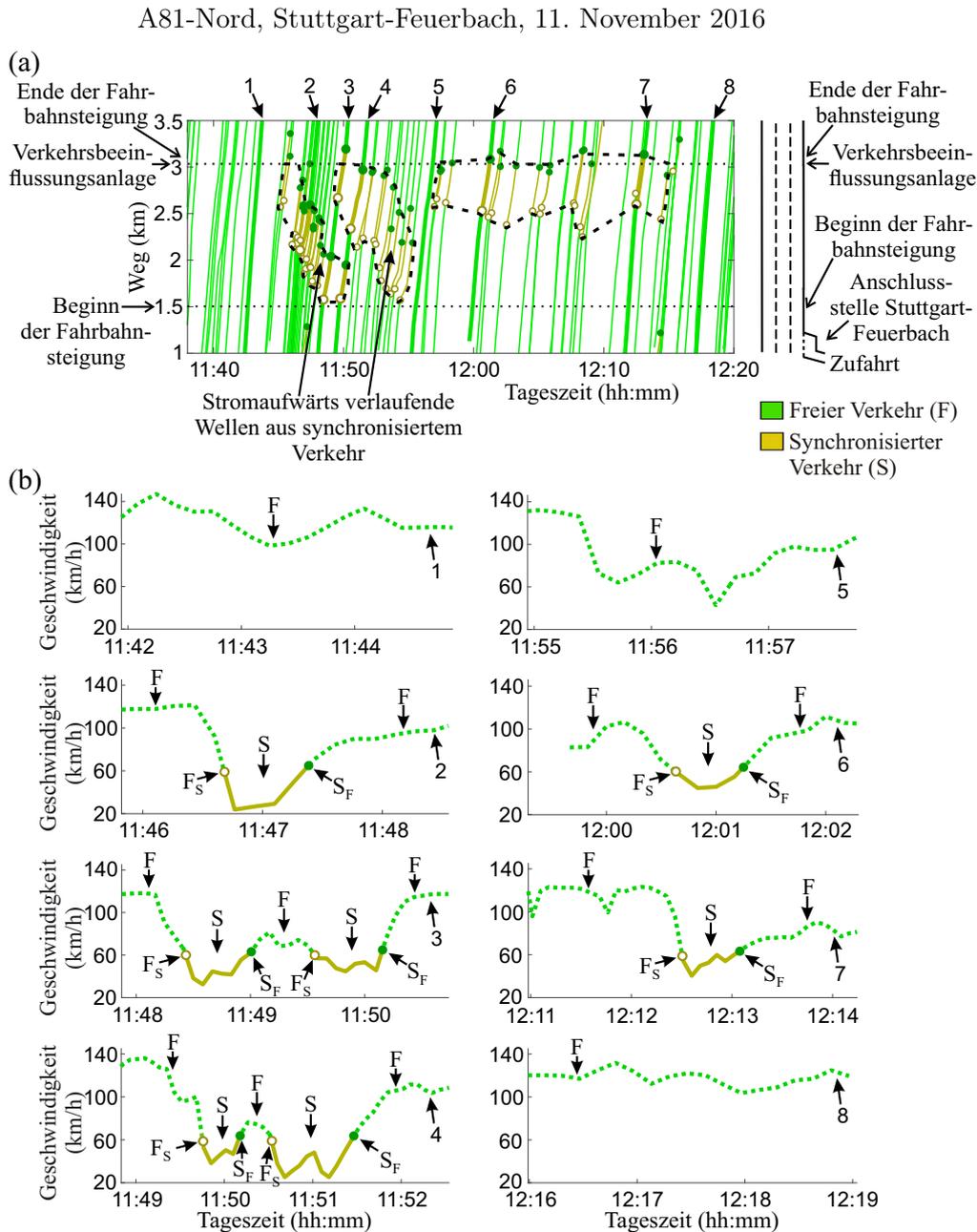


Abbildung 4.11: (a) Datenausschnitt aus Abbildung 4.10 (b), der durch das Rechteck F markiert ist, an der Autobahninfrastruktur aus Abbildung 4.4 (a). Die gestrichelten Linien kennzeichnen die Verkehrsphasenfronten. (b) Fahrzeugtrajektorien sind in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen mit den Verkehrszustandsübergängen und Verkehrsphasen abgebildet und durch die gleichen Zahlen 1–8 aus (a) markiert. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

Aus den in diesem Kapitel untersuchten Beispielen basierend auf Floating-Car-Daten und vielen weiteren Beispielen an unterschiedlichen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen und an verschiedenen Wochentage aus den Jahren 2015–2019 ergibt sich, dass die Zeitintervalle von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_S^{FSF}) und zwischen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_F^{FSF}) stark variieren. In Kapitel 4.5 erfolgt eine detaillierte Analyse der Zeitintervalle T_S^{FSF} und T_F^{FSF} .

4.4 Komplexität von sich auflösenden Verkehrsphänomenen

Es werden die räumlich-zeitliche Komplexität und Struktur von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten beschrieben. Die beobachteten sich auflösenden Verkehrsphänomene werden an verschiedenen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen und an unterschiedlichen Wochentagen diskutiert.

Definition 4.4. *Stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr:* Stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr sind Strukturen des synchronisierten Verkehrs, die sich im freien Verkehr durch einen $F \rightarrow S$ Übergang (Definition 3.16) anfangen zu bilden und stromaufwärts ausbreiten (siehe Abbildung 4.12 (b)). Sie entstehen häufig an Autobahnengstellen und vor Verkehrszusammenbrüchen. Sie werden auch als sich bewegende Strukturen des synchronisierten Verkehrs (engl. *moving synchronized flow patterns*) bezeichnet und mit MSP abgekürzt [42].

Basierend auf den empirischen Ergebnissen dieses Kapitels wird folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese 4.2. $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete weisen im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen eine komplexe räumlich-zeitliche Form und Ausbreitung auf mit allgemeinen Eigenschaften und Gemeinsamkeiten. Die Gebiete können als stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr auftreten (Definition 4.4).

Anhand der empirischen Beispiele aus Abbildung 4.12 werden die räumlich-zeitlichen Formen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen und den daraus entstehenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten verglichen und Eigenschaften von stromaufwärts verlaufenden Wellen aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr (Definition 4.4) diskutiert.

Die am häufigsten beobachtete räumlich-zeitliche Form der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete, die auf Basis von Floating-Car-Daten rekonstruiert wurden, ist in Abbildung 4.12 (a) dargestellt, die ein Datenausschnitt aus Abbildung 4.6 (a) ist. Bei dieser räumlich-zeitlichen Form existiert der synchronisierte Verkehr an der Autobahnengstelle fast ausschließlich zwischen dem Zeitpunkt des $F \rightarrow S$ Phasenüberganges und dem Zeitpunkt des darauffolgenden $S \rightarrow F$ Phasenüberganges. Das $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet breitet sich räumlich-zeitlich nur derart aus, dass es den Zeitpunkt des $S \rightarrow F$ Phasenüberganges zeitlich nicht überschreitet. Der synchronisierte Verkehr löst sich in der Umgebung des $S \rightarrow F$ Phasenüberganges schnell auf. Außerdem ist fast während des gesamten Zeitintervalls T_S^{FSF} des $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes die stromabwärtige Verkehrsphasenfront des Gebietes des synchronisierten Verkehrs räumlich an dem effektiven Ort der Autobahnengstelle mit einer gewissen räumlichen Unschärfe fixiert. Die Besonderheit dieser betrachteten Form des $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes (Abbildung 4.12 (a)) ist dessen stromaufwärtige Verkehrsphasenfront,

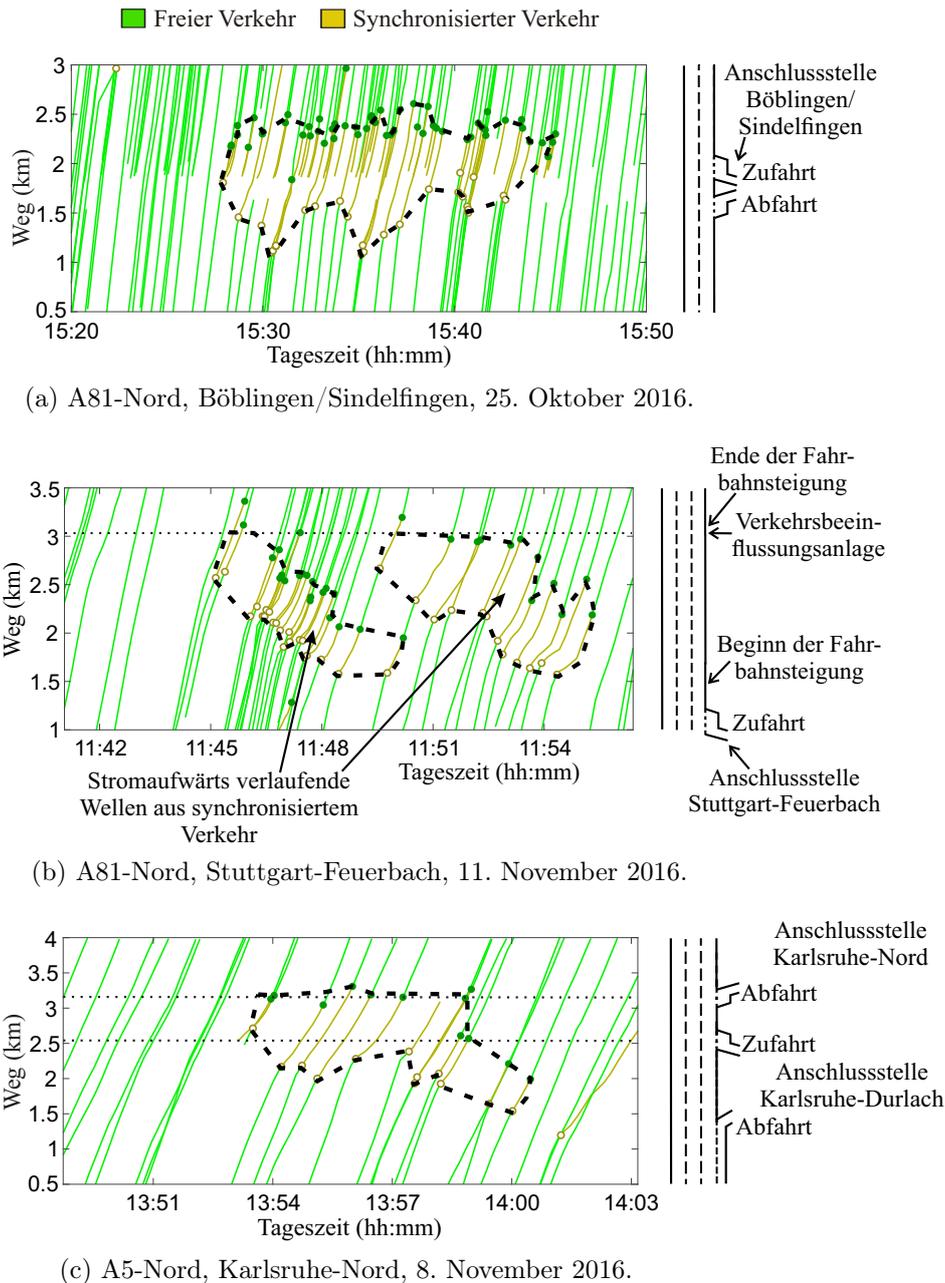


Abbildung 4.12: Komplexität von sich auflösenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten basierend auf Floating-Car-Daten. (a) $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet, das an einer durch eine Zufahrt verursachte Autobahnengstelle entstanden ist (aus Abbildung 4.6 (b)). (b) Zwei $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete als stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr, die an einer Autobahnengstelle entstanden sind, die durch eine Fahrbahnsteigung und eine Verkehrsbeeinflussungsanlage verursacht wurde (Datenausschnitt aus Abbildung 4.11 (a)). (c) $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet, das an einer durch eine Abfahrt verursachte Autobahnengstelle entstanden ist (Datenausschnitt aus Abbildung 4.8 (b)). Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

die komplexe räumlich-zeitlich oszillierende Bewegungen stromaufwärts von der Autobahnengstelle aufweist. An der stromaufwärtigen Verkehrsphasenfront des synchronisierten Verkehrs bremsen die Fahrzeuge vom freien Verkehr in den synchronisierten Verkehr.

In Abbildung 4.12 (b), die einen Datenausschnitt aus Abbildung 4.11 (a) darstellt, entstehen durch zwei aufeinanderfolgende $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge zwei stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr (Definition 4.4). Diese Wellen werden auch als sich bewegende Strukturen des synchronisierten Verkehrs (engl. moving synchronized flow patterns) bezeichnet [42]. Diese Verkehrsphänomene können wie folgt erklärt werden. Nachdem der $S \rightarrow F$ Phasenübergang bei einer Abfolge von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen eintritt, bildet sich wieder freier Verkehr an dem effektiven Ort der Autobahnengstelle. Jedoch bleibt der synchronisierte Verkehr stromaufwärts von dem effektiven Ort der Autobahnengstelle über eine relativ lange Zeit bestehen. Diese Zeit beträgt in Abbildung 4.12 (b) für die zeitlich erste stromaufwärts verlaufende Welle ca. 5 min und für die zweite stromaufwärts verlaufende Welle ca. 4 min. Dieses „Überleben“ des synchronisierten Verkehrs kann durch die relativ geringe mittlere Geschwindigkeit des entstandenen synchronisierten Verkehrs qualitativ erklärt werden. Die mittlere Geschwindigkeit für die in Abbildung 4.11 (b) gekennzeichneten Fahrzeugtrajektorien 2, 3 und 4 entspricht beim Durchqueren der zeitlich ersten stromaufwärts verlaufenden Welle ($F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet) ca. 20–40 km/h. Die zeitlichen Abstände des $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes zu fast jeder seiner räumlichen Positionen entsprechen approximativ dem Zeitintervall zwischen dem $F \rightarrow S$ und dem darauffolgenden $S \rightarrow F$ Phasenübergang des $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes ($T_S^{\text{FSF}}(1)$). Es entsteht ein Gebiet des synchronisierten Verkehrs, das durch die stromaufwärtige und stromabwärtige Verkehrsphasenfront beschränkt ist und sich als eine Struktur des synchronisierten Verkehrs stromaufwärts ausbreitet. Dieses Verkehrsphänomen wird als stromaufwärts verlaufende Welle aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr (Definition 4.4) bezeichnet. Da sich diese Welle aus synchronisiertem Verkehr über die Zeit auflöst und ca. 1.5 km stromaufwärts von dem effektiven Ort der Autobahnengstelle wieder zum freien Verkehr übergeht, ist es ein sich auflösendes Verkehrsphänomen. Diese qualitative Erklärung der Entstehung von sich auflösenden stromaufwärts verlaufende Welle anhand der mittleren Geschwindigkeit des entstandenen synchronisierten Verkehrs wird bestärkt durch das zeitlich dritte $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet des betrachteten Beispiels, das in Abbildung 4.11 (a) dargestellt ist. Die Geschwindigkeiten der in Abbildung 4.11 (b) dargestellten Fahrzeugtrajektorien 6 und 7 im synchronisierten Verkehr sind im Mittel größer als die der Fahrzeugtrajektorien 2–4.

Es werden auch räumlich-zeitliche Gebiete von sich auflösenden stromaufwärts verlaufenden Wellen aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr beobachtet, die eine Form aufweisen, die die beiden bereits beschriebenen Formen aus Abbildung 4.12 (a) und 4.12 (b) kombiniert. In Abbildung 4.12 (c) ist dazu ein empirisches Beispiel dargestellt, das ein Datenausschnitt aus Abbildung 4.8 (b) ist. Nach dem $S \rightarrow F$ Phasenübergang des zugehörigen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes bei $x_{Vz}^{F \rightarrow S} \approx 3.1$ km und $t_1^{S \rightarrow F} \approx 13:59$ Uhr löst sich der synchronisierte Verkehr in der Umgebung schnell auf. Jedoch wird die Auflösung des synchronisierten Verkehrs ca. 0.55 km stromaufwärts von dem effektiven Ort der Autobahnengstelle unterbrochen. Infolgedessen breitet sich ein Gebiet des synchronisierten Verkehrs über eine relativ kurze Zeit stromaufwärts aus. Dieses Gebiet befindet sich approximativ zwischen 13:59–14:01 Uhr und 1.5–2.55 km und ist eine *kurzlebige* sich auflösende stromaufwärts verlaufende Welle aus synchronisiertem Verkehr.

4.5 Deskriptive Analyse der Zeitintervalle empirischer Verkehrsphänomene

Es werden Zeitintervalle von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_S^{FSF}) und zwischen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_F^{FSF}) quantitativ mit den zugehörigen bedingten Häufigkeitsverteilungen untersucht (Definitionen 4.2 und 4.3). Dies erfolgt auf Basis von empirischen Beispielen an unterschiedlichen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen und an verschiedenen Wochentagen.

Es wurden 67 Tage aus den Jahren 2015–2019 betrachtet, an denen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge und die daraus resultierenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete vor Verkehrszusammenbrüchen an unterschiedlichen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen beobachtet wurden. Diese untersuchten Beispiele basieren auf Floating-Car-Daten. Die räumlich-zeitlichen Formen der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete von allen diesen Beispielen weisen qualitativ ähnliche allgemeine Eigenschaften und eine ähnliche räumlich-zeitliche Ausbreitung wie die in den Abbildungen 4.6 bis 4.12 bereits diskutierten Beispiele:

- An verschiedenen Wochentagen wurden an derselben Autobahnengstelle und Autobahninfrastruktur sehr unterschiedliche $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete beobachtet.
- Die Entstehungszeitpunkte von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten vor Verkehrszusammenbrüchen variieren stark.
- Die Anzahl der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete vor Verkehrszusammenbrüchen können sich auch bei gleichen Autobahnengstellen und Autobahninfrastrukturen sehr unterscheiden.
- Die Zeitintervalle von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_S^{FSF}) und zwischen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_F^{FSF}) sind sehr unterschiedlich.

Die Werte von T_S^{FSF} und T_F^{FSF} weisen in den untersuchten Beispielen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten kein regelmäßiges Verhalten auf. Beispielsweise können die Unterschiede von T_S^{FSF} und T_F^{FSF} für die Beispiele, die in den Abbildungen 4.6 bis 4.12 dargestellt und diskutiert wurden, in Tabelle 4.2 festgestellt werden. Die Erkenntnis, dass T_S^{FSF} und T_F^{FSF} bei beobachteten $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten vor Verkehrszusammenbrüchen stark variierende Werte aufweisen, wird durch Floating-Car-Daten bestätigt, die neben den Autobahninfrastrukturen aus den Abbildungen 4.3 und 4.4 auch an den folgenden Autobahninfrastrukturen erhoben und analysiert wurden:

- Autobahnabschnitt B27-West bei der Anschlussstelle Stuttgart-Möhringen,
- Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Herrenberg (siehe Abbildung A.2),
- Autobahnabschnitt A8-Ost beim Dreieck Leonberg,
- Autobahnabschnitt B464-Ost bei der Anschlussstelle Sindelfingen-Ost,
- Autobahnabschnitt A8-Nord bei Kreuz Stuttgart (siehe Abbildung A.1),
- Autobahnabschnitt A5-Nord bei der Anschlussstelle Nordwestkreuz-Frankfurt,
- Autobahnabschnitt M4-Ost in England an der Kreuzung zwischen M4 and M25.

Tabelle 4.2: Werte der Zeitintervalle in Minuten von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_S^{FSF}) und zwischen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_F^{FSF}) der empirischen Beispiele aus den angegebenen Abbildungen (Definitionen 4.2 und 4.3).

	Abbildung 4.6	Abbildung 4.7	Abbildung 4.8	Abbildung 4.10
T_S^{FSF} (in min)	16.5, 8	10.2, 9	6.5	1, 2.5, 17.5
T_F^{FSF} (in min)	11.5, 9.8	4.2, 35.8	15	3, 5.5, 11

In Abbildung 4.13 (a) und (b) zeigen Histogramme die bedingten Häufigkeitsverteilungen von T_S^{FSF} bzw. T_F^{FSF} der untersuchten empirischen Beispielen von 67 verschiedenen Tagen und unterschiedlichen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen. Die Erkenntnis, dass T_S^{FSF} und T_F^{FSF} stark variierende Werte aufweisen, wird in Abbildung 4.13 bestätigt. An den Häufigkeitsverteilungen wird erkannt, dass für T_S^{FSF} häufig sehr kleine Werte zwischen 1–8 min auftreten (Abbildung 4.13 (a)), wohingegen für T_F^{FSF} häufiger etwas größere Werte zwischen 4–12 min auftreten. Außerdem ergeben sich für die Mittelwerte $\bar{T}_S^{\text{FSF}} = 8.2$ min und $\bar{T}_F^{\text{FSF}} = 9.1$ min und für die Standardabweichungen $\sigma_S^{\text{FSF}} = 5.6$ min und $\sigma_F^{\text{FSF}} = 5.1$ min.

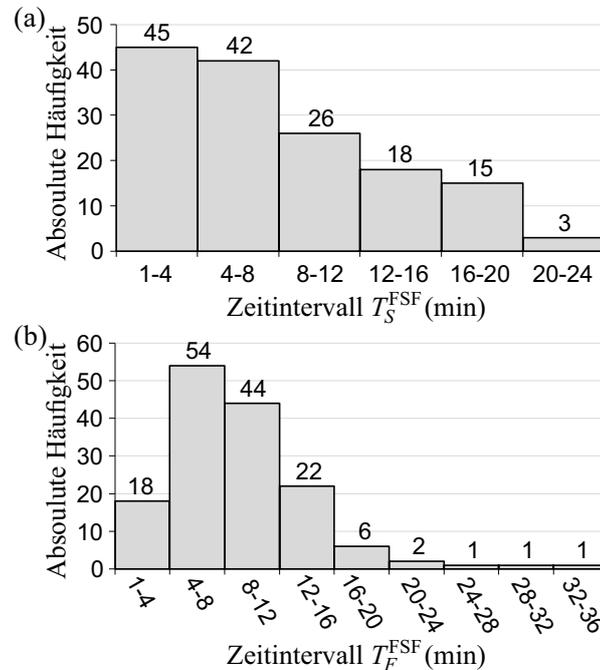


Abbildung 4.13: Histogramme zeigen bedingte Häufigkeitsverteilungen der Zeitintervalle T_S^{FSF} in (a) und T_F^{FSF} in (b) von empirischen Beispielen von 67 verschiedenen Tagen und unterschiedlichen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen (Definitionen 4.2 und 4.3). Angepasst aus [139].

Es ist wichtig zu beachten, dass die Datenanalyse basierend auf der Tabelle 4.2 und Abbildung 4.13 mindestens die zwei folgenden Einschränkungen hat:

1. Der durchschnittliche zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen der verwendeten Floating-Car-Daten, die nur einen kleinen Anteil des Gesamtverkehrsflusses ausmachen, beträgt ca. 34 Sekunden. Damit können viele empirische $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge, für die die Werte T_S^{FSF} und T_F^{FSF} mehr als 60 Sekunden betragen, erkannt werden. Beispiele hierfür sind in den Abbildungen 4.6 bis 4.12 dargestellt. Jedoch können $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge, für die die Werte T_S^{FSF} und T_F^{FSF} deutlich weniger als 60 Sekunden

betragen, *nicht* erkannt werden. Im Allgemeinen gilt, dass je kleiner die Durchdringungsrate (Definition 2.3) von Floating-Car-Daten, desto größer der Fehler bei der Erkennung von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen mit kleinen Werten von T_S^{FSF} und T_F^{FSF} . Beispielsweise gibt es in Abbildung 4.7 (a) in den Zeiträumen 14:00–14:15 Uhr und 15:00–15:20 Uhr einige Fahrzeugtrajektorien, die beim Durchqueren der Autobahnengstelle auf die Geschwindigkeit des synchronisierten Verkehrs abbremsen, wohingegen die umgebenden Fahrzeuge im freien Verkehr fahren. Wenn sich in Zukunft die Durchdringungsrate von Floating-Car-Daten erhöht und sich damit der durchschnittliche zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen der Floating-Car-Daten verringert, liegt es nahe, dass dann weitere Abfolgen von empirischen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen mit deutlich kleineren Werten von T_S^{FSF} und T_F^{FSF} als 60 Sekunden erkannt werden können.

2. Eine weitere Einschränkung ist, dass Informationen über den Gesamtverkehrsfluss für die untersuchten empirischen Beispiele nicht verfügbar waren, da Verkehrsmessanlagen aktuell nicht ausreichend vorhanden sind. Jedoch hängen nach den Theorien zu $F \rightarrow S$ und $S \rightarrow F$ Phasenübergängen die Mittelwerte \bar{T}_S^{FSF} und \bar{T}_F^{FSF} stark von dem Gesamtverkehrsfluss an der Autobahnengstelle ab [43, 100]. Deshalb ist für eine genauere deskriptive Analyse über die empirischen Eigenschaften der Verteilungsfunktionen von T_S^{FSF} und T_F^{FSF} der Gesamtverkehrsfluss nötig. Dann können die Eigenschaften von T_S^{FSF} und T_F^{FSF} abhängig von den Werten des Gesamtverkehrsflusses studiert werden.

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Studie von Verkehrsphänomenen vor Verkehrszusammenbrüchen im freien Verkehr wurden Floating-Car-Daten aus Europa und den USA verwendet (Kapitel 2.3). Zur Bestimmung der Verkehrsphasen wurde eine Methode zur Erkennung von Verkehrsphasenübergängen von Fahrzeugtrajektorien beschrieben (Kapitel 4.1). Es wurden empirische Beispiele an unterschiedlichen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen und an verschiedenen Wochentagen hinsichtlich der Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten analysiert (Kapitel 4.2 und 4.3). Außerdem wurde die räumlich-zeitliche Form und Ausbreitung von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten genauer untersucht (Kapitel 4.4).

Es wurden folgende Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten basierend auf mikroskopischen Verkehrsdaten empirisch nachgewiesen:

- Räumlich begrenzte und zeitlich befristete Verkehrsphänomene ($F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete) entstehen häufig im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen.
- $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete entstehen an verschiedenen Autobahnabschnitten in Europa und den USA und an unterschiedlichen Arten von Autobahnengstellen, wie zum Beispiel Autobahnengstellen, die durch Zufahrten, Abfahrten oder Fahrbahnsteigungen verursacht werden.
- Die Zeitpunkte, an denen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete beginnen zu entstehen oder sich auflösen, weisen stark variierende Werte auf. Die Zeitintervalle zwischen dem $F \rightarrow S$ Phasenübergang und dem zurückkehrenden $S \rightarrow F$ Phasenübergang (T_S^{FSF}) von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten unterscheiden sich sehr voneinander und betragen häufig zwischen 1 und 24 Minuten. Die

Zeitintervalle zwischen mehreren aufeinanderfolgenden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (T_F^{FSF}) unterscheiden sich ebenfalls stark voneinander und betragen häufig zwischen 1 und 20 Minuten. Außerdem unterscheiden sich auch die Zeitintervalle zwischen einem $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet und dem Verkehrszusammenbruch.

- $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete haben komplexe räumlich-zeitliche Formen und Ausbreitungen. Es können räumliche Ausbreitungen von bis zu 1.5 Kilometer und zeitliche Ausbreitungen von bis zu 24 Minuten beobachtet werden. Die stromaufwärtigen Verkehrsphasenfronten der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete können räumlich-zeitlich oszillierende Bewegungen stromaufwärts von der Autobahnengstelle aufweisen. Bestimmte räumlich-zeitliche Formen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten kommen häufiger vor als andere.
- $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete können an der gleichen Autobahnengstelle an verschiedenen Wochentagen unterschiedlich oft auftreten und haben häufig verschiedene räumlich-zeitliche Formen und Ausbreitungen.
- Es werden stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr in Floating-Car-Daten vor Verkehrszusammenbrüchen nachgewiesen.

Die Hypothesen 4.1 und 4.2 konnten damit verifiziert werden. Im freien Verkehr vor Verkehrszusammenbrüchen können sich räumlich begrenzte und zeitlich befristete Verkehrsphänomene an Autobahnengstellen bilden, die allgemeine Eigenschaften aufweisen (Hypothese 4.1). Die komplexe räumlich-zeitliche Form und Ausbreitung dieser Verkehrsphänomene können stromaufwärts verlaufende Welle aus synchronisiertem Verkehr im freien Verkehr bilden (Hypothese 4.2).

5 Methode zur lokalen Dichtebestimmung durch mikroskopische Verkehrsdaten

Drohnenmessungen auf Autobahnen ermöglichen eine vollständige und hochgenaue Erfassung aller Fahrzeugtrajektorien des Autobahnabschnittes, der von der Videokamera der Drohne erfasst wird (Kapitel 2.2.3). Insbesondere können Fahrzeuge fahrspurgenau gemessen werden. Drohnenmessungen ermöglichen sowohl die zeitlichen als auch räumlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen zu ermitteln. Anhand von Floating-Car-Daten aus vernetzten Fahrzeugen ist die fahrspurgenaue Messung heute noch nicht möglich (Kapitel 2.2.2). Außerdem decken Floating-Car-Daten nicht alle Fahrzeugtrajektorien eines Autobahnabschnittes ab, da sie nur aus einem bestimmten prozentualen Anteil des Gesamtverkehrs (z. B. ca. 2%) bestehen. Daher können weder zeitliche noch räumliche Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen mit Floating-Car-Daten bestimmt werden. Ein Detektor wiederum kann an der Detektorposition alle Fahrzeuge fahrspurgenau messen, jedoch nur an einer festen räumlichen Position und nicht über eine gewisse räumliche Ausbreitung (Kapitel 2.2.1). Daher werden räumlich-zeitliche Verkehrsstrukturen zwischen zwei Detektorpositionen nicht gemessen. Außerdem kann ein Detektor an der jeweiligen Detektorposition den zeitlichen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden gemessenen Fahrzeugen bestimmen, jedoch nicht den räumlichen Abstand. Zur Erkennung und zur räumlich-zeitlichen Rekonstruktion von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen auf Autobahnen sind vollständige und fahrspurgenaue Verkehrsdaten notwendig wie beispielsweise Drohnenmessungen von Autobahnabschnitten [28].

Es existieren zu realen fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen auf Autobahnen bisher kaum empirische Untersuchungen basierend auf einer so hochgenauen Datengrundlage wie Drohnenmessungen. Außerdem ist eine vollständige Rekonstruktion des Verkehrs an Autobahnabschnitten mit allen Fahrzeugtrajektorien und deren mikroskopischen Eigenschaften von großem Interesse zum Verständnis des Verkehrsablaufs. Die Verkehrserfassung von Autobahnabschnitten durch Drohnen ermöglicht es, gestaute Verkehrsstrukturen und Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte auf allen Fahrspuren der Autobahn über Raum und Zeit einzeln zu untersuchen.

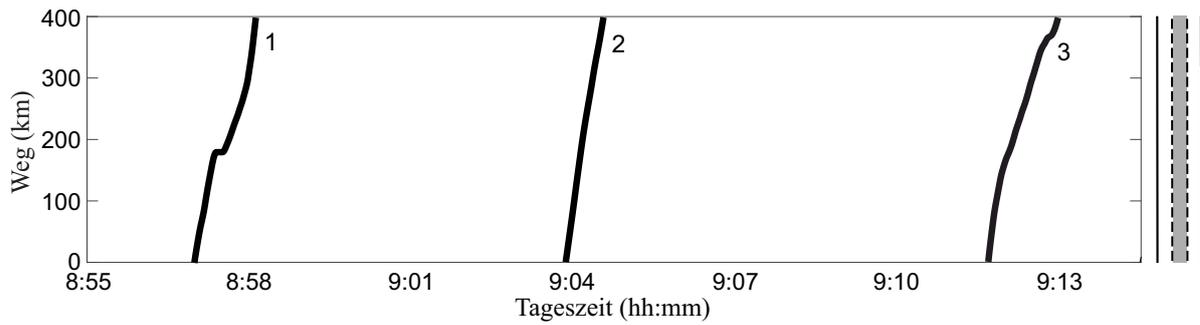
In diesem Kapitel werden Erkenntnisse über die Heterogenität und Komplexität von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen des gestauten Verkehrs auf Autobahnen basierend auf Drohnenmessungen gewonnen. Kapitel 5.1 beschreibt die räumlich-zeitliche Darstellung von Drohnenmessungen. Anschließend wird in Kapitel 5.2 die fahrspurabhängigkeit von mikroskopischem gestautem Verkehr auf Autobahnen diskutiert. In Kapitel 5.3 wird eine Verkehrsdichtemethode entwickelt, die auf den räumlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen und auf Methoden der gleitenden Mittelwerte basiert. Außerdem werden statistische

Eigenschaften zu den mit der Verkehrsdichte-Methode berechneten Werten dargestellt. Abschließend werden in Kapitel 5.4 die Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst.

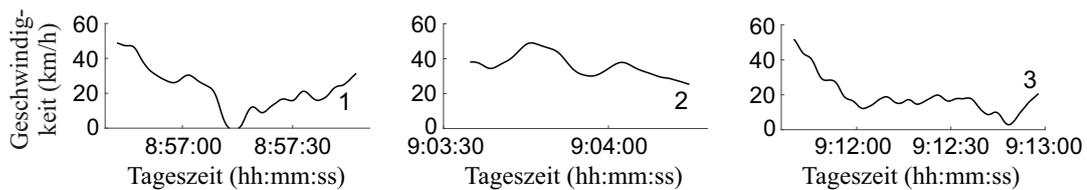
5.1 Räumlich-zeitliche Darstellung von Drohnenmessungen

Die durch Drohnenmessungen erfassten Fahrzeugtrajektorien werden in einem Weg-Zeit-Diagramm mit der zugehörigen Autobahninfrastruktur abgebildet (siehe Abbildung 5.1 (a) und (c)). Da die Drohne die Fahrzeuge auf dem jeweiligen Autobahnabschnitt fahrspurgenau misst, werden die in Kapitel 5 auf Drohnenbasierten Abbildungen der Fahrzeugtrajektorien fahrspurabhängig dargestellt. Die Framerate (Bildrate) der Videoaufnahme der Drohne beträgt 25 Frames pro Sekunde (fps) [28]. Es erfolgt also in 40-Millisekunden-Schritten je eine Frameaufnahme (Bildaufnahme).

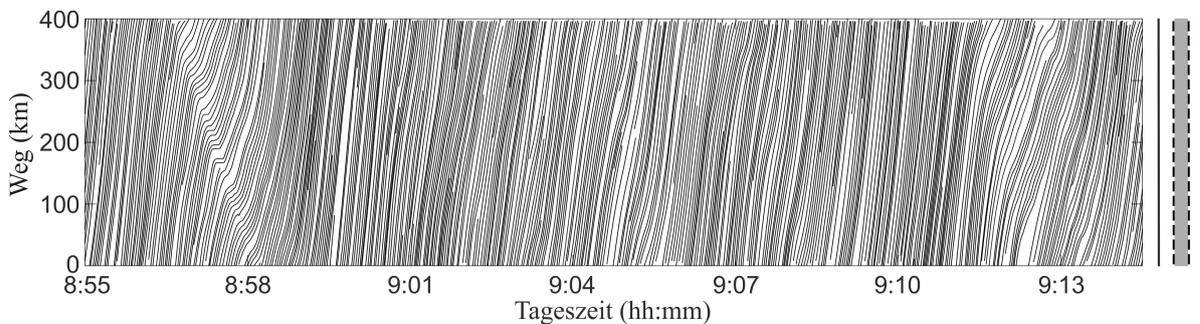
Zur Erläuterung der räumlich-zeitlichen Darstellung von Drohnenbasierten Daten wird eine Drohnenmessung betrachtet, die eine Aufnahmezeit von 19.5 Minuten hat und einen Autobahnabschnitt von 400 Meter erfasst (siehe Abbildung 5.1) [28]. Die Drohnenmessung wurde im Oktober 2017 an einem Montag zwischen 8:55:00–9:14:30 Uhr auf der dreispurigen Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West durchgeführt. In Abbildung 5.1 (a) sind drei Fahrzeugtrajektorien von der mittleren Fahrspur des gemessenen Autobahnabschnittes durch schwarze Linien in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Die als schwarze Linien abgebildeten Fahrzeugtrajektorien entstehen durch das Verbinden der räumlich-zeitlichen Positionen der Fahrzeugfronten zu jedem Frame der Videoaufnahme der Drohnenmessung. Die zugehörige Autobahninfrastruktur ist rechts neben dem Weg-Zeit-Diagramm veranschaulicht. In Abbildung 5.1 (b) sind die Fahrzeugtrajektorien, die in Abbildung 5.1 (a) durch die Zahlen 1–3 markiert sind, in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen abgebildet. Beispielsweise folgt aus dem Geschwindigkeitsverlauf der Fahrzeugtrajektorie 1, dass das Fahrzeug seine Geschwindigkeit über die Zeit reduziert bis es bei 8:57:15 Uhr zum Stillstand kommt. Das Anhalten kann auch in Abbildung 5.1 (a) durch die zur Zeitachse parallele Linie der Fahrzeugtrajektorie 1 bei 200 m und 8:57:15 Uhr erkannt werden. Denn die Steigung der über Weg und Zeit dargestellten Fahrzeugtrajektorie zu einem bestimmten Zeitpunkt ergibt die Geschwindigkeit dieser Fahrzeugtrajektorie zu dem Zeitpunkt. In Abbildung 5.1 (c) sind alle durch die Drohne gemessenen Fahrzeugtrajektorien von der mittleren Fahrspur in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt.



(a) Darstellung einzelner Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur einer Drohnenmessung in einem Weg-Zeit-Diagramm.



(b) Abbildung der Fahrzeugtrajektorien aus (a) in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen.



(c) Darstellung aller Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur der Drohnenmessung aus (a) in einem Weg-Zeit-Diagramm.

Abbildung 5.1: Drohnenmessung der mittleren Fahrspur der dreispurigen Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West in Deutschland gemessen am Montag, 8:55:00–9:14:30 Uhr, im Oktober 2017 [28]. In (a) sind einzelne Fahrzeugtrajektorien der Drohnenmessung in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Die als schwarze Linie abgebildete Fahrzeugtrajektorie entsteht durch das Verbinden der räumlich-zeitlichen Position der Fahrzeugfront zu jedem Frame der Videoaufnahme der Drohnenmessung. Die zugehörige Autobahninfrastruktur ist rechts neben dem Weg-Zeit-Diagramm veranschaulicht. In (b) sind die Fahrzeugtrajektorien, die in (a) durch die Zahlen 1–3 markiert sind, in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen abgebildet. In (c) sind alle Fahrzeugtrajektorien der Drohnenmessung aus (a) in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt.

5.2 Fahrspurabhängigkeit von mikroskopischem gestautem Verkehr auf Autobahnen

Es wird auf die Fahrspurabhängigkeit von gestauten Verkehrsstrukturen auf Autobahnen eingegangen. Die hierfür verwendete Datengrundlage sind hochgenaue Drohnendaten. Basierend auf den in Kapitel 5.2 und 5.3 aufgeführten empirischen Erkenntnissen werden zunächst folgende Hypothesen aufgestellt:

Hypothese 5.1. *Gestaute Verkehrsstrukturen und Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte können auf Autobahnen auf allen Fahrspuren zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen und sich räumlich-zeitlich unterschiedlich ausbreiten. Dies zeigt die Heterogenität und Komplexität von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen des gestauten Verkehrs auf Autobahnen.*

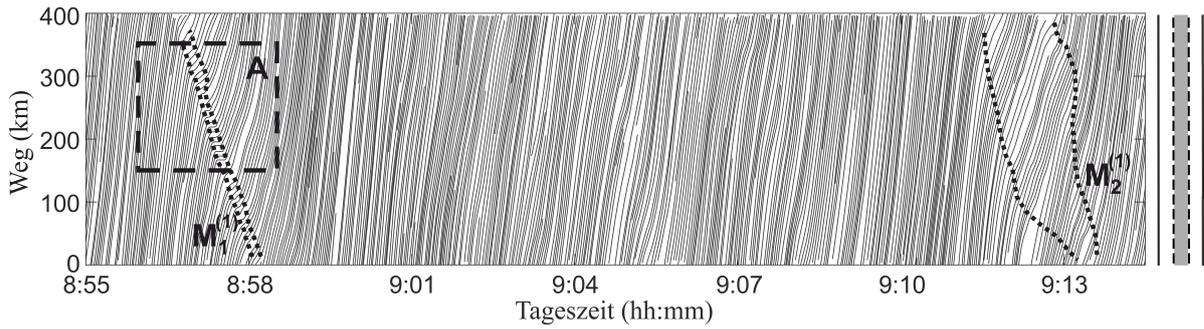
Hypothese 5.2. *Die charakteristische Eigenschaft der Verkehrsphase des sich bewegenden breiten Staus (J), die mittlere Geschwindigkeit der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront von J über die Zeit beizubehalten, wird durch vollständige, fahrspurabhängige und hochgenaue Drohnendaten verifiziert.*

Die Untersuchung der Hypothese 5.1 und 5.2 setzt eine fahrspurgenaue empirische Verkehrsdatengrundlage voraus, die Autobahnabschnitte über Raum und Zeit erfasst. Daher werden hochaufgelöste und fahrspurgenaue Drohnendaten verwendet.

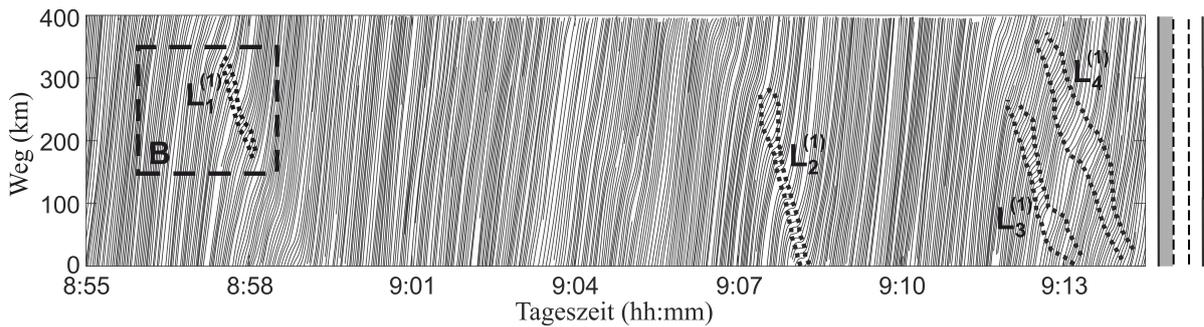
Es wird die Drohnenmessung aus Abbildung 5.1, die an einem Autobahnabschnitt der Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West im Oktober 2017 erhoben wurde, näher betrachtet. Alle Fahrzeugtrajektorien der mittleren und linken Fahrspur im Zeitraum von 8:55:00–9:14:30 Uhr sind in einem Weg-Zeit-Diagramm in Abbildung 5.2 (a) bzw. (b) dargestellt [140]. In Abbildung 5.3 sind alle Fahrzeugtrajektorien derselben Drohnenmessung aus Abbildung 5.2 für alle drei Fahrspuren im Zeitraum von 8:56:00–8:58:30 Uhr und im Wegabschnitt zwischen 150–350 m in Weg-Zeit-Diagrammen durch schwarze Linien abgebildet. Das graue Gebiet entlang der Fahrzeugtrajektorien in Abbildung 5.3 gibt die Fahrzeuglänge an. Anhand der Fahrzeuglängen können längere Fahrzeuge (LKW) von kürzeren Fahrzeugen (PKWs) unterschieden werden. Beispielsweise kann in Abbildung 5.3 (a) ein LKW bei 8:57:00 Uhr und 150 m beobachtet werden. Abbildung 5.3 (b) und (c) sind Datenausschnitte aus Abbildung 5.2 (a) bzw. (b), die durch die gestrichelten Rechtecke A bzw. B gekennzeichnet sind. Es können gestaute Verkehrsstrukturen *fahrspurabhängig* beobachtet werden. Die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeugtrajektorien in den gestauten Verkehrsstrukturen ist kleiner als 20 km/h. Diese Verkehrsstrukturen sind durch je zwei gepunktete Linien und in Abbildung 5.2 (a) durch $M_1^{(1)}$ und $M_2^{(1)}$ und in Abbildung 5.2 (b) durch $L_1^{(1)}$, $L_2^{(1)}$, $L_3^{(1)}$ und $L_4^{(1)}$ gekennzeichnet. In Abbildung 5.3 können für die rechte, mittlere und linke Fahrspur die gestauten Verkehrsstrukturen $R_1^{(1)}$ und $R_2^{(1)}$ in Abbildung 5.3 (a) bzw. $M_1^{(1)}$ in Abbildung 5.3 (b) bzw. $L_1^{(1)}$ in Abbildung 5.3 (c) beobachtet werden.

Beim Vergleich der mittleren und linken Fahrspur (Abbildung 5.2 (a) bzw. (b)) entlang der Weg- und Zeitachse können in den gleichen räumlichen und zeitlichen Intervallen unterschiedliche Verkehrsstrukturen beobachtet werden. Beispielsweise entsteht im Zeitraum von 8:56:50–8:58:15 Uhr auf der mittleren Fahrspur (Abbildung 5.2 (a)) eine sich stromaufwärts bewegende gestaute Verkehrsstruktur, die durch $M_1^{(1)}$ gekennzeichnet ist. Wohingegen im gleichen Zeitraum von 8:56:50–8:58:15 Uhr auf der linken Fahrspur (Abbildung 5.2 (b)) die gestaute Verkehrsstruktur $L_1^{(1)}$ entsteht, die jedoch eine deutlich kleinere räumlich-zeitliche Ausbreitung aufweist als $M_1^{(1)}$. Im Zeitraum, in der die gestaute Verkehrsstruktur $L_2^{(1)}$ auf der linken Fahrspur beobachtet wird, wird auf der mittleren Fahrspur erst gar keine gestaute Verkehrsstruktur beobachtet. Die gestaute Verkehrsstruktur $M_2^{(1)}$ auf der mittleren Fahrspur bei ca. 9:13 Uhr erstreckt sich zu jeder räumlichen Position im Vergleich zu $M_1^{(1)}$, $L_1^{(1)}$ und $L_2^{(1)}$ über ein größeres

A4-West, vor dem Kreuz Köln-West, Montag, 8:55:00–9:14:30 Uhr, Oktober 2017



(a) Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur.



(b) Fahrzeugtrajektorien der linken Fahrspur.

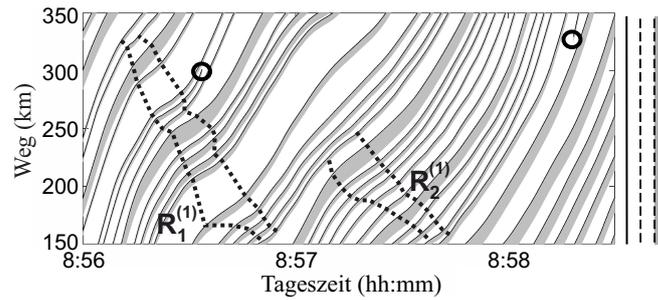
Abbildung 5.2: Drohnenmessung der dreispurigen Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West in Deutschland gemessen am Montag, 8:55:00–9:14:30 Uhr, im Oktober 2017 [28]. In (a) und (b) sind alle Fahrzeugtrajektorien der mittleren bzw. linken Fahrspur in Weg-Zeit-Diagrammen dargestellt. (a) entspricht dem Weg-Zeit-Diagramm aus Abbildung 5.1 (c). Gestaute Verkehrsstrukturen sind durch $M_1^{(1)}$, $M_2^{(1)}$, $L_1^{(1)}$, $L_2^{(1)}$, $L_3^{(1)}$ und $L_4^{(1)}$ gekennzeichnet. Angepasst aus [140].

Zeitintervall. Während $M_2^{(1)}$ auf der mittleren Fahrspur als eine größere gestaute Verkehrsstruktur beobachtet werden kann, entstehen im gleichen Zeitraum wie $M_2^{(1)}$ auf der linken Fahrspur zwei unterschiedliche gestaute Verkehrsstrukturen, die sich stromaufwärts bewegen und durch $L_3^{(1)}$ und $L_4^{(1)}$ gekennzeichnet sind.

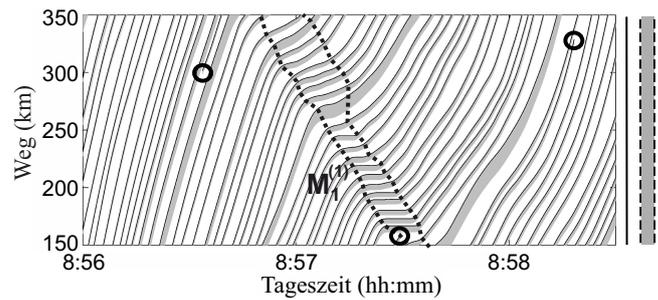
In Abbildung 5.3 sind die sich stromaufwärts bewegenden gestauten Verkehrsstrukturen $R_1^{(1)}$, $R_2^{(1)}$, $M_1^{(1)}$ und $L_1^{(1)}$ detaillierter auf allen drei Fahrspuren dargestellt. Bei der fahrspurabhängigen Betrachtung dieser Verkehrsstrukturen kann festgestellt werden, dass sie sich zeitlich versetzt stromaufwärts bewegen und unterschiedliche räumlich-zeitliche Formen aufweisen. Außerdem erfolgt die Entstehung der gestauten Verkehrsstrukturen $R_1^{(1)}$, $R_2^{(1)}$, $M_1^{(1)}$ und $L_1^{(1)}$ zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten. Darüber hinaus ist die Verkehrsdichte in der Umgebung beispielsweise der sich stromaufwärts bewegenden gestauten Verkehrsstruktur $M_1^{(1)}$ (Abbildung 5.3 (b)) relativ hoch aufgrund der kleinen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen.

Eine wichtige Erkenntnis bei der fahrspurabhängigen Betrachtung des Verkehrs auf der Autobahn ist, dass gestaute Verkehrsstrukturen sowohl unterschiedliche räumlich-zeitliche Ausbreitungen aufweisen als auch zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen können. Viele weitere Drohnenmessungen von Autobahnabschnitten aus [28] bestätigen diese Erkenntnis (siehe z. B. Abbildung 5.4).

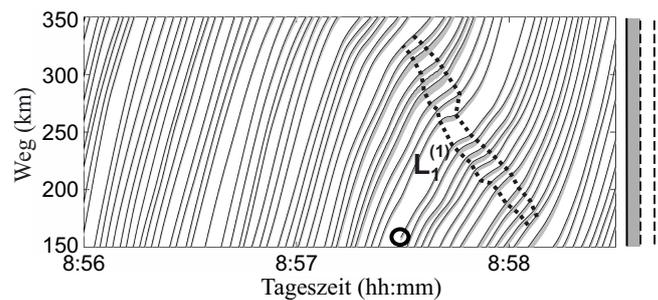
A4-West, vor dem Kreuz Köln-West, Montag, 8:56:00–8:58:30 Uhr, Oktober 2017



(a) Fahrzeugtrajektorien der rechten Fahrspur.



(b) Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur.



■ = Fahrzeuglänge ○ = Spurwechselvorgang

(c) Fahrzeugtrajektorien der linken Fahrspur.

Abbildung 5.3: Drohnenmessung der dreispurigen Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West in Deutschland gemessen am Montag, 8:56:00–8:58:30 Uhr, im Oktober 2017 [28]. Alle Fahrzeugtrajektorien der rechten (a), mittleren (b) und linken (c) Fahrspur sind in Weg-Zeit-Diagrammen durch schwarze Linien dargestellt. Die als schwarze Linien abgebildeten Fahrzeugtrajektorien entstehen durch das Verbinden der räumlich-zeitlichen Positionen der Fahrzeugfronten zu jedem Frame der Videoaufnahme der Drohnenmessung. Das graue Gebiet entlang der Fahrzeugtrajektorien gibt die Fahrzeuglängen an. (b) und (c) sind Datenausschnitte aus Abbildung 5.2 (a) bzw. (b), die durch die gestrichelten Rechtecke A bzw. B gekennzeichnet sind. Die schwarzen Kreise markieren die räumlich-zeitlichen Positionen der Spurwechselvorgänge. Gestaute Verkehrsstrukturen sind durch $R_1^{(1)}$, $R_2^{(1)}$, $M_1^{(1)}$ und $L_1^{(1)}$ gekennzeichnet. Angepasst aus [140].

In der Drei-Phasen-Verkehrstheorie (Kapitel 3.3) ist die sich stromaufwärts bewegende gestaute Verkehrsstruktur $M_1^{(1)}$ aus Abbildung 5.2 (a) und 5.3 (b) ein *sich bewegendes breiter Stau* (J) (Definition 3.10). Die charakteristische Eigenschaft eines sich bewegendes breiter Staus (J) ist, dass die mittlere Geschwindigkeit \bar{v}_{ab}^J der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront (Definition 3.8) von J über die Zeit beibehalten wird. Nach Gleichung (3.2) gilt:

$\bar{v}_{ab}^J \approx -15$ km/h. Die Erfassung von sich bewegenden breiten Staus auf Autobahnen durch Drohnen ermöglicht eine Berechnung von \bar{v}_{ab}^J . Für J aus Abbildung 5.3 (b) ergibt sich

$$\bar{v}_{ab}^J \approx -15.45 \text{ km/h.}$$

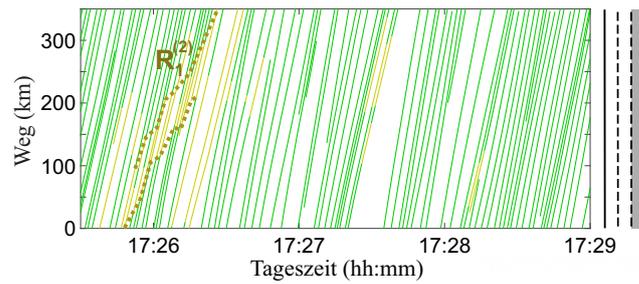
Dadurch wird die charakteristische Eigenschaft eines sich bewegenden breiten Staus (J) auf Basis fahrspurabhängiger, vollständiger und hochgenauer Drohnen Daten verifiziert.

In Abbildung 5.4 ist eine weitere Drohnenmessung, die an einem Donnerstag im September 2017 an derselben Autobahninfrastruktur wie Abbildung 5.2 und 5.3 durchgeführt wurde, dargestellt. Die Fahrzeugtrajektorien von allen drei Fahrspuren sind im Zeitraum von 17:25:30–17:29:00 Uhr in jeweils einem Weg-Zeit-Diagramm abgebildet und anhand der Fahrzeuggeschwindigkeiten durch folgende Geschwindigkeitsintervalle gefärbt: Rot = 0–30 km/h, Gelb = 30–60 km/h und Grün > 60 km/h. Ein rot oder gelb gefärbtes räumlich-zeitliches Verkehrsgebiet wird einer gestauten Verkehrsstruktur zugeordnet. Auf der linken Fahrspur (Abbildung 5.4 (c)) können die gestauten Verkehrsstrukturen $L_2^{(2)}$ und $L_3^{(2)}$ zwischen 17:26:45 und 17:29:00 Uhr beobachtet werden, während auf der mittleren und rechten Fahrspur (Abbildung 5.4 (b) bzw. (a)) in demselben Zeitraum keine gestauten Verkehrsstrukturen entstehen. Diese Beobachtung bestätigt die Erkenntnis, dass gestaute Verkehrsstrukturen fahrspurabhängig zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen und unterschiedliche räumlich-zeitliche Formen aufweisen können.

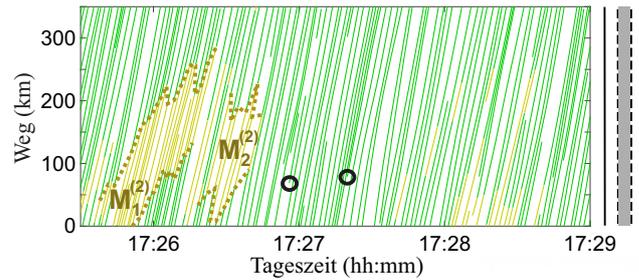
Nun wird auf die in den Drohnen Daten beobachteten Spurwechsellvorgänge eingegangen. In Abbildung 5.3 (b) findet ein Spurwechsellvorgang, der durch einen schwarzen Kreis gekennzeichnet ist, von der mittleren Fahrspur auf die linke Fahrspur (Abbildung 5.3 (c)) bei 8:57:30 Uhr und 160 m statt. Ein möglicher Grund des Fahrers für den Spurwechsel könnte die Vermeidung der gestauten Verkehrsstruktur $M_1^{(1)}$ auf der mittleren Fahrspur sein. Zu dem Zeitpunkt von $M_1^{(1)}$ durchquert der Fahrer auf der linken Fahrspur keine gestaute Verkehrsstruktur. Jedoch muss der Fahrer auf der linken Fahrspur zu einem späteren Zeitpunkt und Ort die gestaute Verkehrsstruktur $L_1^{(1)}$ durchqueren. Ein ähnlicher Spurwechsellvorgang kann in Abbildung 5.4 (c) bei den Fahrern um 17:26:55 Uhr und bei 70 m und um 17:27:20 Uhr und bei 80 m beobachtet werden. Beide wechseln die Fahrspur von der linken auf die mittlere Fahrspur und durchqueren daher die gestaute Verkehrsstruktur $L_2^{(2)}$ nicht.

In Kapitel 5.3 werden Methoden der gleitenden Mittelwerte basierend auf Drohnen Daten auf die Verkehrsdichte jeder Fahrspur angewandt. Bei der fahrspurabhängigen Betrachtung der berechneten Verkehrsstrukturen *mit hoher Verkehrsdichte* kann festgestellt werden, dass sie zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen und unterschiedliche räumlich-zeitliche Formen aufweisen. Diese Beobachtung ähnelt den Beobachtungen aus den Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.4.

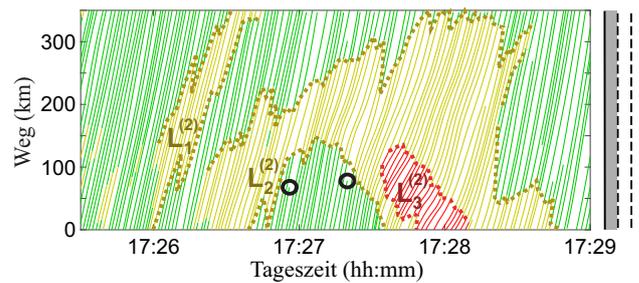
A4-West, vor dem Kreuz Köln-West, Donnerstag, 17:25:30–17:29:00 Uhr, September 2017



(a) Fahrzeugtrajektorien der rechten Fahrspur.



(b) Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur.



■ = 0–30 km/h, ■ = 30–60 km/h, ■ = >60 km/h ○ = Spurwechselvorgang

(c) Fahrzeugtrajektorien der linken Fahrspur.

Abbildung 5.4: Drohnenmessung der dreispurigen Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West in Deutschland gemessen am Donnerstag, 17:25:30–17:29:00 Uhr, im September 2017 [28]. Alle Fahrzeugtrajektorien der rechten (a), mittleren (b) und linken (c) Fahrspur sind in Weg-Zeit-Diagrammen dargestellt und anhand der Fahrzeuggeschwindigkeiten durch folgende Geschwindigkeitsintervalle gefärbt: Rot = 0–30 km/h, Gelb = 30–60 km/h und Grün > 60 km/h. Die schwarzen Kreise in (b) und (c) markieren die räumlich-zeitlichen Positionen von zwei Spurwechselvorgängen. Gestaute Verkehrsstrukturen sind durch $R_1^{(2)}$, $M_1^{(2)}$, $M_2^{(2)}$, $L_1^{(2)}$, $L_2^{(2)}$ und $L_3^{(2)}$ gekennzeichnet. Angepasst aus [140].

5.3 Verkehrsdichte-Methode basierend auf mikroskopischen Verkehrsdaten

Es wird eine Verkehrsdichte-Methode zur Bestimmung der Verkehrsdichte auf Autobahnen entwickelt, die auf den räumlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen und auf Methoden der gleitenden Mittelwerte basiert [141]. Die räumlichen Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen werden anhand von fahrspurgenauen Fahrzeugpositionsdaten aus Drohnenmessungen ermittelt. Die mit der Verkehrsdichte-Methode berechneten Verkehrsstruk-

turen mit hoher Verkehrsdichte werden fahrspurabhängig auf ihre räumlich-zeitlichen Formen und die Eigenschaften ihrer Entstehung untersucht. Außerdem werden statistischen Eigenschaften zu den mit der Verkehrsdichte-Methode ermittelten Werten diskutiert.

Definition 5.1. *Der räumliche Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen (engl. distance headway) wird als δ_{Fzg} bezeichnet. Der räumliche Abstand eines Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug entspricht daher ebenfalls δ_{Fzg} . Der Abstand δ_{Fzg} zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen zu einem festen Zeitpunkt wird berechnet durch den räumlichen Abstand zwischen der Fahrzeugfront des hinteren Fahrzeugs und dem Fahrzeugheck des vorausfahrenden Fahrzeugs (siehe Abbildung 5.5).*

Aufgrund der fahrspurgenauen Auflösung der Drohnenmessung können die räumlichen Abstände δ_{Fzg} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ermittelt werden. In Abbildung 5.5 ist ein Frame (Bild) einer Videoaufnahme einer Drohnenmessung von einem Autobahnabschnitt zu einem bestimmten Zeitpunkt aus der Vogelperspektive beispielhaft dargestellt. Die räumlichen Abstände δ_{Fzg} zwischen den aufeinanderfolgenden Fahrzeugen sind durch Linien zwischen den Fahrzeugen in folgenden Farben markiert: Rot für sehr kleine, Gelb für kleine und Grün für etwas größere räumliche Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Das Fahrzeug auf der rechten Fahrspur in Abbildung 5.5, auf das ein schwarzer Pfeil zeigt, bekommt beispielhaft die Verkehrsdichte-Information aus den räumlichen Abständen der vorausfahrenden Fahrzeuge. Diese Verkehrsdichte-Information könnte z. B. als Warnung über bevorstehenden Verkehr mit hoher Verkehrsdichte im Fahrzeug genutzt werden.

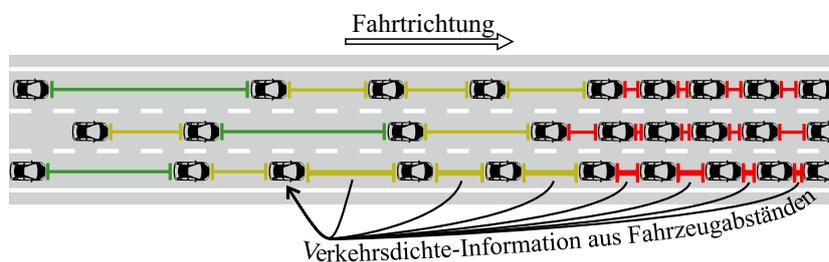


Abbildung 5.5: Ein Frame (Bild) einer Videoaufnahme einer Drohnenmessung von einem Autobahnabschnitt zu einem bestimmten Zeitpunkt ist aus der Vogelperspektive beispielhaft dargestellt. Die räumlichen Abstände δ_{Fzg} (Definition 5.1) zwischen den aufeinanderfolgenden Fahrzeugen sind durch Linien zwischen den Fahrzeugen in folgenden Farben markiert: Rot für sehr kleine, Gelb für kleine und Grün für etwas größere räumliche Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Das Fahrzeug auf der rechten Fahrspur, auf das ein schwarzer Pfeil zeigt, bekommt beispielhaft die Verkehrsdichte-Information aus den räumlichen Abständen der vorausfahrenden Fahrzeuge. Angepasst aus [142].

5.3.1 Methoden der gleitenden Mittelwerte angewandt auf Fahrzeugpositionsdaten

Die Methoden der *gleitenden Mittelwerte* (engl. *moving average*, kurz *MA*) sind in der Wissenschaft häufig verwendete Verfahren, wie beispielsweise zum Glätten von verrauschten Daten. In der Literatur sind gleitende Mittelwerte auch unter anderen Begriffen bekannt, z. B. als Filterungs- oder Glättungsmethode. Es gibt zahlreiche Untersuchungen, die ungewichtete, gewichte-

te und exponentielle gleitende Mittelwerte behandeln (siehe z. B. [143–145]). Der *exponentielle gleitende Mittelwert (EMA)* hat folgende einfache Form:

$$A_i = a \cdot A_{i-1} + (1 - a) \cdot X_i,$$

wobei X_i der gemessene Datenpunkt einer Datenreihe zum Zeitpunkt i ist, A_i der zeitabhängige gemittelte Wert zum Zeitpunkt i und a ein Glättungsparameter, z. B. $a = 0.8$.

Methoden der gleitenden Mittelwerte (MA) werden oft auf Datenreihen angewandt, die eine (annähernd) *äquidistante Zeitschrittweite* zwischen den jeweiligen Datenpunkten haben. Jedoch haben die Datenreihen, die für die in diesem Kapitel entwickelte Verkehrsdichte-Methode verwendet werden, *keine* äquidistante Zeitschrittweite zwischen den Datenpunkten. In [141] wird der exponentielle gleitende Mittelwert (EMA) derart ausgebaut, dass die Eigenschaft von Datenreihen keine äquidistante Zeitschrittweite zu haben mit betrachtet wird. Dieser ausgebaut EMA wird als *TEMA* (engl. *time-exponential moving average*) bezeichnet. Außerdem hat EMA einen relativ starken *Bias* zum ersten verwendeten Datenpunkt X_0 der Datenreihe. Dies gilt auch für TEMA. Daher wurde in [141] TEMA derart ausgebaut, dass es keinen starken Bias mehr zum Anfangswert X_0 gibt. Die sich daraus ergebende Methode wird als *UTEMA* (engl. *unbiased time-exponential moving average*) bezeichnet [141, 146–149]. Für die in diesem Kapitel entwickelte Verkehrsdichte-Methode wird eine *adaptierte Form von UTEMA* zur Mittelwertbildung verwendet.

UTEMA kann durch folgende Gleichungen *rekursiv* berechnet werden [141]:

$$S_t = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ X_0 & t = t_0 \\ e^{-\beta \cdot (t-t_{i-1})} \cdot S_{t_{i-1}} + X_i & t = t_i \\ e^{-\beta \cdot (t-t_i)} \cdot S_{t_i} & t_i < t < t_{i+1} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$N_t = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ 1 & t = t_0 \\ e^{-\beta \cdot (t-t_{i-1})} \cdot N_{t_{i-1}} + 1 & t = t_i \\ e^{-\beta \cdot (t-t_i)} \cdot N_{t_i} & t_i < t < t_{i+1} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$A_t = \begin{cases} \frac{S_t}{N_t} & N_t > 0 \\ 0 & N_t \leq 0 \end{cases}, \quad (5.3)$$

wobei X_i der gemessene Datenpunkt einer Datenreihe zum Zeitpunkt t_i ist, A_t der zeitabhängige gemittelte Wert zum Zeitpunkt t und β ein Glättungsparameter, z. B. $\beta = \frac{0.25}{\Delta t}$ bei einer Datenreihe mit der äquidistanten Zeitschrittweite Δt . Die Zeitreihe t_0, t_1, t_2, \dots ist in aufsteigender Reihenfolge geordnet und t_0 ist der Zeitpunkt, an dem der Datenpunkt X_0 gemessen wurde.

Eine wichtige Metrik zur Charakterisierung der Eigenschaften von gleitenden Mittelwerten (MA) ist das *Gedächtnis M* (engl. *memory*) eines MA. Das Gedächtnis M kann im Wesentlichen aufgefasst werden als die Zeitspanne, über die die Datenpunkte X_0, X_1, X_2, \dots gemittelt werden. Die durchschnittliche Zeitdauer des Beitrags eines Datenpunktes X_i an dem gemittelten Wert A_{t_k} wird quantifiziert durch das Gedächtnis M . Für UTEMA gilt:

$$M = \frac{1}{\beta}.$$

Beispielsweise ergibt sich für $\beta = \frac{0.25}{\Delta t}$ mit $\Delta t = 20$ Zeiteinheiten ein Gedächtnis von $M = \frac{\Delta t}{0.25} = 80$ Zeiteinheiten. In den Abbildungen 5.7 (c) und 5.9 wurde $\beta = \frac{1}{100}$ verwendet, d. h. $M = 100$.

Nun wird auf die *adaptierte Form von UTEMA (adaptierter UTEMA)* eingegangen. Der adaptierte UTEMA wird für die Verkehrsdichte-Methode, die in diesem Kapitel entwickelt wird, verwendet. UTEMA benutzt eine Datenreihe bestehend aus den Datenpunkten X_0, X_1, X_2, \dots zu den gemessenen Zeitpunkten t_0, t_1, t_2, \dots , wobei die Zeitschrittweite häufig nicht äquidistant ist. Für den adaptierten UTEMA wird eine *räumliche Positionsreihe* d_0, d_1, d_2, \dots anstelle einer Zeitreihe t_0, t_1, t_2, \dots verwendet. Die Datenpunkte X_0, X_1, X_2, \dots werden an den räumlichen Fahrzeugpositionen d_0, d_1, d_2, \dots betrachtet, wobei d_i der Fahrzeugmitte des i -ten Fahrzeugs entspricht. Beispielwerte für die Fahrzeugpositionen sind $d_0 = 400$ m, $d_1 = 380$ m, $d_2 = 340$ m, etc. Der Datenpunkt X_i entspricht dem räumlichen Abstand δ_{Fzg} (Definition 5.1) zwischen dem Fahrzeug i und $i - 1$. Anstelle von A_t wird beim adaptierten UTEMA der ortsabhängige gemittelte Dichtewert mit A_d bezeichnet, wobei A_d an der räumlichen Position d anhand der Datenpunkte X_0, X_1, X_2, \dots rekursiv mit den Gleichungen (5.4)–(5.6) berechnet wird. Da mit der Verkehrsdichte-Methode beabsichtigt wird für ein Fahrzeug eine Verkehrsdichte-Information über den räumlich bevorstehenden Verkehr zu ermitteln, wird der adaptierte UTEMA auf eine räumliche Positionsreihe d_0, d_1, d_2, \dots angewandt, die in *absteigender* Reihenfolge geordnet ist, d. h. die Ungleichungen $d_0 > d_1 > d_2 > \dots$ gelten. Die Zeitreihe t_0, t_1, t_2, \dots für UTEMA ist in *aufsteigender* Reihenfolge geordnet. Daher sind die Zeitdifferenzen $t - t_i$ und $t - t_{i-1}$ in den Gleichungen (5.1) und (5.2) positiv. Aufgrund der absteigenden Reihenfolge der räumlichen Positionsreihe d_0, d_1, d_2, \dots werden die Differenzen $d - d_i$ und $d - d_{i-1}$ beim adaptierten UTEMA angepasst zu $d_i - d$ bzw. $d_{i-1} - d$ (siehe Gleichungen (5.4) und (5.5)).

Zur Erläuterung wird ein kurzes Beispiel gegeben. Angenommen zum Zeitpunkt 8:57 Uhr befindet sich ein Fahrzeug an der räumlichen Position $d_j = 200$ m (siehe z. B. Abbildung 5.3 (b)). Der Datenpunkt X_j entspricht dem räumlichen Abstand δ_{Fzg} zwischen den Fahrzeugen j und $j - 1$, wobei $d_{j-1} > d_j$ gilt. Der Glättungsparameter β für den adaptierten UTEMA wird gewählt als $\beta = \frac{1}{100}$, d. h. das Gedächtnis des adaptierten UTEMA beträgt $M = 100$ Meter. Dann wird anhand der Gleichungen (5.4)–(5.6) der gemittelte *Dichtewert* A_{d_j} rekursiv berechnet. A_{d_j} gibt an der Fahrzeugposition $d_j = 200$ m eine Verkehrsdichte-Information über den räumlich bevorstehenden Verkehr mit einem Gedächtnis von 100 Metern an. Das Fahrzeug bei d_j könnte einen relativ geringen gemittelten Dichtewert A_{d_j} z. B. als eine Warnung über bevorstehenden Verkehr mit hoher Verkehrsdichte nutzen.

Der *adaptierte UTEMA* kann durch folgende Gleichungen *rekursiv* berechnet werden:

$$S_d = \begin{cases} 0 & d > d_0 \\ X_0 & d = d_0 \\ e^{-\beta \cdot (d_{i-1} - d)} \cdot S_{d_{i-1}} + X_i & d = d_i \\ e^{-\beta \cdot (d_i - d)} \cdot S_{d_i} & d_i > d > d_{i+1} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$N_d = \begin{cases} 0 & d > d_0 \\ 1 & d = d_0 \\ e^{-\beta \cdot (d_{i-1} - d)} \cdot N_{d_{i-1}} + 1 & d = d_i \\ e^{-\beta \cdot (d_i - d)} \cdot N_{d_i} & d_i > d > d_{i+1} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$A_d = \begin{cases} \frac{S_d}{N_d} & N_d > 0 \\ 0 & N_d \leq 0 \end{cases}, \quad (5.6)$$

wobei X_i der räumliche Abstand δ_{FzG} zwischen den Fahrzeugen i und $i - 1$ ist, A_d der ortsabhängige gemittelte *Dichtewert* an der räumlichen Position d und β ein Glättungsparameter, z. B. $\beta = \frac{1}{100}$. Für das Gedächtnis M des adaptierten UTEMA gilt wie bei UTEMA $M = \frac{1}{\beta}$.

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 5.6 das rekursive Vorgehen des adaptierten UTEMA für die Datenpunkte $X_i, X_{i+1}, X_{i+2}, \dots$, die den räumlichen Abstände δ_{FzG} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen entsprechen, an den Fahrzeugpositionen $d_i, d_{i+1}, d_{i+2}, \dots$ dargestellt. Die Fahrzeugpositionen ergeben sich aus einem Frame der Videoaufnahme der Drohne für eine Fahrspur. Die gemittelten Dichtewerte $A_{d_{i+1}}, A_{d_{i+2}}, A_{d_{i+3}}, \dots$ werden *rekursiv* anhand der Gleichungen (5.4) – (5.6) berechnet. Beispielsweise bekommt in Abbildung 5.6 das Fahrzeug an der Position d_{i+4} eine Verkehrsdichte-Information über den räumlich bevorstehenden Verkehr durch den berechneten Dichtewert $A_{d_{i+4}}$.

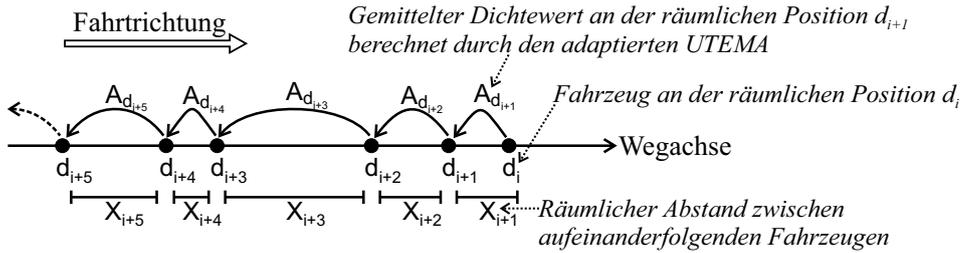


Abbildung 5.6: Darstellung des rekursiven Vorgehens des adaptierten UTEMA für die Datenpunkte $X_i, X_{i+1}, X_{i+2}, \dots$ an den Fahrzeugpositionen $d_i, d_{i+1}, d_{i+2}, \dots$. Die Fahrzeugpositionen ergeben sich aus einem Frame der Videoaufnahme der Drohne für eine Fahrspur. Die gemittelten Dichtewerte $A_{d_{i+1}}, A_{d_{i+2}}, A_{d_{i+3}}, \dots$ werden rekursiv anhand der Gleichungen (5.4) – (5.6) berechnet. Angepasst aus [142].

5.3.2 Lokale Verkehrsdichte-Methode basierend auf gemittelten Fahrzeugabständen

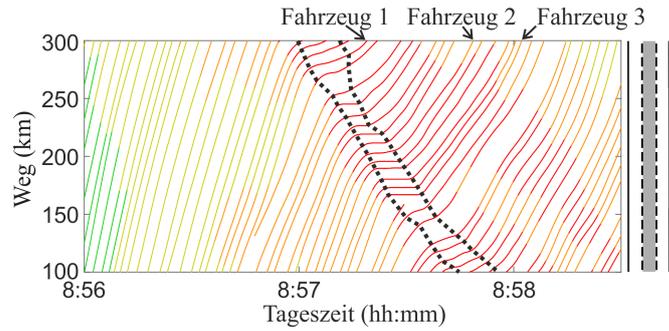
Es wird die *Verkehrsdichte-Methode*, die auf eine gesamte Drohnenmessung angewandt wird, beschrieben. Hierfür wird zur Mittelwertbildung der in Kapitel 5.3.1 eingeführte *adaptierte UTEMA* verwendet. Die einzelnen Frames der Videoaufnahme der Drohne werden in zeitlich aufsteigender Reihenfolge nacheinander betrachtet. Die Drohnenmessung liefert in 40-Millisekunden-Intervallen je ein Frame [28]. Der Algorithmus für die Verkehrsdichte-Methode kann in folgende vier Schritte aufgeteilt werden:

- Schritt 1: Betrachte die Daten aus dem Frame der Videoaufnahme der Drohne von dem Autobahnabschnitt beginnend mit dem zeitlich ersten Frame.
- Schritt 2: Definiere von diesem Frame für jede Fahrspur die absteigend geordneten Fahrzeugpositionen d_0, d_1, d_2, \dots und berechne alle räumlichen Abstände X_0, X_1, X_2, \dots zwischen den aufeinanderfolgenden Fahrzeugen.
- Schritt 3: Berechne für jede Fahrzeugposition d_i den gemittelten Dichtewert A_{d_i} rekursiv anhand des adaptierten UTEMA durch die Gleichungen (5.4)–(5.6).
- Schritt 4: Betrachte den nächsten Frame der Videoaufnahme der Drohne und beginne mit Schritt 1 bis das letzte Frame erreicht ist.

Die durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewerte A_{d_i} werden nun über Raum und Zeit entlang von Fahrzeugtrajektorien näher untersucht. Hierzu werden zusätzlich Fahrzeuggeschwindigkeiten und räumliche Abstände δ_{Fzg} zu vorausfahrenden Fahrzeugen betrachtet.

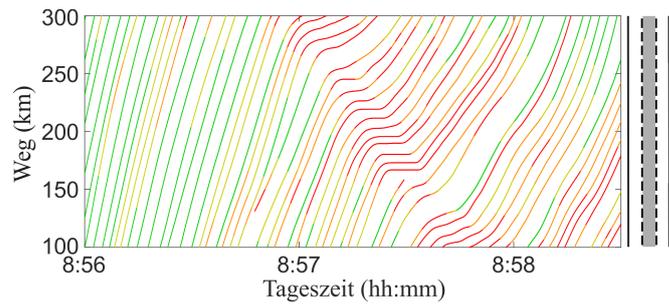
Abbildung 5.7 ist ein Datenausschnitt der Fahrzeugtrajektorien von der mittleren Fahrspur aus Abbildung 5.2 (a) von 8:56:00 bis 8:58:30 Uhr und zwischen 100 und 300 Metern. In Abbildung 5.7 (a) sind die Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit-Diagramm anhand der Fahrzeuggeschwindigkeiten durch folgende Geschwindigkeitsintervalle gefärbt: Rot = 0–20 km/h, Orange = 20–35 km/h, Gelb = 35–50 km/h und Grün > 50 km/h. In Abbildung 5.7 (b) sind die Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit-Diagramm anhand der räumlichen Abstände δ_{Fzg} zu den vorausfahrenden Fahrzeugen durch folgende Abstandsintervalle gefärbt: Rot = 0–10 m, Orange = 10–15 m, Gelb = 15–20 m und Grün > 20 m.

Ein sich stromaufwärts bewegendes Stau, in der die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge kleiner als 10 km/h beträgt, ist in Abbildung 5.7 (a) zwischen 8:57 und 8:58 Uhr durch zwei schwarz gepunktete Linien markiert. Es kann beobachtet werden, dass die Fahrzeuggeschwindigkeiten vor dem Eintritt in den sich stromaufwärts bewegendes Stau höher sind als nach dem Austritt. Vor dem Eintritt betragen die Fahrzeuggeschwindigkeiten im Mittel zwischen 20 und 35 km/h und sind durch orange gefärbte Trajektorien gekennzeichnet, während die Fahrzeuggeschwindigkeiten nach dem Austritt im Mittel kleiner als 20 km/h betragen und durch rot gefärbte Trajektorien markiert sind. Außerdem können in Abbildung 5.7 (b) im Gebiet des sich stromaufwärts bewegendes Staus, das in Abbildung 5.7 (a) gekennzeichnet ist, sehr kleine räumliche Abstände δ_{Fzg} zu den vorausfahrenden Fahrzeugen beobachtet werden. Der durchschnittliche Abstand δ_{Fzg} im sich stromaufwärts bewegendes Stau ist kleiner als 10 m und durch rot gefärbte Fahrzeugtrajektorien markiert. Des Weiteren ist δ_{Fzg} , wie bereits bei den Fahrzeuggeschwindigkeiten in Abbildung 5.7 (a) beobachtet wurde, beim Eintritt in den sich stromaufwärts bewegendes Stau größer als beim Austritt. Beim Austritt kann zusätzlich festgestellt werden, dass sich einzelne Fahrzeuge mit sehr kleinen Abständen zum vorausfahrenden Fahrzeug räumlich-zeitlich fortbewegen, wie z. B. die zwei Fahrzeuge bei ca. 170 m und 8:57:35 Uhr in Abbildung 5.7 (b).



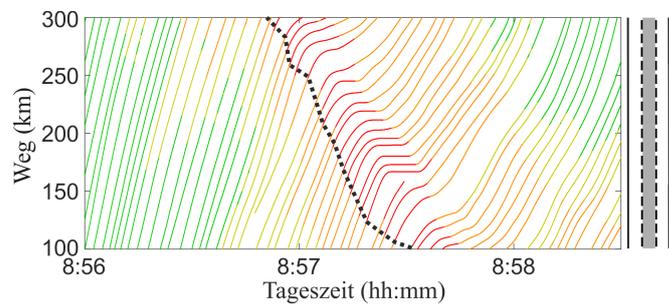
■ = 0–20 km/h, ■ = 20–35 km/h, ■ = 35–50 km/h, ■ > 50 km/h

(a) Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur gefärbt nach der Fahrzeuggeschwindigkeit.



■ = 0–10 m, ■ = 10–15 m, ■ = 15–20 m, ■ > 20 m

(b) Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur gefärbt nach dem Abstand δ_{Fzg} zum vorausfahrenden Fahrzeug.



■ = 0–10 m, ■ = 10–15 m, ■ = 15–20 m, ■ > 20 m

(c) Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur gefärbt nach dem durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewert A_{d_i} .

Abbildung 5.7: Datenausschnitt der Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur aus Abbildung 5.2 (a) von 8:56:00 bis 8:58:30 Uhr und zwischen 100 und 300 Metern. Die Fahrzeugtrajektorien sind in (a) nach der Fahrzeuggeschwindigkeit, in (b) nach dem Abstand δ_{Fzg} zum vorausfahrenden Fahrzeug und in (c) nach dem durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewert A_{d_i} gefärbt. Die jeweilige Farblgende ist unterhalb des Weg-Zeit-Diagramms dargestellt. Angepasst aus [142].

In Abbildung 5.7 (c) sind die Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit-Diagramm anhand der durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewerte A_{d_i} durch folgende Dichteintervalle gefärbt: Rot = 0–10 m, Orange = 10–15 m, Gelb = 15–20 m und Grün > 20 m. Eine *Verkehrsdichtefront* bildet sich aus den berechneten Dichtewerten A_{d_i} zwischen 8:56:50 und 8:57:30 Uhr und ist durch eine gepunktete schwarze Linie markiert. Sie bewegt sich räumlich-zeitlich strom-

aufwärts, ähnlich wie der sich stromaufwärts bewegende Stau aus Abbildung 5.7 (a). Die Verkehrsdichtefront entsteht durch das Verbinden der räumlich-zeitlichen Fahrzeugpositionen, an denen ein Übergang der berechneten Dichtewerte A_{d_i} in das sehr kleine Dichteintervall zwischen 0 und 10 m stattfindet. Die Abschnitte der Fahrzeugtrajektorien, die sich im Dichteintervall zwischen 0 und 10 m befinden, sind als rote Trajektorien gekennzeichnet. Die Verkehrsdichtefront befindet sich räumlich-zeitlich sowohl *vor* dem sich stromaufwärts bewegenden Stau, der in Abbildung 5.7 (a) durch zwei gepunktete schwarze Linien markiert ist, als auch *vor* dem Gebiet, in dem die räumlichen Abstände δ_{Fzg} zu den vorausfahrenden Fahrzeugen sehr klein sind und das sich aus den in Abbildung 5.7 (b) durch rot gefärbte Fahrzeugtrajektorien bildet. Daher bekommen die Fahrzeuge beim Durchqueren der Verkehrsdichtefront die Verkehrsdichte-Information, dass das räumlich bevorstehende Verkehrsgebiet sehr dicht ist, *bevor* sie dieses Verkehrsgebiet erreichen, in der eine sehr geringe durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit vorliegt und an der die Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen im Mittel sehr klein sind. In Abbildung 5.7 (c) befindet sich die Verkehrsdichtefront ca. 100 m und 15 s vor dem Verkehrsgebiet mit der geringen durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit und den kleinen Abständen zu vorausfahrenden Fahrzeugen.

In Abbildung 5.8 sind drei Fahrzeugtrajektorien, die in Abbildung 5.7 (a) durch Fahrzeug 1, 2 und 3 gekennzeichnet sind, anhand der Abstände δ_{Fzg} zu den vorausfahrenden Fahrzeugen (gepunktete Linie) und anhand der durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewerte A_{d_i} (durchgezogene Linie) dargestellt. Die Werte für δ_{Fzg} und A_{d_i} sind in Abbildung 5.8 (a), (c) und (e) über den Weg und in Abbildung 5.8 (b), (d) und (f) über die Zeit abgebildet. Abbildung 5.8 illustriert durch die mit schwarzen Pfeilen gekennzeichneten Stellen die Beobachtung der Verkehrsdichtefront aus Abbildung 5.7 (c), dass die Dichtewerte A_{d_i} (durchgezogene Linie) zeitlich und räumlich *vor* den Abständen δ_{Fzg} (gepunktete Linie) auf kleinere Werte fallen.

Es ist zu beachten, dass die räumlich-zeitliche Position der Verkehrsdichtefront aus Abbildung 5.7 (c) vom Gedächtnis des adaptierten UTEMA abhängt, das bei der Verkehrsdichte-Methode zur Berechnung der Dichtewerte A_{d_i} verwendet wird. Ein größeres Gedächtnis würde im Wesentlichen das räumliche Intervall vergrößern, über das die Datenpunkte beim adaptierten UTEMA gemittelt werden. In Abbildung 5.7 (c) und 5.9 wurde für den adaptierten UTEMA der Glättungsparameter $\beta = \frac{1}{100 \text{ Meter}}$ gewählt, d. h. ein Gedächtnis von $M = 100$ Meter.

In Abbildung 5.9 werden die Dichtewerte A_{d_i} für alle drei Fahrspuren der dreispurigen Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West in Deutschland betrachtet. Die abgebildeten Fahrzeugtrajektorien sind nach den gleichen Dichteintervallen wie in Abbildung 5.7 (c) gefärbt: Rot = 0–10 m, Orange = 10–15 m, Gelb = 15–20 m und Grün > 20 m. Abbildung 5.9 (b) und (c) sind Datenausschnitte der Fahrzeugtrajektorien aus Abbildung 5.2 (a) bzw. (b) von 8:56:00 bis 8:58:30 Uhr und zwischen 100 und 300 Metern.

In Abbildung 5.9 können *Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte fahrspurabhängig* beobachtet werden. Die Dichtewerte A_{d_i} der Fahrzeugtrajektorien in den Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte sind im Mittel kleiner als 10 m. Wie bereits in Abbildung 5.7 (c) diskutiert und durch eine gepunktete schwarze Linie markiert bildet sich auf der mittleren Fahrspur (Abbildung 5.9 (b)) eine Verkehrsdichtefront zwischen 8:56:50 und 8:57:30 Uhr. Räumlich-zeitlich *nach* dieser Verkehrsdichtefront entsteht eine Verkehrsstruktur mit hoher Verkehrsdichte. Auf der rechten und linken Fahrspur wiederum entstehen Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrs-

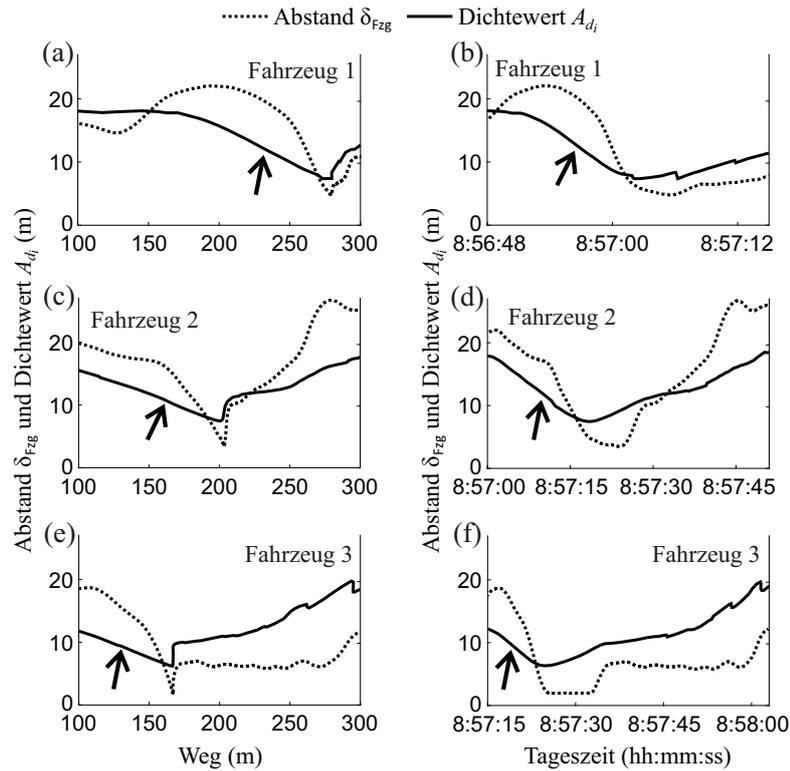
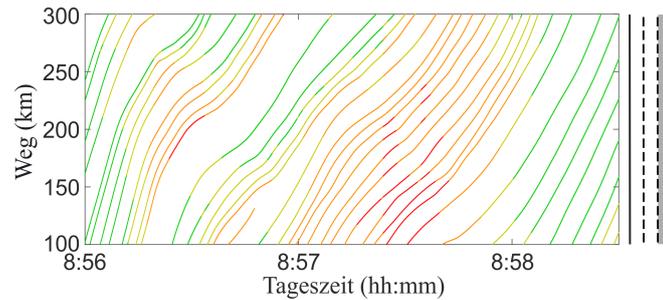
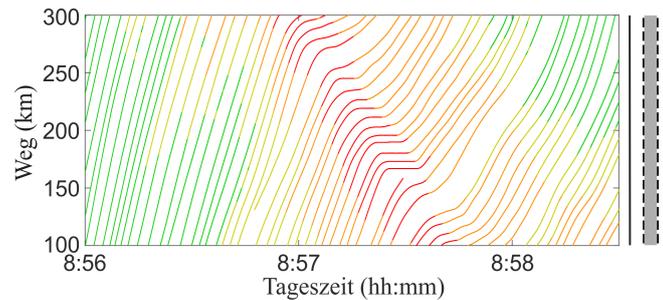


Abbildung 5.8: Darstellung von drei Fahrzeugtrajektorien, die in Abbildung 5.7 (a) durch Fahrzeug 1, 2 und 3 gekennzeichnet sind, für die Abstände δ_{FzG} zu den vorausfahrenden Fahrzeugen (gepunktete Linie) und für die durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewerte A_{d_i} (durchgezogene Linie) über den Weg in (a), (c) und (e) und über die Zeit in (b), (d) und (f). (a) und (b) entsprechen Fahrzeug 1, (c) und (d) entsprechen Fahrzeug 2 und (e) und (f) entsprechen Fahrzeug 3. Angepasst aus [142].

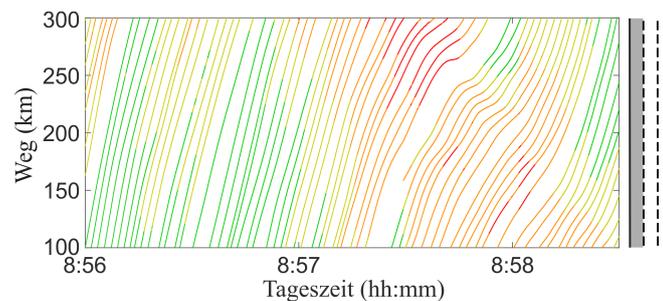
dichte an anderen räumlich-zeitlichen Gebieten. Auf der rechten Fahrspur (Abbildung 5.9 (a)) entsteht eine Verkehrsstruktur mit hoher Verkehrsdichte bei ca. 8:57:25 Uhr und zwischen 100 und 160 m, und auf der linken Fahrspur (Abbildung 5.9 (c)) bei ca. 8:57:35 Uhr und zwischen 230 und 300 m. Die Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte entstehen auf allen Fahrspuren zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten und breiten sich räumlich-zeitlich unterschiedlich aus. Dies ähnelt der Erkenntnis aus Kapitel 5.2 (Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.4), dass *gestaute* Verkehrsstrukturen fahrspurabhängig zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen und unterschiedliche räumlich-zeitliche Formen aufweisen können.



(a) Fahrzeugtrajektorien der rechten Fahrspur.



(b) Fahrzeugtrajektorien der mittleren Fahrspur.



■ = 0 – 10 m, ■ = 10 – 15 m, ■ = 15 – 20 m, ■ > 20 m

(c) Fahrzeugtrajektorien der linken Fahrspur.

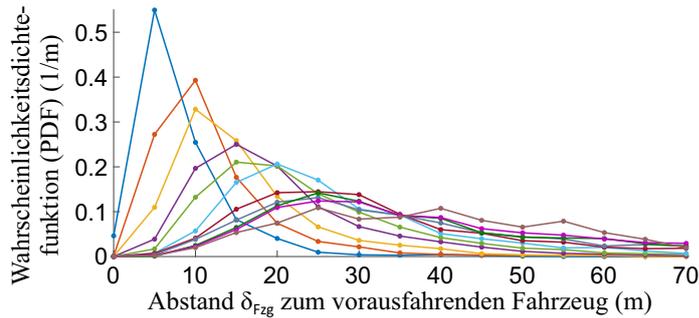
Abbildung 5.9: Fahrzeugtrajektorien der rechten (a), mittleren (b) und linken (c) Fahrspur der dreispurigen Autobahn A4-West vor dem Kreuz Köln-West in Deutschland sind dargestellt in Weg-Zeit-Diagrammen und gefärbt nach den durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewerten A_{d_i} . Die Farblegende ist unterhalb des Weg-Zeit-Diagramms in (c) dargestellt. (b) und (c) sind Datenausschnitte der Fahrzeugtrajektorien aus Abbildung 5.2 (a) bzw. (b) von 8:56:00 bis 8:58:30 Uhr und zwischen 100 und 300 Metern. Angepasst aus [140].

5.3.3 Statistische Eigenschaften von gemittelten Fahrzeugabständen

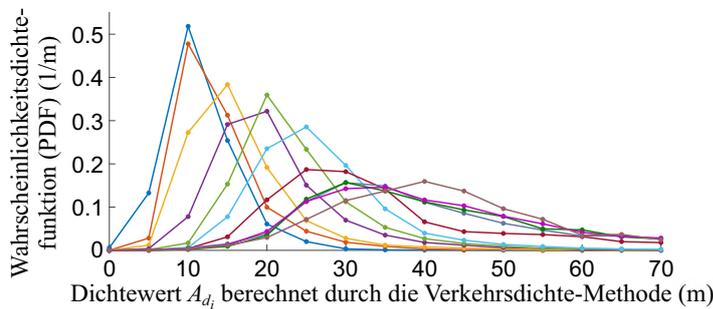
Zur Untersuchung von statistischen Eigenschaften der Abstände δ_{Fzg} zu den vorausfahrenden Fahrzeugen und der durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewerte A_{d_i} werden mehrere Drohnennmessungen an verschiedenen Tagen und an unterschiedlichen dreispurigen Autobahnabschnitten verwendet [28]. Die verwendeten Drohnendaten beinhalten verschiedene Verkehrsphasen (gestauter und freier Verkehr) und die Daten aus den Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.7.

In Abbildung 5.10 (a) und (b) sind basierend auf Drohnendaten die *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen* (engl. probability density function, kurz PDF) der Abstände δ_{Fzg} bzw. der Dichtewerte A_{d_i} in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsintervallen abgebildet. Die Farblegende

Geschwindigkeitsintervalle (in km/h):
 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60,
 60-70, 70-80, 80-90, 90-100, >100



(a) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Abstände δ_{FZg} .



(b) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Dichtewerte A_{d_i} .

Abbildung 5.10: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Abstände δ_{FZg} in (a) und der Dichtewerte A_{d_i} in (b) in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsintervallen. Die Farblegende der verwendeten Geschwindigkeitsintervalle ist oberhalb von (a) dargestellt. Die verwendeten Drohnenmessungen wurden an verschiedenen Tagen und an unterschiedlichen dreispurigen Autobahnabschnitten erhoben und beinhalten verschiedene Verkehrsphasen (gestauter und freier Verkehr) und die Daten aus den Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.7. Angepasst aus [142].

der verwendeten Geschwindigkeitsintervalle ist oberhalb des Diagramms aus Abbildung 5.10 (a) dargestellt. Außerdem sind die Mittelwerte und Mediane der Abstände δ_{FZg} und der Dichtewerte A_{d_i} in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsintervallen in Tabelle 5.1 aufgelistet. In Abbildung 5.11 (a) und (b) sind die *komplementären kumulativen Verteilungsfunktionen* (engl. complementary cumulative distribution function, kurz CCDF) der Abstände δ_{FZg} bzw. der Dichtewerte A_{d_i} in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsintervallen abgebildet.

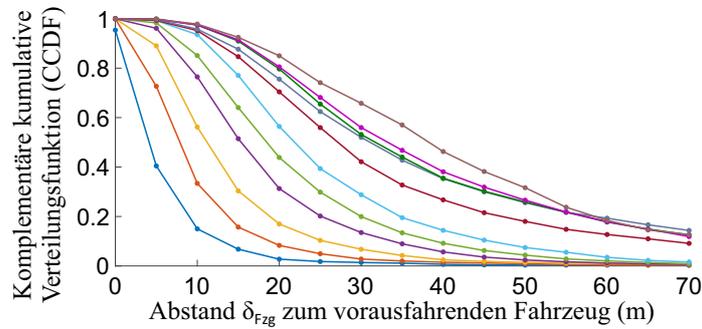
Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen und die komplementären kumulativen Verteilungsfunktionen bestätigen die bekannte Korrelation zwischen der Verkehrsdichte und der mittleren Verkehrsgeschwindigkeit. Die Werte für die Abstände δ_{FZg} und für die Dichtewerte A_{d_i} steigen bei wachsenden Geschwindigkeitsintervallen (Abbildungen 5.10 und 5.11). Der Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten und den Abständen δ_{FZg} beträgt 0.49. Zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten und den Dichtewerten A_{d_i} beträgt der Pearson-Korrelationskoeffizient 0.57. Durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen und die komplementären kumulativen Verteilungsfunktionen konnte die Korrelation zwischen der Verkehrsdichte und der mittleren Verkehrsgeschwindigkeit *anhand* von hochaufgelösten und fahrspurgenauen Drohnen Daten von dreispurigen Autobahnabschnitten *quantifiziert* werden.

Tabelle 5.1: Mittelwerte und Mediane der Abstände δ_{Fzg} und der Dichtewerte A_{d_i} in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsintervallen.

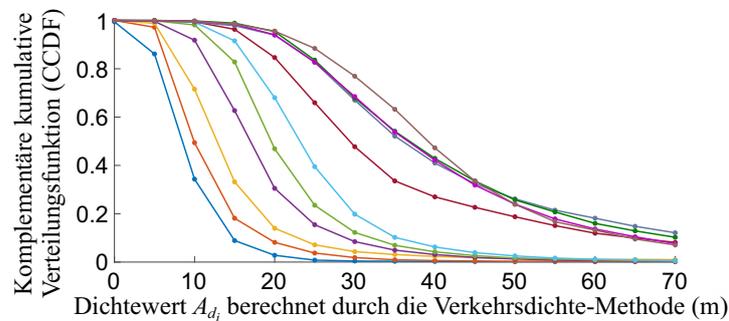
Geschwindigkeitsintervall (km/h)	Mittelwert / Median von δ_{Fzg} (m)	Mittelwert / Median von A_{d_i} (m)
0 – 10	8.4 / 6.6	11.7 / 11.0
10 – 20	12.5 / 10.0	14.3 / 12.4
20 – 30	16.8 / 13.5	17.8 / 15.0
30 – 40	21.1 / 17.8	21.3 / 19.3
40 – 50	24.3 / 20.8	24.3 / 22.1
50 – 60	28.3 / 24.2	27.4 / 25.5
60 – 70	38.1 / 29.6	39.7 / 31.8
70 – 80	43.9 / 33.6	46.7 / 38.4
80 – 90	43.0 / 34.2	45.6 / 39.5
90 – 100	42.8 / 35.8	43.8 / 39.2
> 100	45.3 / 40.6	45.1 / 41.9

Geschwindigkeitsintervalle (in km/h):

0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90, 90-100, >100



(a) CCDF der Abstände δ_{Fzg} .



(b) CCDF der Dichtewerte A_{d_i} .

Abbildung 5.11: Komplementäre kumulative Verteilungsfunktionen (CCDF) der Abstände δ_{Fzg} in (a) und der Dichtewerte A_{d_i} in (b) in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsintervallen. Die verwendeten Drohnennmessungen sind dieselben wie in Abbildung 5.10.

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Studie der Heterogenität und Komplexität von realen fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen auf Autobahnen wurden hochaufgelöste Drohnennmessungen an verschiedenen Tagen und an unterschiedlichen dreispurigen Autobahnabschnitten verwendet (Kapitel 2.3). Die verwendeten Drohnen­daten beinhalten verschiedene Verkehrsphasen (gestauter und freier Verkehr). Es wurde die fahrspurabhängigkeit von mikroskopischen *gestauten* Verkehrsstrukturen auf Autobahnen über Raum und Zeit analysiert (Kapitel 5.2). Zur Bestimmung der fahrspurabhängigen Verkehrsdichte auf Autobahnen wurde eine *Verkehrsdichte-Methode* entwickelt, die auf den räumlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen und auf Methoden der gleitenden Mittelwerte basiert (Kapitel 5.3.1 und 5.3.2). Die mit der Verkehrsdichte-Methode berechneten Verkehrsstrukturen *mit hoher Verkehrsdichte* wurden fahrspurabhängig auf ihre räumlich-zeitlichen Formen und Ausbreitungen untersucht (Kapitel 5.3.2). Außerdem wurden statistische Eigenschaften der räumlichen Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen und der durch die Verkehrsdichte-Methode berechneten Dichtewerte genauer betrachtet (Kapitel 5.3.3).

Es wurden folgende fahrspurabhängige Verkehrsstrukturen auf Autobahnen basierend auf Drohnen­daten rekonstruiert und deren Eigenschaften empirisch nachgewiesen:

- Vielfältige und qualitativ unterschiedliche Verkehrsstrukturen können im realen Verkehr auf Autobahnen fahrspuregenau nachgewiesen werden.
- Sowohl *gestaute Verkehrsstrukturen* als auch *Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte* können auf Autobahnen auf allen Fahrspuren zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen. Beispielsweise kann eine gestaute Verkehrsstruktur nur auf der linken Fahrspur einer dreispurigen Autobahn auftreten, während auf den anderen beiden Fahrspuren keine gestauten Verkehrsstrukturen vorliegen.
- Die räumlich-zeitliche Form und Ausbreitung der gestauten Verkehrsstrukturen und der Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte können sich für jede Fahrspur unterscheiden.
- Die charakteristische Eigenschaft der Verkehrsphase des sich bewegenden breiten Staus, die mittlere Geschwindigkeit der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront beizubehalten, wurde auf Basis fahrspurabhängiger, vollständiger und hochgenauer Drohnen­daten verifiziert.
- Zur Analyse vom Verkehr auf Autobahnen mit hoher Verkehrsdichte und zur Rekonstruktion von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte wurde eine *Verkehrsdichte-Methode* auf Basis von gleitenden Mittelwerten und den räumlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen entwickelt. Mit der Verkehrsdichte-Methode werden gemittelte Dichtewerte berechnet, die Aussagen über die Verkehrsdichte des räumlich bevorstehenden Verkehrs erlauben.
- Eine sich stromaufwärts bewegende *Verkehrsdichtefront* kann sich im Verkehr auf der Autobahn bilden. Diese Verkehrsdichtefront befindet sich räumlich-zeitlich sowohl *vor*

dem sich stromaufwärts bewegenden Stau als auch *vor* dem Verkehrsgebiet, in welchem die räumlichen Abstände zu den vorausfahrenden Fahrzeugen sehr klein sind. Ein Fahrzeug kann beim Durchqueren der Verkehrsdichtefront eine Verkehrsdichte-Information über das räumlich bevorstehende Verkehrsgebiet ca. 100 m und 15 s vorher bekommen.

- Die Korrelation zwischen der Verkehrsdichte und der mittleren Verkehrsgeschwindigkeit auf Autobahnen wurde anhand von hochaufgelösten und fahrspurgenauen Drohnendaten quantifiziert. Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte korrelieren mit gestauten Verkehrsstrukturen.
- Die Heterogenität und Komplexität von fahrspurgenauem Verkehr auf Autobahnen konnte anhand von Drohnendaten empirisch nachgewiesen werden.

Die Hypothesen 5.1 und 5.2 konnten damit auf Basis einer hochgenauen mikroskopischen Datengrundlage verifiziert werden. Auf Autobahnen können gestaute Verkehrsstrukturen und Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte auf allen Fahrspuren zu verschiedenen Zeitpunkten und Orten entstehen und sich räumlich-zeitlich unterschiedlich ausbreiten (Hypothese 5.1). Die charakteristische Eigenschaft der Verkehrsphase des sich bewegenden breiten Staus wurde basierend auf fahrspurabhängigen Drohnendaten bestätigt (Hypothese 5.2).

6 Verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken zwischen Fahrzeugen

Automatisierte Fahrzeuge müssen alle Fahrvorgänge sicher und nach allen Verkehrsregeln durchführen. Menschen folgen während einer Fahrt nicht zu jeder Zeit allen Verkehrsregeln. Zum Beispiel wird die Sicherheitszeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug häufig nicht eingehalten (siehe z. B. Abbildung 3.18 aus Kapitel 3.6) [136]. Das Einscheren und der Spurwechsel sind zwei anspruchsvolle und herausfordernde Fahrvorgänge für ein automatisiertes Fahrzeug. Ein Einschervorgang ist insbesondere ein Spurwechselvorgang. Eine Randbedingung beim Einscheren von automatisierten Fahrzeugen ist es eine ausreichend große Zeitlücke zu finden, die einen sicheren Einschervorgang ermöglicht. Eine ausreichend große Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ist auch erforderlich beim sicheren Spurwechsel auf Autobahnen oder beim sicheren Einscheren von Autobahnzufahrten auf die Autobahn. Hierfür ist es essentiell das Fahrverhalten von realen Fahrern besser und genauer zu verstehen.

Die bislang erfolgten Untersuchungen von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen lassen vermuten, dass Zeitlücken sehr stark von der Verkehrsphase des vorliegenden Verkehrs und auch von der Fahrspur abhängen. Durch Induktionsschleifen gemessene *mikroskopische und fahrspurgenaue Detektordaten* dienen als empirische Datengrundlage für die Untersuchungen in diesem Kapitel (Kapitel 2.2.1 und 2.3). Die Einteilung der mikroskopischen Detektordaten und die daraus ermittelten Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen in Verkehrsphasen ermöglichen eine *verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Analyse von Zeitlücken* auf Autobahnen. Dadurch können auch verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Einschere- und Spurwechsellmöglichkeiten untersucht werden. Wenn die Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen über ein bestimmtes Zeitintervall zu klein sind, ist die Durchführung eines sicheren Einschere- oder Spurwechselvorganges in diesem Zeitintervall nicht möglich. Die Erkenntnisse über verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken liefern einen Beitrag zur technischen Machbarkeit eine ausreichend große Zeitlücke für den Einschere- oder Spurwechselvorgang auf Autobahnen zu finden. Mit dieser Herausforderung werden automatisierte Fahrzeuge im realen Verkehr konfrontiert sein.

In Kapitel 6.1 werden die aus Detektordaten ermittelten Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen auf Autobahnen beschrieben und in Verkehrsphasen eingeteilt. Empirische Nachweise zu verkehrsphasen- und fahrspurabhängigen Zeitlücken auf Autobahnen erfolgen in Kapitel 6.2. Hierzu werden statistische Eigenschaften der Zeitlücken untersucht und Einschere- und Spurwechsellmöglichkeiten diskutiert. Außerdem wird ein Wartezeit-Modell entwickelt zur Untersuchung von Zeitintervallen, in denen die Durchführung von sicheren Einschere- oder Spur-

wechsellvorgängen aufgrund von zu kleinen Zeitlücken zwischen Fahrzeugen nicht möglich ist. In Kapitel 6.3 werden abschließend die Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst.

6.1 Einteilung von Zeitlücken zwischen Fahrzeugen in Verkehrsphasen basierend auf Detektordaten

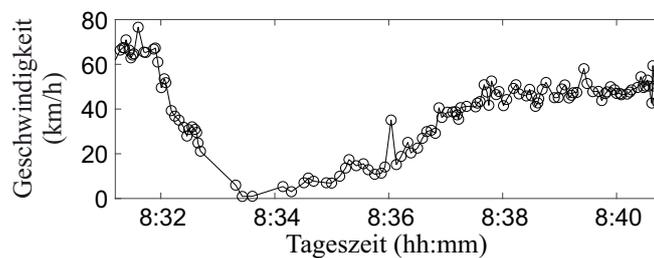
Aus Detektordaten von der Autobahn ergeben sich die Zeitlücken τ_{Fzg} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen für jede Fahrspur des vorliegenden Verkehrs. Neben den Zeitlücken enthalten die Detektordaten auch die Fahrzeuggeschwindigkeiten $v_{\text{Fzg}}^{\text{D}}$ der detektierten Fahrzeuge an den Detektorpositionen (Definition 2.2). Der Verkehr auf der Autobahn kann als *freier Verkehr* (F) oder *gestauter Verkehr* vorliegen (Definitionen 3.12 und 3.13). In der Drei-Phasen-Verkehrstheorie wird der gestaute Verkehr wiederum in zwei Verkehrsphasen unterteilt: *synchronisierter Verkehr* (S) und *sich bewegendes breites Stau* (J) (Definitionen 3.10 und 3.11). In den Kapiteln 3.2.2 und 3.3 wurde die Drei-Phasen-Verkehrstheorie eingeführt. Die drei Verkehrsphasen F, S und J sind durch verschiedene Eigenschaften charakterisiert. Daher werden die Eigenschaften der Zeitlücken für jede Verkehrsphase gesondert untersucht. Hierzu müssen die Zeitlücken zunächst in Verkehrsphasen eingeteilt werden.

Die aus den Detektordaten ermittelten Zeitlücken τ_{Fzg} werden dem freien Verkehr (F) anhand der detektierten Fahrzeuggeschwindigkeiten $v_{\text{Fzg}}^{\text{D}}$ zugeordnet. Wenn für ein Fahrzeug $v_{\text{Fzg}}^{\text{D}} > 80$ km/h gilt, dann wird die Zeitlücke τ_{Fzg} zum vorausfahrenden Fahrzeug dem freien Verkehr zugeordnet. Bei geringerer Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{\text{Fzg}}^{\text{D}}$ wird die Zeitlücke τ_{Fzg} dem gestauten Verkehr, d. h. dem synchronisierten Verkehr (S) oder dem sich bewegendem breiten Stau (J), zugeordnet. Die Unterscheidung zwischen S und J auf Basis der verwendeten Detektordaten erfolgt durch die Eigenschaft von J, dass die Fahrzeuge zwischen den stromaufwärtigen und stromabwärtigen Verkehrsphasenfronten von J im Stillstand sind oder eine sehr geringe Geschwindigkeit aufweisen (Definitionen 3.9 und 3.10). Der Gesamtverkehrsfluss wird somit durch J unterbrochen. Daher sollte der Detektor in J mindestens eine relativ große Zeitlücke τ_{Fzg} zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen messen. Damit ergibt sich für die Zuordnung der Zeitlücken τ_{Fzg} der Verkehrsphase J folgendes *mikroskopisches Kriterium* [150, 151]:

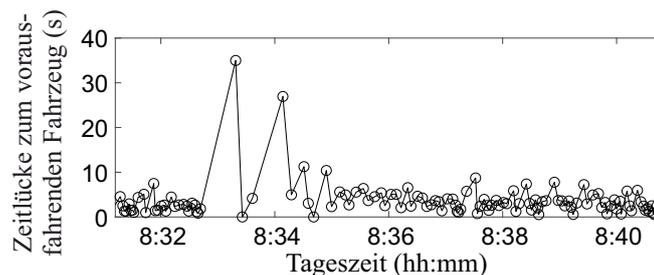
$$\tau_{\text{Fzg}}^{\text{J,max}} \gg \bar{\tau}_{\text{ab}}^{\text{J}}, \quad (6.1)$$

wobei $\tau_{\text{Fzg}}^{\text{J,max}}$ der maximalen Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen im gemessenen gestauten Verkehr entspricht. Die Variable $\bar{\tau}_{\text{ab}}^{\text{J}}$ steht für die mittlere Reaktionszeit, die ein Fahrer beim Anfahren im Mittel benötigt, nachdem das vordere Fahrzeug aus dem Stillstand losgefahren ist (Kapitel 3.3.1). Basierend auf empirischen Untersuchungen ergibt sich [9, 116]: $\bar{\tau}_{\text{ab}}^{\text{J}} \approx 1.5 - 2.0$ s. Das Zeichen \gg in Gleichung (6.1) sagt aus, dass der linke Ausdruck *deutlich größer* ist als der rechte Ausdruck, z. B. um ein Faktor 10. Beispielsweise ergibt sich im gestauten Verkehr der Detektordaten aus Abbildung 6.1 (b) folgendes: $\tau_{\text{Fzg}}^{\text{J,max}} \approx 35$ s $\gg 2$ s $\approx \bar{\tau}_{\text{ab}}^{\text{J}}$. Wenn die Gleichung (6.1) erfüllt ist, gibt es Fahrzeuge in dem betrachteten Abschnitt des gestauten Verkehrs, die im Stillstand sind oder eine sehr geringe Geschwindigkeit aufweisen. Daher werden die Zeitlücken dieses Abschnittes des gestauten Verkehrs mit $v_{\text{Fzg}}^{\text{D}} < 25$ km/h der Verkehrsphase J zugeordnet. Andernfalls werden sie der Verkehrsphase S zugeordnet.

In Abbildung 6.1 ist ein 10-Minuten-Ausschnitt von Detektordaten der rechten Fahrspur der dreispurigen Autobahn A5 bei Frankfurt am Main in Deutschland abgebildet. Die Messpunkte des Detektors sind durch Kreise gekennzeichnet und durch Linien verbunden. In Abbildung 6.1 (a) sind die Geschwindigkeitswerte v_{Fzg}^D der detektierten Fahrzeuge im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm dargestellt. In Abbildung 6.1 (b) sind die zu den Geschwindigkeitswerten v_{Fzg}^D korrespondierenden Zeitlücken τ_{Fzg} der detektierten Fahrzeuge zu den vorausfahrenden Fahrzeugen im Zeitlücken-Zeit-Diagramm dargestellt. Zu den Zeitpunkten $t_{Fzg,1} = 8:33:15$ Uhr und $t_{Fzg,2} = 8:34:05$ Uhr werden die großen Zeitlücken $\tau_{Fzg,1}^{J,max} \approx 35$ s bzw. $\tau_{Fzg,2}^{J,max} \approx 27$ s gemessen. Sowohl für $\tau_{Fzg,1}^{J,max}$ als auch für $\tau_{Fzg,2}^{J,max}$ ist die Gleichung (6.1) erfüllt. Daher werden die Zeitlücken dieses Abschnittes des gestauten Verkehrs mit $v_{Fzg}^D < 25$ km/h der Verkehrsphase J zugeordnet.



(a) Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm aus Detektordaten.



(b) Zeitlücke-Zeit-Diagramm aus Detektordaten.

Abbildung 6.1: Darstellung von Detektordaten der rechten Fahrspur der dreispurigen Autobahn A5 bei Frankfurt am Main in Deutschland. Die Messpunkte sind durch Kreise gekennzeichnet. In (a) sind die Geschwindigkeitswerte v_{Fzg}^D der detektierten Fahrzeuge im Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm abgebildet. In (b) sind die Zeitlücken τ_{Fzg} der detektierten Fahrzeuge zu den vorausfahrenden Fahrzeugen im Zeitlücken-Zeit-Diagramm abgebildet. Es können große Zeitlücken beobachtet werden, für die die Gleichung (6.1) erfüllt ist. Angepasst aus [138].

In Abbildung 6.2 sind Geschwindigkeitswerte v_{Fzg}^D aus Detektordaten des gleichen Detektors wie aus Abbildung 6.1 an einem anderen Tag in einem Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm dargestellt. Die Messpunkte sind den ermittelten Verkehrsphasen J, S und F zugeordnet und in Rot, Gelb bzw. Grün gefärbt und durch Linien verbunden. Manche Messpunkte können nicht eindeutig einem der drei Verkehrsphasen zugeordnet werden, da sie sich genau zwischen zwei Verkehrsphasen befinden und anhand von Detektordaten keine eindeutigen Eigenschaften aufweisen. Diese Messpunkte sind schwarz gefärbt und werden in den Untersuchungen dieses Kapitels nicht verwendet, um mögliche Verzerrungen bei den Ergebnissen durch falsch zugeordnete Messpunkte zu vermeiden.

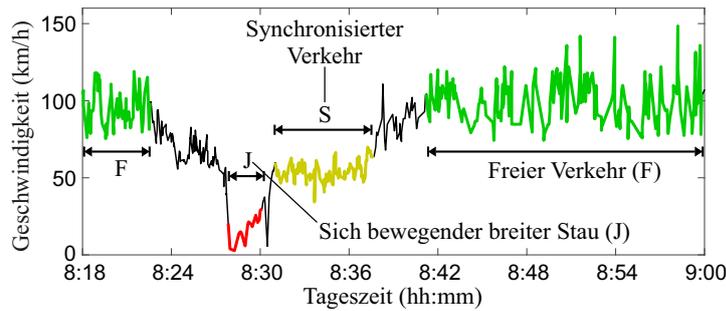


Abbildung 6.2: Darstellung von Geschwindigkeitswerten v_{Fzg}^D aus Detektordaten des gleichen Detektors wie aus Abbildung 6.1 an einem anderen Tag in einem Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm. Die Messpunkte sind den ermittelten Verkehrsphasen Freier Verkehr (F), synchronisierter Verkehr (S) und sich bewegender breiter Stau (J) zugeordnet und in Grün, Gelb bzw. Rot gefärbt. Messpunkte, die nicht eindeutig einem der drei Verkehrsphasen zugeordnet werden können, sind schwarz gefärbt und werden in den Untersuchungen dieses Kapitels nicht verwendet. Angepasst aus [138].

In Tabelle 6.1 ist die Anzahl der Messpunkte der in diesem Kapitel verwendeten Detektordaten, die in Verkehrsphasen eingeteilt wurden, aufgelistet. Außerdem ist die durchschnittliche Zeitlänge des Fortbestehens der Verkehrsphase und der prozentuale Tagesanteil der Verkehrsphase angegeben. Es werden Detektordaten zwischen ca. 6:00 – 20:00 Uhr betrachtet. In diesem Zeitintervall befinden sich auf den Autobahnabschnitten, an denen die Detektordaten erhoben wurden, durchgehend eine gewisse Menge an Fahrzeugen. Daher ergibt sich für die verwendeten Detektordaten durchgehend ein Verkehrsfluss größer als Null, außer wenn sich die Fahrzeuge im Stillstand befinden.

Tabelle 6.1: Anzahl der Messpunkte der verwendeten Detektordaten, die in Verkehrsphasen eingeteilt wurden, mit der durchschnittlichen Zeitlänge des Fortbestehens der Verkehrsphase und dem prozentualen Tagesanteil der Verkehrsphase.

Verkehrsphasen	Anzahl an Messpunkten	Durchschnittliche Zeitlänge des Fortbestehens der Verkehrsphase	Prozentualer Tagesanteil der Verkehrsphase
Freier Verkehr	$\approx 20\,000$	> 60 min	$\approx 80\%$
Synchronisierter Verkehr	$\approx 4\,500$	≈ 60 min	$\approx 18\%$
Sich bewegender breiter Stau	≈ 500	$\approx 3-7$ min	$\approx 2\%$

6.2 Verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Zeitlücken zwischen Fahrzeugen auf Basis von Detektordaten

In Kapitel 6.1 wurde beschrieben wie die Zeitlücken τ_{Fzg} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen basierend auf Detektordaten in die drei Verkehrsphasen F, S und J eingeteilt werden. Daher können nun diese Zeitlücken *verkehrsphasenabhängig* untersucht werden. Da die verwendeten Detektordaten zusätzlich *fahrspurabhängig* aufgelöst sind, erfolgt eine sowohl verkehrsphasenabhängige als auch fahrspurabhängige Analyse der Zeitlücken τ_{Fzg} . Auf Basis der in

Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 aufgeführten empirischen Erkenntnisse wird zunächst folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese 6.1. *Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen weisen verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Eigenschaften auf. Die Wahrscheinlichkeit von Einscher- und Spurwechselfähigkeiten auf Autobahnen weisen ebenfalls verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Eigenschaften auf. Die Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs (S) auf Autobahnen stellt sich für einen Einscher- oder Spurwechselvorgang eines (automatisierten) Fahrzeugs sowohl zum Finden einer ausreichend großen Zeitlücke als auch für kurze oder keine Wartezeiten als ungeeignetste Verkehrsphase heraus.*

6.2.1 Statistische Eigenschaften und Spurwechselfähigkeiten

In Abbildung 6.3 sind die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Zeitlücken τ_{Fzg} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen für die linke Fahrspur als durchgezogene Linie und für die rechte Fahrspur als gestrichelte Linie dargestellt. Die Zeitlücken wurden auf dreispurigen Autobahnabschnitten erhoben und sind zunächst *nicht* nach Verkehrsphasen eingeteilt. Es wurden ca. 25 000 Zeitlückenmessungen durch Detektoren verwendet. Anhand der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen wird die Fahrspurabhängigkeit der gemessenen Zeitlückenwerte deutlich. Auf der linken Fahrspur treten deutlich häufiger kleinere Zeitlücken auf als auf der rechten Fahrspur. Es sind ca. 68 % der Zeitlückenwerte der linken Fahrspur kleiner als 4 s, wohingegen es auf der rechten Fahrspur ca. 53 % sind. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Zeitlücken der *mittleren* Fahrspur weist einen qualitativ ähnlichen Verlauf wie die der linken und rechten Fahrspur auf und wird nicht gesondert abgebildet. Auf der mittleren Fahrspur treten kleinere Zeitlücken häufiger auf als auf der rechten Fahrspur, aber weniger häufig als auf der linken Fahrspur.

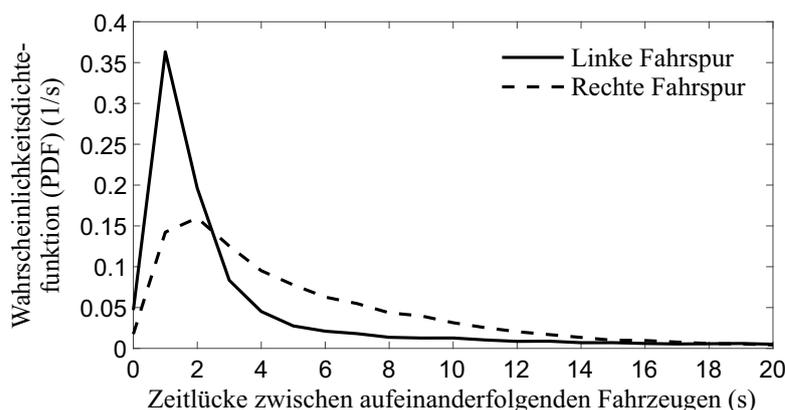


Abbildung 6.3: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Zeitlücken τ_{Fzg} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen der linken und rechten Fahrspur (durchgezogene bzw. gestrichelte Linie) basierend auf ca. 25 000 Zeitlückenmessungen durch Detektoren. Angepasst aus [138].

Nun werden die Detektordaten aus Abbildung 6.3 nach den in Kapitel 6.1 beschriebenen Kriterien in die Verkehrsphasen freier Verkehr (F), synchronisierter Verkehr (S) und sich bewegender breiter Stau (J) eingeteilt. In Abbildung 6.4 (a) und (b) sind die *verkehrsphasenabhängigen* Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Zeitlücken τ_{Fzg} der linken bzw. rechten Fahrspur

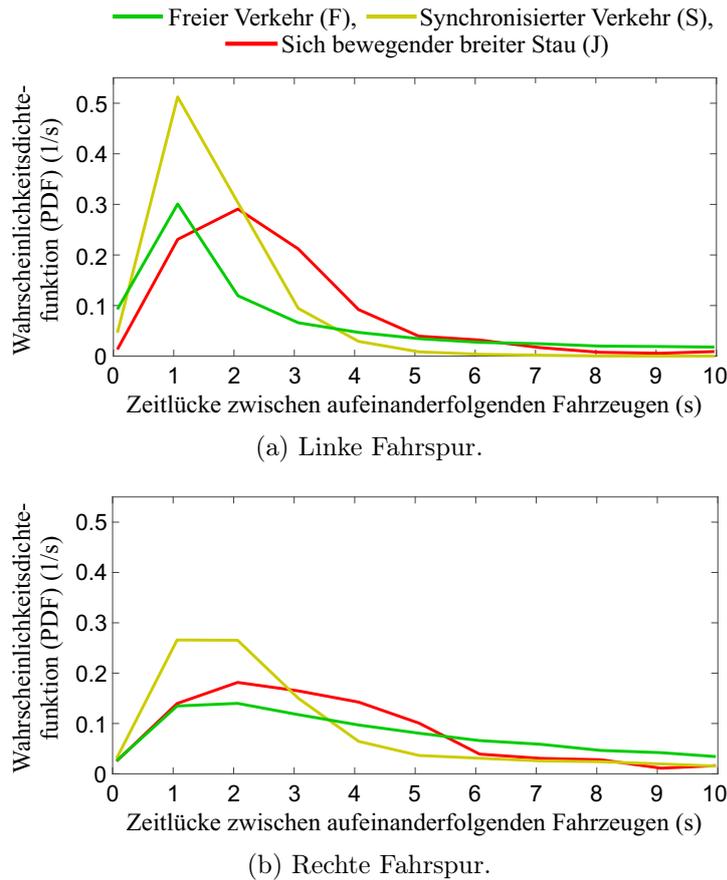


Abbildung 6.4: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Zeitlücken τ_{Fzg} zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen der linken Fahrspur in (a) und der rechten Fahrspur in (b) eingeteilt nach den Verkehrsphasen freier Verkehr (F) in Grün, synchronisierter Verkehr (S) in Gelb und sich bewegender breiter Stau (J) in Rot. Es werden dieselben Detektordaten wie in Abbildung 6.3 verwendet. Angepasst aus [138].

dargestellt und für F, S und J in Grün, Gelb bzw. Rot gefärbt. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zeigen sowohl die *Fahrspurabhängigkeit* als auch die *Verkehrsphasenabhängigkeit* der Zeitlücken. Auf der linken Fahrspur werden deutlich häufiger für alle drei Verkehrsphasen kleinere Zeitlücken gemessen als auf der rechten Fahrspur. Außerdem werden kleine Zeitlücken am häufigsten in der Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs (S) beobachtet. Dies ist eine wichtige empirische Erkenntnis für den Verkehr. Auf der linken und rechten Fahrspur sind ca. 98 % bzw. 77 % der Zeitlücken in S kleiner oder gleich 4 s, während es in J ca. 83 % bzw. 64 % und in F ca. 62 % bzw. 50 % sind. Es wird angemerkt, dass die Detektordaten, die der Verkehrsphase J zugeordnet sind, von Fahrzeugen erhoben werden, die *nicht* im Stillstand sind. Denn von Fahrzeugen, die im Stillstand sind, können keine Zeitlücken τ_{Fzg} durch Detektoren, die fest an räumlichen Positionen der Autobahn installiert sind, gemessen werden. Erst nachdem die Fahrzeuge aus dem Stillstand wieder beginnen zu fahren wird die relativ große Zeitlücke $\tau_{Fzg}^{J,max}$ gemessen (Gleichung (6.1) aus Kapitel 6.1).

In Tabelle 6.2 sind die verkehrsphasenabhängigen Mittelwerte und Mediane der Zeitlücken τ_{Fzg} für die linke und rechte Fahrspur aus Abbildung 6.4 aufgelistet. Außerdem ist der prozentuale Anteil aller gemessenen und verkehrsphasenabhängigen Zeitlücken, die größer sind als 4 s, durch $P(Z > 4 \text{ s})$ angegeben. Die verkehrsphasenabhängig ermittelten Werte aus

Tabelle 6.2 quantifizieren und bekräftigen die Aussage, dass im synchronisierten Verkehr (S) am häufigsten kleine Zeitlücken auftreten und am wenigsten große Zeitlücken.

Tabelle 6.2: Auflistung der Mittelwerte und Mediane der Zeitlücken τ_{Fzg} , die in Abbildung 6.4 in Verkehrsphasen eingeteilt wurden, für die linke Fahrspur in der oberen Tabelle und für die rechte Fahrspur in der unteren Tabelle. Der prozentuale Anteil aller gemessenen und verkehrsphasenabhängigen Zeitlücken, die größer sind als 4 s, ist durch $P(Z > 4 \text{ s})$ angegeben.

Linke Fahrspur	Freier Verkehr (F)	Synchronisierter Verkehr (S)	Sich bewegender breiter Stau (J)
Mittelwert	9.8 s	1.7 s	3.8 s
Median	2.5 s	1.5 s	2.5 s
$P(Z > 4 \text{ s})$	38 %	2 %	17 %

Rechte Fahrspur	Freier Verkehr (F)	Synchronisierter Verkehr (S)	Sich bewegender breiter Stau (J)
Mittelwert	6.2 s	3.8 s	5.5 s
Median	4.5 s	2.3 s	3.5 s
$P(Z > 4 \text{ s})$	50 %	23 %	36 %

Die Dauer eines Spurwechselforganges, die ein Fahrzeug für einen vollständigen Spurwechselforgang benötigt, zusammen mit den Sicherheitszeitlücken zum vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeug wird als *Dauer eines sicheren Spurwechselforganges* bezeichnet (Kapitel 3.6). Da es sich bei einem Einschervorgang bei Autobahnzufahrten ebenfalls um einen Spurwechsel handelt, bezieht sich die Dauer eines sicheren Spurwechselforganges auch auf einen Einschervorgang. Nach empirischen Verkehrsuntersuchungen auf mehrspurigen Autobahnen ergeben sich für die durchschnittliche Dauer eines sicheren Spurwechselforganges Werte im Bereich von ca. 4–6 Sekunden (Kapitel 3.6) [137]. In Abbildung 6.4 und Tabelle 6.2 konnte beobachtet werden, dass kleine Zeitlücken am häufigsten in der Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs (S) vorkommen. In S sind auf der linken und rechten Fahrspur nur ca. 2 % bzw. 23 % der Zeitlücken τ_{Fzg} größer als 4 s, während es in J ca. 17 % bzw. 36 % und in F ca. 38 % bzw. 50 % sind (Tabelle 6.2). Daher ist die Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs (S) auf Autobahnen zum Finden einer ausreichend großen Zeitlücke für einen Einschervorgang oder Spurwechselforgang eines (automatisierten) Fahrzeugs die ungeeignetste Verkehrsphase.

In Abbildung 6.5 ist der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit in (a), dem Verkehrsfluss in (b) und der Wahrscheinlichkeit von Einschermöglichkeiten in (c) auf Basis von Detektordaten der rechten Fahrspur der dreispurigen Autobahn A5 *im freien Verkehr* dargestellt. Die Verkehrsflusswerte in Abbildung 6.5 (b) wurden anhand von gleitenden Mittelwerten mit einem gleitenden Zeitfenster von zwei Minuten berechnet. In Abbildung 6.5 (c) ist die Wahrscheinlichkeit der Einschermöglichkeiten für ein (automatisiertes) Fahrzeug, das für einen sicheren Einschervorgang 4 Sekunden benötigt, abgebildet. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Einschermöglichkeiten wurden gleitende 10-Minuten-Intervalle betrachtet. Zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0 werden die Zeitintervalle, während denen ein Fahrzeug im betrachte-

ten 10-Minuten-Intervall einscheren kann, aufsummiert und durch 10 Minuten geteilt. Dieses Verhältnis ergibt dann die Wahrscheinlichkeit der Einschermöglichkeit zum Zeitpunkt t_0 . Angenommen in den ersten 6 Minuten eines betrachteten 10-Minuten-Intervalls werden immer nur Zeitlücken kleiner als 4 Sekunden gemessen und in den restlichen 4 Minuten nur Zeitlücken größer als 4 Sekunden. Dann würde sich eine Wahrscheinlichkeit der Einschermöglichkeit von 40 % ergeben. Abbildung 6.5 zeigt, dass bei gleich bleibender Verkehrsphase F und bei abnehmendem Verkehrsfluss die Wahrscheinlichkeit der Einschermöglichkeit steigt. Diese Beobachtung war zu erwarten, da durch eine abnehmende Anzahl an Fahrzeugen auf einem Autobahnabschnitt die räumliche und zeitliche Lücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen zunimmt. Anhand realer mikroskopischer Verkehrsmessungen an Autobahnen wurde diese Beobachtung quantifiziert.

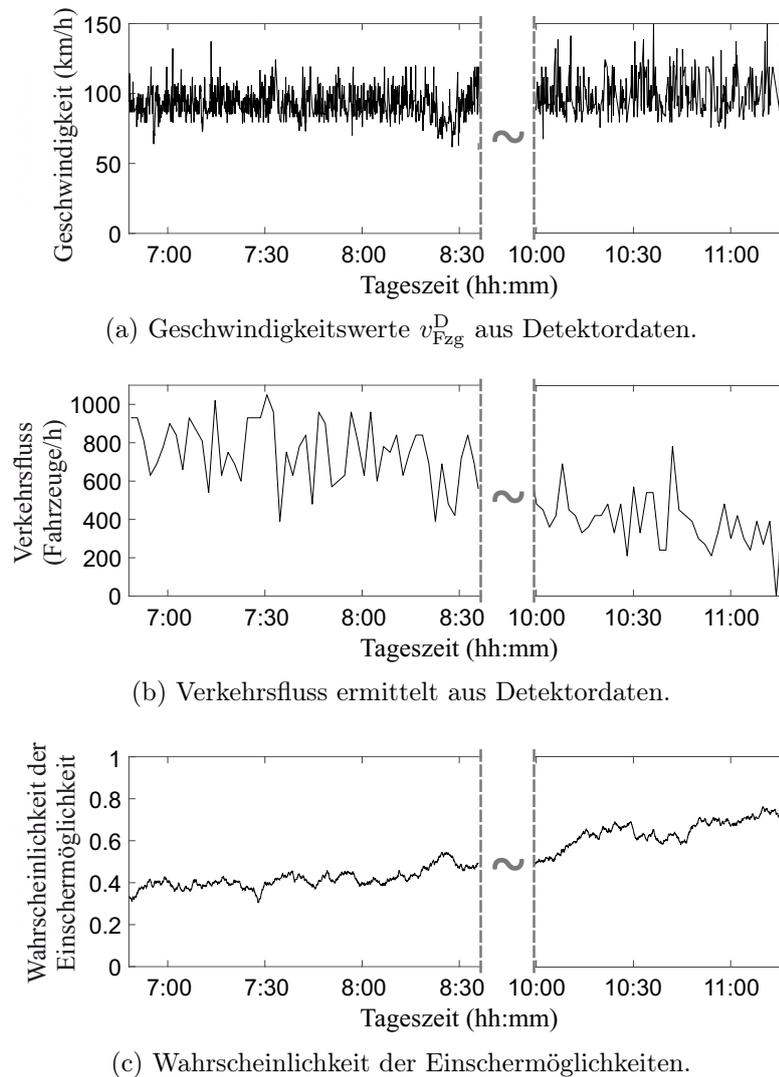


Abbildung 6.5: Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit, dem Verkehrsfluss und der Wahrscheinlichkeit von Einschermöglichkeiten auf Basis von Detektordaten der rechten Fahrspur der dreispurigen Autobahn A5 im freien Verkehr. In (a) sind Geschwindigkeitswerte v_{Fzg}^D und in (b) Verkehrsflusswerte abgebildet. Die Verkehrsflusswerte wurden anhand von gleitenden Mittelwerten mit einem gleitenden Zeitfenster von zwei Minuten berechnet. In (c) ist die Wahrscheinlichkeit der Einschermöglichkeiten für ein Fahrzeug, das eine Einscherzeit von 4 Sekunden benötigt, dargestellt.

6.2.2 Wartezeit-Modell

Auf Basis der aus den Detektordaten ermittelten Zeitlücken τ_{Fzg} wird die *Wartezeit* von (automatisierten) Fahrzeugen untersucht, die von einer Autobahnzufahrt auf die Autobahn einscheren oder die Spur auf der Autobahn wechseln wollen. Ein Fahrzeug ist nur dann in der Lage einzuscheren oder die Spur zu wechseln, wenn eine ausreichend große Zeitlücke vorliegt. Diese Zeitlücke muss größer oder gleich sein als die Dauer des sicheren Einscher- und Spurwechselforganges des Fahrzeugs. Wenn eine derartige Zeitlücke nicht vorliegt, muss das Fahrzeug warten, d. h. es ergibt sich für das Fahrzeug eine Wartezeit größer als Null. Aus empirischen Verkehrsuntersuchungen ergeben sich für die durchschnittliche Dauer eines sicheren Einscher- und Spurwechselforganges Werte im Bereich von ca. 4–6 Sekunden (Kapitel 3.6) [137]. Bei der weiteren Betrachtung wird 4 s für die Dauer eines sicheren Einscher- und Spurwechselforganges verwendet.

Zur Berechnung der Wartezeiten von (automatisierten) Fahrzeugen, die einscheren oder die Spur wechseln wollen, wurde ein *Wartezeit-Modell* entwickelt, das in Abbildung 6.6 beschrieben ist. Das Wartezeit-Modell verwendet ausschließlich aus Detektordaten ermittelte Zeitlücken τ_{Fzg} . Wie in Abbildung 6.6 dargestellt, werden vom Detektor beispielsweise zwei Fahrzeuge um 8:00:00 bzw. 8:00:06 Uhr gemessen. Ein anderes (automatisiertes) Fahrzeug, das für einen sicheren Einscher- und Spurwechselforgang 4 s benötigt, könnte zwischen diesen zwei Fahrzeugen ohne zu warten einscheren, wenn es mit dem Einscher- oder Spurwechselforgang zwischen 8:00:00–8:00:02 Uhr beginnt. Dann würde sich für die Wartezeit der Wert Null ergeben. Zwischen 8:00:02–8:00:06 Uhr müsste das (automatisierte) Fahrzeug mit dem Einscher- oder Spurwechselforgang bis 8:00:06 Uhr warten, da keine ausreichend große Leitlücke vorliegt. In diesem Fall würde sich ein positiver Wert für die Wartezeit ergeben. Beispielsweise ergibt

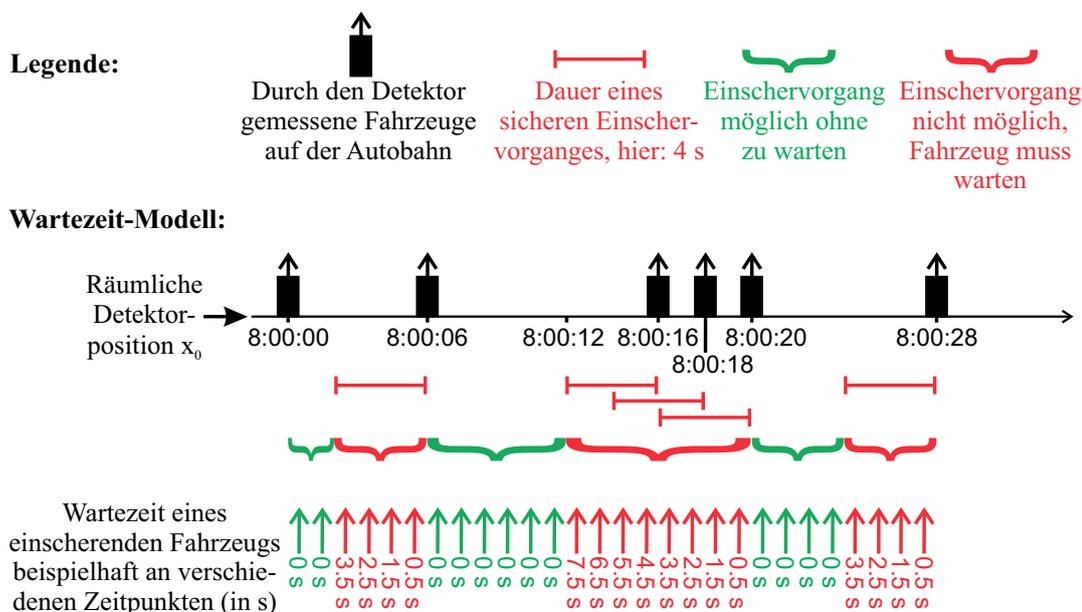


Abbildung 6.6: Erklärung des Wartezeit-Modells, das zur Berechnung der Wartezeiten von (automatisierten) Fahrzeugen, die von einer Autobahnzufahrt auf die Autobahn einscheren oder die Spur auf der Autobahn wechseln wollen, entwickelt wurde. Das Wartezeit-Modell verwendet ausschließlich aus Detektordaten ermittelte Zeitlücken τ_{Fzg} . Angepasst aus [138].

sich um 8:00:04 Uhr eine Wartezeit von 2 s. Wenn vom Detektor mehrere Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen gemessen werden, die alle kleiner als 4 s sind, dann kann ein anderes (automatisiertes) Fahrzeug während diesen Zeitintervallen nicht einscheren oder die Spur wechseln. Daher summiert sich die Wartezeit entsprechend und es ergibt sich z. B. um 8:00:13 Uhr eine Wartezeit von 7 s.

Die aus Detektordaten ermittelten Zeitlücken τ_{Fzg} wurden in Abbildung 6.4 nach den Verkehrsphasen freier Verkehr (F), synchronisierter Verkehr (S) und sich bewegendem breiter Stau (J) dargestellt. Da eine Wartezeit zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0 (z. B. um 8:00:05 Uhr in Abbildung 6.6) mit dem Wartezeit-Modell anhand der Zeitlücke $\tau_{Fzg,0}$ beim Zeitpunkt t_0 berechnet wird, wird diese Wartezeit derselben Verkehrsphase wie die Zeitlücke $\tau_{Fzg,0}$ zugeordnet. Damit können die Wartezeiten verkehrsphasenabhängig untersucht werden. In Abbildung 6.7 sind komplementäre kumulative Verteilungsfunktionen der Wartezeiten abgebildet, die anhand des Wartezeit-Modells (Abbildung 6.6) berechnet und nach den Verkehrsphasen F in Grün, S in Gelb und J in Rot eingeteilt wurden. Es wurden aus Detektoren ermittelte Zeitlücken der rechten Fahrspur der dreispurigen Autobahn A5 verwendet. Die Verteilungsfunktionen wurden für folgende Dauer von sicheren Einschervorgängen erstellt: 2 s, 4 s, 5 s und 6 s in Abbildung 6.7 (a), (b), (c) bzw. (d).

Die komplementären kumulativen Verteilungsfunktionen der Wartezeiten zeigen, dass mit größer werdender Dauer des sicheren Einschervorganges eines Fahrzeugs die Wartezeiten häufiger größere Werte annehmen. Eine wichtige Beobachtung ist, dass die Wartezeiten verkehrsphasenabhängige Eigenschaften aufweisen. In der Verkehrsphase S entstehen lange Wartezeiten am häufigsten. Daher ist die Verkehrsphase S auf Autobahnen für kurze oder keine Wartezeiten bei einem Einschervorgang eines (automatisierten) Fahrzeugs die ungeeignetste Verkehrsphase.

In Tabelle 6.3 sind die verkehrsphasenabhängigen Mittelwerte und Mediane der Wartezeiten aus Abbildung 6.7 aufgelistet. Außerdem ist der prozentuale Anteil aller gemessenen und verkehrsphasenabhängigen Wartezeiten, die größer sind als 20 s, durch $P(W > 20 \text{ s})$ angegeben. Die Mittelwerte der Wartezeiten in S sind fast doppelt so groß wie in F oder J. Bei einer Dauer des sicheren Einschervorganges von 6 s sind bereits 15 % der Wartezeiten in S größer als 20 s, während es in F 4.2 % und in J 9.5 % sind. Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass die Wartezeiten mit größer werdender Dauer des sicheren Einschervorganges deutlich schneller wachsen als linear. Beispielsweise ergibt eine Erhöhung der Dauer des sicheren Einschervorganges um einen Faktor 3 (von 2 s auf 6 s) eine Erhöhung der Mittelwerte der Wartezeiten um einen Faktor größer als 10. Die verkehrsphasenabhängig ermittelten Werte aus Tabelle 6.2 quantifizieren und bekräftigen die Aussage, dass im synchronisierten Verkehr (S) am häufigsten lange Wartezeiten und am wenigsten kleine Wartezeiten auftreten und dass bei größer werdender Dauer des sicheren Einschervorganges die Wartezeiten häufiger größere Werte annehmen.

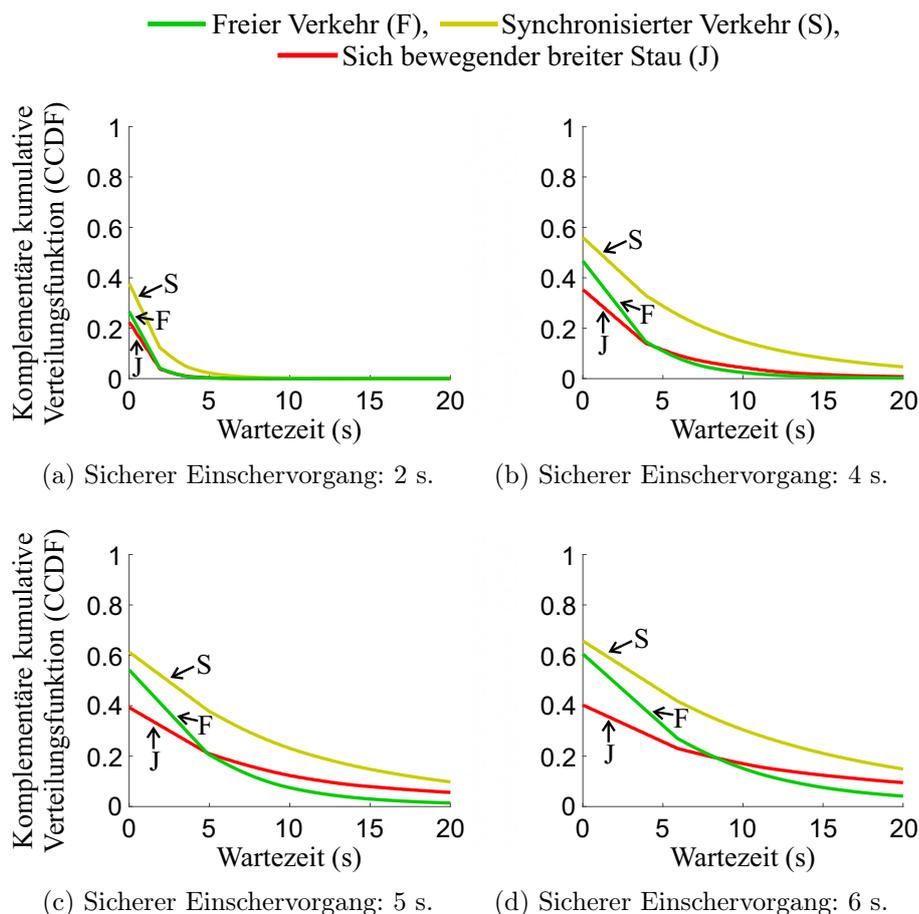


Abbildung 6.7: Komplementäre kumulative Verteilungsfunktionen der Wartezeiten, die anhand des Wartezeit-Modells (Abbildung 6.6) berechnet wurden, eingeteilt nach den Verkehrsphasen freier Verkehr (F) in Grün, synchronisierter Verkehr (S) in Gelb und sich bewegender breiter Stau (J) in Rot. Es wurden aus Detektoren ermittelte Zeitlücken der rechten Fahrspur der dreispurigen Autobahn A5 verwendet. Die Verteilungsfunktionen wurden für folgende Dauer von sicheren Einschervorgängen erstellt: in (a) für 2 s, in (b) für 4 s, in (c) für 5 s und in (d) für 6 s. Angepasst aus [138].

Tabelle 6.3: Auflistung der Mittelwerte und Mediane der Wartezeiten, die in Abbildung 6.4 in die Verkehrsphasen F, S und J eingeteilt wurden. Der prozentuale Anteil aller gemessenen und verkehrsphasen-abhängigen Wartezeiten, die größer sind als 20 s, ist durch $P(W > 20 \text{ s})$ angegeben. Die Mittelwerte, Mediane und $P(W > 20 \text{ s})$ sind abhängig von der Dauer eines sicheren Einschervorganges ermittelt worden.

Dauer eines sicheren Einschervorganges	Mittelwert			Median			$P(W > 20 \text{ s})$		
	F	S	J	F	S	J	F	S	J
6 s	4.7 s	9.3 s	5.7 s	1.9 s	3.9 s	0.0 s	4.2 %	15.0 %	9.5 %
5 s	3.0 s	7.0 s	3.7 s	0.7 s	2.4 s	0.0 s	1.4 %	9.8 %	5.6 %
4 s	1.7 s	4.4 s	1.7 s	0.0 s	1.1 s	0.0 s	0.2 %	4.7 %	0.8 %
2 s	0.4 s	0.7 s	0.3 s	0.0 s	0.0 s	0.0 s	0.0 %	0.0 %	0.0 %

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Untersuchung von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen wurden fahrspurabhängige mikroskopische Detektordaten von Autobahnen verwendet (Kapitel 2.3). Die aus den Detektordaten ermittelten Zeitlücken wurden in die drei Verkehrsphasen freier Verkehr (F), synchronisierter Verkehr (S) und sich bewegendes breiter Stau (J) eingeteilt. Anhand der verkehrsphasen- und fahrspurabhängigen Zeitlücken wurden folgende empirische Ergebnisse gewonnen, die die Hypothese 6.1 bestätigen:

- Es wurden verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Eigenschaften von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen nachgewiesen. Die Wahrscheinlichkeit von Einscher- und Spurwechsellmöglichkeiten auf Autobahnen weisen ebenfalls verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Eigenschaften auf. In S sind auf der linken und rechten Fahrspur nur ca. 2% bzw. 23% der Zeitlücken größer als 4 s, während es in J ca. 17% bzw. 36% und in F ca. 38% bzw. 50% sind. Die Verkehrsphase S auf Autobahnen stellt sich zum Finden einer ausreichend großen Zeitlücke für einen Einscher- oder Spurwechsellvorgang eines (automatisierten) Fahrzeugs als ungeeignetste Verkehrsphase heraus.
- Basierend auf Zeitlücken wurde ein Wartezeit-Modell zur Ermittlung der Wartezeit, die an einer räumlichen Position der Autobahn vergehen muss, um eine ausreichend große Zeitlücke für einen Einscher- oder Spurwechsellvorgang zu finden, entwickelt. Es wurden verkehrsphasenabhängige Eigenschaften von Wartezeiten nachgewiesen. Bei einer Dauer des sicheren Einschervorganges von 6 s sind bereits 15% der Wartezeiten in S größer als 20 s, während es in F 4.2% und in J 9.5% sind. Es treten in S am häufigsten lange Wartezeiten und am wenigsten kleine oder keine Wartezeiten auf.
- Die Abhängigkeit der Wartezeit und der Dauer des sicheren Einschervorganges wurde auf Basis gemessener Zeitlücken quantifiziert. Es wird festgestellt, dass die Wartezeiten mit größer werdender Dauer des sicheren Einschervorganges deutlich schneller wachsen als linear. Beispielsweise ergibt eine Erhöhung der Dauer des sicheren Einschervorganges um einen Faktor 3 (von 2 s auf 6 s) eine Erhöhung der Mittelwerte der Wartezeiten um einen Faktor größer als 10.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde anhand umfangreicher und vielfältiger realer Verkehrsmessungen an Autobahnen das räumlich-zeitliche Verkehrsgebiet vor und bei einem Verkehrszusammenbruch untersucht. Eine zentrale Leitfrage war:

Wie kommt es zu einem empirischen Verkehrszusammenbruch auf Autobahnen und was passiert in der räumlich-zeitlichen Umgebung eines Verkehrszusammenbruchs?

7.1 Ergebnisse dieser Arbeit

Aus den empirischen Untersuchungen konnten folgende Ergebnisse gewonnen werden:

1. Räumlich begrenzte und zeitlich befristete Verkehrsstörungen können im freien Verkehr zeitlich vor Verkehrszusammenbrüchen an Autobahnengstellen auftreten. Die Existenz und Eigenschaften wurden anhand von Floating-Car-Daten nachgewiesen. Diese Verkehrsstörungen können als stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr (engl. Moving Synchronized Pattern) vorliegen.
2. Die Entstehung eines Verkehrszusammenbruchs durch sich entgegen der Fahrtrichtung bewegendem gestautem Verkehr wurde basierend auf Floating-Car-Daten gezeigt.
3. Da Floating-Car-Daten heute noch nicht fahrspurgenau aufgelöst sind, wurden hochgenaue und vollständige Drohnendaten für den Nachweis der Entstehung von fahrspurabhängigen Verkehrszusammenbrüchen verwendet. Es wurden gestaute Verkehrsstrukturen und Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte auf allen drei Fahrspuren zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Orten festgestellt. Beispielsweise kann eine gestaute Verkehrsstruktur nur auf der linken Fahrspur einer dreispurigen Autobahn auftreten, während auf den anderen beiden Fahrspuren keine gestauten Verkehrsstrukturen vorliegen.
4. Zur Rekonstruktion und Analyse von fahrspurabhängigen Verkehrsstrukturen mit hoher Verkehrsdichte wurde eine Verkehrsdichte-Methode auf Basis von gleitenden Mittelwerten (UTEMA) und den räumlichen Abständen zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen entwickelt. Es können sich stromaufwärts bewegende Verkehrsdichtefronten im Verkehr auf der Autobahn bilden. Diese Verkehrsdichtefronten befinden sich räumlich-zeitlich sowohl vor dem sich stromaufwärts bewegenden Stau als auch vor dem Verkehrsgebiet, in dem die räumlichen Abstände zu den vorausfahrenden Fahrzeugen sehr klein sind.
5. Die charakteristische Eigenschaft der Verkehrsphase des sich bewegenden breiten Staus (J), die mittlere Geschwindigkeit der stromabwärtigen Verkehrsphasenfront beizubehalten, wurde auf Basis fahrspurabhängiger und hochgenauer Drohnendaten verifiziert.

6. Die Verkehrsphasen- und Fahrspurabhängigkeit von Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen wurden anhand von mikroskopischen Detektordaten nachgewiesen und statistisch quantifiziert. Die Wahrscheinlichkeit von Einscher- und Spurwechsellmöglichkeiten auf Autobahnen weisen ebenfalls verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Eigenschaften auf. Die Verkehrsphase des synchronisierten Verkehrs (S) auf Autobahnen stellt sich zum Finden einer ausreichend großen Zeitlücke für einen Einscher- oder Spurwechsellvorgang eines (automatisierten) Fahrzeugs als ungeeignetste Verkehrsphase heraus.
7. Auf Basis von Detektordaten wurde ein Wartezeit-Modell zur Ermittlung der Wartezeit, die an einer räumlichen Position der Autobahn vergehen muss, um eine ausreichend große Zeitlücke für einen Einscher- oder Spurwechsellvorgang zu finden, entwickelt. Die Wartezeit weist verkehrsphasen- und fahrspurabhängige Eigenschaften auf, wobei lange Wartezeiten am häufigsten im synchronisierten Verkehr (S) entstehen.

Der Zugang zu großen Mengen an Verkehrsdaten aus unterschiedlichen Datenquellen (Floating-Car-Daten, Drohrendaten und Detektordaten) verteilt über Europa und den USA ermöglichte es zuverlässige und detaillierte Verkehrsuntersuchungen auf Autobahnen durchzuführen. Es konnten neue Verkehrsphänomene nachgewiesen und existierende Verkehrsphänomene auf Basis neuer Daten bestätigt werden. Die empirischen Ergebnisse dieser Arbeit leisten einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Abbildung des realen Verkehrs und können als Anforderungen an Verkehrstheorien und Verkehrsmodelle dienen.

7.2 Ausblick und mögliche Anwendungen

Es wurden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete auf Basis von Floating-Car-Daten, die einen kleinen Anteil des Gesamtverkehrsflusses ausmachen, untersucht. Für einige Beispiele waren keine Informationen über den Gesamtverkehrsfluss verfügbar, da Verkehrsmessanlagen aktuell nicht ausreichend vorhanden sind. Jedoch ist für eine genauere deskriptive Analyse von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten der Gesamtverkehrsfluss wichtig. Beispiele mit $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten, bei denen auch der Gesamtverkehrsfluss verfügbar ist, sollten in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

Für die Verkehrstelematik und für Automobilhersteller und -zulieferer werden Möglichkeiten eröffnet die empirisch nachgewiesenen Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten zu nutzen, beispielsweise in Navigationssystemen oder in der Fahrerassistenz. Mögliche Anwendungen sind:

- Empirische Eigenschaften von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergängen könnten in zukünftigen Anwendungen für die Verkehrstelematik (engl. Intelligent Transportation Systems) genutzt werden, zum Beispiel für die Verkehrsregelung.
- Um einen Verkehrszusammenbruch zu verhindern, sollten Strategien zur Verkehrssteuerung entwickelt werden, die $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete reduzieren oder sogar verhindern.
- Durch Zuflussregelungsanlagen an Autobahnen könnte nach Entstehung eines $F \rightarrow S$ Phasenübergangs der Zufluss reduziert werden solange bis ein $S \rightarrow F$ Phasenübergang entsteht (siehe [152]).

- Diese Verkehrssteuerungen sollten in automatisierten Fahrzeugen, in der Fahrerassistenz und in Navigationssystemen angewandt und implementiert werden.
- Vorliegende Informationen über neu entstehende $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiete könnten den Fahrzeugen über eine zentrale Kommunikation verfügbar gemacht werden. Alternativ könnten solche Informationen durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation ausgetauscht werden.

Die in dieser Arbeit verwendeten fahrspurabhängigen Verkehrsdaten (Drohnendaten und mikroskopische Detektordaten) wurden in Deutschland gemessen. Anhand dieser Verkehrsdaten wurden die Fahrspur- und Verkehrsphasenabhängigkeit von Zeitlücken, von Einscher- und Spurwechsellmöglichkeiten, und von gestauten und dichten Verkehrsstrukturen untersucht. Nach der Straßenverkehrsordnung gilt in Deutschland das Rechtsfahrgebot. In einigen Ländern gilt kein Rechtsfahrgebot, wie beispielsweise in den meisten Staaten der USA. Daher sollten in weiteren Untersuchungen die Unterschiede von fahrspurabhängigen Verkehrsdaten aus Ländern, in denen kein Rechtsfahrgebot gilt, mit Ländern, in denen das Rechtsfahrgebot gilt, erarbeitet werden.

Ein automatisiertes Fahrzeug, das für einen sicheren Spurwechselvorgang längere Zeit benötigt als ein menschlicher Fahrer, könnte Schwierigkeiten haben eine ausreichend große Zeitlücke für einen sicheren Spurwechselvorgang zu finden. Daher sollte für derartige Fahrzeuge eine Funktion implementiert und getestet werden, die bei einem bevorstehenden Spurwechsel eine Steuerübernahme durch den Fahrzeuginsassen vorschlägt. In der Patentoffenlegung [153] wird ein Verfahren zum Unterstützen eines Fahrzeugs beim Einschervorgang beschrieben. Es basiert auf lokalen Detektor- oder Sensordaten, die an eine zentrale Rechneinheit gesendet werden und vor und nach der jeweiligen Einscherstelle installiert sind. In den aktuellen vom Bundesministerium geförderten Forschungsprojekten *MEC-View* ([7]) und *LUKAS* ([8]) wird an der technischen Machbarkeit gearbeitet, eine ausreichend große Zeitlücke für einen Einschere- oder Spurwechselvorgang im realen Verkehr zu finden und diese über Mobile Edge Computing an die Fahrzeuge zu übertragen.

Darüber hinaus sollten Drohnendaten auf Autobahnen derart erhoben werden, dass die räumlich-zeitliche Position des Verkehrszusammenbruchs und ein Teil des darauffolgenden gestauten Verkehrs erfasst werden. Die räumlich-zeitliche Untersuchung des empirischen Verkehrszusammenbruchs auf hochgenauen Drohnendaten ist zum Verständnis des realen Verkehrsablaufs und für Verkehrsmodelle wesentlich. Es sollten auch Drohnendaten *innerorts* und an weiteren komplexen Infrastrukturen erhoben werden. Dies würde ermöglichen innerorts beobachtete gestaute Verkehrsstrukturen detailliert zu untersuchen und mit Verkehrsstrukturen, die außerorts beobachtet wurden, zu vergleichen.

7.3 Veröffentlichungen

Im Folgenden sind die Veröffentlichungen aufgelistet, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind:

- [139] Dülgar, Y.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H.; Koller, M.; Kerner, B. S.; Wegerle, D.; Schreckenberg, M.; Menth, M.; Klenov, S. L., Empirical random phase transitions between free

- flow and synchronized flow at highway bottlenecks, in: *Journal of Intelligent Transportation Systems* (2019), S. 1–17.
- [140] Dülger, Y.; Menth, M.; Rehborn, H.; Koller, M., Heterogeneity of Microscopic Congested Traffic Data Based on Drone Measurements, in: *8th IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo*, IEEE, 2019.
- [142] Dülger, Y.; Menth, M.; Rehborn, H.; Koller, M., Analysis of Microstructures in Traffic Jams on Highways Based on Drone Observations, in: *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, IEEE, 2019.
- [138] Dülger, Y.; Rehborn, H.; Molzahn, S.-E.; Koller, M.; Menth, M.; Kerner, B.; Schreckenberg, M., A Study for Merging of Automated Vehicles, in: *27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2018.
- [154] Dülger, Y.; Rehborn, H.; Molzahn, S.-E.; Kerner, B. S.; Wegerle, D.; Schreckenberg, M., Towards empirical detection of F→S→F transitions indicating subsequent traffic breakdown, in: *25th ITS World Congress*, 2018.
- [155] Dülger, Y.; Rehborn, H.; Kerner, B. S., Verkehrsphasenübergänge an Autobahnengstellen vor einem Verkehrszusammenbruch, in: *HEUREKA'21 Optimierung in Verkehr und Transport* (2021).
- [156] Rehborn, H.; Koller, M.; Dülger, Y.; Ünal, B.; Maier, M.; Völz, B., Energy Consumption of Automated and Non-Automated Vehicles in Various Traffic Scenarios, in: *29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, 2020.
- [157] Huang, W.; Dülger, Y.; Rehborn, H.; Bernhardt, B.; Xu, J., Identification and Characterization of Mobile Work Zones using Floating Car Data, in: *Transportation Research Board* (2021).
- Darüber hinaus sind im Rahmen dieser Arbeit folgende Patentoffenlegungen beim deutschen Patent- und Markenamt entstanden:
- [153] Dülger, Y.; Menth, M.; Rehborn, H., *Verfahren zum Unterstützen eines Fahrzeuges beim Einfädeln in eine Fahrspur*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 009 651 A1, 2019.
- [158] Dülger, Y.; Rehborn, H., *Verfahren zum automatisierten Einfädeln eines Fahrzeugs*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 005 446 B3, WO 2021 023 549 A1, 2020.
- [159] Molzahn, S.-E.; Rehborn, H.; Auer, M.; Dülger, Y.; Menth, M., *Verfahren zum Steuern eines für einen autonomen Fahrbetrieb ausgebildeten Assistenzsystems eines Fahrzeuges*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 003 572 A1, 2018.
- [160] Dülger, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 009 429 A1, 2019.

- [161] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.; Starman, F., *Verfahren zum Einstellen eines Soll-Abstands zwischen Kraftfahrzeugen*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 009 532 A1, 2018.
- [162] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Verfahren zur Ausgabe einer Überholempfehlung*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 009 609 A1, 2019.
- [163] Auer, M.; Dülgar, Y.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H., *Verfahren zur Verkehrsprognose*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 010 292 A1, 2018.
- [164] Dülgar, Y.; Rehborn, H.; Starman, F.; Wenz, M., *Verfahren zur nutzerspezifischen Anzeige*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 006 944 A1, 2018.
- [165] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.; Starman, F., *Verfahren zur Darstellung einer Ankunftszeit*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 009 875 A1, 2018.
- [166] Birk, K.; Bogner, S.; Dülgar, Y.; Rehborn, H.; Starman, F.; Turber, M., *Verfahren zum Darstellen von Routeninformationen*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 011 205 A1, 2019.
- [167] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Verfahren zur Bewertung von standortspezifischen Fahrzeugdaten*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 004 922 A1, 2018.
- [168] Rehborn, H.; Dülgar, Y., *Verfahren zur Routenplanung*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 007 298 A1, 2019.
- [169] Auer, M.; Dülgar, Y.; Koller, M.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H., *Verfahren zum Darstellen von Routeninformationen*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 001 863 A1, 2018.
- [170] Dülgar, Y.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H., *Informationssystem eines Kraftfahrzeugs, Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Information von Passagieren eines Kraftfahrzeugs*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 001 445 A1, 2019.
- [171] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Verfahren zur Erfassung und Nutzung eines Signalhorn-Signals*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 004 014 A1, 2020.
- [172] Dülgar, Y.; Eker, A.; Künbül, R., *Verfahren zur Ermittlung einer ortsbezogenen Verfügbarkeitswahrscheinlichkeit für einen Parkplatz*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 004 159 A1, 2020.
- [173] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Verfahren zur Fahrtroutenauswahl und zur Ermittlung einer Ankunftszeit eines Fahrzeuges an einem Zielort*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 005 584 A1, 2020.
- [174] Ünal, B.; Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Verfahren zur Erzeugung einer hochwertigen Verbrauchsmatrix für Fahrzeuge*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 004 214 A1, 2020.

- [175] Dülger, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Auswertung tatsächlicher Fahrspurnutzung durch vernetzte Fahrzeuge*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 005 330 A1, 2020.
- [176] Dülger, Y.; Koller, M.; Rehborn, H., *Qualitätsbestimmung eines Verkehrsserviceanbieters*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 005 135 A1, 2020.
- [177] Dülger, Y.; Rehborn, H.; Starman, F., *Routenwahl durch ein Fahrzeug-Navigationssystem*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 006 717 A1, 2020.

A Anhang

A.1 Empirische Beispiele von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergängen an Autobahnengstellen

Neben den empirischen Beispielen aus Kapitel 4 werden weitere Beispiele von Verkehrsphänomenen ($F \rightarrow S \rightarrow F$ Phasenübergängen) vor Verkehrszusammenbrüchen im freien Verkehr basierend auf Floating-Car-Daten an verschiedenen Autobahninfrastrukturen und Autobahnengstellen und an unterschiedlichen Tagen betrachtet. In den Abbildungen A.1 und A.2 sind die Autobahninfrastrukturen der Floating-Car-Daten dargestellt, die in den Weg-Zeit-Diagrammen in den Abbildungen A.3 und A.4 bzw. A.5 abgebildet sind. In Abbildung A.6 sind Floating-Car-Daten von der gleichen Autobahninfrastruktur (Abbildung 4.4 (a)), wie von dem Beispiel aus Abbildung 4.10 (a), in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt.

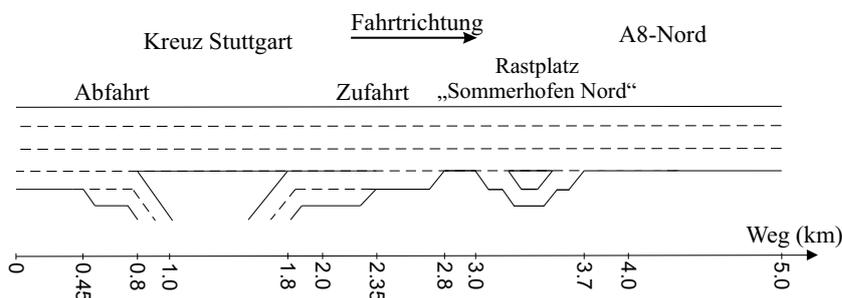


Abbildung A.1: Autobahninfrastruktur des Autobahnabschnittes A8-Nord bei Kreuz Stuttgart (Deutschland). Floating-Car-Daten wurden an dieser Autobahninfrastruktur untersucht und sind in den Abbildungen A.3 und A.4 dargestellt. Angepasst aus [155].

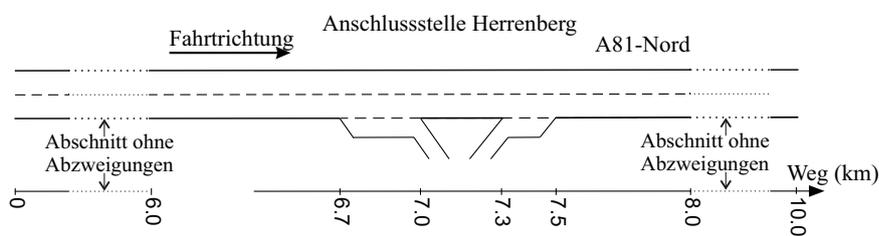


Abbildung A.2: Autobahninfrastruktur des Autobahnabschnittes A81-Nord bei der Anschlussstelle Herrenberg (Deutschland). Floating-Car-Daten wurden an dieser Autobahninfrastruktur untersucht und sind in der Abbildung A.5 dargestellt. Angepasst aus [154].

A8-Nord, Kreuz-Stuttgart, 14. November 2016

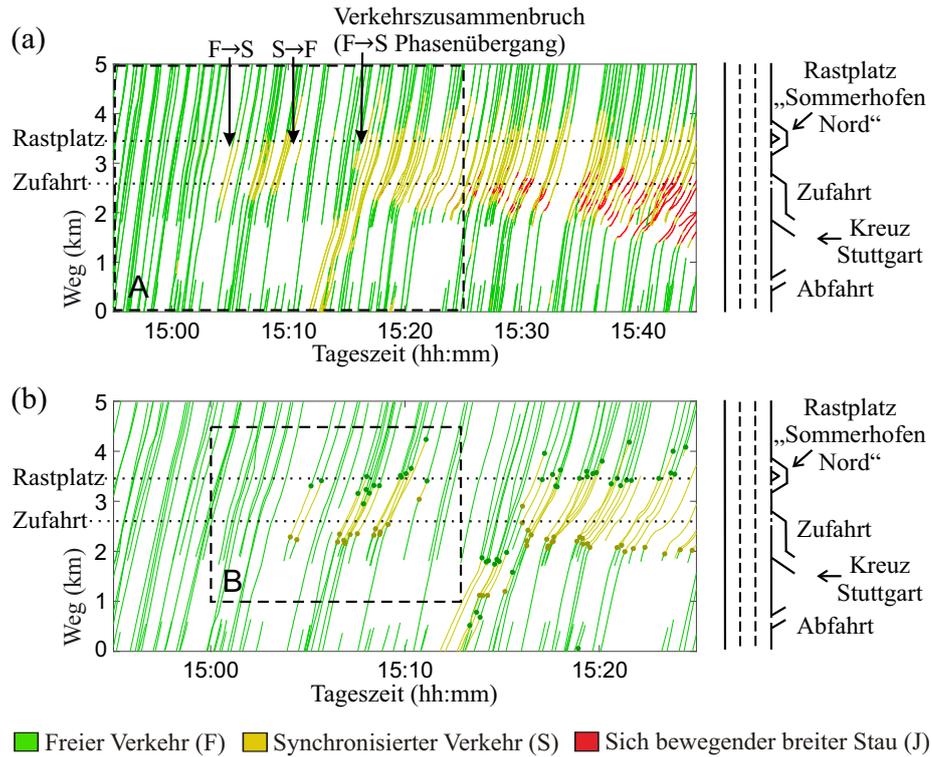


Abbildung A.3: Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A8-Nord bei Kreuz Stuttgart vom 14. November 2016. (a) Darstellung in einem Weg-Zeit-Diagramm an der in Abbildung A.1 dargestellte Autobahninfrastruktur mit gekennzeichneten Verkehrsphasenübergängen. Die Abfahrt und Zufahrt eines Rastplatzes verursachen die Autobahnengstelle. (b) Datenausschnitt aus (a), der durch das Rechteck A markiert ist. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [155].

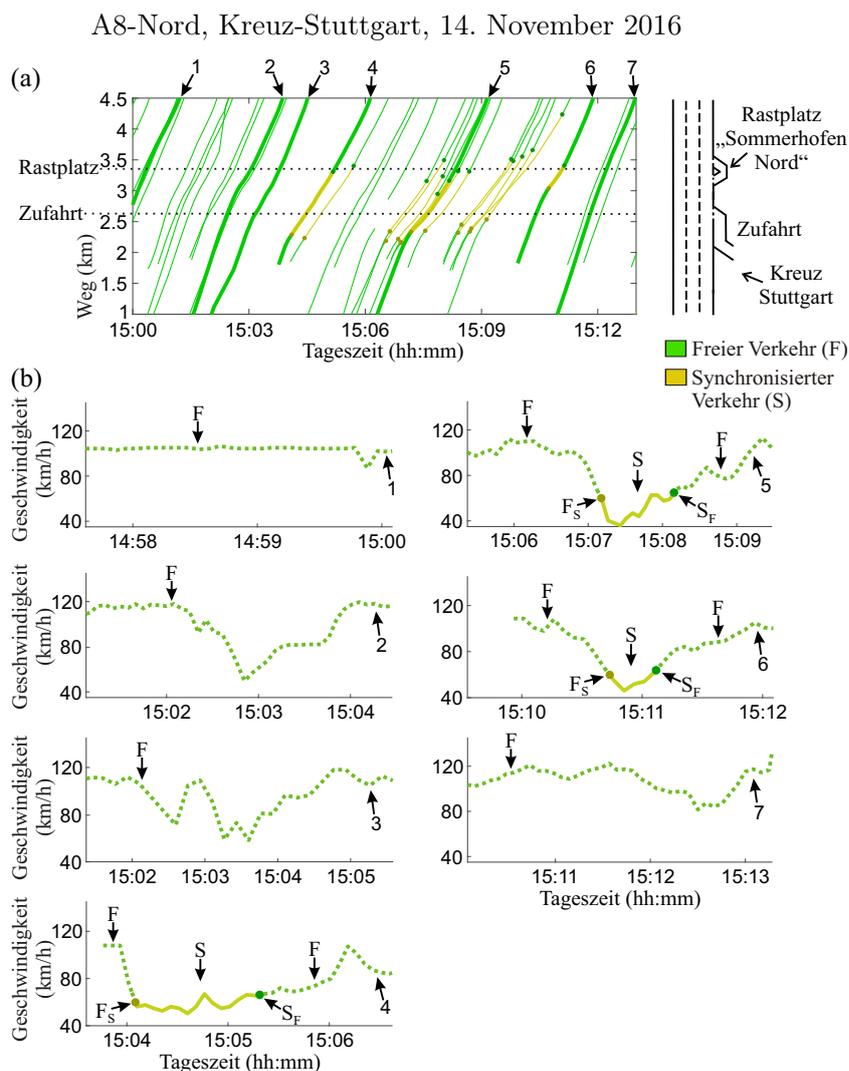


Abbildung A.4: (a) Datenausschnitt aus Abbildung A.3 (b), der durch das Rechteck B markiert ist, an der Autobahninfrastruktur aus Abbildung A.1. (b) Fahrzeugtrajektorien sind in Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammen mit den Verkehrszustandsübergängen und Verkehrsphasen abgebildet und durch die gleichen Zahlen 1 – 7 aus (a) gekennzeichnet. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt. Angepasst aus [139].

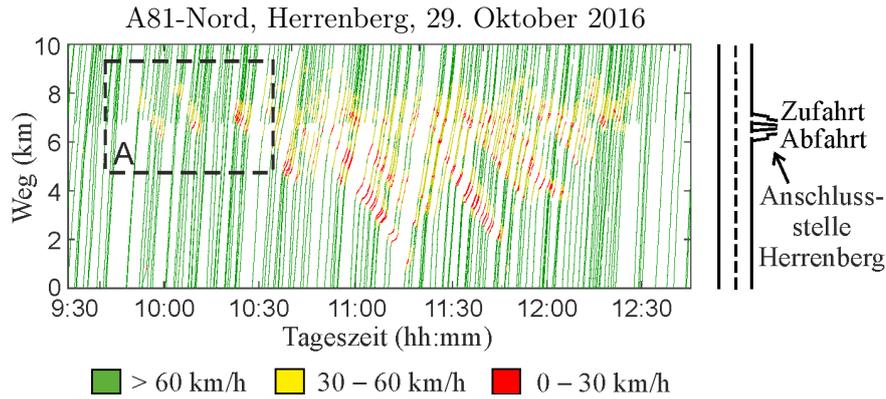


Abbildung A.5: Floating-Car-Daten am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Herrenberg vom 29. Oktober 2016. Darstellung in einem Weg-Zeit-Diagramm an der in Abbildung A.2 dargestellte Autobahninfrastruktur. Die Fahrzeugtrajektorien sind nach den in der Abbildung angegebenen Geschwindigkeitsintervallen gefärbt. Angepasst aus [154].

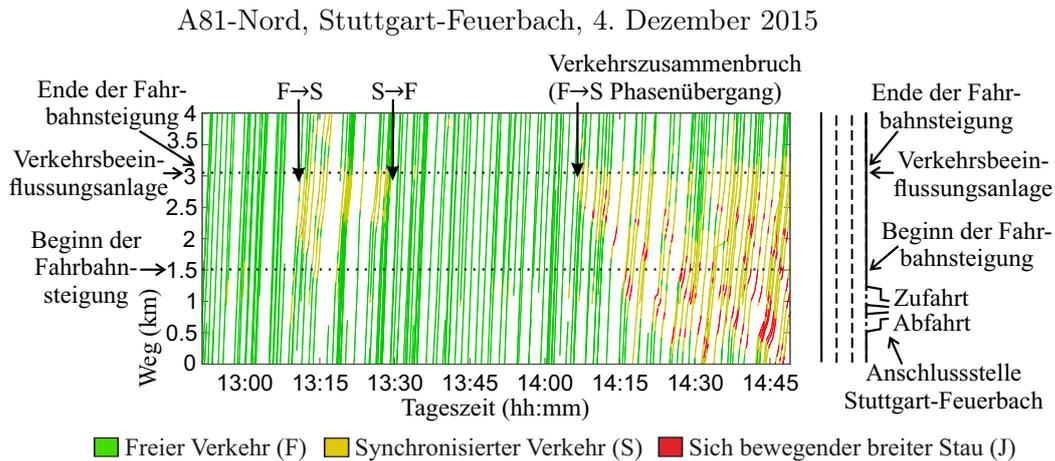


Abbildung A.6: Floating-Car-Daten von der gleichen Autobahninfrastruktur (Abbildung 4.4 (a)) wie in Abbildung 4.10 (a) am Autobahnabschnitt A81-Nord bei der Anschlussstelle Stuttgart-Feuerbach vom 4. Dezember 2015. Darstellung in einem Weg-Zeit-Diagramm mit gekennzeichneten Verkehrsphasenübergängen. Die in Abbildung 4.4 (b) dargestellte Fahrbahnsteigung und eine Verkehrsbeeinflussungsanlage verursachen die Autobahnengstelle. Die Verkehrsphasen wurden durch die Verkehrsphasenerkennung aus Kapitel 4.1 ermittelt.

Abkürzungs- und Definitionsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

FCD – Floating-Car-Daten (engl. floating car data)

F – Freier Verkehr (engl. free flow)

S – Synchronisierter Verkehr (engl. synchronized flow)

J – Sich bewegender breiter Stau (engl. wide moving jam)

F→S – Verkehrsphasenübergang von F nach S

F_S – Verkehrszustandsübergang von F nach S

GNSS – Global navigation satellite system (dt. globales Navigationssatellitensystem)

GPS – Global Positioning System (dt. globales Positionsbestimmungssystem)

NGSIM – Next Generation Simulation

MSP – Moving synchronized flow pattern

A81-Nord – Bundesautobahn 81 (kurz A81) in Fahrtrichtung Norden

ASDA – Automatische Staudynamikanalyse (engl. automatic tracking of moving jams)

FOTO – Forecasting of traffic objects

\bar{v} – Mittlere Verkehrsgeschwindigkeit

q – Verkehrsfluss, Verkehrsstärke (engl. traffic flow)

ρ – Verkehrsdichte (engl. traffic density)

T_S^{FSF} – Zeitintervall eines F→S→F Gebietes

T_F^{FSF} – Zeitintervall zwischen F→S→F Gebieten

Definitionsverzeichnis

- 2.1. Verkehrsvariable (Seite 5)
- 2.2. Zeitlücke (Seite 8)
- 2.3. Durchdringungsrate (Seite 9)
- 3.1. Verkehrszustand (Seite 20)
- 3.2. Verkehrsphase (Seite 20)
- 3.3. Geschwindigkeitsanpassung (engl. speed-adaptation) (Seite 21)
- 3.4. Erhöhte Beschleunigung (engl. over-acceleration) (Seite 21)
- 3.5. Verstärktes Bremsen (engl. over-deceleration) (Seite 21)
- 3.6. Stromabwärts und stromaufwärts (Seite 22)
- 3.7. Verkehrsphasenfront (Seite 22)
- 3.8. Stromabwärtige und stromaufwärtige Verkehrsphasenfront (Seite 22)
- 3.9. Sich bewegender Stau (Seite 26)
- 3.10. Verkehrsphase – Sich bewegender breiter Stau (J) (Seite 26)
- 3.11. Verkehrsphase – Synchronisierter Verkehr (S) (Seite 27)
- 3.12. Gestauter Verkehr (Seite 27)
- 3.13. Verkehrsphase – Freier Verkehr (F) (Seite 27)
- 3.14. Verkehrliche Autobahnengstelle (Seite 28)
- 3.15. Effektiver Ort der Autobahnengstelle (Seite 28)
- 3.16. Verkehrsphasenübergang (Seite 29)
- 3.17. Verkehrszustandsübergang (Seite 29)
- 3.18. Kritische Verkehrsstörung (Seite 30)
- 3.19. Metastabilität des freien Verkehrs (Seite 30)
- 3.20. Verkehrszusammenbruch (Seite 30)
- 3.21. Sich bewegender schmaler Stau (NJ) (Seite 34)
- 3.22. Mega-Stau (MJ) (Seite 35)
- 3.23. S→J Verkehrsflussinstabilität (Seite 36)
- 3.24. S→F Verkehrsflussinstabilität (Seite 37)

- 3.25. $F \rightarrow S \rightarrow F$ Verkehrsphasenübergänge (Seite 39)
- 3.26. $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebiet (Seite 39)
- 4.1. Autobahninfrastruktur (Seite 52)
- 4.2. Zeitintervall eines $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebietes (Seite 55)
- 4.3. Zeitintervall zwischen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Gebieten (Seite 55)
- 4.4. Stromaufwärts verlaufende Wellen aus synchronisiertem Verkehr (Seite 65)
- 5.1. Räumlicher Abstand δ_{Fzg} zwischen Fahrzeugen (engl. distance headway) (Seite 81)

Literaturverzeichnis

- [1] *ADAC Staubilanz 2010*, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC), 2011.
- [2] *ADAC Staubilanz 2019*, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC), 2020, URL: <https://www.adac.de/verkehr/verkehrsinformationen/staubilanz> (besucht am 20.07.2020).
- [3] *The future economic and environmental costs of gridlock in 2030*, Report for INRIX, Centre for Economics and Business Research, 2014, URL: <http://www.cebr.com/reports/the-future-economic-and-environmental-costs-of-gridlock> (besucht am 25.07.2020).
- [4] Koller, M.: Kraftstoffmehrverbrauch auf Basis dynamischer Verkehrslagen, Diss., Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 2015.
- [5] Hennessy, D. A.; Wiesenthal, D. L.: Traffic congestion, driver stress, and driver aggression, in: *Aggressive Behavior: Official Journal of the International Society for Research on Aggression (ISRA)* 25.6 (1999), S. 409–423.
- [6] Stokols, D.; Novaco, R. W.; Stokols, J.; Campbell, J.: Traffic congestion, Type A behavior, and stress. In: *Journal of Applied Psychology* 63.4 (1978), S. 467.
- [7] *Forschungsprojekt MEC-View: Mobile Edge Computing Based Object Detection for Automated Driving*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017–2020, URL: <http://www.mec-view.de> (besucht am 02.01.2020).
- [8] *Forschungsprojekt LUKAS: Lokales Umfeldmodell für das Kooperative Automatisierte Fahren in komplexen Verkehrssituationen*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020–2023.
- [9] Kerner, B. S.: *Introduction to modern traffic flow theory and control: the long road to three-phase traffic theory*, Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2009.
- [10] May, A. D.: *Traffic flow fundamentals*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1990, ISBN: 0-13-926072-2.
- [11] Transportation Research Board: *Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*, hrsg. von Elefteriadou, L. A., Washington, DC: The National Academies Press, 2016.
- [12] Gartner, N.; Messer, C.; Rathi, A.: *Traffic flow theory: A state-of-the-art report*, 2001.
- [13] Nelson, P.: A kinetic model of vehicular traffic and its associated bimodal equilibrium solutions, in: *Transport Theory and Statistical Physics* 24.1-3 (1995), S. 383–409.

- [14] Kell, J. H.; Fullerton, I. J.; Mills, M. K.: *Traffic detector handbook*, United States. Federal Highway Administration, 1990.
- [15] Coifman, B.: Identifying the onset of congestion rapidly with existing traffic detectors, in: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37.3 (2003), S. 277–291.
- [16] Gordon, R. L.; Tighe, W.; Siemens, I.: *Traffic control systems handbook*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2005.
- [17] Höfler, F.: *Verkehrswesen-Praxis-Band 2: Verkehrstechnik*, 2006.
- [18] Breitenberger, S.; Grüber, B.; Neuherz, M.: Extended Floating Car Data-Potenziale fuer die Verkehrsinformation und notwendige Durchdringungsraten/Extended Floating Car Data-Potential for Traffic Information and required Floating Car Penetration, in: *Straßenverkehrstechnik* 48.10 (2004).
- [19] Kerner, B.; Demir, C; Herrtwich, R.; Klenov, S.; Rehborn, H; Aleksic, M; Haug, A: Traffic state detection with floating car data in road networks, in: *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005*. IEEE, 2005, S. 44–49.
- [20] Kerner, B. S.; Rehborn, H.; Schäfer, R.-P.; Klenov, S. L.; Palmer, J.; Lorkowski, S.; Witte, N.: Traffic dynamics in empirical probe vehicle data studied with three-phase theory: Spatiotemporal reconstruction of traffic phases and generation of jam warning messages, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 392.1 (2013), S. 221–251.
- [21] Treiterer, J: Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetry techniques, in: *Proceedings*, US Bureau of Public Roads, Office of Research und Development, 1967, S. 333.
- [22] *NGSIM - Next Generation Simulation*, 2006, URL: <https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/ngsim.htm> (besucht am 02.01.2020).
- [23] Alexiadis, V.; Colyar, J.; Halkias, J.; Hranac, R.; McHale, G.: The next generation simulation program, in: *ITE Journal (Institute of Transportation Engineers)* 74.8 (2004), S. 22.
- [24] Kovvali, V. G.; Alexiadis, V.; Zhang, P.: Video-based vehicle trajectory data collection, in: *Proc. 86th Annual TRB Meeting*, 2007.
- [25] Kaufmann, S.; Kerner, B. S.; Rehborn, H.; Koller, M.; Klenov, S. L.: Aerial Observation of Inner City Traffic and Analysis of Microscopic Data at Traffic Signals, in: *Transportation Research Board Annual Meeting* (2017).
- [26] Kaufmann, S.: Luftbeobachtung und Interpretation mikroskopischer Verkehrsmuster im übersättigten Verkehr vor Lichtsignalanlagen, Diss., Germany: University of Tübingen, 2018, URL: <http://dx.doi.org/10.15496/publikation-26626> (besucht am 22.01.2020).
- [27] Kaufmann, S.; Kerner, B. S.; Rehborn, H.; Koller, M.; Klenov, S. L.: Aerial observations of moving synchronized flow patterns in over-saturated city traffic, in: *Transportation research part C: emerging technologies* 86 (2018), S. 393–406.

- [28] Krajewski, R.; Bock, J.; Kloeker, L.; Eckstein, L.: The highD Dataset: A Drone Dataset of Naturalistic Vehicle Trajectories on German Highways for Validation of Highly Automated Driving Systems, in: *Proc. 2018 IEEE 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018.
- [29] *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen*, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 2012, URL: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v5-tls/tls-streckenstationen.html (besucht am 16.08.2020).
- [30] Quddus, M. A.; Ochieng, W. Y.; Noland, R. B.: Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions, in: *Transportation research part c: Emerging technologies* 15.5 (2007), S. 312–328.
- [31] White, C. E.; Bernstein, D.; Kornhauser, A. L.: Some map matching algorithms for personal navigation assistants, in: *Transportation research part c: emerging technologies* 8.1-6 (2000), S. 91–108.
- [32] Bernstein, D.; Kornhauser, A.: An introduction to map matching for personal navigation assistants, in: (1996).
- [33] Bouillet, E.; Ranganathan, A.: Scalable, Real-Time Map-Matching Using IBM’s System S, in: *2010 Eleventh International Conference on Mobile Data Management*, IEEE, 2010, S. 249–257.
- [34] Auer, M.; Rehborn, H.; Molzahn, S.-E.; Koller, M.: Traffic services for vehicles: the process from receiving raw probe data to space-time diagrams and the resulting traffic service, in: *Frontiers of Engineering Management* 4.4 (2017), S. 490–497.
- [35] Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.: *Global positioning system: theory and practice*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [36] Parkinson, B. W.; Enge, P.; Axelrad, P.; Spilker Jr, J. J.: *Global positioning system: Theory and applications, Volume II*, American Institute of Aeronautics und Astronautics, 1996.
- [37] DoD, U.: Global positioning system standard positioning service performance standard, in: *Assistant secretary of defense for command, control, communications, and intelligence* (2001).
- [38] Auer, M.: Empirical Analysis of Driving and Route Choice Behavior in Traffic Networks Based on Connected Vehicle Data, Diss., Germany: Bundeswehr University Munich, 2018.
- [39] Leutzbach, W.: *Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses*, Springer, 1972.
- [40] Leutzbach, W.: *Introduction to the theory of traffic flow*, Bd. 47, Springer, 1988.
- [41] Schulz, W.: Traffic management improvement by integrating modern communication systems, in: *IEEE Communications Magazine* 34.10 (1996), S. 56–60.
- [42] Kerner, B. S.: *The Physics of Traffic*, Berlin: Springer, 2004.
- [43] Kerner, B. S.: *Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science*, Berlin: Springer, 2017.

- [44] Greenshields, B.; Channing, W.; Miller, H.: A study of traffic capacity, in: *Highway research board proceedings*, Bd. 1935, National Research Council (USA), Highway Research Board, 1935.
- [45] Transportation Research Board: Highway capacity manual, in: *National Research Council* (2000).
- [46] Hall, F. L.; Gunter, M. A.: Further analysis of the flow-concentration relationship, in: *Transportation Research Record* 1091 (1986), S. 1–9.
- [47] Hall, F. L.: An interpretation of speed-flow-concentration relationships using catastrophe theory, in: *Transportation Research Part A: General* 21.3 (1987), S. 191–201.
- [48] Hall, F. L.; Agyemang-Duah, K.: Freeway capacity drop and the definition of capacity, in: *Transportation research record* 1320 (1991), S. 91–98.
- [49] Elefteriadou, L.; Roess, R. P.; McShane, W. R.: Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions, in: *Transportation Research Record* 1484 (1995), S. 80–89.
- [50] Persaud, B.; Yagar, S.; Brownlee, R.: Exploration of the breakdown phenomenon in freeway traffic, in: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1634 (1998), S. 64–69.
- [51] Lorenz, M. R.; Elefteriadou, L.: A probabilistic approach to defining freeway capacity and breakdown, Diss., Citeseer, 2000.
- [52] Brilon, W.; Geistefeldt, J.; Regler, M.: Reliability of freeway traffic flow: a stochastic concept of capacity, in: *Proceedings of the 16th International symposium on transportation and traffic theory*, Bd. 125143, College Park Maryland, 2005.
- [53] Elefteriadou, L.; Kondyli, A.; Brilon, W.; Hall, F. L.; Persaud, B.; Washburn, S.: Enhancing ramp metering algorithms with the use of probability of breakdown models, in: *Journal of Transportation Engineering* 140.4 (2014), S. 04014003.
- [54] Elefteriadou, L.: *An introduction to traffic flow theory*, Bd. 84, New York: Springer, 2014.
- [55] Pipes, L. A.: An operational analysis of traffic dynamics, in: *Journal of applied physics* 24.3 (1953), S. 274–281.
- [56] Lighthill, M. J.; Whitham, G. B.: On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads, in: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 229.1178 (1955), S. 317–345.
- [57] Richards, P. I.: Shock waves on the highway, in: *Operations research* 4.1 (1956), S. 42–51.
- [58] Herman, R.; Montroll, E. W.; Potts, R. B.; Rothery, R. W.: Traffic dynamics: analysis of stability in car following, in: *Operations research* 7.1 (1959), S. 86–106.
- [59] Gazis, D. C.; Herman, R.; Rothery, R. W.: Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow, in: *Operations research* 9.4 (1961), S. 545–567.
- [60] Kometani, E.; Sasaki, T.: On the stability of traffic flow (report-I), in: *J. Oper. Res. Soc. Japan* 2.1 (1958), S. 11–26.

- [61] Newell, G. F.: Mathematical models for freely-flowing highway traffic, in: *Journal of the Operations Research Society of America* 3.2 (1955), S. 176–186.
- [62] Newell, G. F.: Nonlinear effects in the dynamics of car following, in: *Operations research* 9.2 (1961), S. 209–229.
- [63] Newell, G. F.: Theories of instability in dense highway traffic, in: *J. Operations Research Society of Japan* 5.1 (1962), S. 9–54.
- [64] Newell, G. F.: A simplified car-following theory: a lower order model, in: *Transportation Research Part B: Methodological* 36.3 (2002), S. 195–205.
- [65] Payne, H. J.: FREFLO: A macroscopic simulation model of freeway traffic, in: *Transportation Research Record* 722 (1979).
- [66] Gipps, P. G.: Behavioral car-following model for computer simulation, in: *Transport. Res.* 15.2 (1981), S. 105–111.
- [67] Gipps, P. G.: A model for the structure of lane-changing decisions, in: *Transportation Research Part B: Methodological* 20.5 (1986), S. 403–414.
- [68] Gazis, D. C.: Traffic science, in: (1974).
- [69] Daganzo, C.; Daganzo, C.: *Fundamentals of transportation and traffic operations*, Bd. 30, Pergamon Oxford, 1997.
- [70] Prigogine, I.; Herman, R.: *Kinetic theory of vehicular traffic*, 1971.
- [71] Cremer, M.: Modellbildung für den Verkehrsfluß, in: *Der Verkehrsfluß auf Schnellstraßen*, Springer, 1979, S. 11–50.
- [72] Hall, F. L.; Hurdle, V.; Banks, J. H.: Synthesis of recent work on the nature of speed-flow and flow-occupancy (or density) relationships on freeways, in: (1993).
- [73] Gartner, N. H.; Messer, C. J.; Rathi, A. K.: *Monograph on traffic flow theory*, Federal Highway Administration, 1997.
- [74] Wolf, D. E.: Cellular automata for traffic simulations, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 263.1-4 (1999), S. 438–451.
- [75] Chowdhury, D.; Santen, L.; Schadschneider, A.: Statistical physics of vehicular traffic and some related systems, in: *Physics Reports* 329.4-6 (2000), S. 199–329.
- [76] Helbing, D.: Verkehrsdynamik [Traffic Dynamics], in: *Springer, Berlin, Germany* (1997).
- [77] Helbing, D.: Traffic and related self-driven many-particle systems, in: *Reviews of modern physics* 73.4 (2001), S. 1067.
- [78] Nagatani, T.: The physics of traffic jams, in: *Reports on progress in physics* 65.9 (2002), S. 1331.
- [79] Wolf, D.; Schreckenberg, M.; Bachem, A.: Traffic and granular flow, in: *Proceedings of the International Workshop on Traffic and Granular Flow*, 1995.
- [80] Schreckenberg, M.; Wolf, D.: *Traffic and Granular Flow'97*, Bd. 301, Springer Singapore, 1998.

- [81] Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D.: Microscopic simulation of congested traffic, in: *Traffic and granular flow'99*, Springer, 2000, S. 365–376.
- [82] Fukui, M.; Sugiyama, Y.; Schreckenberg, M.; Wolf, D. E.: *Traffic and granular flow'01*, Springer Science & Business Media, 2001.
- [83] Hoogendoorn, S. P.; Luding, S.; Bovy, P. H.; Schreckenberg, M.; Wolf, D. E.: *Traffic and granular flow'03*, Springer Science & Business Media, 2003.
- [84] Treiber, M.; Kesting, A.: *Traffic Flow Dynamics*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, ISBN: 978-3-642-32459-8.
- [85] May, A. D.; Keller, H.: Evaluation of single-and two-regime traffic flow models, in: (1968).
- [86] Helbing, D.; Hennecke, A.; Treiber, M.: Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities, in: *Physical Review Letters* 82.21 (1999), S. 4360.
- [87] Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, in: *Physical review E* 62.2 (2000), S. 1805.
- [88] Treiber, M.; Kesting, A.: *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*, Springer-Verlag, 2010.
- [89] Kim, Y.; Keller, H.: Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm, in: *Straßenverkehrstechnik* 45.9 (2001).
- [90] Kerner, B. S.: Failure of classical traffic flow theories: stochastic highway capacity and automatic driving, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 450 (2016), S. 700–747.
- [91] Kerner, B. S.; Rehborn, H.: Experimental features and characteristics of traffic jams, in: *Physical Review E* 53.2 (1996), R1297.
- [92] Kerner, B. S.; Rehborn, H.: Experimental properties of phase transitions in traffic flow, in: *Physical Review Letters* 79.20 (1997), S. 4030.
- [93] Kerner, B. S.: A theory of congested traffic flow, in: *Third International Symposium on Highway Capacity, Transportation Research Board Highway Capacity and Quality of Service Committee, Danish Road Directorate*, Volume 2, 1998, S. 621–641.
- [94] Kerner, B. S.: Experimental features of self-organization in traffic flow, in: *Physical review letters* 81.17 (1998), S. 3797.
- [95] Kerner, B. S.: Congested traffic flow: Observations and theory, in: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1678 (1999), S. 160–167.
- [96] Kerner, B. S.: Theory of congested traffic flow: self-organization without bottlenecks, in: *14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Transportation Research Institute*, 1999, S. 147–171.
- [97] Kerner, B. S.; Rehborn, H.; Aleksic, M.; Haug, A.: Methods for tracing and forecasting congested traffic patterns, in: *Traffic engineering & control* 42.8 (2001).
- [98] Kerner, B. S.; Klenov, S. L.: A microscopic model for phase transitions in traffic flow, in: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 35.3 (2002), S. L31.

- [99] Kerner, B. S.; Klenov, S. L.; Wolf, D. E.: Cellular automata approach to three-phase traffic theory, in: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 35.47 (2002), S. 9971.
- [100] Kerner, B. S.: Microscopic theory of traffic-flow instability governing traffic breakdown at highway bottlenecks: Growing wave of increase in speed in synchronized flow, in: *Physical Review E* 92.6 (2015), S. 062827.
- [101] Davis, L.: Multilane simulations of traffic phases, in: *Physical Review E* 69.1 (2004), S. 016108.
- [102] Lee, H. K.; Barlovic, R.; Schreckenberg, M.; Kim, D.: Mechanical restriction versus human overreaction triggering congested traffic states, in: *Physical review letters* 92.23 (2004), S. 238702.
- [103] Jiang, R.; Wu, Q.-S.: Spatial-temporal patterns at an isolated on-ramp in a new cellular automata model based on three-phase traffic theory, in: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 37.34 (2004), S. 8197.
- [104] Gao, K.; Jiang, R.; Hu, S.-X.; Wang, B.-H.; Wu, Q.-S.: Cellular-automaton model with velocity adaptation in the framework of Kerner's three-phase traffic theory, in: *Physical Review E* 76.2 (2007), S. 026105.
- [105] Davis, L.: Mitigation of congestion at a traffic bottleneck with diversion and lane restrictions, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 391.4 (2012), S. 1679–1691.
- [106] Jiang, R.; Hu, M.-B.; Jia, B.; Wang, R.; Wu, Q.-S.: Spatiotemporal congested traffic patterns in macroscopic version of the Kerner-Klenov speed adaptation model, in: *Physics Letters A* 365.1-2 (2007), S. 6–9.
- [107] Schadschneider, A.; Pöschel, T.; Kühne, R.; Schreckenberg, M.; Wolf, D. E.: *Traffic and Granular Flow'05*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [108] Wu, J.; Sun, H.; Gao, Z.: Long-range correlations of density fluctuations in the Kerner-Klenov-Wolf cellular automata three-phase traffic flow model, in: *Physical Review E* 78.3 (2008), S. 036103.
- [109] Gao, K.; Jiang, R.; Wang, B.-H.; Wu, Q.-S.: Discontinuous transition from free flow to synchronized flow induced by short-range interaction between vehicles in a three-phase traffic flow model, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 388.15-16 (2009), S. 3233–3243.
- [110] Tian, J.-f.; Jia, B.; Li, X.-g.; Jiang, R.; Zhao, X.-m.; Gao, Z.-y.: Synchronized traffic flow simulating with cellular automata model, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 388.23 (2009), S. 4827–4837.
- [111] Kokubo, S.; Tanimoto, J.; Hagishima, A.: A new cellular automata model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 390.4 (2011), S. 561–568.
- [112] Zhang, P.; Wu, C.-X.; Wong, S.: A semi-discrete model and its approach to a solution for a wide moving jam in traffic flow, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 391.3 (2012), S. 456–463.

- [113] Tian, J.-f.; Yuan, Z.-z.; Treiber, M.; Jia, B.; Zhang, W.-y.: Cellular automaton model within the fundamental-diagram approach reproducing some findings of the three-phase theory, in: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 391.11 (2012), S. 3129–3139.
- [114] Kimathi, M. E.: *Mathematical Models for 3-PhaseTraffic Flow Theory*, Diss., 2012.
- [115] Kerner, B. S.: *Complex dynamics of traffic management. Encyclopedia of complexity and systems science series*, New York: Springer, 2019.
- [116] Kienzle, J.: *Analyse von Einzelfahrzeugdaten: Verkehr verstehen*, Germany: University of Stuttgart, 2001, URL: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-148> (besucht am 09.03.2020).
- [117] Kerner, B. S.; Klenov, S. L.; Schreckenberg, M.: Probabilistic physical characteristics of phase transitions at highway bottlenecks: incommensurability of three-phase and two-phase traffic-flow theories, in: *Physical Review E* 89.5 (2014), S. 052807.
- [118] Chandler, R. E.; Herman, R.; Montroll, E. W.: Traffic dynamics: studies in car following, in: *Operations research* 6.2 (1958), S. 165–184.
- [119] Gazis, D. C.; Herman, R.; Potts, R. B.: Car-following theory of steady-state traffic flow, in: *Operations research* 7.4 (1959), S. 499–505.
- [120] Molzahn, S.-E.; Kerner, B. S.; Rehborn, H.; Klenov, S. L.; Koller, M.: Analysis of speed disturbances in empirical single vehicle probe data before traffic breakdown, English, in: *IET Intelligent Transport Systems* 11.9 (2017), S. 604–612, ISSN: 1751-956X.
- [121] Daamen, W.; Loot, M.; Hoogendoorn, S. P.: Empirical analysis of merging behavior at freeway on-ramp, in: *Transportation Research Record* 2188.1 (2010), S. 108–118.
- [122] Minderhoud, M. M.: *Supported driving: impacts on motorway traffic flow*, in: (1999).
- [123] Laval, J. A.; Daganzo, C. F.: Lane-changing in traffic streams, in: *Transportation Research Part B: Methodological* 40.3 (2006), S. 251–264.
- [124] Kesting, A.; Treiber, M.; Helbing, D.: General lane-changing model MOBIL for car-following models, in: *Transportation Research Record* 1999.1 (2007), S. 86–94.
- [125] Choudhury, C. F.: *Modeling driving decisions with latent plans*, Diss., Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [126] Yang, Q.; Koutsopoulos, H. N.: A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems, in: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 4.3 (1996), S. 113–129.
- [127] Hill, C.; Elefteriadou, L.; Kondyli, A.: Exploratory analysis of lane changing on freeways based on driver behavior, in: *Journal of transportation engineering* 141.4 (2014), S. 04014090.
- [128] Pan, T.; Lam, W. H.; Sumalee, A.; Zhong, R.: Modeling the impacts of mandatory and discretionary lane-changing maneuvers, in: *Transportation research part C: emerging technologies* 68 (2016), S. 403–424.

- [129] Kusuma, A.; Liu, R.; Choudhury, C.; Montgomery, F.: Lane-changing characteristics at weaving section, in: *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, 2015.
- [130] Beinum, A. van; Farah, H.; Wegman, F.; Hoogendoorn, S.: Driving behaviour at motorway ramps and weaving segments based on empirical trajectory data, in: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 92 (2018), S. 426–441.
- [131] Schakel, W. J.; Knoop, V. L.; Arem, B. van: Integrated lane change model with relaxation and synchronization, in: *Transportation Research Record* 2316.1 (2012), S. 47–57.
- [132] Laval, J. A.; Leclercq, L.: Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model, in: *Transportation Research Part B: Methodological* 42.6 (2008), S. 511–522.
- [133] Duret, A.; Ahn, S.; Buisson, C.: Passing rates to measure relaxation and impact of lane-changing in congestion, in: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 26.4 (2011), S. 285–297.
- [134] Hentschel, P.; König, P.; Dauer, P.: Straßenverkehrsrecht, in: *C.H. Beck* 45.5 (2019).
- [135] *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)*, 2020, URL: <https://www.stvo.de/strassenverkehrsordnung> (besucht am 14.04.2020).
- [136] Filzek, B.: Abstandsverhalten auf Autobahnen-Fahrer und ACC im Vergleich, in: *Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik* 536 (2003).
- [137] Thiemann, C.; Treiber, M.; Kesting, A.: Estimating acceleration and lane-changing dynamics from next generation simulation trajectory data, in: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2008), S. 90–101.
- [138] Dülgar, Y.; Rehborn, H.; Molzahn, S.-E.; Koller, M.; Menth, M.; Kerner, B.; Schreckenberg, M.: A Study for Merging of Automated Vehicles, in: *27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2018.
- [139] Dülgar, Y.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H.; Koller, M.; Kerner, B. S.; Wegerle, D.; Schreckenberg, M.; Menth, M.; Klenov, S. L.: Empirical random phase transitions between free flow and synchronized flow at highway bottlenecks, in: *Journal of Intelligent Transportation Systems* (2019), S. 1–17.
- [140] Dülgar, Y.; Menth, M.; Rehborn, H.; Koller, M.: Heterogeneity of Microscopic Congested Traffic Data Based on Drone Measurements, in: *8th IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo*, IEEE, 2019.
- [141] Menth, M.; Hauser, F.: On Moving Averages, Histograms and Time-Dependent Rates for Online Measurement, in: *8th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering*, ACM, 2017, S. 103–114.
- [142] Dülgar, Y.; Menth, M.; Rehborn, H.; Koller, M.: Analysis of Microstructures in Traffic Jams on Highways Based on Drone Observations, in: *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, IEEE, 2019.
- [143] Zivot, E.; Wang, J.: Vector autoregressive models for multivariate time series, in: *Modeling Financial Time Series with S-PLUS* (2006), S. 385–429.

- [144] Chiulli, R. M.: *Quantitative Analysis: An Introduction*, CRC Press, 1999.
- [145] Eckner, A.: Algorithms for unevenly-spaced time series: Moving averages and other rolling operators, in: 2012.
- [146] Menth, M.; Milbrandt, J.; Junker, J.: Time-Exponentially Weighted Moving Histograms (TEWMH) for Application in Adaptive Systems, in: *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM'06. IEEE*, IEEE, 2006, S. 1–6.
- [147] Martin, R.; Menth, M.: Improving the Timeliness of Rate Measurements. In: *12th GI/ITG Conference on Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB) together with 3rd Polish-German Teletraffic Symposium (PGTS)*, 2004, S. 145–154.
- [148] Menth, M.; Hauser, F.: Time Series Online Measurement for Python (TSOMpy), in: *8th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering*, ACM, 2017, S. 175–176.
- [149] Menth, M.; Hauser, F.: *TSOMpy—Time Series Online Measurement for Python*, 2017, URL: <https://www.github.com/uni-tue-kn/TSOMpy> (besucht am 05.01.2020).
- [150] Kerner, B. S.; Klenov, S. L.; Hiller, A.: Criterion for traffic phases in single vehicle data and empirical test of a microscopic three-phase traffic theory, in: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 39.9 (2006), S. 2001.
- [151] Kerner, B. S.; Klenov, S. L.; Hiller, A.; Rehborn, H.: Microscopic features of moving traffic jams, in: *Physical Review E* 73.4 (2006), S. 046107.
- [152] Kerner, B. S.: Control of spatiotemporal congested traffic patterns at highway bottlenecks, in: *Physica A: statistical mechanics and its applications* 355.2-4 (2005), S. 565–601.
- [153] Dülger, Y.; Menth, M.; Rehborn, H.: *Verfahren zum Unterstützen eines Fahrzeuges beim Einfädeln in eine Fahrspur*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 009 651 A1, 2019.
- [154] Dülger, Y.; Rehborn, H.; Molzahn, S.-E.; Kerner, B. S.; Wegerle, D.; Schreckenberg, M.: Towards empirical detection of $F \rightarrow S \rightarrow F$ transitions indicating subsequent traffic breakdown, in: *25th ITS World Congress*, 2018.
- [155] Dülger, Y.; Rehborn, H.; Kerner, B. S.: Verkehrsphasenübergänge an Autobahnengstellen vor einem Verkehrszusammenbruch, in: *HEUREKA'21 Optimierung in Verkehr und Transport* (2021).
- [156] Rehborn, H.; Koller, M.; Dülger, Y.; Ünal, B.; Maier, M.; Völz, B.: Energy Consumption of Automated and Non-Automated Vehicles in Various Traffic Scenarios, in: *29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, 2020.
- [157] Huang, W.; Dülger, Y.; Rehborn, H.; Bernhardt, B.; Xu, J.: Identification and Characterization of Mobile Work Zones using Floating Car Data, in: *Transportation Research Board* (2021).

- [158] Dülgar, Y.; Rehborn, H.: *Verfahren zum automatisierten Einfädeln eines Fahrzeugs*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 005 446 B3, WO 2021 023 549 A1, 2020.
- [159] Molzahn, S.-E.; Rehborn, H.; Auer, M.; Dülgar, Y.; Menth, M.: *Verfahren zum Steuern eines für einen autonomen Fahrbetrieb ausgebildeten Assistenzsystems eines Fahrzeuges*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 003 572 A1, 2018.
- [160] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Verfahren zur Verkehrszustandsüberwachung*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 009 429 A1, 2019.
- [161] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.; Starman, F.: *Verfahren zum Einstellen eines Soll-Abstands zwischen Kraftfahrzeugen*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 009 532 A1, 2018.
- [162] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Verfahren zur Ausgabe einer Überholempfehlung*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 009 609 A1, 2019.
- [163] Auer, M.; Dülgar, Y.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H.: *Verfahren zur Verkehrsprognose*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 010 292 A1, 2018.
- [164] Dülgar, Y.; Rehborn, H.; Starman, F.; Wenz, M.: *Verfahren zur nutzerspezifischen Anzeige*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 006 944 A1, 2018.
- [165] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.; Starman, F.: *Verfahren zur Darstellung einer Ankunftszeit*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 009 875 A1, 2018.
- [166] Birk, K.; Bogner, S.; Dülgar, Y.; Rehborn, H.; Starman, F.; Turber, M.: *Verfahren zum Darstellen von Routeninformationen*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2017 011 205 A1, 2019.
- [167] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Verfahren zur Bewertung von standortspezifischen Fahrzeugdaten*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 004 922 A1, 2018.
- [168] Rehborn, H.; Dülgar, Y.: *Verfahren zur Routenplanung*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 007 298 A1, 2019.
- [169] Auer, M.; Dülgar, Y.; Koller, M.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H.: *Verfahren zum Darstellen von Routeninformationen*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2018 001 863 A1, 2018.
- [170] Dülgar, Y.; Molzahn, S.-E.; Rehborn, H.: *Informationssystem eines Kraftfahrzeugs, Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Information von Passagieren eines Kraftfahrzeugs*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 001 445 A1, 2019.
- [171] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Verfahren zur Erfassung und Nutzung eines Signalhorn-Signals*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 004 014 A1, 2020.
- [172] Dülgar, Y.; Eker, A.; Künbül, R.: *Verfahren zur Ermittlung einer ortsbezogenen Verfügbarkeitswahrscheinlichkeit für einen Parkplatz*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 004 159 A1, 2020.
- [173] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Verfahren zur Fahrtroutenauswahl und zur Ermittlung einer Ankunftszeit eines Fahrzeuges an einem Zielort*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2019 005 584 A1, 2020.

- [174] Ünal, B.; Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Verfahren zur Erzeugung einer hochwertigen Verbrauchsmatrix für Fahrzeuge*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 004 214 A1, 2020.
- [175] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Auswertung tatsächlicher Fahrspurnutzung durch vernetzte Fahrzeuge*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 005 330 A1, 2020.
- [176] Dülgar, Y.; Koller, M.; Rehborn, H.: *Qualitätsbestimmung eines Verkehrsserviceanbieters*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 005 135 A1, 2020.
- [177] Dülgar, Y.; Rehborn, H.; Starman, F.: *Routenwahl durch ein Fahrzeug-Navigationssystem*, Deutsches Patent- und Markenamt: DE 10 2020 006 717 A1, 2020.