

Sven-Eric Molzahn

Verkehrsphasenbasierte
Datenanalyse von zeitlich-
räumlichen Strukturen der
Staufrenten



Scientific
Publishing

Sven-Eric Molzahn

**Verkehrsphasenbasierte Datenanalyse von
zeitlich-räumlichen Strukturen der Staufronten**

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen

Band 76

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Verkehrsphasenbasierte Datenanalyse von zeitlich-räumlichen Strukturen der Staufronten

von
Sven-Eric Molzahn

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Verkehrswesen

Verkehrsphasenbasierte Datenanalyse von
zeitlich-räumlichen Strukturen der Staufrenten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Sven-Eric Molzahn, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Februar 2021

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.

Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –
is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2022 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 0341-5503

ISBN 978-3-7315-1116-8

DOI 10.5445/KSP/1000135973

Zusammenfassung

Bis heute stellt die plötzliche Entstehung der Strukturen von gestautem Verkehr eine große Gefahr für Fahrer und Fahrzeug dar: Dieses gilt vor allem für das Auffahren auf ein Stauende. Eine Möglichkeit die Gefahr zu minimieren, ist die rechtzeitige und präzise Warnung vor einem Stauende. Daher ist es ein Ziel dieser Arbeit, neue Lösungen und Verfahren zur schnellen und präzisen Erkennung von Staufronten zu entwickeln. Weiterhin liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Untersuchung mikroskopischer Charakteristiken von Staufronten in Bezug auf einer Verbesserung der Stauendewarnsysteme. Die Methodologie dieser Untersuchung basiert auf der Analyse von empirischen Flottendaten und Erkenntnissen der Phasenübergänge im Verkehr, um Verfahren zur Stauendewarnung zu entwickeln, die dem realen Verhalten von Verkehrsmustern entsprechen.

Im Rahmen dieser Arbeit können die folgenden Hauptergebnisse zusammengefasst werden: (i) Anhand von mikroskopischen Mobilitätsdaten einer realen Fahrzeugflotte werden erstmals die zeitlich-räumlichen Strukturen einiger lokaler Störungen vor einem Verkehrszusammenbruch ($F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge genannt) aufgezeigt und analysiert. (ii) Es wird ein Verfahren („Stauwand“ genannt) vorgestellt und entwickelt. Bei diesem Verfahren werden Geschwindigkeitseinbrüche an einer Staufront bestimmt. (iii) Auf Basis der Geschwindigkeitseinbrüche wird die Staufront in Gefährdungsklassen eingestuft, die über die Zeit einer Staufront wechseln können. Durch diese Analyse wird das Gefährdungspotenzial einer Staufront dargestellt.

Insbesondere wird die Analyse der lokalen Störungen vor einen Zusammenbruch ($F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge) dargelegt, bei dem zeitlich vor einem Verkehrszusammenbruch Regionen von synchronisiertem Verkehr entstehen, die sich wieder auflösen: Die Verkehrssituation verbessert sich wieder zum freien Verkehr.

Das Verfahren zur Klassifikation des Gefährdungspotenzials von Staufronten besteht aus mehreren Schritten: Zunächst werden anhand von Trajektorien einzelne Staufronten extrahiert, die auf Grundlage von Charakteristiken der Verkehrsphasen bestimmt werden. Da die einzelnen Staufronten die Verkehrsphasen voneinander abgrenzen und jedes Fahrzeug diese Staufront durchqueren muss, werden an dieser Stelle die Geschwindigkeitseinbrüche bestimmt und zu einer „Stauwand“ zusammengeführt. Diese dienen als Indikator für das Gefährdungspotenzial und klassifizieren die Staufront in die jeweiligen Gefährdungsklassen. Exemplarisch wurden anhand von drei Situationen an verschiedenen Tagen und Engstellen einzelne Verläufe von Geschwindigkeitseinbrüchen gezeigt. Der Verlauf von Geschwindigkeitseinbrüchen folgt dabei jeweils einem bestimmten Trend.

Das Verfahren wurde weiterhin an drei Datensätzen angewandt, die jeweils mehrere Tage auf einer längeren Strecke umfassen. Die jeweiligen statistischen Auswertungen zeigen Verteilungen von der Dauer der jeweiligen Gefährdungsklasse.

Abstract

To this day, the sudden emergence of congested traffic poses a great danger to drivers and vehicles: This applies in particular to driving onto the end of a traffic jam. One way to minimize the danger is to give a timely and accurate warning of the end of a traffic jam. Therefore, one goal of this work is to develop new solutions and procedures for the fast and precise detection of traffic jam fronts. Furthermore, the focus of this work is on the investigation of microscopic characteristics of jam fronts with respect to the improvement of the congestion warning systems. The methodology of this study is based on the analysis of empirical fleet data (floating car data) and current knowledge of phase transitions in traffic, to develop jam tail warning methods that correspond to the real behaviour of traffic patterns.

Within the framework of this work, the following main results can be summarised: (i) On the basis of microscopic mobility data of a real vehicle fleet, the temporal-spatial structures of some local disturbances before a traffic breakdown ($F \rightarrow S \rightarrow F$ transitions) are shown and analysed for the first time. (ii) A method („jam wall“) is presented and developed. In this method, speed drops at a jam front are determined. (iii) On the basis of the speed drops, the jam front is classified into severity classes that can change over the time of a congestion front. This analysis shows the severity potential of a traffic jam front.

In particular, the analysis of the local disturbances before a traffic breakdown ($F \rightarrow S \rightarrow F$ transitions) is presented, in which regions of synchronized traffic emerge before a traffic breakdown and dissolve again: Traffic is thus recovering.

The procedure for classifying the severity potential of congestion fronts consists of several steps: First, individual jam fronts are extracted using trajectories, which are determined on the basis of characteristics of the traffic phases. Since the

individual jam fronts separate the traffic phases from each other and each vehicle has to cross this traffic jam front, the speed drops are determined at this point and combined to a „jam wall“. These serve as indicators for the severity potential and classify the traffic jam front into the respective severity classes. Three situations on different days and bottlenecks were used as examples to illustrate individual courses of speed drops. The course of speed drops follows a certain trend.

The method was also applied to three data sets, each of which comprises several days over a longer distance. The respective statistical evaluations show distributions of the duration of the respective severity class.

Vorwort

Zunächst bedanke ich mich sehr herzlich für die Übernahme des Hauptreferats bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch vom Institut für Verkehrswesen (IfV) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Für seine stete Unterstützung meines Themengebiets und viele wichtige Impulse im Laufe der Promotion bin ich sehr dankbar. Ebenso danke ich besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich vom Institut für Straßen und Verkehrswesen (ISV) der Universität Stuttgart für die Übernahme des Koreferats sowie für die hilfreichen und freundlichen Diskussionen zu meiner Arbeit.

Mein weiterer Dank gilt meinen Kollegen von der Mercedes-Benz AG, die mich vielfältig mehrere Jahre unterstützt haben. Allen voran Dr. Hubert Rehborn und Prof. Dr. Boris Kerner, die mich stets motivierten und durch ihre jahrelange Erfahrung sowohl fachlich als auch persönlich begleitet haben. Dr. Micha Koller, Dr. Markus Auer, Yildirim Dülger und Dr. Stefan Kaufmann danke ich für die zahlreichen Diskussionen und das unermüdliche Hinterfragen meiner fachlichen Fortschritte. Weiter möchte ich mich bei allen ehemaligen und aktuellen Kollegen sowie bei Familie und Freunden bedanken, die mich während meiner Zeit bei Mercedes-Benz unterstützt haben. Meinen Eltern möchte ich abschließend danken, die mich jederzeit uneingeschränkt unterstützt haben und dadurch mir die Ausbildung und diesen Weg ermöglichten.

Karlsruhe, im Februar 2021

Sven-Eric Molzahn

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	iii
Vorwort	v
Abkürzungen und Symbole	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung der Arbeit	5
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Methoden zur Verkehrsdatenerfassung	9
2.1 Methoden zur Erhebung von Fahrzeugdaten	9
2.1.1 Videobasierte Verkehrserfassung	10
2.1.2 Stationäre Messeinheiten zur lokalen Erfassung	11
2.1.3 Fahrzeuggenerierte Verkehrsdaten	12
2.2 Datensatz dieser Arbeit	14
3 Stand der Technik	17
3.1 Verkehrssicherheit	17
3.1.1 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit	19
3.1.2 Stationäre und dynamische Warnungen vor Stauenden	20
3.2 Nutzung von dynamischen Verkehrsdaten in Navigationsgeräten	22
3.3 Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallrisiko	22

3.3.1	Identifikation und Evaluierung von Gefahrensituationen im Straßenverkehr	23
3.3.2	Gefährdungspotenzial und Unfallmetriken	24
3.4	Verkehrstheoretischer Hintergrund	25
3.4.1	Empirische Definition der Verkehrsphasen	27
3.4.2	Verkehrsmuster der Drei-Phasen Verkehrstheorie	28
3.4.3	Empirischer Verkehrszusammenbruch	29
3.4.4	S→F Instabilität	31
3.5	Defizite vorhandener Systeme und Bedarf neuer Lösungen	34
4	Verkehrsphasenbasierte FC-Datenanalyse	37
4.1	Empirischer Nachweis von lokalen Störungen vor dem Verkehrszusammenbruch	37
4.1.1	Untersuchter Streckenabschnitt	38
4.1.2	Mikroskopische empirische Eigenschaften vor dem Verkehrszusammenbruch	39
4.2	Vergleich von FCD und Detektordaten zur Erkennung von Geschwindigkeitseinbrüchen	43
4.3	F→S→F Übergänge vor einem Verkehrszusammenbruch	45
5	Zeitlich-räumliche Strukturen von Staufronten	47
5.1	Fahrerverhalten bei Einfahrt in den gestauten Verkehr	48
5.1.1	Definition eines Bremsvorgangs	48
5.1.2	Bremsvorgänge in empirischen Flottendaten	51
5.2	Zeitlich-räumliche Eigenschaften von Staufronten	55
5.2.1	Staufronten in empirischen Flottendaten	57
5.2.2	Mikroskopische Eigenschaften von Staueinfahrten	59
5.2.3	Potenzial der Gefährdung gestauten Verkehrs	61
5.2.4	Empirische Staueinfahrten	63
5.2.5	Dynamik von Einfahrten an der Staufront	69
5.3	Dynamik der Geschwindigkeitseinbrüche innerhalb eines gestauten Verkehrsmusters	73
5.3.1	Das Konzept der Stauwand	74
5.3.2	Empirischer Nachweis der Dynamik einer Stauwand	75

6	Gefährdungsklassen von Staufronten	83
6.1	Gefährdungspotenzial von Staufronten	84
6.1.1	Klassifikation des Gefährdungspotenzials in komplexen Verkehrsmustern	84
6.1.2	Verfolgung der Staufront	86
6.1.3	Analyse des Gefährdungspotenzials von Geschwindigkeitseinbrüchen	88
6.2	Trendanalyse des Gefährdungspotenzials einzelner Staufronten	91
6.2.1	Trend des Gefährdungspotenzials empirischer Staufronten	92
6.2.2	Einteilung der Staufront in Gefährdungsklassen	95
6.3	Statistische Auswertung der Gefährdungsklassen	96
6.4	Integration des Gefährdungspotenzials in Stauendewarnsystemen	99
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
7.1	Ergebnisse dieser Arbeit	104
7.2	Ausblick	105
A	Anhang	109
A.1	Empirische Beispiele von Verkehrszusammenbrüchen	109
A.2	Empirische Beispiele der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge	114
A.3	Statistiken zu Staufronten	118
A.3.1	A5 Karlsruhe–Westkreuz Frankfurt	118
A.3.2	M4 Bristol–London	119
A.3.3	Dauer der Gefährdungsklassen	121
	Abbildungsverzeichnis	125
	Tabellenverzeichnis	133
	Eigene Veröffentlichungen	135
	Journalartikel	135
	Konferenzbeiträge	135
	Literaturverzeichnis	137

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

IfV	Institut für Verkehrswesen
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
ABS	Antiblockiersystem
ASDA	Automatische Staudynamikanalyse
CV	Connected Vehicle
ETA	Estimated Time of Arrival
ESP	Elektronisches Stabilisierungsprogramm
FC	Floating Car
FCD	Floating Car Data
FHWA	Federal Highway Administration
FOTO	Forecasting of traffic objects
FPD	Floating Phone Data
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System
LKW	Lastkraftwagen

LSA	Lichtsignalanlage
NGSIM	Next Generation Simulation
PKW	Personenkraftwagen
RDS	Radio Data System
TMC	Traffic Message Channel
TPEG	Transport Protocol Expert Group
TSP	Traffic Service Provider
WSP	Widening Synchronized Pattern
WVZ	Wechselverkehrszeichen
xFCD	extended Floating Car Data

Symbole

F	Freier Verkehr
S	Synchronisierter Verkehr
J	Sich bewegender breiter Stau

1 Einleitung

Informationen über die aktuelle Verkehrslage sind heute gängiger Standard in Navigationsgeräten. Sie dienen nicht nur zur Informationsvermittlung von Stau, Sperrungen und anderen Ereignissen im Straßenverkehr, sondern können auch zur dynamischen Zielführung genutzt werden.

Durch die stetige Integration von Messtechnik in Fahrzeugen, portable Navigationsgeräten und Smartphones ist es mittels der genauen Ortung dieser und Übermittlung des Standorts immer einfacher geworden, Bewegungsprofile und Eigenschaften von Verkehrsverzögerungen (Stau) zu ermitteln. Zunächst war die Erhebung von flächendeckenden Massendaten nur mit stationären Detektoren möglich – neue Technologien in der Sensor- und Kommunikationstechnik ermöglichen nun die Erhebung von Daten, die detaillierter aufgelöst sind. Mit diesen lassen sich wiederum charakteristische Eigenschaften, beispielsweise von mikroskopischen Fahrzeuggeschwindigkeitsprofilen, zeigen. Dadurch ist es möglich geworden, räumlich und zeitlich präzise Aussagen über den real fließenden beziehungsweise stockenden Verkehr zu tätigen. Feine räumlich-zeitliche Eigenschaften von Verkehr können auf diese Weise identifiziert und Charakteristiken, die mittels Simulation von Verkehrsmodellen herausgearbeitet wurden, bestätigt oder widerlegt werden. Die essenziellen Ziele dieser Modelle und das Erfassen der Verkehrsdaten waren und sind weiterhin die Rekonstruktion der Verlustzeiten für einen Echtzeit-Verkehrsdienst, der z. B. dem öffentlichen Rundfunk bereitgestellt wird. Während zu Beginn der Entwicklung und Einführung fest verbauter Navigationsgeräte in Fahrzeugen die Verkehrsinformationen über das Radio verbreitet wurden, erweiterte die Einführung von neuen Protokollen und Kommunikationstechnologien den Umfang und die Genauigkeit der übermittelten Daten. Diese

werden zur Berechnung einer dynamischen Route und zur Ermittlung einer genauen Ankunftszeit (ETA) genutzt. Mittels Erfassung mikroskopischer Verkehrsdaten lassen sich zusätzlich weitere Funktionalitäten umsetzen.

Diese Arbeit zeigt einen weiteren Aspekt der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten mikroskopischer Flottendaten auf. Insbesondere die Untersuchung der Staufronten hinsichtlich der zeitlich-räumlichen Erkennung des Verlaufs und der Schwere der Geschwindigkeitseinbrüche ist für diese Arbeit relevant. Die einzelnen Geschwindigkeitseinbrüche einer Staufront und deren Verlauf über die Zeit lassen das Potenzial einer Gefährdung erkennen. Hierfür wird zunächst ein Verfahren zur Identifikation der Bremsvorgänge vorgestellt. Mittels der Bremsvorgänge in Einzelfahrzeugtrajektorien ist die Schwere des Geschwindigkeitseinbruchs zu berechnen, deren Verlauf an einer Staufront über mehrere Trajektorien das Potenzial der Gefährdung birgt.

1.1 Motivation

Bereits seit Jahrzehnten sind über den Rundfunk Stau- und Unfallmeldungen zu hören. Verkehrsstörungen sind für den Autofahrer zur Normalität geworden. Die Reduzierung von Verkehrsstaus und -störungen tragen unmittelbar zu Verbesserung der Lebensqualität bei. Boltze et al. (2008) identifizierten zur Erreichung des Leitziels des Verkehrsmanagements 4 grundlegende Ziele:

- Befriedigung des Mobilitätsbedürfnisses
- Erhöhung der Verkehrssicherheit
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit
- Schonung von Umwelt und Ressourcen.

Zur Erfüllung dieser Ziele wurden mehrere Maßnahmen definiert zur Beeinflussung der Nachfrage und des Angebots. Zwei konkrete Ziele dabei sind „Reduzierung von Störungen durch Behinderungen des Verkehrsflusses“ und „Vermeidung

von Verkehrsunfällen und Reduzierung der Auswirkungen“. Vornehmlich auf Autobahnen entstehen Verkehrssituationen, die eine potenzielle Gefahr für Fahrer und Fahrzeug darstellen: Unfälle durch Auffahren auf ein Stauende. Die Unfallforschung belegt in einer Studie, dass 95 % aller Auffahrunfälle mit schweren bis tödlichen Verletzungen einhergehen (Unger 2011). Weiterhin wurde in dem Bericht festgestellt, dass nach dem Missachten der Vorfahrt, Auffahrunfälle die zweithäufigste Art des Unfalls darstellen. Insgesamt sind mehr als ein viertel aller Unfälle in Deutschland auf Kollisionen mit stehenden, stoppenden oder vorausfahrenden Fahrzeugen zurückzuführen. Die Häufigkeit von Auffahrunfällen und die unter Umständen schwerwiegenden Folgen für die Insassen, erfordern die Entwicklung neuer Assistenzsysteme im Fahrzeug. Eine weitere Analyse bestätigt die oftmals schwerwiegenden Folgen von Auffahrunfällen an Stauenden und weist nach, dass es bei Auffahrunfällen zudem zu einer überdurchschnittlich hohen Anzahl an Verunglückten kommt (Assenmacher 2008).

Unfallstatistik 2016

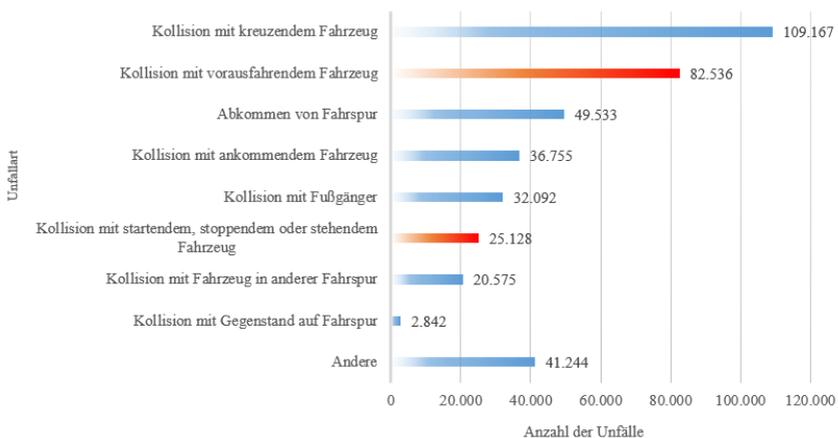


Abbildung 1.1: Unfallstatistik für das Jahr 2016 in Deutschland. Knapp 27 % der offiziell von der Polizei aufgenommenen Unfälle entstehen durch Kollisionen mit stehenden oder vorausfahrenden Fahrzeugen (Statistisches Bundesamt 2017)

Durch moderne Verkehrsmeldesysteme sowie der Erhebung von Echtzeitdaten und den daraus gewonnenen Informationen ist es möglich, die Verkehrslage zu rekonstruieren, um diese in Navigationsgeräten zur dynamischen Routenwahl zu nutzen. Nicht nur die Verkehrslage, sondern auch Ereignisse wie Baustellen und Sperrungen, lassen sich mittels entsprechender Verfahren automatisiert erkennen. Die Verarbeitung und Analyse von dynamischen Verkehrsdaten kann außerdem für Informations- und Warnsysteme genutzt werden, wie z. B. die Stauendewarnung, die vor einem aufkommenden Stau auf der Route warnt. Das Risiko eines Auffahrunfalls an einem Stauende kann auf diese Weise minimiert werden.

Neben dem Missachten der Vorfahrt ist das Auffahren auf den Vordermann (nicht nur bei einem Stauende) die häufigste Ursache für einen Unfall. Als Gründe hierfür identifizierte Unger (2011)

- falsches Einschätzen der eigenen Annäherungsgeschwindigkeit zu Stauenden,
- zu geringe Abstände zum Vordermann und die damit einhergehende oder fehlende Reaktionszeit,
- Ablenkung / Unaufmerksamkeit während der Fahrt.

Die Studie zeigt, dass vor allem unerwartet auftretende Verkehrssituationen, wie beispielsweise ein plötzlich auftretendes Stauende, das z. B. hinter einer Kurve liegt, eine erhöhte Gefahr darstellen. Das statistische Bundesamt belegt diese Zahlen mit einer Auswertung der Unfallursachen durch Fehlverhalten der Fahrzeugführer bei Unfällen mit Personenschaden (Statistisches Bundesamt 2018). Es wurden polizeilich aufgenommene Unfälle mit Personenschaden nach festgestellter Unfallursache ausgewertet. Ungenügender Abstand und nicht angepasste Geschwindigkeit bilden zusammen den mehrheitlichen Anteil von rund einem Viertel aller Unfälle.

Die heute eingesetzten Technologien zur Meldung von Verkehrsstörungen sind in vielen Belangen nicht ausreichend, um den Anforderungen eines Stauendewarnsystems gerecht zu werden. Mit der zeitlichen Verzögerung der Aufnahme

einer Störung bis hin zur eigentlichen Übermittlung zum Fahrzeug und der mangelnden Genauigkeit der Abbildung der realen Verkehrssituation, sind hier nur zwei der vielen Probleme genannt. Darüber hinaus untersuchten Volk and Totzke (2014) in einer Probandenstudie mit 399 Probanden die Nutzerakzeptanz und Kaufbereitschaft von Car-2-X-Technologien im Rahmen von simTD. Ein System zur Stauendewarnung setzte sich als sog. „TOP-Funktion“ mit der höchsten Kaufbereitschaft durch. 78,2 % stimmten der Frage „Ich würde diese Funktion kaufen“ zu.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die in Abschnitt 1.1 genannten Probleme und deren Lösung bei der Anwendung von Stauendewarnsystemen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf Schnellstraßen bilden die Grundlage dieser Arbeit. Die Zielsetzung hierbei ist, die grundlegende Ausarbeitung theoretischer Erkenntnisse über die Einfahrt von Fahrzeugen in ein gestautes Verkehrsmuster. Der verkehrstheoretische Hintergrund in dieser Arbeit ist die Kerner'sche Drei-Phasen-Verkehrstheorie, deren Begriffe und Theorien in Kapitel 3.4 näher erläutert werden. Mithilfe empirischer Flottendaten und aktueller Erkenntnisse über Eigenschaften der Phasenübergänge im Verkehr wird die Staufrentenerkennung hinsichtlich der Geschwindigkeitseinbrüche bei der Stau einfahrt untersucht. Zielsetzung dieser Untersuchung ist mikroskopische Charakteristiken und Eigenschaften von Stauenden in Bezug auf Stauendewarnsystemen herauszuarbeiten und zu verstehen. Dabei wird der Fokus auf die Lösung der Probleme der rechtzeitigen und zuverlässigen Warnung vor einem voraus liegenden Stauende gelegt, um die Verkehrssicherheit somit zentral und unabhängig von Fahrzeugfunktionalitäten zu erhöhen. Zusätzlich wird die zeitlich-räumliche Dynamik einer Staufrent dargelegt und in Bezug zu einem Stauendewarnsystem diskutiert.

Sowohl theoretisch als auch empirisch sind die Kerner'schen Verkehrsphasen bekannt. Jedoch ist die Auswirkung der Phasen auf die zeitlich-räumliche Ausdehnung und Entwicklung hinsichtlich der Geschwindigkeitseinbrüche an der jeweiligen Staufonten unbekannt. Deswegen ist eine zuverlässige empirische Grundlage für die Forschung und Weiterentwicklung von z. B. Systemen zur Gewährleistung der Sicherheit notwendig. Die theoretischen Erkenntnisse und Charakteristiken der lokalen Störungen, sowie die mikroskopischen Eigenschaften von Staufonten bilden die zentralen Ziele und Ergebnisse dieser Arbeit. Dafür wird der neue Begriff einer Gefährdungsklasse eingeführt und detailliert erörtert.

Folgende Leitfragen bestimmen die Untersuchungsmethoden und Verfahren dieser Arbeit:

Leitfrage 1:

Inwiefern können lokale Störungen an einer Engstelle bereits vor einem Verkehrszusammenbruch erkannt werden?

Leitfrage 2:

Wie lassen sich die Geschwindigkeitseinbrüche an einer Staufont erkennen und klassifizieren?

Leitfrage 3:

Wie kann das Gefährdungspotenzial bei Einfahrt in ein gestautes Verkehrsmuster klassifiziert werden?

Leitfrage 4:

Wie verhält sich das Gefährdungspotenzial einzelner Staufonten in Verkehrsnetzen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in drei große Themenbereiche. Zunächst wird der erste Themenbereich durch die Kapitel 2 und 3: Methoden zur Verkehrsdatenerfassung und Stand der Technik abgedeckt. Kapitel 2 stellt bekannte Methoden zur

Erhebung von Floating Car (FC) Daten vor, während Kapitel 3 einen Einblick in die Verkehrssicherheit, die Nutzung von dynamischen Verkehrsdaten in Navigationsgeräten und die Grundfunktionalität von autonomen Fahrzeugfunktionen gibt. Abschließend wird der verkehrstheoretische Hintergrund dieser Arbeit zusammengefasst.

Im zweiten großen Themenbereich werden die empirischen Erkenntnisse dieser Arbeit aufbereitet und die Hauptergebnisse in Kapitel 4 und 5, aufeinander aufbauend, dargestellt. Zum einen wird in der verkehrsphasenbasierten FC-Datenanalyse mikroskopische Eigenschaften von den entsprechenden Verkehrsphasen herausgestellt. Zum anderen wird der Fokus auf die Untersuchung und Darstellung von lokalen Störungen an einer Engstelle gelegt, die vor einem Verkehrszusammenbruch gemessen wurden. Hierbei zeigen die Ergebnisse eindeutige Muster hinsichtlich des Erholens des Verkehrsphasenmusters an der Engstelle, die die bereits bekannten theoretischen Phänomene erstmals empirisch bestätigen. Die Untersuchung der zeitlich-räumlichen Strukturen von Staufronten bauen dahingehend auf den Erkenntnissen des 4. Kapitels auf, dass das Einfahrverhalten an die entstehende Staufront bislang unbekannt war. In diesem Kapitel 5 wird daher zunächst allgemein das Einfahrverhalten von Verkehrsteilnehmern einer großen Flotte analysiert und verallgemeinert dargestellt. Weiterhin wird das Konzept der Stauwand eingeführt, die als Basis zur Klassifikation der Stauereignisse hinsichtlich der Geschwindigkeitseinbrüche dient.

Der dritte Themenbereich beschreibt ausführlich die möglichen zukünftigen Anwendung der theoretischen Ergebnisse. Es wird eine Klassifikation der Geschwindigkeitseinbrüche an einer Staufront vorgestellt und diese anwendungsorientiert diskutiert.

Im abschließenden Kapitel 7 wird die Arbeit zusammengefasst, die Hauptergebnisse prägnant dargestellt und diskutiert. Mit dem Ausblick über weiteren Forschungsbedarf wird diese Arbeit abgeschlossen.

2 Methoden zur Verkehrsdatenerfassung

Die Nutzung und Akzeptanz von derzeitigen Navigationsgeräten ist von den angebotenen Funktionen abhängig, die über die Routenführung hinausgehen. Die Integration und Nutzung der aktuellen Verkehrslage ist heutiger Standard. Die Qualität der dynamischen Routenwahl und weiterer Funktionen, wie u.a. die Berechnung des Reisezeitverlusts hängen maßgeblich davon ab, wie aktuell und präzise die Verkehrslage erfasst und rekonstruiert werden kann. Da vor allem sicherheitskritische Warnungen, wie die Warnung vor einem Stauende, präzise räumlich-zeitliche Aussagen erfordern, ist die Abschätzung der geeigneten Daten und Methoden wichtig. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Methoden und Technologien zur Erhebung von Verkehrsdaten.

2.1 Methoden zur Erhebung von Fahrzeugdaten

Verkehr ist ein komplexes System in Raum und Zeit. Um dieses System besser zu verstehen, wurden verschiedene Verfahren zur Erfassung von Verkehrsdaten entwickelt, die jeweils ihre Vor- und Nachteile haben. Eine wichtige Voraussetzung für viele Dienste im Bereich der Verkehrstelematik ist die stets aktuelle Kenntnis über die Verkehrslage. In diesem Kapitel werden die relevanten Verfahren und Methoden zur Erhebung von Fahrzeugdaten vorgestellt und diskutiert. Weiterhin wird der Stand der Technik zur Verkehrssicherheit beschrieben.

2.1.1 Videobasierte Verkehrserfassung

Die Aufnahme und Verarbeitung von Verkehrsdaten aus der Luft bietet den Vorteil einer Vollerhebung: Im Beobachtungsraum kann *jedes* Fahrzeug und insbesondere auch das Zusammenspiel aller Fahrzeuge, wie z.B. Überholvorgänge oder Spurwechselerhalten, beobachtet und erfasst werden. Erfasst man die Daten von allen Fahrzeugen in einem räumlich-zeitlichen Bereich, spricht man von *Trajektorien-daten*. Bei dieser Erhebungsmethode werden meist Videokameras eingesetzt, die entweder stationär (vgl. Abbildung 2.1) oder mittels Flugkörper einen bestimmten Raum aufnehmen. Wurde früher auf teure, bemannte Helikopter zurückgegriffen (vgl. Treiterer (1967)), werden mittlerweile Drohnen eingesetzt, die mit hochauflösenden Kameras ausgestattet sind und stabil über mehrere Minuten in der Luft schweben können (Kaufmann et al. 2018, DataFromSky 2018).



Abbildung 2.1: Luftbeobachtung einer Schnellstraße mit einer digitalen Videokamera FHWA (2006)

Als einer der Ersten auf dem Gebiet der Verkehrsdatenerhebung hat James Treiterer (1967) ein System zur zeitlich-räumlichen Vollerhebung des Verkehrs durch

Luftbeobachtung vorgestellt. Dabei wurden wichtige Erkenntnisse zu Geschwindigkeit, Verkehrsfluss und -dichte, Beschleunigung und Verzögerung, Spurwechselverhalten und dem allgemeinen Verhalten auf einer zweispurigen Autobahn in Columbus, Ohio gewonnen. Die wichtigsten Erkenntnisse waren der multilinear Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dichte sowie das Hysterese-Phänomen des Verkehrszusammenbruchs. Im Rahmen des Next Generation Simulation (NGSIM) Projekts, gefördert durch die Federal Highway Administration (FHWA), wurden mehrere Verkehrsdatenerhebungen mittels stationärer Kameras durchgeführt (FHWA 2006). Zur Analyse von innerstädtischen synchronisiertem Verkehr vor einer Lichtsignalanlage (LSA), haben Kaufmann et al. mittels Drohnen mikroskopische Daten an einer Kreuzung in Düsseldorf erhoben. Durch überwachtetes Verfolgen wurden Trajektorien der herannahenden Fahrzeuge extrahiert und hinsichtlich der Warteschlangen an der LSA analysiert (Kaufmann et al. 2018). Trajektorien Daten stellen somit die umfangreichsten und detailreichsten Verkehrsinformationen dar und nur die Vollerhebung erlaubt die genaue Bestimmung mancher Kenngrößen wie z. B. die Verkehrsdichte. Jedoch ist festzuhalten, dass die Erfassung und Verarbeitung der Daten sehr aufwendig und teuer ist. Trotz leistungsstärkerer Sensoren, Kameras und Recheneinheiten ist die visuelle Erfassung noch immer fehlerbehaftet und automatisierte Algorithmen zur Erkennung und Verfolgung nicht robust genug (Coifman and Li 2017).

2.1.2 Stationäre Messeinheiten zur lokalen Erfassung

Weit verbreitet sind Detektoren, die in Straßen fest verbaut sind. Diese traditionelle Methode zur Fahrzeugerkennung und Fahrzeugzählung wird meist durch Induktionsschleifen (Spule) realisiert, die in der Fahrbahn eingelassen sind. Je nach Typ des verbauten Detektors können makroskopische Kenngrößen des Verkehrs, wie z. B. der Verkehrsfluss, erfasst werden. Auch das Erkennen des passierenden Fahrzeugs (ob PKW oder LKW) ist mit Induktionsschleifen möglich. Grundlegend funktioniert eine Induktionsschleife mittels eines hochfrequenten Schwingkreises. Durch die Metallteile eines heranfahrenden Fahrzeugs wird das

Magnetfeld und somit die Frequenz des Schwingkreises geändert. Diese Änderung kann mit dem Schleifendetektor ausgewertet werden. Sie erkennen somit lediglich, ob sich ein Fahrzeug über dem Detektor befindet oder nicht. Da sich das Magnetfeld bei Eintritt des Fahrzeugs und bei Austritt ändert, ist es mittels Annahmen über die Fahrzeuglänge möglich, Geschwindigkeiten zu schätzen – dies ist allerdings sehr fehlerbehaftet. Mit doppelschleifigen Detektoren kann jedoch neben der Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde (Verkehrsstärke) auch die Geschwindigkeit einzelner Fahrzeuge erfasst werden, die typischerweise über den Zeitraum von einer Minute gemittelt werden. Dies funktioniert, wie der Name bereits verrät, mit Hilfe von doppelten Schleifen, die in einem festen Abstand zueinander verbaut sind. Durch den Zeitversatz der Erkennung von Fahrzeugen an den jeweiligen Induktionsschleifen lässt sich die Geschwindigkeit berechnen. Neben der Geschwindigkeit lassen sich mit doppelschleifigen Detektoren weitere Kenngrößen wie die Zeitlücken, Abstände und Fahrzeuglänge bestimmen. Dabei sind fest in die Straße verbaute Detektoren am weitesten verbreiteten. Darüber hinaus können weitere Sensoren wie Radaranlagen oder auch Kameras genutzt werden (als mobile Lösung sind auch pneumatische Schläuche im Einsatz üblich), um ein ähnliches System umzusetzen.

2.1.3 Fahrzeuggenerierte Verkehrsdaten

Floating Car (FC) Daten basieren auf einer Positionsbestimmung mittels Global Positioning System (GPS). Beim satellitengestützten Verfahren wird mittels Lateration anhand der Entfernung der Satelliten und der Kenntnis über den Standort der Satelliten die eigene Position im dreidimensionalen Raum bestimmt (Zogg 2009). FC Daten werden direkt im Fahrzeug ermittelt und generiert, und im Anschluss an ein zentrales Verarbeitungssystem weitergeleitet – das Fahrzeug fungiert hierbei als zeitlich-räumlich bewegter Sensor. Durch die Ermittlung von Fahrzeuggeschwindigkeiten in einer ausreichenden Durchdringungsrate kann auf diese Weise für jeden Streckenabschnitt der zugrundeliegende Verkehrszustand über die Zeit abgeschätzt werden. Die ersten Massendaten wurden in experimentellen Feldversuchen erhoben: Einige wenige Fahrzeuge wurden mit entsprechenden globalen

Navigationssatellitensystemen (GNSS) ausgestattet, Positionen an einen Internet-Server geschickt, aggregiert und zur Ermittlung des aktuellen Verkehrszustand verarbeitet (Fastenrath 1997, Huber et al. 1999). Mit diesen Feldversuchen wurde die Machbarkeit eines Ende-zu-Ende Systems, beginnend mit der Datenerhebung bis hin zur Rekonstruktion in Echtzeit, aufgezeigt und mit den zu der Zeit eingesetzten Systemen verglichen. Die erste größere Nutzung von FC Daten außerhalb von experimentellen Feldversuchen wurde mittels Taxiunternehmen in Berlin, Nürnberg und Wien realisiert, bei dem mehrere hundert Fahrzeuge des Taxiunternehmens ihre Positionen in einem minütlichen Intervall an einen Internet-Server schickten (Schäfer et al. 2002). Über die notwendige Durchdringungsrate für eine ausreichend präzise Rekonstruktion des zugrundeliegenden Verkehrszustands kamen Breitenberger et al. (2004) und Kerner et al. (2005) überein: Mit 1,5 % an vernetzten Fahrzeugen des gesamten Verkehrsflusses kann die Verkehrslage ausreichend genau bestimmt werden. Auf Grundlage von FC Daten wurden weitere Verfahren und Methoden zur Bestimmung des Verkehrszustands entwickelt (siehe Kerner et al. (2005), Leduc (2008), De Fabritiis et al. (2008), Van Lint and Hoogendoorn (2010), Yuan et al. (2012), Treiber and Kesting (2013), Remppe et al. (2016)). Darüber hinaus wurden weitere Methoden zur kontinuierlichen Erhebung von Bewegungsdaten evaluiert: Floating Phone Data (FPD) basiert auf der Positionsbestimmung von Mobiltelefonen mittels der Einbuchungsvorgänge in Funkzellen. Als Alternative zu FC Daten ist sie vor allem kostengünstig und bedarf keiner großen initialen Investition, da die Infrastruktur bereits vorhanden ist. Die Positionsbestimmung ist allerdings weitaus ungenauer als auf GPS basierten FC Daten. FPD wurde in verschiedenen Feldversuchen genutzt, um die Qualität dieser Erfassungsmethoden mit derjenigen der Detektoren und FC Daten zu vergleichen (Bar-Gera 2007). Sie wurde außerdem für die Erstellung von Fahrzeugtrajektorien genutzt (Friedrich et al. 2008, Liu et al. 2008, Schlaich et al. 2010).

Neben den Positionsdaten bietet die kontinuierliche Erfassung von Fahrzeugdaten, in Verbindung mit dem stetigen Datenaustausch mit einem zentralen Server, weitere Möglichkeiten zur Abschätzung von verkehrlichen Kenngrößen, wie z. B. der

Dichte. Hierzu wäre die Abschätzung der Entfernung von umliegenden Fahrzeugen zu dem Ego-Fahrzeug mittels Radar-/Lidar-Sensoren oder (Stereo-)Kameras notwendig. Darüber hinaus fallen in einem modernen Fahrzeug eine Vielzahl von weiteren Daten an, dazu zählen z. B. Daten von allgemeinen Steuergeräten oder auch Assistenzsystemen. Analog zur Erfassung von FC Daten werden weitere Funktionalitäten durch die im Fahrzeug befindlichen Sensoren, wie z. B. dem Reagensensor oder Radar-/Lidar-Sensoren, möglich. Diese Erweiterung wird häufig „extended floating car data“ (xFCD) genannt (Huber et al. 1999, Breitenberger et al. 2004).

2.2 Datensatz dieser Arbeit

Für die Analyse der Daten und die Evaluierung der entsprechenden Methoden in dieser Arbeit liegt ein anonymisierter Datensatz einer Flotte vor. Die Daten entstammen einem Produktivsystem für Echtzeitverkehrsinformationen und bilden einen Teil der FC Daten zur Rekonstruktion des Verkehrszustands. Sie werden in dem Produktivsystem an einen Verkehrsdienstleister („traffic server provider“ (TSP)) weitergeleitet, der zusammen mit weiteren Quellen die Verkehrslage rekonstruiert und eine maschinenlesbare Repräsentation des Verkehrszustands zurück an das Fahrzeug sendet. Auf Grundlage der Repräsentation berechnet das Navigationsgerät dynamische Routen. Die Übertragung der Positionsdaten eines Fahrzeugs ist sitzungsbasiert, somit können keine Rückschlüsse auf Fahrzeug oder Fahrer gezogen sowie keine Mobilitätsmuster über einen längeren Zeitraum abgeleitet werden. Die Sitzungsnummer wird nach jeder längeren Pause erneuert. Die Fahrzeuge senden in einem zweiminütigen Intervall ein Datenpaket, bestehend aus 12 oder 24 (je nach verbautem Navigationsgerät ein Intervall von 5 Sekunden oder 10 Sekunden zwischen den Positionen) Positionen an den Server, die aus Längengrad und Breitengrad zusammengesetzt sind. Die Sitzungsnummer wird zusammen mit jedem Datenpaket an den Internetserver übermittelt, um hierdurch Einzelpunkte zu längeren Trajektorien zusammenzusetzen. Diese Trajektorien werden auf einer

Tabelle 2.1: Zeiträume und Tage insgesamt erhoben in den Jahren 2015 bis 2017

Jahr	Zeitraum	Tage
2015	01.10.2015 – 22.12.2015	45
2016	01.04.2016 – 11.04.2016	11
2016	25.10.2016 – 22.11.2016	29
2017	20.04.2017 – 19.05.2017	30

digitalen Karte abgebildet (Auer et al. 2017b) und somit der Bezug zu den Straßen hergestellt. Zur Verbesserung des Produktivsystems sowie zur Auswertung der Daten und Entwicklung von neuen Methoden, werden die Daten über gewisse Zeiträume gespeichert. Ein kontinuierliches Speichern ist nicht vorgesehen. An insgesamt 115 Tagen wurden die FC Daten für den Großteil Europas erhoben (vgl. Tabelle 2.1).

3 Stand der Technik

Das folgende Kapitel erläutert den Begriff Verkehrssicherheit und stellt die momentan im Einsatz befindlichen Systeme und Methoden, die vor Stauenden warnen, vor. Da die Begriffe, *Stauende* und *Stauanfang* in der Literatur nicht eindeutig definiert sind und teilweise als Synonyme verwendet werden, definiert der Begriff *Stauende* in dieser Arbeit einen zeitlich-räumlichen Punkt einer stromaufwärtigen Staufront. Die stromaufwärtige Staufront setzt sich somit aus einzelnen Stauenden zu einem zeitlich-räumlichen Verlauf zusammen. Ein Stauende ist somit das erstmalige Eintreffen eines Fahrzeugs auf gestauten Verkehr zu einem Zeitpunkt an einem Ort.

3.1 Verkehrssicherheit

Als Verkehrssicherheit wird im Allgemeinen in der Verkehrswissenschaft die Abwesenheit von unvermeidbaren Risiken und Gefahren bei einer Ortsveränderung von Personen bezeichnet (Drewes 2009). In der Historie des Automobils und der Verkehrswissenschaft wurden weitreichende Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr getätigt. Dazu zählen aktive und passive Sicherheitsmaßnahmen in der Fahrzeugsicherheit, wie auch Anpassungen in den Teilbereichen Infrastruktur und Straßenverkehrsrecht. Das Ende eines Staus stellt ein potenziell erhöhtes Risiko für die Verkehrsteilnehmer dar (Li et al. 2013): In einem kurzen zeitlichen Intervall muss von einer hohen Geschwindigkeit oftmals fast bis zum Stillstand gebremst werden. Zusätzlich erhöht die räumliche Unschärfe eines Stauendes auf verschiedenen Fahrspuren das Risiko und verleitet

zu vielen Fahrspurwechseln bei der Heranfahrt an das Stauende. Obwohl die allgemeine Unfallstatistik zur Anzahl der Verkehrstoten rückläufige Zahlen angibt (2017 waren es 8 % weniger als noch 2016), stieg die Anzahl der Todesfälle am Stauende von 11 im Jahr 2016 auf 19 Verkehrstote im Jahr 2017 - verursacht durch das Auffahren von LKW am Stauende (MI NRW 2018). Daher hat sich die Bundesregierung bereits der Thematik angenommen und eine Ausrüstungspflicht für LKW mit automatischen Notbremsassistenten vorgeschrieben. Seit November 2015 gilt diese Vorschrift für alle Neufahrzeuge ab einem zulässigen Gesamtgewicht von 8 Tonnen. Auch der ITS Action Plan (KOM 2008) der europäischen Union beschreibt die Wichtigkeit der Erkennung und Meldung von gefährlichen Stauenden an die Fahrer.

Eine konzeptuelle Erläuterung eines Systems, das serverseitig eine Warnung an Verkehrsteilnehmer ausstrahlt, ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Mit einer frühen Erkennung und eventueller zeitlich-räumlicher Vorhersage können heranfahrende Fahrzeuge frühzeitig gewarnt werden. So lässt sich nicht nur eine Notbremsung vermeiden, sondern durch das frühe Ausrollen bei der Annäherung an das Stauende wird zusätzlich der Spritverbrauch reduziert.

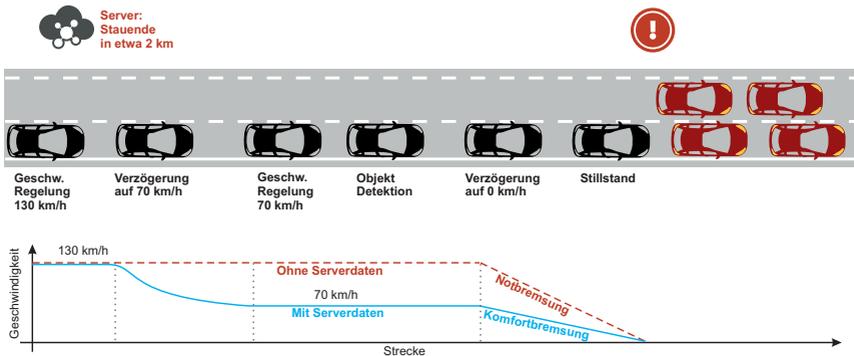


Abbildung 3.1: Konzeptuelle Darstellung eines möglichen Stauendewarnsystems: Durch eine frühe Erkennung und Mitteilung an heranfahrende Fahrzeuge kann eine Notbremsung vermieden werden. Abbildung aus Molzahn et al. (2017b), nach Vorlage aus Bogenberger et al. (2012)

3.1.1 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit

Die Entwicklung von Assistenzsystemen zur Integration in Fahrzeuge nahm über die letzten Jahre auf vielfältige Art und Weise drastisch zu. Ein großer Faktor in der Entwicklung ist die stärkere Rechenleistung, die zu einer immer kleineren und effizienteren Hardware führt. Hinzu kommt spezielle Hardware für den Einsatz von Echtzeitoperationen im maschinellen Lernen, die zusammen mit effizienten Algorithmen in der Objekterkennung, Sensorfusion und Umfeldmodellierung zu den Funktionalitäten der heutigen Fahrerassistenzsysteme führen. Waren die ersten Systeme vornehmlich zur Unterstützung der eigentlichen Fahrfunktionalität konzipiert (Schwerpunkt: Antiblockiersystem (ABS), elektronisches Stabilisierungsprogramm (ESP)), werden heutzutage weitaus spezifischere und komplexere Systeme entwickelt und eingebaut, wie z. B.

- adaptiver Abstandstempomat
- Objekt- bzw. Fußgängererkennung
- vorausschauende Notbremsassistenten
- Verkehrszeichenerkennung (z. B. für Geschwindigkeitsbegrenzungen bzw.-aufhebungen oder Baustellenschilder)
- Umfeldmodellierung
- Erkennung von Objekten im toten Winkel.

Eine umfassende Darstellung zeigt Abbildung 3.2 mit verschiedenen Sensortypen und aktuellen Systemen, die mithilfe der Sensoren automatisierte Fahrfunktionen ermöglichen. Mit der serienmäßigen Ausstattung von Assistenzsystemen ließen sich vermutlich viele schwere Unfälle vermeiden und Schäden verringern.

Die aktuell eingesetzten Radar-, LIDAR- und Kamera-Systeme haben jedoch systembedingte Einschränkungen. Long-Range-Radar-Systeme sind nach heutigem Standard in der Lage bis zu 200 Meter abzudecken. Für eine Notbremsung ist dies

werden potenziell alle ankommenden Verkehrsteilnehmer vor dem Stau und somit dem Stauende optisch gewarnt. Jedoch sind nur hochbelastete Straßenabschnitte mit stationären Warnsystemen ausgestattet. Zudem sind diese sehr kostenintensiv und eignen sich daher nicht für die Umrüstung des vollständigen Schnellstraßennetzes in Deutschland. Zusätzlich werden stationäre WVZ als vorbeugende Maßnahme meist an Orten positioniert, die sich als überdurchschnittlich gefährlich herausgestellt haben, beispielsweise als Reaktion auf kumulativ auftretende Unfälle – dabei sind gerade die Autobahnabschnitte gefährdet, in denen kein WVZ aufgestellt ist und die Fahrer dort folglich keine Warnung erhalten können. Nowakowski et al. (2012) zeigten in einem Feldversuch, bei dem im Großraum San Francisco ein Echtzeit Stauendewarnsystem implementiert wurde, einen positiven Einfluss auf 24 Testteilnehmer. Dabei wurde die Aufmerksamkeit beim Heranfahren an das Stauende erhöht und der Bremsvorgang konnte über einen längeren Zeitraum und über längere Distanz eingeleitet werden, wodurch das unfallanfällige und riskante abrupte Abbremsen entschärft wurde. Da Baustellen ein zusätzliches Risiko bedeuten, wurden Systeme und Verfahren entwickelt, um speziell in diesen Umgebungen ankommende Fahrer zu warnen (Mekker et al. 2018). Getestet wurde das Verfahren in sieben Baustellen mit dreizehn Fahrern. Ein weiterer Feldversuch wurde von Ullman et al. (2016) durchgeführt, der auf mobilen Radarsensoren basierte. Um mehr als nur eine ausgewählte Menge an Testfahrern zu erreichen, wurden Geschwindigkeitsmessungen auf der I-35 in Texas durchgeführt, die mit mehreren mobilen WVZ verbunden sind. Ankommende Fahrzeuge wurden mittels der WVZ vor dem Stauende gewarnt, was zu weniger Kollisionen und Unfällen führte. Durch das Aufstellen mobiler Radarsensoren und WVZ sind die initialen Kosten und der Aufwand des Aufbaus hoch. In Verbindung mit FC Daten haben Dinh et al. einen „practice-ready“ Algorithmus entwickelt. Dabei wurden FC Daten auf französischen Schnellstraßen untersucht und ein Verfahren entwickelt, Stauenden im Live-Betrieb zu erkennen (Dinh et al. 2014).

3.2 Nutzung von dynamischen Verkehrsdaten in Navigationsgeräten

Über die Verkehrsdurchsage im Rundfunk wird allgemein auf gestaute Streckenabschnitte hingewiesen. Dabei werden gefährliche Stauenden gesondert erwähnt, z. B. wenn diese hinter einer Kurve liegen. Zusätzlich wurden Verkehrsmeldungen über Radio Data System - Traffic Message Channel (RDS-TMC) an Navigationssysteme übertragen (Davies et al. 1989). Die Technologie basiert auf der Datenübertragung mit einem gesonderten Radiosender, bei dem Staus, Verlustzeiten und weitere vordefinierte Event-Codes mittels einer sog. TMC-Tabelle verortet sind. Die TMC-Tabelle besteht aus einer verketteten Liste aus Positionen, die die wichtigsten Straßen und ihre verschiedenen Knoten abdecken. Mit dem Aufkommen von Internet-basierten Diensten war es nicht mehr notwendig, ein ressourcensparendes Verfahren zu nutzen, bei dem die Anzahl der Meldungen und die Abdeckung des Straßennetzes limitiert ist. Somit wurde von der Transport Protocol Expert Group (TPEG) ein neues Verfahren und Protokoll entwickelt, das unabhängig vom Übertragungskanal funktioniert und sowohl über Radio als auch über das mobile Internet übertragen werden kann (Bures 2009). Das TPEG Protokoll ermöglicht es nun, umfangreichere und detailliertere Informationen an ein Navigationsgerät zu übertragen. Erste Automobilhersteller haben seit 2016 eine aktive Warnung bei Stauenden im Seriensystem eingeführt, die zusammen mit den Echtzeit-Stauinformationen über das TPEG Protokoll an das Fahrzeug geschickt werden.

3.3 Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallrisiko

Viele Faktoren spielen eine Rolle bei der Bestimmung der Schwere einer Verletzung beim Unfall im Straßenverkehr. Ausschlaggebende Faktoren sind sowohl Eigenschaften wie Alter, Geschlecht, Erfahrung, Anlegen des Sicherheitsgurtes, etc. der beteiligten Verkehrsteilnehmer, als auch Fahrzeugbezogene Faktoren wie

z.B. Größe, Form oder Art des Aufpralls. Des Weiteren sind die entfernteren Umstände des Unfalls, wie z.B. Eigenschaften des getroffenen Objektes oder die medizinische Erstversorgung wichtige Indikatoren für den Verletzungsgrad. Der wichtigste und damit am häufigsten untersuchte Faktor ist die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Aufprallgeschwindigkeit bei einem Unfall mit mehreren Fahrzeugen (Richards 2010). Je höher die Aufprallgeschwindigkeit, desto höher ist die freigelassene Energie. Teile der Energie werden vom Körper absorbiert, wobei der durchschnittliche menschliche Körper nur einen kleinen Teil der Energie ohne Schäden tolerieren kann. Wird diese Hürde überwunden, sind schwere Verletzungen unvermeidbar – daraus resultiert, dass eine höhere Aufprallgeschwindigkeit zu einem höheren Verletzungsgrad führt (SafetyNet 2009).

3.3.1 Identifikation und Evaluierung von Gefahrensituationen im Straßenverkehr

Um das Unfallrisiko und potentielle Gefahrensituation zu evaluieren, wurden vielfältige Studien und Untersuchungen durchgeführt. Diese reichen von Simulationen, über Kundenstudien im Fahrsimulator bis hin zu Untersuchungen und Analysen mit empirischen Verkehrsdaten. Dabei werden potentielle Gefahrensituationen als Ereignisse definiert, bei denen ein Fahrer gezwungen ist, Ausweichmanöver zu unternehmen, um auf das ungewöhnliche Verhalten anderer Fahrzeuge oder auf Manöver zur Vermeidung von Kollisionen zu reagieren (Smith et al. 2002). Die Studien untersuchten dabei vornehmlich die TTC (time to collision). TTC ist definiert als die Zeitdifferenz zwischen einem führenden Fahrzeug und einem nachfolgenden Fahrzeug, bei der es zu einer Kollision führen kann, wenn diese Fahrzeuge ihre aktuelle Geschwindigkeit ohne Ausweichmanöver beibehalten. Die Anwendung von Algorithmen zur Identifikation von Gefahrensituation beruhte meist auf die Auswertung von Videodatenbanken von Verkehrsaufnahmen wie NGSIM. Dabei stellte sich heraus, dass im Gegensatz zu einem festen Wert der TTC (wie bspw. 1.5 Sekunden von Van Der Horst (1990) vorgeschlagen), die persönlichen Präferenzen und Fahrstile der Fahrer einbezogen werden müssten (Talebpour et al. 2014).

3.3.2 Gefährdungspotenzial und Unfallmetriken

Die Metrik zur Bestimmung der Unfallschwere ist definiert als die Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit über die Dauer des Unfalls (Δ_v). Diese Schweregradmessung ist die am weitesten verbreitete und wird typischerweise anhand von gemessenen Fahrzeugschäden nach einem Unfall geschätzt. Hierfür wird die Messung der Geschwindigkeit mittels sogenannten Event Data Recorders (EDRs) vor der Auslösung des Airbags aufgezeichnet und extrahiert (Gabler et al. 2003). Das Δ_v wird als Grundlage zur Abschätzung der kinematischen Auswirkungen eines Unfalls auf die Insassen genutzt, da Daten über die eigentlichen Auswirkungen in diesem Maße nicht vorhanden sind. Die Daten des EDRs werden von der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) in Zusammenarbeit mit dem Automobilhersteller GM in einer Datenbank gespeichert und zur Verfügung gestellt. Die Datenbank enthält über 1700 aufgenommene Fälle. Dabei besteht ein Fall aus der Aufnahme von Daten kurz vor dem Aufprall, während des Aufpralls und kurz nach dem Aufprall. Die Daten bestehen aus unfallspezifischen Parametern wie die Geschwindigkeit über die Zeit (in 10ms aufgelöst), Zeitpunkt des Auslösens vom Airbag und dem Status des Sicherheitsgurts. Zusätzlich werden 5 Sekunden vor dem Aufprall die Fahrzeuggeschwindigkeit, Motordrehzahl, Motor-drosselklappenstellung und Bremsstatus (Gabauer and Gabler 2006) erfasst. In der Literatur werden dabei einige empirische Untersuchungen von Unfallstatistiken vorgestellt. Richards (2010) untersuchte sowohl den Zusammenhang zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Risiko einer Verletzung beim Aufprall eines Fahrzeugs mit einem Fußgänger als auch das Risiko und die Auswirkungen eines Aufpralls zwei Fahrzeuge mittels Δ_v . Der Autor differenziert zwischen drei Stufen der Unfallschwere: geringfügig (slight), schwerwiegend (serious) und tödlich (fatal), die folgendermaßen beschrieben werden:

- geringfügig: leichte, nicht schwerwiegende Verstauchungen, Prellungen oder Schnittwunden
- schwerwiegend: Frakturen, Gehirnerschütterungen, innere Verletzungen, Quetschungen, schwere Schnitte und Schnittwunden, schwere Schocks, die

eine medizinische Behandlung erfordern, oder jeder Unfall, der als stationärer Patient im Krankenhaus festgehalten wurde

- tödlich: Tod innerhalb von 30 Tagen nach dem Unfall

Abbildung 3.3 zeigt das kumulative Δ_v für die Fahrzeuge bei Frontalaufprall, geteilt durch die Verletzungsschwere der Autofahrer. Diese Stichprobe enthält Fahrer, die einen Sicherheitsgurt angelegt hatten und einen einzigen Frontalaufprall erhielten. Dabei wurden Fahrzeuge, die sich überschlugen, ausgeschlossen. Zusammenfassend lässt sich aus dieser Abbildung ableiten, dass bei einer Aufprallgeschwindigkeit von z.B. 55 km/h (34mph), die Wahrscheinlichkeit einer tödlichen Verletzung bei 50 % liegt. Bei der gleichen Aufprallgeschwindigkeit können schwerwiegende Verletzungen zu 90 % eintreten und geringfügige Verletzungen treten mit 100 %iger Wahrscheinlichkeit auf. Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Definition des Gefährdungspotenzials und die Bestimmung der Schwellwerte (Gefährdungsklassen) in dieser Arbeit. Da die Aufprallgeschwindigkeit mit dem in dieser Arbeit verwendeten Datensatz nicht bestimmt werden kann, werden aus dem Δ_v die Schwellwerte für die Geschwindigkeitseinbrüche abgeleitet. Hierfür wird der Bereich für schwerwiegende und tödliche Unfälle herangezogen: Für die jeweiligen Kurven wird das 90 % Perzentil bestimmt und als Schwellwerte für die Geschwindigkeitseinbrüche definiert. Dies bedeutet bei den schwerwiegenden Unfällen ca. 33mph (≈ 52 km/h) und respektive bei den tödlichen Unfällen ca. 55mph (≈ 89 km/h).

3.4 Verkehrstheoretischer Hintergrund

In der Verkehrstheorie wird u.a. zwischen zwei empirischen Phänomenen auf Schnellstraßen unterschieden (Gartner et al. 2001, C.Gazis 2002, Elefteriadou 2014, Kerner 2004, 2009):

- Verkehrszusammenbruch an einer Engstelle: Übergänge von freiem Verkehr zu gestautem Verkehr

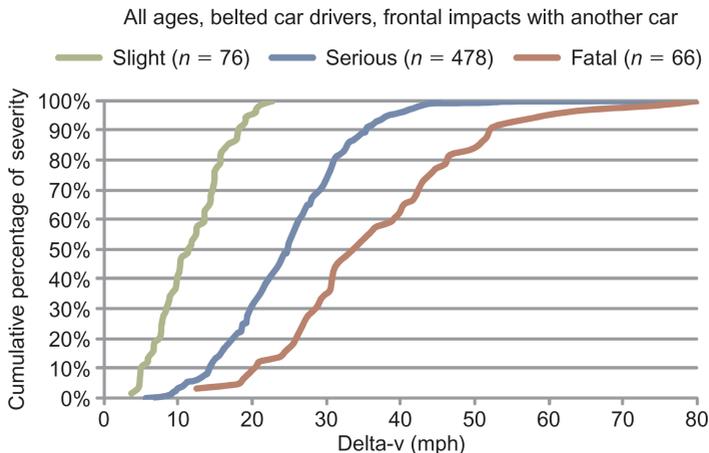


Abbildung 3.3: Kumulative Geschwindigkeitskurven für Autofahrer in Fahrzeugen mit Frontalaufprall. Abbildung übernommen aus Richards (2010)

- Entstehung von sich bewegenden breiten Staus in gestautem Verkehr nach einem Verkehrszusammenbruch.

Insbesondere wurden sich bewegende breite Staus (in der Literatur oft auch Stauwellen oder „freeway traffic oscillations“ genannt) in klassischen Studien empirisch von Edie and Foote (1958), Treiterer (1975) und Koshi et al. (1983) untersucht. Diese Phänomene des Verkehrsflusses können im Kontext der klassischen Verkehrsflussinstabilität von Herman et al. (1959) und Gazis et al. (1961) erklärt werden, die zu einer Entstehung einer Welle mit lokalem Geschwindigkeitsanstieg im freien Verkehr führt (vgl. Abbildung 3.4 (a)). Empirische charakteristische Eigenschaften der Ausbreitung von sich bewegenden breiten Staus wurden in einigen ITS-Anwendungen berücksichtigt. Insbesondere wurden die charakteristischen Eigenschaften für die Entwicklung und den Einsatz der ASDA/FOTO Methode (ASDA: Automatische Staudynamikanalyse, FOTO: Forecasting of traffic objects), bei der gestaute Verkehrsmuster erkannt, verfolgt und prognostiziert werden (Kerner et al. 2004), genutzt. Neue mikroskopische Eigenschaften der

klassischen Verkehrsflussinstabilität wurden in vielen Arbeiten zu „freeway traffic oscillations“ vorgestellt (Zheng et al. 2011, Jiang et al. 2015, Tian et al. 2016, Chen et al. 2012b,a, Laval et al. 2014, Yang and Monterola 2016).

Verkehrsteilnehmer erwarten mit der Anwendung von intelligenten Transportsystemen, dass freier Verkehr an einer Engstelle bestehen bleibt. Durch einen Verkehrszusammenbruch, der in ein gestautes Verkehrsmuster übergeht, steigt die Reisezeit und der Spritverbrauch gegenüber dem freiem Verkehr drastisch an. In den letzten Dekaden wurden signifikante Fortschritte in der Entwicklung und Analyse von empirischen Eigenschaften eines Verkehrszusammenbruchs und der Kapazität von Schnellstraßen vorgestellt, insbesondere von Banks (1990), Hall and Agyemang-Duah (1991), Elefteriadou et al. (1995), Persaud et al. (1998), Brilon et al. (2005), sowie weitere Referenzen in Gartner et al. (2001), Elefteriadou (2014) und Elefteriadou et al. (2014).

Ende der 90er Jahre veröffentlichte Kerner in zahlreichen Studien, dass ein Verkehrszusammenbruch an einer Engstelle empirisch betrachtet einen Phasenübergang von freiem Verkehr zu synchronisiertem Verkehr darstellt, der in einem *metastabilen* Zustand des freien Verkehrs vorkommt. Die Metastabilität bedeutet, dass kleine Geschwindigkeitseinbrüche oder -beeinflussungen an einer Engstelle nicht zwangsläufig zu einem Verkehrszusammenbruch führen müssen, sondern mit der Zeit verschwinden können, ohne einen Phasenübergang auszulösen: Der Verkehr erholt sich wieder. Bei größeren Einflüssen jedoch findet ein Verkehrszusammenbruch statt (Kerner 2004, 2009, 2015a, 2017).

3.4.1 Empirische Definition der Verkehrsphasen

Zur Erklärung und Darstellung der probabilistischen Natur eines Verkehrszusammenbruchs wurde die Drei-Phasen Verkehrstheorie von Kerner (2004, 2009) entwickelt. Die Theorie beschreibt Verkehr in drei Phasen: Freier Verkehr (F), synchronisierter Verkehr (S) und sich bewegende breite Staus (J [Jam]).

Freier Verkehr beschreibt den Zustand, den sich jeder Verkehrsteilnehmer wünscht: Die Geschwindigkeit kann im Rahmen der gesetzlich erlaubten Höchstgeschwindigkeit frei gewählt werden und Autofahrer können auf einer mehrspurigen Schnellstraße überholen. Die empirischen Daten zeigen eine positive Korrelation zwischen Verkehrsfluss und -dichte bis zur maximalen Kapazität der Straße (vgl. Abbildung A.5).

Die empirischen Eigenschaften der **synchronisierten Verkehrsphase** sind nach Kerner (2004) folgende: Die stromabwärtige Staufront des synchronisierten Verkehrs ist meist an einer Engstelle fixiert, wohingegen sich die stromaufwärtige Front entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet. Die Autofahrer können nicht frei ihre Geschwindigkeit wählen, sondern passen sich an die Geschwindigkeiten auf den anderen Fahrspuren an und nähern sich somit an. An der stromabwärtigen Staufront des synchronisierten Verkehrs können die Autofahrer in den freien Verkehr beschleunigen. Innerhalb des synchronisierten Verkehrs ist ein kontinuierlicher Verkehrsfluss ohne signifikanten Unterbrechungen zu erwarten.

Im Gegensatz zum synchronisierten Verkehr breiten sich die stromabwärtige und -aufwärtige Staufront des **sich bewegenden breiten Stau** entgegen der Fahrtrichtung aus. Sich bewegende breite Staus sind dabei auch nicht anfällig gegenüber Engstellen, sondern breiten sich unverändert aus. Meist kommt es in dieser Verkehrsphase zu erheblichen Beeinträchtigungen der Fahrt bis zu einem kompletten Halt.

3.4.2 Verkehrsmuster der Drei-Phasen Verkehrstheorie

In der Drei-Phasen Verkehrstheorie wird ein Verkehrsmuster als eine zeitlich-räumliche Ausdehnung mindestens einer der drei Verkehrsphasen (freier Verkehr, synchronisierter Verkehr, sich bewegende breite Staus) genannt. Das Verkehrsmuster ist relevant, wenn es sich über mehrere Kilometer Länge ausdehnt. Der Begriff Verkehrsmuster wird wie folgt genutzt: Langjährige Untersuchungen mit empirischer Daten von stationären Detektoren und/oder vernetzten Fahrzeugen

zeigen, dass Verkehrsmuster wiederkehrende charakteristische Eigenschaften aufweisen. Die Untersuchung wiederkehrender Verkehrsmuster ist daher nützlich für die Verkehrsprognose von zeitlich-räumlichen Ausdehnung auf den jeweiligen Streckenabschnitten.

3.4.2.1 Gestautes Verkehrsmuster

Ein gestautes Verkehrsmuster ist ein Verkehrsmuster, das neben der freien Verkehrsphase mindestens einer der zwei Verkehrsphasen „synchronisierter Verkehr“ und/oder „sich bewogender breiter Stau“ aufweist.

3.4.2.2 Verkehrsmuster von freiem Verkehr

Ein Verkehrsmuster von freiem Verkehr ist ein Verkehrsmuster, das ausschließlich aus der Verkehrsphase „freier Verkehr“ besteht. Ein Beispiel für Verkehrsmuster von freiem Verkehr ist die zeitlich-räumliche Entwicklung von Wellen in freiem Verkehr des heterogenen Verkehrs untersucht von Kerner et al. (2015).

3.4.3 Empirischer Verkehrszusammenbruch

Für eine zuverlässige Modellierung und Optimierung von Verkehrsflussmodellen in Netzen, sollten diese die empirischen Eigenschaften eines Verkehrszusammenbruchs abbilden. In Kerner (2013) werden dafür folgende Gründe aufgeführt:

1. Die Kapazität im freien Verkehr ist begrenzt durch den Verkehrszusammenbruch; somit ist die Kapazität abhängig von den empirischen Eigenschaften des Verkehrszusammenbruchs.
2. Die Zuverlässigkeit von Steuer- und Optimierungsmethoden in Verkehrsnetzen hängt maßgeblich davon ab, ob ein Verkehrszusammenbruch verhindert werden kann.

3. Die Wirkung von dynamischen Wechselwegweisern hängt maßgeblich davon ab, ob die Verteilung Verkehrsstaus in einem Netz verringern kann.

Über viele Jahre hinweg wurden die Eigenschaften eines Verkehrszusammenbruchs (wie z. B. die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs) in Untersuchungen mit empirischen Daten herausgearbeitet. In Kerner (2013) werden folgende Eigenschaften eines Verkehrszusammenbruchs an einer Engstelle zusammengefasst:

1. Ein Verkehrszusammenbruch an einer Engstelle ist ein Phasenübergang von freiem Verkehr zu gestautem Verkehr, bei dem die stromabwärtige Front an der Engstelle fixiert ist. Wie bereits in Abschnitt 3.4.1 beschrieben, wird diese Phase **synchronisierter Verkehr** genannt. An der stromabwärtigen Front des synchronisierten Verkehrs beschleunigen die Fahrzeuge zum freien Verkehr stromabwärts der Engstelle (vgl. hierfür die empirischen Beispiele eines Verkehrszusammenbruchs im Anhang A.3).
2. An einer Engstelle kann der Verkehr spontan (Abbildungen A.1 und A.2) oder induziert (Abbildungen A.3 und A.4) zusammenbrechen.
3. Die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs ist eine steigende Funktion des Verkehrsflusses.
4. Das bekannte Hysterese-Phänomen wird mit einem Verkehrszusammenbruch assoziiert: Wenn der Verkehr an einem maximalen Punkt des Verkehrsflusses mit der darauffolgenden Bildung des gestauten Verkehrs zusammenbricht, findet ein Phasenübergang zurück zu freiem Verkehr bei geringeren Flussraten statt (vgl. Abbildung A.5).

Ein spontaner Verkehrszusammenbruch findet statt, wenn davor stromauf- und stromabwärts der Engstelle freier Verkehr herrscht; Abbildungen A.1 und A.2. In dem empirischen Beispiel in Abbildung A.2 zeigt die Flussrate eine hohe Fluktuation, wobei die mittlere Flussrate über die Zeit ansteigt (vgl. Abbildung A.2 (b-d)). Folglich sinkt die mittlere Geschwindigkeit (vgl. Abbildung A.2 (f-h)). Zu einem Zeitintervall steigt die Flussrate deutlich an, so dass ein Impuls einer hohen

Flussrate (bei dem die mittlere Geschwindigkeit im freien Verkehr verringert ist) stromabwärts propagiert. Wenn dieser Impuls erhöhter Flussrate auf die Engstelle trifft, bricht der Verkehr zusammen. Das resultierende Verkehrsmuster zeigt die Eigenschaften des synchronisierten Verkehrs.

Im Gegensatz zu dem spontanen, ist ein induzierter Zusammenbruch von einem propagierenden gestauten Verkehrsmuster ausgelöst (vgl. Abbildungen A.3 und A.4).

3.4.4 $S \rightarrow F$ Instabilität

In der Drei-Phasen-Verkehrstheorie wird zwischen zwei Arten der Verkehrsflussinstabilität unterschieden:

1. Die Verkehrsflussinstabilität des synchronisierten Verkehrs hinsichtlich der Entstehung von sich bewegenden breiten Staus (genannt $S \rightarrow J$ Instabilität). Diese gehört zu der klassischen Verkehrsflussinstabilität von Herman et al. (1959) und Gazis et al. (1961).
2. Die Verkehrsflussinstabilität des synchronisierten Verkehrs hinsichtlich der Entstehung von freiem Verkehr (genannt $S \rightarrow F$ Instabilität), die in der Drei-Phasen Verkehrstheorie eingeführt wurde.

Der Unterschied zwischen den beiden Instabilitäten ist wie folgt: Die $S \rightarrow J$ Instabilität ist eine wachsende Welle von lokaler Geschwindigkeitsreduktion an einer Engstelle im synchronisierten Verkehr, die schlussendlich zur Entstehung von sich bewegenden breiten Staus führt (vgl. Abbildung 3.4 (a)). Im Gegensatz dazu ist die $S \rightarrow F$ Instabilität eine wachsende Welle von lokaler Geschwindigkeitszunahme an einer Engstelle in synchronisiertem Verkehr, die zu freiem Verkehr führt (vgl. Abbildung 3.4 (b, c)).

In Übereinstimmung mit der Drei-Phasen Verkehrstheorie leitet die $S \rightarrow F$ Instabilität an einer Engstelle einen Verkehrszusammenbruch ein. Mit der Theorie der

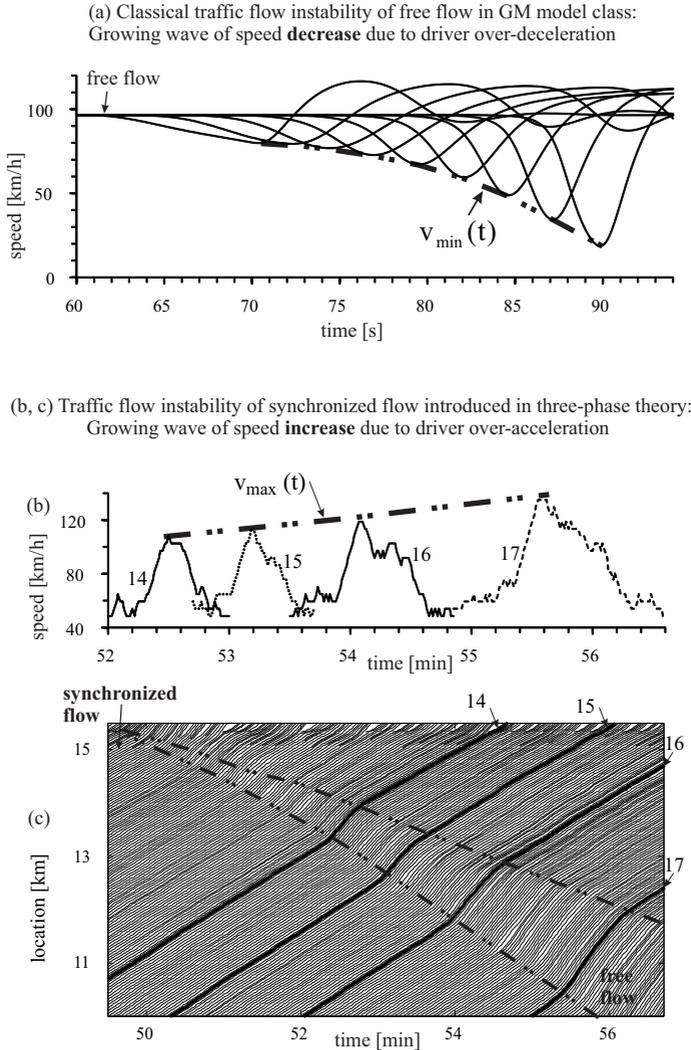


Abbildung 3.4: (a) Verkehrssimulationen der klassischen Verkehrsflussinstabilität Herman et al. (1959), Gazis et al. (1961) in freiem Verkehr mit einem Verkehrsflussmodell der General Motors (GM) Klasse; (b, c) S→F Instabilität in synchronisiertem Verkehr der Drei-Phasen Verkehrstheorie. Abbildung übernommen aus Kerner (2015b)

$S \rightarrow F$ Instabilität wurde außerdem aufgezeigt, dass vor einem Verkehrszusammenbruch eine Reihe von $F \rightarrow S$ Übergängen stattfinden, auf die jeweils ein $S \rightarrow F$ Übergang folgt, ausgelöst von der $S \rightarrow F$ Instabilität. Die Sequenz von $F \rightarrow S$ und $S \rightarrow F$ Übergängen werden $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge genannt (Kerner 2015b). Mittels Simulationen des Verkehrsflusses wurden zufällige zeitliche Verzögerungen vor einem Verkehrszusammenbruch gezeigt (vgl. $T_1^{(B)}$ in Abbildung 3.5 (a)). Diese zufällige Verzögerung des Verkehrszusammenbruchs geht einher mit den Effekten der Keimbildung der $S \rightarrow F$ Instabilität, die in den Simulationen beobachtet werden konnten (vgl. Abbildung 3.5). Insbesondere wurde die Auflösung eines WSPs¹ zu einem zufälligen Zeitpunkt durch die $S \rightarrow F$ Instabilität beobachtet. Nach einem zufälligen $F \rightarrow S$ Übergang, der nicht von der $S \rightarrow F$ Instabilität beeinträchtigt wird, findet der Verkehrszusammenbruch statt, der zur Entwicklung von gestautem Verkehr führt. Zusätzlich wurden die mikroskopischen Eigenschaften der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge aufgezeigt: Während des Zeitintervalls $T_1^{(B)}$ (vgl. Abbildung 3.5) findet ein kontinuierlicher räumlich-zeitlicher Kampf zwischen dem „speed-adaption“ Effekt, der einen $F \rightarrow S$ Übergang bestärkt und dem „over acceleration“ Effekt, der die $S \rightarrow F$ Instabilität bestärkt, statt. Diese Effekte sorgen für einen dauerhaften durchschnittlichen Geschwindigkeitseinbruch in der Nähe der Engstelle. In Abbildung 3.5 (b) und (d) sind die Regionen mit $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen mit strich-punktierten Linien eingegrenzt, die den sich auflösenden synchronisierten Verkehr zeigen. Dazu sind in Abbildung 3.5 (e) und (f) Einzeltrajektorien im Geschwindigkeitsprofil mit den Indikatoren $F \rightarrow S$ und $S \rightarrow F$ aufgezeigt, an denen der Phasenübergang stattfand.

¹ WSP („widening synchronized flow pattern“): Häufig pflanzt sich die stromaufwärtige Front eines synchronisierten Verkehrsmusters stromaufwärts fort. Wenn sich nur die stromaufwärtige Front stromaufwärts ausbreitet, wird das zugehörige synchronisierte Verkehrsmuster als WSP bezeichnet. Die stromabwärts gerichtete Front bleibt an der Engstelle und die Breite des synchronisierte Verkehrsmusters nimmt zu.

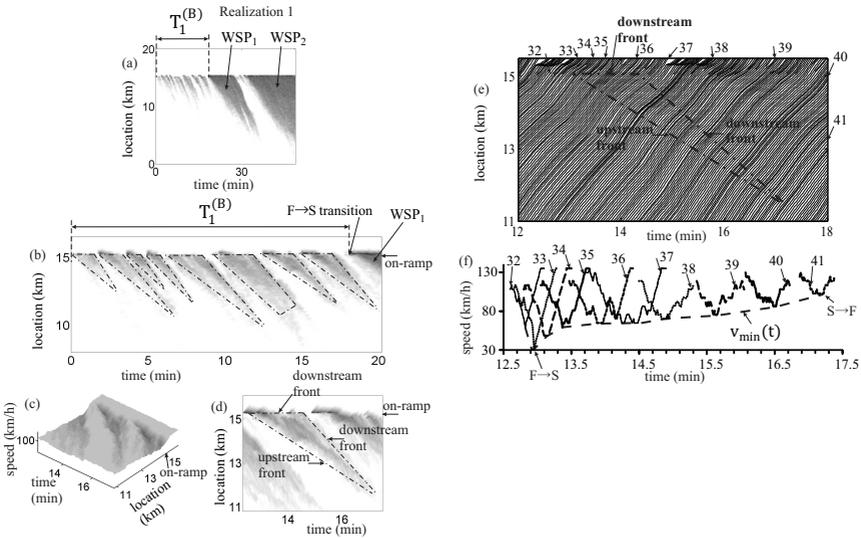


Abbildung 3.5: Verkehrsflussimulation der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge mit einer dauerhaften Geschwindigkeitsstörung an der Engstelle. (a) Eine der Simulationsrealisationen; WSP: „wide-ranging synchronized flow pattern“. (b) Ein vergrößerter Ausschnitt von WSP_1 aus (a); Die strich-punktierten Linien zeigen Regionen von sich auflösendem synchronisiertem Verkehr aufgrund von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen. (c, d) Ein vergrößerter Ausschnitt aus (b), der eine Region des sich auflösenden synchronisierten Verkehrs zeigt. (e) Fahrzeugtrajektorien zu (c, d). (f) Trajektorien zu (c, d) als Geschwindigkeitsprofil. Pfeile $F \rightarrow S$ und $S \rightarrow F$ zeigen jeweils die entsprechenden Phasenübergänge. Adaptiert aus Kerner (2015b)

3.5 Defizite vorhandener Systeme und Bedarf neuer Lösungen

Heutige Systeme und Verfahren bieten eine räumlich-zeitliche Warnung vor einem Stauende. Diese unterscheiden sich durch die Art und die Genauigkeit der Erfassung und der Verarbeitung der Daten. Stationäre Wechselverkehrszeichen werden durch Verkehrsmanagementzentralen aktiviert und gesteuert, sind durch ihre Immobilität in der Genauigkeit und Abdeckung der Wechselverkehrszeichen eingeschränkt. Die durch den Rundfunk ausgestrahlten Stauinformationen und

Warnungen werden von staatlicher Seite bereitgestellt, sind aber durch die eingeschränkte Bandbreite des Übertragungskanals in der Anzahl der Meldungen limitiert. Zudem ist es aufgrund des fehlenden Rückkanals im Rundfunk nicht möglich, auf den Einzelnen zugeschnittene Verkehrsinformationen bereitzustellen. Privatunternehmen² (Traffic Service Provider: TSP) rekonstruieren die reale Verkehrslage mittels FC Daten, bestimmen algorithmisch die Verkehrslage und leiten daraus Warnungen vor einem Stauende ab. Nutzer der Applikationen und Services dieser Unternehmen stellen ihren anonymisierten Standort kontinuierlich zur Verfügung und erhalten daraufhin meist kostenlos den (verbesserten) Service. Aufgrund der steigenden Zahl der Nutzer dieser Applikationen und Services können mittlerweile viele TSPs auf eine große Menge an Rohdaten zurückgreifen. Diese nutzen sie schon heute für eine zuverlässige und exakte Bestimmung des räumlich-zeitlichen Verlaufs des Stauendes. Eine flächendeckende Analyse der Staufronten und der Geschwindigkeitseinbrüche ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht durchgeführt worden. Bestehende Forschungsergebnisse zielen auf die Analyse von Stauenden vor einer bestimmten Situation wie z. B. einer Baustelle oder Engstelle. Mithilfe lokal angebrachter Sensorik wird diese eine Situation meist mit einer festen Anzahl von Probanden analysiert.

Details eines Verkehrszusammenbruchs und einer möglichen Erholung des Verkehrs bereits vor der Entstehung gefährlicher Staufronten, konnten wegen der nicht ausreichenden Verfügbarkeit von Flottendaten noch nicht im Detail untersucht werden. Es existiert keine Methodik und kein Nachweis zur Klassifikation der jeweiligen Geschwindigkeitseinbrüche. Diese Kenntnis über die Einordnung von Geschwindigkeitseinbrüchen und Klassifikation eines Stauendes ist ein wichtiger Punkt zur Sicherstellung der Verkehrssicherheit auf Schnellstraßen (Molzahn et al. 2018). Sie dient als empirische Grundlage für zukünftige Untersuchungen der Verkehrssicherheit und Unfallforschung. Die Ergebnisse dieser Arbeit können

² Zu den bekanntesten Privatunternehmen, die Verkehrs- und Mobilitätsdaten verarbeiten, gehören HERE, INRIX, TomTom, Google, aber auch Unternehmen wie UBER, Lyft, Apple oder Microsoft verarbeiten Standortdaten, bieten sie normalerweise aber nicht als Service an.

sowohl als Grundlage für Systeme zur aktiven Warnung als auch in Assistenzsystemen und autonomen Fahrfunktionen genutzt werden, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

4 Verkehrsphasenbasierte FC-Datenanalyse

Eines der Hauptziele von intelligenten Transportsystemen (ITS) ist die Verringerung der Ausmaße von Staus auf Schnellstraßen bis hin zur Vermeidung der Entstehung eines Staus. Ein wichtiger Aspekt dabei sind mikroskopische Eigenschaften des Verkehrsflusses. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Massenflottendaten in der Anfangszeit der Verkehrsflussanalyse, ist es mit der Einführung von flächendeckenden Systemen zur Erhebung von Verkehrsdaten möglich geworden intelligente Transportsysteme zu erweitern und verbessern. Zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs wurden in Massenflottendaten Geschwindigkeitseinbrüche zeitlich vor dem eigentlichen Zusammenbruch beobachtet.

4.1 Empirischer Nachweis von lokalen Störungen vor dem Verkehrszusammenbruch

Auf der Grundlage empirischer Daten (vgl. Abschnitt 2.2) erfolgt der Nachweis von den in der Theorie bekannten lokalen Störungen an Engstellen, die zeitlich vor einem Verkehrszusammenbruch zufällig auftreten. Die Abfolge von freiem Verkehr zu lokaler Störung und freiem Verkehr zurück wird $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergang genannt.

4.1.1 Untersucher Streckenabschnitt

Das Phänomen der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge konnte an vielen unterschiedlichen Engstellen und Tagen beobachtet werden (Molzahn et al. 2018b). Durch die zufällige Keimbildung ist dieses Phänomen jedoch nicht vor jedem Verkehrszusammenbruch zu beobachten. Aufgrund der höheren Durchdringungsrate von vernetzten Fahrzeugen auf der Autobahn A8 in den vorliegenden Daten, wurde das Kreuz Stuttgart zur ersten Analyse identifiziert. Eine Besonderheit des Kreuzes Stuttgart ist die automatische Freigabe des Standstreifens bei hohem Verkehrsaufkommen für eine Länge von ca. 2 km vor der eigentlichen Abfahrt (vgl. Abbildung 4.1 zwischen 1.5 km und 3.6 km), sodass eine vierspurige Autobahn entsteht. Am Ende des freigegebenen Standstreifens (vgl. Abbildung 4.1: 3,6 km) kommt es zu vielen Spurwechseln von Fahrzeugen, die auf dem freigegebenen Standstreifen fahren und auf der A8 verbleiben wollen und von Fahrzeugen, die auf der dreispurigen regulären Autobahn fahren und die Abfahrt nehmen wollen. Viele Spurwechselmanöver können zu Störungen in der Nähe der Engstelle führen (Ahn and Cassidy 2007).

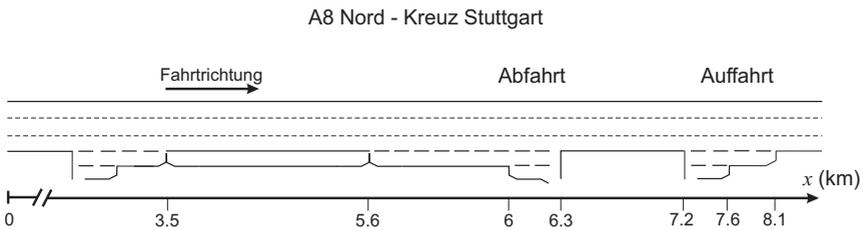


Abbildung 4.1: Autobahn A8 Nord von München kommend Richtung Karlsruhe. Gezeigt ist das Kreuz Stuttgart mit der automatischen Standstreifenfreigabe vor der eigentlichen Abfahrt

4.1.2 Mikroskopische empirische Eigenschaften vor dem Verkehrszusammenbruch

Für die empirische Analyse von mikroskopischen Eigenschaften der Geschwindigkeitseinbrüche vor einem Verkehrszusammenbruch wurden für den untersuchten Abschnitt (vgl. Abbildung 4.1) FC Daten analysiert. In Abbildung 4.2 (a) sind für diesen Abschnitt Trajektorien in einem Weg-Zeit-Diagramm gezeigt - zu sehen sind 8 km Strecke über 2,5 Stunden. Dabei wird ein Teil jeder Trajektorie gezeigt, die eine Geschwindigkeit von unter 85 km/h aufweist. Die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Fahrzeugen für diesen Datensatz liegt bei 54 Sekunden. Das grundlegende gestaute Muster mit dem Verkehrszusammenbruch um ca. 6:50 Uhr ist gut zu erkennen. An der Engstelle ist die stromabwärtige Front des gestauten Verkehrs lokal fixiert, wobei die stromaufwärtige Front ab 6:50 Uhr gegen die Fahrtrichtung propagiert. Einzelne sich bewegende breite Staus lassen sich innerhalb des gestauten Musters erkennen. In den zwei Bereichen (A) und (B) lassen sich feine Bereiche gestauten Verkehrs beobachten, die auf einen sich auflösenden Bereich synchronisierten Verkehrs hindeuten. In Abbildung 4.2 (b) ist ein vergrößerter Ausschnitt von (A) zu sehen, der FC Daten vor dem eigentlichen Verkehrszusammenbruch zeigt, mit allen Trajektorien und einem Geschwindigkeitsfilter von 85 km/h . Der mit strich-punktierten Linien begrenzte Bereich in (b) zeigt dabei den sich auflösenden synchronisierten Verkehr, der durch die beiden beschriebenen Phänomene („speed adaption“ und „over acceleration“) ausgelöst wird. Zur Unterstützung dieser These wurden Einzeltrajektorien (vgl. Abbildung 4.2 (c-i)) extrahiert, die folgendes Verkehrsphänomen zeigen: Fahrzeug 4 fährt mit einer konstanten Geschwindigkeit und passiert die Engstelle ohne große Beeinflussung. Sobald sich Fahrzeug 6 der Engstelle nähert, muss der Fahrer abbremsen (auf ca. 55 km/h) - symbolisch markiert in (d) mit $F \rightarrow S$. Fahrzeuge 12 und 16 verhalten sich ähnlich, wohingegen Fahrzeug 13 wieder einen Einbruch erlebt. Somit lassen sich hier $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge beobachten, die einen Verkehrszusammenbruch zu diesem Zeitpunkt verhindern. Diese Eigenschaften von lokalen Störungen sind übereinstimmend mit den theoretischen Ergebnissen von Kerner (2015b).

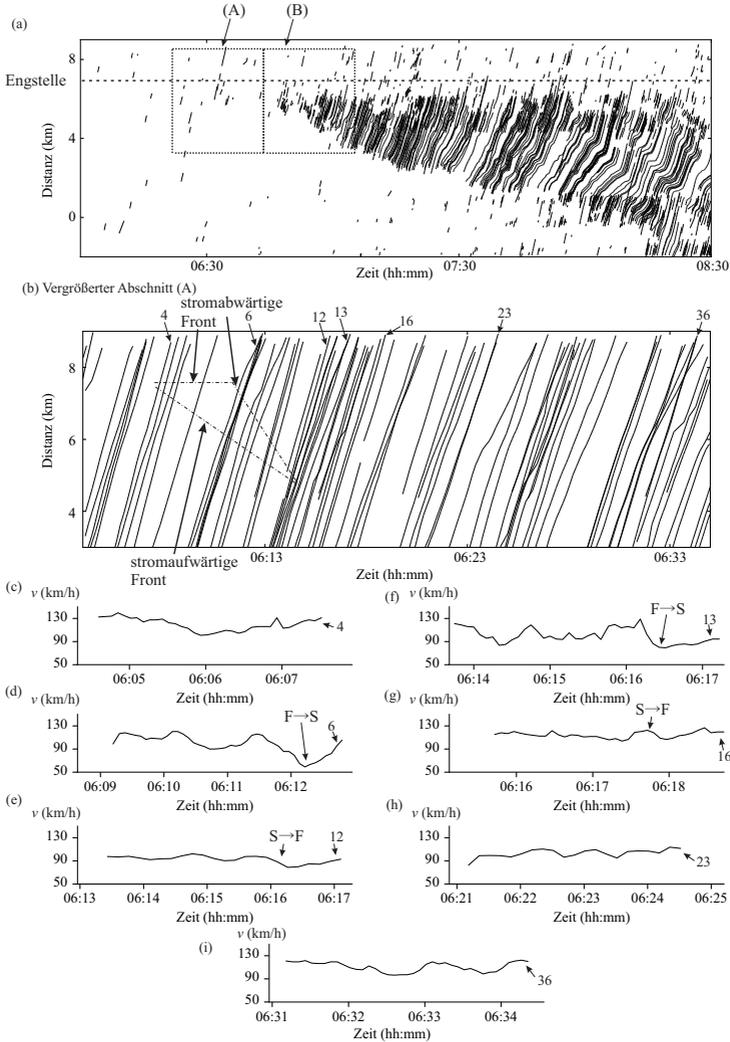


Abbildung 4.2: FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1): (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten $< 85 \text{ km/h}$. Die Engstelle ist markiert mit der gestrichelten Linie. (b) Vergrößerter Ausschnitt (A). (c-i) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)

Das selbe Phänomen wird wenig später an der gleichen Engstelle erneut beobachtet (vgl. Abbildung 4.3). Eine Sequenz von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen vor dem eigentlichen Verkehrszusammenbruch, der um ca. 6:50 Uhr stattfindet, ist in Abbildung 4.3 (a) und (b) mit strich-punktierten Linien begrenzt. Die mikroskopischen Geschwindigkeitsprofile (c-g) zeigen die charakteristischen Eigenschaften der Abfolgen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen. Die stromabwärtigen und -aufwärtigen Fronten zeigen ein ähnliches Verhalten zu den theoretischen Ergebnissen in Abbildung 3.5. Die empirischen Daten zeigen außerdem, dass solche Abfolgen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen über die Zeit bestehen bleiben und der Verkehrszusammenbruch nur unvermeidlich ist, wenn kein $S \rightarrow F$ Übergang einen vorangestellten $F \rightarrow S$ Übergang auflösen kann (vgl. Abbildung 4.3 ab 06:50 Uhr). Ab diesem Zeitpunkt formiert sich ein gestautes Verkehrsmuster (in diesem Fall ein „widening synchronized flow pattern“: WSP) an der Engstelle.

An mehreren weiteren Tagen konnte dieses Phänomen, das nicht zwangsläufig auftreten muss, beobachtet werden. Ein weiteres Beispiel ist im Anhang A.2 zu sehen: Die Abbildungen A.6 und A.7 zeigen FC Daten vom 07.12.2015 über einen Zeitraum von einer Stunde am Morgen. Der Verkehrszusammenbruch fand um 06:28 Uhr statt, mit vorherigen $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen, die ähnliche Eigenschaften aufweisen, wie bereits in den Abbildungen 4.2 und 4.3 diskutiert. An diesem Tag wurden zwei unterschiedliche Abfolgen von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen beobachtet.

Das Auftreten von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen ist maßgeblich von der Engstelle und dessen Anordnung abhängig. Vor allem die automatische Freigabe des Standstreifens, mit den daraus resultierenden erhöhten Spurwechselmanövern an der Engstelle, führt zu erhöhter Wahrscheinlichkeit von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen und einem Verkehrszusammenbruch. Der effektive Ort der Engstelle ist somit nicht an der Abfahrt (oder Zufahrt) der Autobahn, sondern befindet sich bei Kilometer 5,6 (vgl. Abbildung 4.1) wo die Standstreifenfreigabe endet. $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge sind zufällige Phasenübergänge (Kerner 2015b). Dies bedeutet, dass sowohl die Übergänge $F \rightarrow S$, als auch $S \rightarrow F$ zeitlich zufällig passieren können und damit die Dauer eines sich auflösenden synchronisierten Verkehrs zufällig ist. Die Simulationen und empirischen Beobachtungen bestätigen dies und zeigten eine Dauer

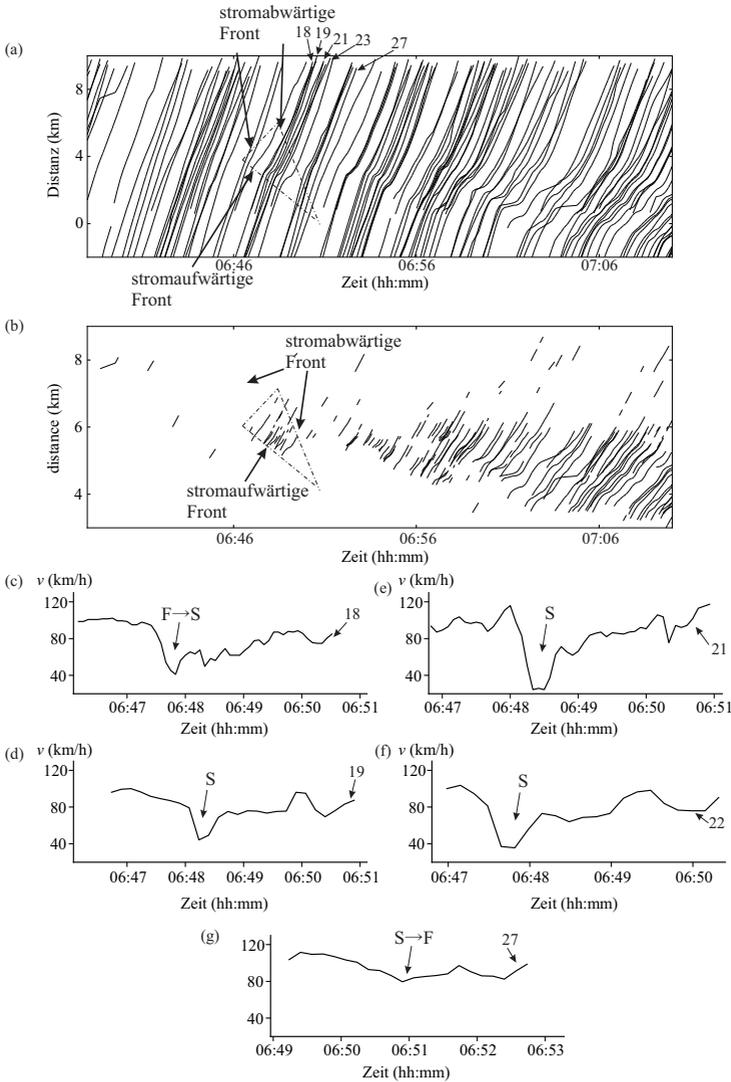


Abbildung 4.3: FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). Fortsetzung von Abbildung 4.2: (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm (b) mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten $< 85 \text{ km/h}$. (c - g) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)

von einigen Minuten. Die Dauer ist dabei abhängig vom Verkehrsfluss und der Infrastrukturanordnung an der Engstelle.

4.2 Vergleich von FCD und Detektordaten zur Erkennung von Geschwindigkeitseinbrüchen

Aufgrund einer geringen Ausstattungs- und Durchdringungsrate von vernetzten Fahrzeugen wurde der Verkehrszusammenbruch bisher mittels stationärer Detektordaten untersucht. Über die Zeit änderte sich dies und umfangreichere FC Daten wurden erhoben. Jedoch stellte sich heraus, dass gerade am Anfang bei den geringen Durchdringungsraten kein Vorteil der Nutzung von FC Daten gegenüber stationären Detektordaten zu erkennen war (Kerner et al. 2013). Dies änderte sich jedoch, als die Durchdringungsrate von vernetzten Fahrzeugen stieg und damit die durchschnittliche Zeit zwischen zwei vernetzten Fahrzeugen geringer wurde. Zur Untersuchung von Verkehrszusammenbrüchen ist es ausreichend, stationäre Detektordaten zu analysieren – $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge jedoch sind feine räumlich-zeitliche Phänomene, die sich in kleinen räumlichen Bereichen ausbreiten. Informationen zwischen zwei Detektorstandorten, in denen sich auflösende synchronisierte Muster entstehen können, gehen somit verloren. Daraus resultiert, dass dieses Phänomen ausnahmslos mit stationären Detektordaten nur schwer zu erkennen ist. Um dies zu verdeutlichen, wurde in Abbildung 4.4 das empirische Beispiel erweitert und mithilfe von zwei **virtuellen** Detektoren - D_1 und D_2 - die Geschwindigkeit an einem Ort bestimmt. Zur Berechnung der gemittelten Geschwindigkeit an den Detektoren wurde die mittlere Geschwindigkeit der FC Daten über eine Minute an diesem Ort gemittelt. Aufgrund der Auflösung dieser Daten wurde ein räumlicher Bereich um den Detektorstandort bestimmt.

Wie in Abbildung 4.4 (b, c) zu erkennen ist, gehen feine zeitlich-räumliche Muster zwischen den Detektoren verloren. Es lassen sich jedoch kleine Indikatoren

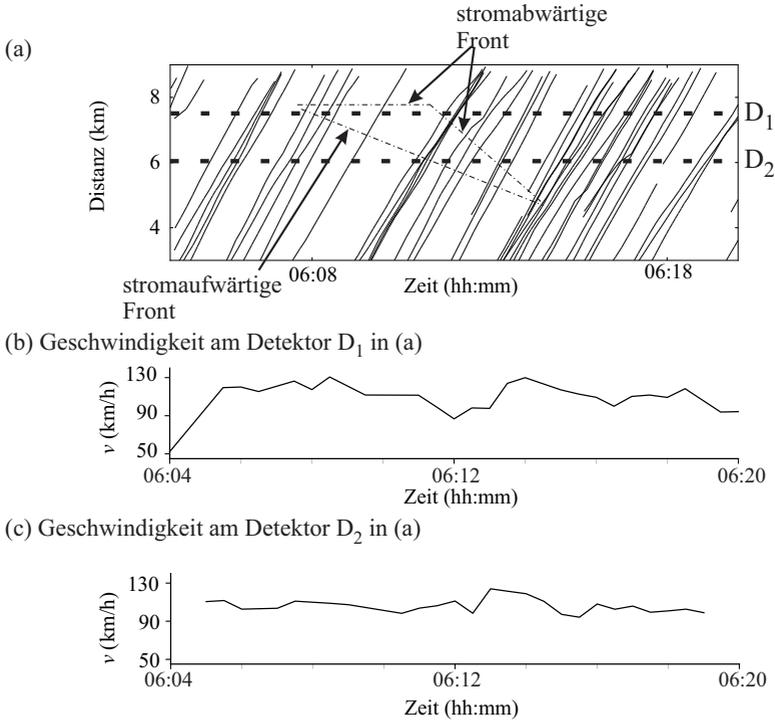


Abbildung 4.4: FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). (a) Weg-Zeit Diagramm mit einem sich auflösenden synchronisiertem Muster. (b, c) Gemittelte Geschwindigkeiten berechnet im 1-Minuten-Intervall aus den FC Daten. Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a).

(vgl. Abbildung 4.4 um 06:12 Uhr) erkennen, an denen sich ein $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergang erahnen lässt. Trotzdem kann keine sichere Aussage über den Ursprung und die räumliche Ausbreitung getätigt werden. Allerdings gibt es einen erheblichen Vorteil von stationären Detektordaten, die den Verkehrsfluss messen. Mit der Kenntnis des Verkehrsflusses in Verbindung mit der räumlich-zeitlichen Ausbreitung des sich auflösenden synchronisierten Musters, kann eine Abschätzung über die zufällige Dauer des Musters gemacht werden. Zusätzlich kann ein niedriger Verkehrsfluss ein Indikator für die eventuelle Auflösung ($S \rightarrow F$ Übergang) sein.

4.3 $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge vor einem Verkehrszusammenbruch

Geschwindigkeitseinbrüche und -störungen an einer Engstelle können ein Indikator für einen Verkehrszusammenbruch sein. Mit der Erkennung von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen ist es möglich, diese Störungen zu identifizieren. Da diese Phasenübergänge einem zufälligen Prozess untergeordnet sind und die Dauer damit nicht vorhersehbar ist, ist die Information über die zeitlich-räumliche Ausdehnung zur Potentialbestimmung der Gefährdung einer Staufront unabdingbar. Wie in den empirischen Beispielen aufgezeigt, sind die sich aus $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen formierenden WSPs feine zeitlich-räumliche Muster, die für die Verarbeitungskette eines Verkehrsinformationsdienstes zu schnell entstehen und sich auch wieder auflösen. Plötzlich auftretende Geschwindigkeitseinbrüche stellen jedoch ein erhöhtes Risiko für die Verkehrssicherheit dar – die Untersuchung von Auffahrunfällen am Stauende zeigte, dass diese oftmals kurz nach einem Verkehrszusammenbruch passieren.

5 Zeitlich-räumliche Strukturen von Staufronten

Stauenden, vor allem an kritischen Orten, weisen ein erhöhtes Verkehrssicherheitsrisiko auf. Sie sind nicht nur eine der häufigsten Unfallursachen, sondern enden oft mit tödlich verunglückten oder schwer verletzten Verkehrsteilnehmern. Ein weiterer Aspekt sind die LKW, die häufig in Unfälle an Stauenden involviert sind – sie erhöhen durch ihr wesentliches Mehrgewicht im Vergleich zu PKW die Schwere des Aufpralls enorm. Trotz der in Deutschland gesetzlich vorgeschriebenen Ausstattungspflicht für neu zugelassene LKW über 8 Tonnen Gesamtgewicht mit einem Notbremsassistenten, werden diese oft manuell ausgeschaltet, da diese Systeme nahes Auffahren in einer Kolonne verhindern.

Die Erkennung von Stauenden ist, wie bereits in Kapitel 3 erläutert, auf vielfältige Weise und mit unterschiedlichen Methoden realisiert worden. Zum Teil wurden in Feldexperimenten, aber auch in einem prototypischen Online-Betrieb verschiedene Daten und Datenquellen evaluiert: Von stationären Detektoren mit dynamischen WVZ bis hin zu FC Daten in Form von Warnungen an Teilnehmer über deren Mobiltelefone des Feldexperiments. Diese Verfahren und Experimente waren darauf ausgelegt, das Stauende generell zu erkennen; es wurde allerdings keine Identifikation von Bremsvorgängen der Einzelfahrzeugtrajektorien und damit einhergehend keine Klassifikation des Gefährdungspotenzials eines Stauendes vorgenommen. Im Allgemeinen wurde angenommen, dass ein Stauende immer gefährlich sei, daher wurde die stationäre Anwendung an bestimmten, als kritisch eingestuften Orten (wie z. B. vor einer Baustelle), durchgeführt. Gerade an Orten, an denen der Verkehrsfluss dauerhaft durch Maßnahmen wie eine Baustelle gestört ist, wird permanent gewarnt. Durch die ständige Warnung sinkt bei der

wiederholten Fahrt an diesen Orten trotzdem die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer. Der gewünschte Effekt der erhöhten Aufmerksamkeit wird somit über längere Zeit an wiederkehrend potentiell gefährlichen Orten minimiert. Zusammenfassend kann folgende Forschungsfrage aufgestellt werden:

Wie lassen sich die Geschwindigkeitseinbrüche an einer Staufront erkennen und klassifizieren?

In den folgenden Kapiteln wird ein Verfahren vorgestellt, das Stauenden zu einer Front zusammensetzt, diese nach der Höhe der Geschwindigkeitseinbrüche klassifiziert und auf Basis des Verlaufs den Trend aufzeigt.

5.1 Fahrerverhalten bei Einfahrt in den gestauten Verkehr

Um das momentane Gefahrenpotenzial an einem Stauende zu bestimmen, wird zunächst das Fahren an ein Stauende empirisch untersucht. Dazu werden die Bremsvorgänge beim Heranfahren an eine Staufront analysiert. Da nicht jeder beliebige Bremsvorgang berücksichtigt werden soll, werden zunächst Kriterien für die Erkennung eines Bremsvorgangs definiert, die dann zu einer Staufront zusammengesetzt werden. Das Zusammenwirken mikroskopischer Bremsvorgänge zeigt einen Indikator des Gefährdungspotenzials an der Staufront, mit der sich ein Trend fortschreiben lässt.

5.1.1 Definition eines Bremsvorgangs

Aufgrund der Diskretisierung der Daten (vgl. Abschnitt 2.2) ist es nicht möglich, die Beschleunigung zu einem Zeitpunkt zu berechnen, sondern nur die Durchschnittsbeschleunigung zwischen den Intervallen. Der Algorithmus zur Bestimmung setzt sich wie folgt zusammen: Aus den Perlenketten von relativen Distanzen x_1, \dots, x_N zu einem fixen Startpunkt, zusammen mit den assoziierten

Zeitpunkten t_1, \dots, t_N , wird die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_i an einem Messpunkt symmetrisch berechnet. Zunächst wird zwischen zwei Punkten die Geschwindigkeit auf dem Link bestimmt:

$$v_{i-1 \rightarrow i} = \frac{\Delta x_{i,i-1}}{\Delta t_{i,i-1}} \quad (5.1)$$

mit

$\Delta x_{i,i-1}$ = Räumliche Differenz zwischen Punkt $i - 1$ und i

$\Delta t_{i,i-1}$ = Zeitliche Differenz zwischen Punkt $i - 1$ und i

Für eine robustere Bestimmung der Geschwindigkeit v zum Zeitpunkt t_i gilt:

$$v(t_i) = \frac{v_{i-1 \rightarrow i} + v_{i \rightarrow i+1}}{2} \quad (5.2)$$

mit

$v_{i-1 \rightarrow i}$ = Geschwindigkeit zwischen Punkt $i - 1$ und i

$v_{i \rightarrow i+1}$ = Geschwindigkeit zwischen Punkt i und $i + 1$

Der Beginn eines Bremsvorgangs wird mittels eines zeitlichen Kriteriums in Verbindung mit einem Geschwindigkeitseinbruch ermittelt. Findet innerhalb von 10 Sekunden ein Geschwindigkeitseinbruch von 30 km/h und mehr statt, wird ein Bremsvorgang erkannt:

$$\phi(t_i) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \Delta v(t_i) \geq 30 \text{ km/h} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.3)$$

mit dem Geschwindigkeitseinbruch Δv_i zu dem Zeitpunkt t_i :

$$\Delta v(t_i) = v(t_i) - v(t_i + 10 \text{ Sekunden}) \quad (5.4)$$

Für jeden auf diese Weise gefundenen Bremsvorgang ϕ_i wird nun innerhalb von 30 Sekunden die minimale Geschwindigkeit bestimmt:

$$v_{i_{min}} = \min(v(t_i), \dots, v_{t_i+30 \text{ Sekunden}}) \quad (5.5)$$

Die Differenz der Geschwindigkeiten zu Beginn des Bremsvorgangs und der minimalen Geschwindigkeit innerhalb der 30 Sekunden ergibt nun die eigentliche Verzögerung an der Staufront:

$$\Delta\phi(t_i) = v(t_i) - v_{i_{min}} \quad (5.6)$$

Durch dieses Vorgehen wird sichergestellt, dass nur Bremsvorgänge, die einen gewissen Geschwindigkeitseinbruch vorweisen, berücksichtigt werden und für diese, unabhängig der Zeit, ein maximaler Geschwindigkeitseinbruch definiert ist. Abbildung 5.1 zeigt schematisch eine Fahrzeugtrajektorie im Geschwindigkeitsprofil. Der erste Punkt $v(t_1)$ zeigt den Beginn eines Bremsvorgangs, der nach Formel 5.3 bestimmt wird. Der schraffierte Bereich stellt den Beobachtungsraum für diesen Punkt dar, um die minimale Geschwindigkeit zu finden. Dieser Punkt wird nach Formel 5.5 zum Zeitpunkt t_2 gefunden und die Geschwindigkeitsdifferenz daraufhin gemäß Formel 5.6 berechnet.

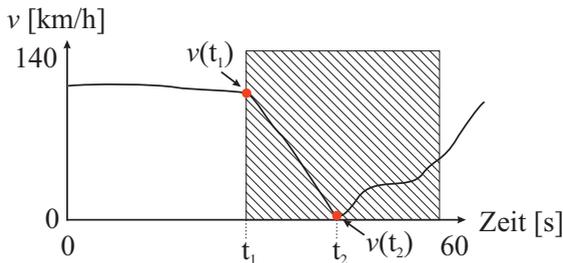


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung einer Fahrzeugtrajektorie im Geschwindigkeitsprofil

Nach dem Herausfiltern der Bremsvorgänge werden aus diesen die stromaufwärtigen Fronten zusammengesetzt. Das Verfahren basiert auf der Idee der fahrzeugautonomen Zustandserkennung von Kerner et al. (2013), bei der räumlich-zeitliche Abhängigkeiten zwischen den Bremsvorgängen (in Kerner et al. (2013) Zustandsübergänge) als Zuordnung zu einer Staufront gelten.

5.1.2 Bremsvorgänge in empirischen Flottendaten

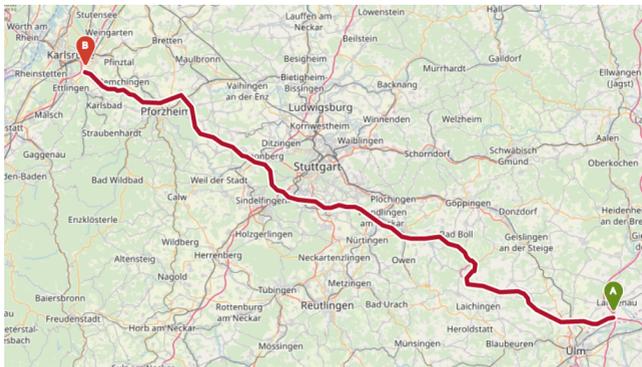


Abbildung 5.2: Untersucher Streckenabschnitt A8 von Ulm bis Karlsruhe – 150 km (Karte: Open Street Map)

Für die statistische Untersuchung von Bremsvorgängen wurde ein 150 km langer Abschnitt auf der A8 gewählt (vgl. Abbildung 5.2). Die Strecke führt von Ulm über das Kreuz Stuttgart nach Karlsruhe. Untersucht wurden die Trajektorien im vorliegenden Datensatz von einer Woche (03.05.2017 – 10.05.2017). In Abbildung 5.3 sind die Anzahl der Trajektorien und Datenpunkte (aus Tabelle 5.1) aufgezeigt. Die Anzahl der Trajektorien und Datenpunkte entspricht der erwarteten Form: Typischerweise wird der Abschnitt am Wochenende weniger gefahren als unter der Woche – somit ergibt sich der in Abbildung 5.3 zu sehende Einbruch in der Anzahl Trajektorien und Datenpunkte. Weiterhin ist auffällig, dass am 07.05.2017 (Sonntag) insgesamt weniger Trajektorien als am 06.05.2017 (Samstag) im Datensatz vorhanden sind, jedoch mehr Datenpunkte als Sonntag als am Samstag

Tabelle 5.1: Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Trajektorien und Datenpunkte zur Analyse der Bremsvorgänge

Tag	Anzahl Trajektorien	Anzahl Datenpunkte
03.05.2017 (Mi)	8.780	1.396.408
04.05.2017 (Do)	8.854	1.511.974
05.05.2017 (Fr)	8.520	1.350.682
06.05.2017 (Sa)	6.265	894.954
07.05.2017 (So)	5.667	1.004.783
08.05.2017 (Mo)	8.318	1.482.665
09.05.2017 (Di)	9.059	1.478.308
10.05.2017 (Mi)	8.998	1.519.259

auftreten. Dies deutet darauf hin, dass sonntags vergleichsweise weniger Fahrten gefahren werden, die jedoch längere Strecken aufweisen (Auer et al. 2017a).

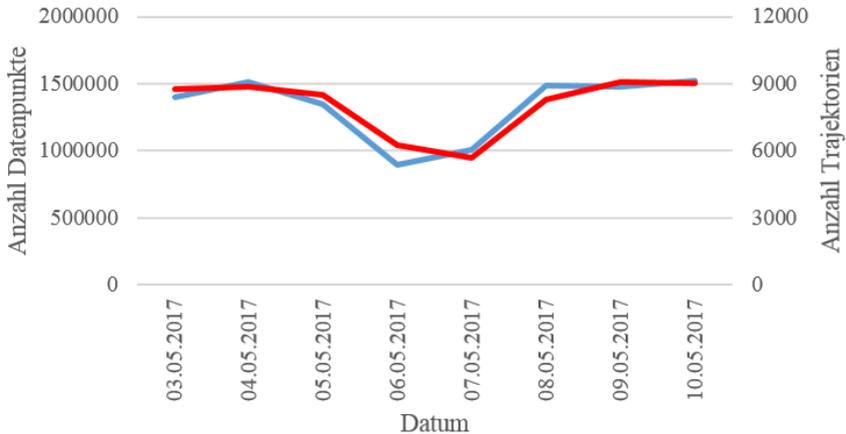


Abbildung 5.3: Anzahl Trajektorien und Datenpunkte an den untersuchten Tagen

Abbildung 5.5 zeigt die Bremsvorgänge für alle untersuchten Tage (vgl. Tabelle 5.1) auf der genannten Strecke. Die Wochentage zeigen durchweg ähnliche

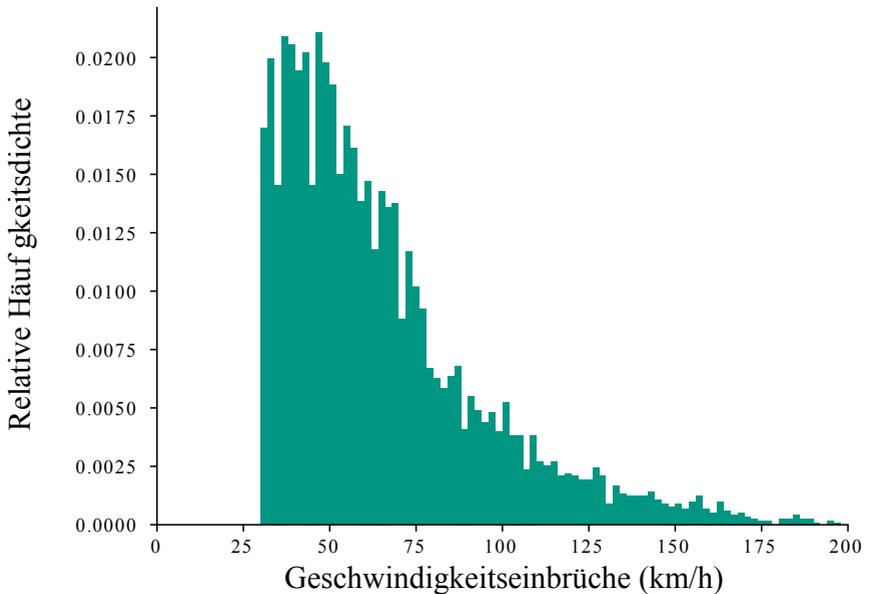


Abbildung 5.4: Verteilung von Bremsvorgängen am 03.05.2017 über die 150 km der A8 (Abbildung 5.2)

Verteilungen: Die häufigsten Bremsvorgänge liegen im Bereich mit Geschwindigkeitseinbrüchen von $30 \text{ km/h} - 50 \text{ km/h}$, mit einer abflachenden Kurve gegen 200 km/h . Am Wochenende zeigt sich das lokale Maximum der Geschwindigkeitseinbrüche bei $75 \text{ km/h} - 100 \text{ km/h}$. Typische Überlastungstaus an Wochentagen führen zu der abfallenden Verteilung mit vielen relativ ungefährlichen Stauenden: Diese sind häufig bei synchronisiertem Verkehr zu finden, der dann vollends zum Erliegen kommt. An Wochenenden treten häufiger gefährliche Stauenden mit Bremsvorgängen von ca. 75 km/h auf: Sonntags wird im freien Verkehr schneller gefahren und Staufronten treten eher überraschend auf.

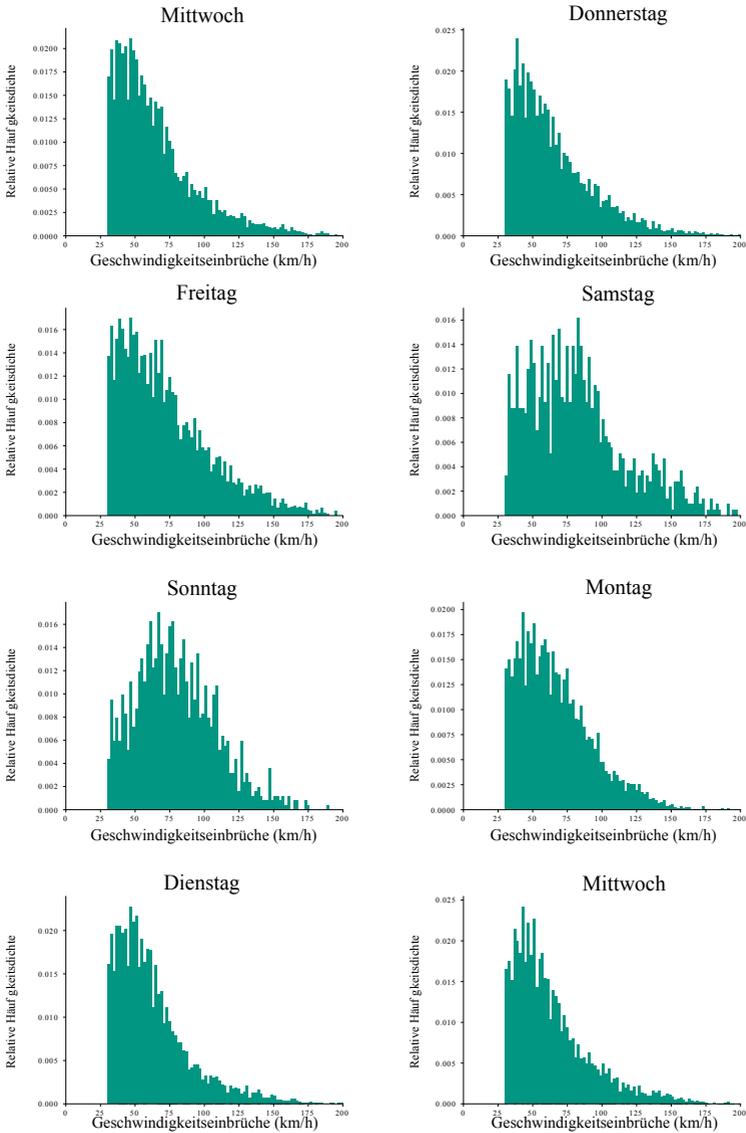


Abbildung 5.5: Verteilung von Bremsvorgängen während der untersuchten Woche über 150 km der A8 (Abbildung 5.2)

Tabelle 5.2: Zeitlich-räumliche Kriterien für die Zuordnung von Bremsvorgängen zu Staufronten

Kriterium	Bedingung
Δx_{pos}	500m
Δx_{neg}	900m
Δt	180s

5.2 Zeitlich-räumliche Eigenschaften von Staufronten

Eine Staufront ist nach Kerner (2004) als zeitlich-räumlicher Verlauf von Zustandsübergängen, die einer gemeinsamen Phase zugehörig sind, definiert. In Kerner et al. (2013) wurde ein Verfahren vorgestellt, bei dem fahrzeugautonom der Verkehrszustand erkannt und die zugehörigen Gebiete der Verkehrsphase generiert wurden. Die Zuordnung von Verkehrszuständen zu stromauf- und stromabwärtigen Staufronten basiert auf zeitlich-räumlichen Kriterien (vgl. Tabelle 5.2), die sowohl für die Verkehrsphasen als auch für die stromauf- und stromabwärtigen Fronten unterschiedlich sind. Für eine Stauendewarnung sind jedoch nur die stromaufwärtigen Fronten, an denen prinzipiell von höherer Geschwindigkeit auf eine geringere verzögert wird, relevant. Die Geschwindigkeitsunterschiede werden unabhängig heuristischer Phasenerkennung bestimmt. Daher ist die Unterscheidung der Verkehrsphase hierbei zu vernachlässigen.

Die Zuordnung der Bremsvorgänge wird durch die Verfolgung einer Staufront realisiert. Die empirischen charakteristischen Eigenschaften von Verkehrsphasen werden hierbei angewandt; es werden jedoch nur die stromaufwärtigen Staufronten der Verkehrsphasen berücksichtigt. Die Identifikation der Zugehörigkeit von Bremsvorgängen zu Staufronten basiert auf der zeitlich-räumlichen Aufspannung eines Beobachtungsraums (vgl. Abbildung 5.6). Dabei wird der zeitlich zuletzt erfasste Bremsvorgang als Referenzpunkt genutzt, um den Bereich innerhalb der definierten Kriterien aufzuspannen. So werden die Bremsvorgänge, die innerhalb

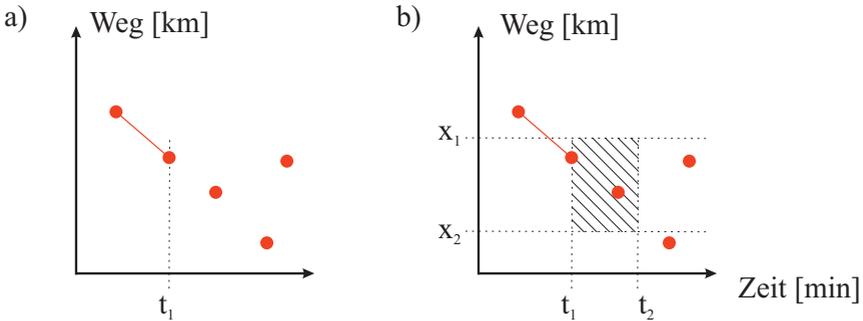


Abbildung 5.6: Zuordnung von Bremsvorgängen zu Staufronten. a) Staufront zum Zeitpunkt t_1 . b) Aufspannung des Beobachtungsraums mit zugeordneten Bremsvorgängen

von 180 Sekunden stattfinden und räumlich betrachtet 500 Meter in stromabwärtige Richtung und 900 Meter in stromaufwärtige Richtung herausgefiltert und der Staufront hinzugefügt. Das zeitliche Kriterium ist notwendig, um genügend (mindestens einen Weiteren) Bremsvorgänge, die noch zur Staufront gehören, abzudecken. Weil die FC-Daten nur einen kleinen Anteil des eigentlichen Gesamtverkehrs ausmachen, wird dieser Beobachtungsraum genutzt. Die räumliche Ausdehnung in stromaufwärtige Richtung deckt die charakteristischen Eigenschaften von sich bewegenden breiten Staus, die typischerweise in stromaufwärtige Fahrtrichtung laufen, ab. Wohingegen die positive Ausdehnung die abflachenden und sich auflösenden Staufronten der gestauten Verkehrsmuster abdecken.

Vereinfacht sind die unterschiedlichen Arten von Staufronten in Abbildung 5.7 zu sehen, die es zu erkennen gilt. Dabei werden die Bremsvorgänge nach dem o.g. Verfahren zunächst bestimmt und zeitlich aufsteigend geordnet. Daraufhin werden die zeitlich-räumlichen Kriterien angewandt und die Bremsvorgänge einer vorhandenen Staufront hinzugefügt. Die Staufront F_1 ist eine stromaufwärtige Front des gestauten Verkehrs, die entgegen der Fahrtrichtung läuft. Typischerweise wird diese Art von Staufront zu Beginn eines gestauten Verkehrsmusters beobachtet. Jedoch sind Staufronten dieser Art auch bei sich bewegenden breiten Staus zu beobachten – in diesem Fall zusätzlich mit einer parallel laufenden stromabwärtigen Staufront. Staufront F_2 fluktuiert räumlich eher gering, wohingegen Staufront F_3 aufgrund der Auflösung des Staus stromaufwärts (mit der Fahrtrichtung) läuft. Die

Staufronten F_1 , F_2 , und F_3 sind dabei nicht zwangsläufig miteinander verbunden und bilden auch keine einheitliche Front. Jede Art von Staufront kann gesondert für sich auftreten.

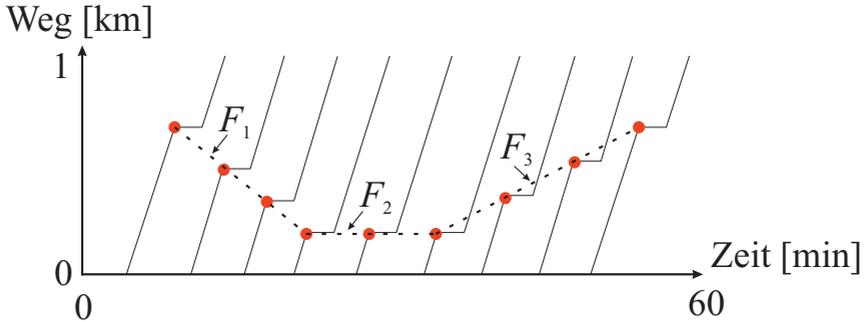


Abbildung 5.7: Unterschiedliche Arten von Staufronten

5.2.1 Staufronten in empirischen Flottendaten

Um einen Überblick über das Vorkommen und die empirischen Eigenschaften von Staufronten zu bekommen, wird zunächst eine statistische Auswertung aller Staufronten in dem beobachteten Zeitraum und Streckenabschnitt (vgl. Abbildung 5.2 und Tabelle 5.1) präsentiert. In Tabelle 5.3 sind hierfür für den gleichen Zeitraum die Anzahl Staufronten und die durchschnittlichen Werte für die Dauer und Länge der Staufronten über die jeweiligen ganzen Tage dargestellt. Erwartungsgemäß fällt die Anzahl der Staufronten am Wochenende ab. Die Dauer und Länge der Staufronten unterscheidet sich jedoch nicht sonderlich von den Staufronten unter der Woche.

Die Häufigkeitsverteilung der beiden Variablen über den kompletten Untersuchungszeitraum (vgl. Abbildung 5.8) zeigt, dass vor allem kurze Staufronten von unter einem Kilometer Länge vermehrt vorkommen. Die Verteilung lässt einen negativ exponentiellen Verlauf vermuten. Bei der Dauer einer Staufront liegt der

Tabelle 5.3: Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Staufonten, die jeweilige durchschnittliche Länge und Dauer der Staufonten an dem Tag

Tag	Staufonten	Ø Dauer (s)	Ø Länge (m)
03.05.2017 (Mi)	316	719,84	1 471,99
04.05.2017 (Do)	269	713,30	1 586,86
05.05.2017 (Fr)	228	675,67	1 263,87
06.05.2017 (Sa)	77	684,73	921,61
07.05.2017 (So)	77	844,35	1 078,58
08.05.2017 (Mo)	300	741,48	1 243,58
09.05.2017 (Di)	329	721,15	1 547,15
10.05.2017 (Mi)	369	750,58	1 621,57

häufigste Wert bei ca. 500 Sekunden - Staufonten bauen sich dementsprechend auf und bleiben dann für zumindest 8 Minuten bestehen.

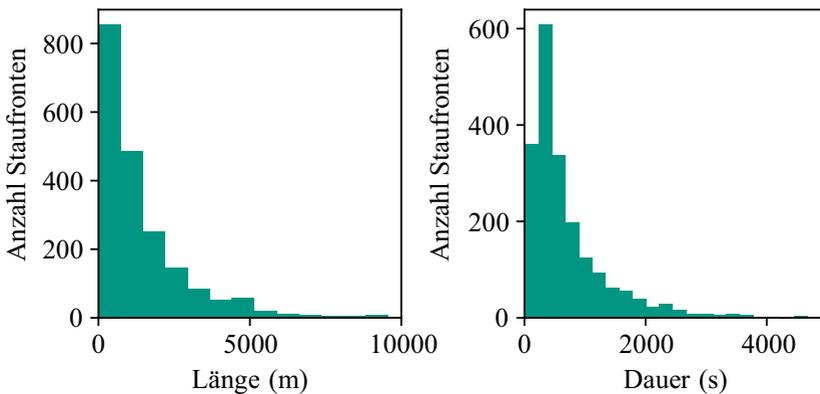


Abbildung 5.8: Verteilung von Dauer und Länge von Staufonten

Betrachtet man nur die Verteilung der Anzahl der Staufonten über die gesamte Strecke, lassen sich die einzelnen Engstellen gut erkennen. In Abbildung 5.9 ist der untersuchte Bereich auf der A8 von Ulm bis Karlsruhe mit der Anzahl der

Staufonten in einer 1-Kilometer-Auflösung gezeigt. Die Engstellen zeigen vermehrtes Aufkommen von Staufonten an diesen Stellen. Vor allem Filderstadt, das Kreuz Stuttgart und die Reduzierung der Fahrspuren von 3 auf 2 Spuren bei Pforzheim stechen mit bis zu 50 Staufonten pro Kilometer in dem untersuchten Zeitraum heraus. Zusätzlich zeigen diese Gebiete auch die meisten Geschwindigkeitseinbrüche mit einem Δv von mehr als 100 km/h. Diese treten vornehmlich in dem hinteren Bereich der Staufonten auf – also beim Auftreffen der Fahrzeuge aus dem freien Verkehr auf eine Staufont. Weitere Streckenabschnitte in Deutschland (Abbildung A.9) und Großbritannien (Abbildung A.10) zeigen ähnliche Charakteristiken. An den jeweiligen Anschlussstellen auf dem Streckenabschnitt treten erwartungsgemäß die meisten Staufonten auf. Bei großflächigeren Staus (wie in Abbildung A.9 in Bruchsal und am Westkreuz Frankfurt zu sehen) lässt sich keine Regelmäßigkeit bzgl. der gefährlichen Geschwindigkeitseinbrüche an Stauenden erkennen. Dies zeigt das dritte Beispiel auf der M4 in Großbritannien: Auf über 50 Kilometer zwischen Reading und London sind regelmäßig Staufonten zu erkennen, die verteilt auf die gesamte Strecke gefährliche Geschwindigkeitseinbrüche zeigen.

Die vorangegangenen Beispiele zeigen für eine komplette Strecke die Verteilung von Staufonten und die gefährlichen Geschwindigkeitseinbrüchen. Diese liefern einen wichtigen Hinweis auf prinzipiell gefährliche Infrastrukturen – erwartungsgemäß sind das Engstellen, wie Auf-/Abfarten oder Reduzierung der Fahrspuranzahl. Für eine detaillierte Analyse von Staufonten und deren potentiellen Gefährdung müssen mikroskopische Eigenschaften jeder Staueinfahrt für einzelne Staufonten isoliert betrachtet werden.

5.2.2 Mikroskopische Eigenschaften von Staueinfahrten

Typische gestaute Verkehrsmuster (wie in Abbildung 5.10) wurden mittels verschiedener Erhebungsmethoden gezeigt. Mit FC Daten ist es nun möglich, einzelne mikroskopische Eigenschaften von der konkreten Staueinfahrt von Fahrzeugen zu

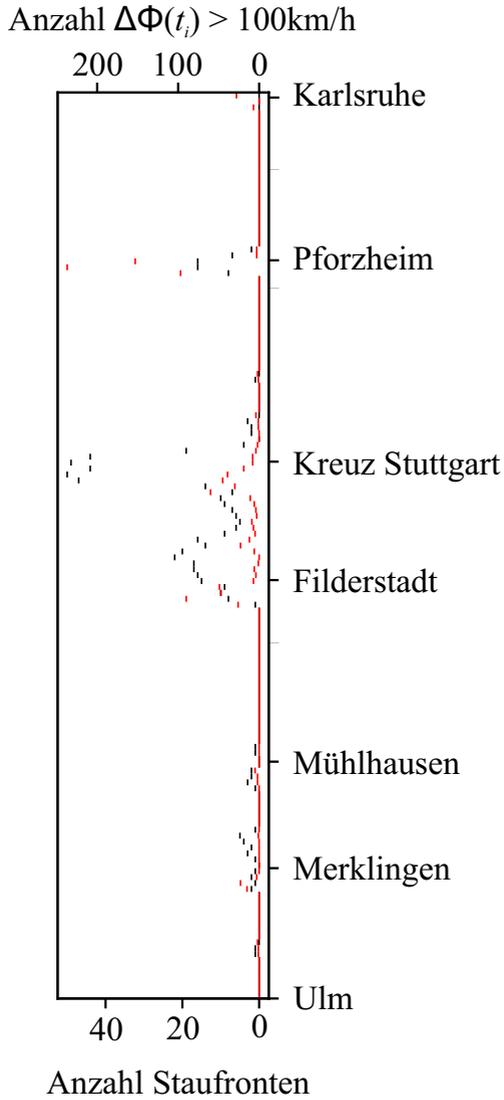


Abbildung 5.9: Anzahl Staufronten (schwarz) und Geschwindigkeitseinbrüche über 100 km/h (rot) auf der untersuchten Strecke

untersuchen. Dies ist essenziell zur Klassifikation des Gefährdungspotenzials von Staufonten. Prinzipiell kann zwischen drei verschiedenen Einfahrten in den Stau unterschieden werden, die jeweils folgende Fragen aufwerfen:

- Fahrzeug 1 fährt zunächst in ein gestautes Muster des synchronisierten Verkehrs, kurz darauf in ein Muster des sich bewegenden breiten Staus
 - Sollte nur vor dem ersten, kleinen Geschwindigkeitseinbruch gewarnt werden?
 - Sollte vor dem zweiten, größeren Geschwindigkeitseinbruch gewarnt werden?
 - Ist es sinnvoll, vor beiden Geschwindigkeitseinbrüchen zu warnen?
- Fahrzeug 2 fährt zuerst direkt in ein Muster des sich bewegenden breiten Staus, bevor ein kurzer Bereich freier Verkehr, gefolgt von synchronisiertem Verkehr durchfahren wird
 - Wie gefährlich ist der erste große Geschwindigkeitseinbruch?
 - Sollte nach einem ersten gefährlichen Geschwindigkeitseinbruch vor einem vermeintlich ungefährlicheren noch einmal gewarnt werden?
- Fahrzeug 3 fährt durch den synchronisierten Verkehr und erfährt keinen großen Geschwindigkeitseinbruch
 - Ist eine Warnung bei potenziell ungefährlichen Stauenden notwendig?

5.2.3 Potenzial der Gefährdung gestauten Verkehrs

Mit den drei verschiedenen Einfahrten in gestauten Verkehr können drei Stufen des Gefährdungspotenzials (Gefährdungsklassen) definiert werden. Die Klassifikation basiert auf Geschwindigkeitseinbrüchen von Staueinfahrten an der Staufont.

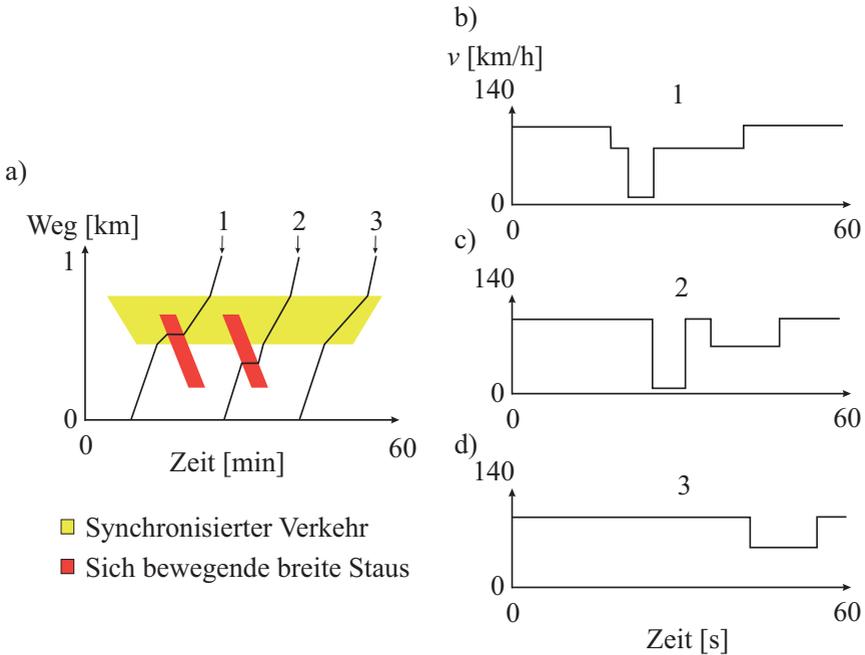


Abbildung 5.10: (a) Typisches gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm mit drei exemplarischen Trajektorien. (b, c, d) Schematischer Geschwindigkeitsverlauf der drei Trajektorien aus (a)

Dabei wird zwischen Staufronten erster Ordnung und Staufronten höherer Ordnung unterschieden: Als Staufronten erster Ordnung werden jene bezeichnet, bei denen die **erste** Beeinflussung der Geschwindigkeit beobachtet wird. Es werden jedoch nur Beeinflussungen berücksichtigt, die gemäß Formel 5.3 erkannt wurden. Die Ordnung einer Staufront kann sich über die Zeit ändern, indem z. B. ein sich bewegender breiter Stau aus der Phase des synchronisierten Verkehrs in den freien Verkehr fortläuft (wie in Abbildung 5.10 zu sehen). In diesem Beispiel beginnt die Staufront als zweite Ordnung. Sobald die Staufront räumlich-zeitlich den synchronisierten Verkehr verlässt, gilt sie für dann heranfahrende Fahrzeuge als Staufront erster Ordnung. Für die persönliche Wahrnehmung des Gefährdungspotenzials einer Staufront ist die Ordnung essenziell. Nach der erstmaligen Einfahrt in den

Stau (Passieren einer Staufront erster Ordnung) sind die Fahrer für den gestauten Verkehr sensibilisiert. Staufronten höherer Ordnung werden nicht mehr als überraschend wahrgenommen und durch die allgemein niedrigeren Geschwindigkeiten im gestauten Verkehr sind diese Staufronten generell ungefährlicher. Eine Ausnahme gilt bei Staufronten höherer Ordnung, bei denen räumlich-zeitlich unmittelbar davor jedoch freier Verkehr herrschte. Trotz der Sensibilisierung der Fahrer für den gestauten Verkehr, treten dann wieder starke Geschwindigkeitseinbrüche und damit auch wieder gefährliche Stauenden auf.

5.2.4 Empirische Staueinfahrten

Um die Eigenschaften von Staueinfahrten zu verdeutlichen, werden einige Beispiele empirischer Staueinfahrten gezeigt. Die FC Daten entstammen dem vorher genannten Datensatz, es werden hier allerdings ausgewählte Einzelbeispiele gezeigt. Zur Untersuchung der empirischen Eigenschaften von Staueinfahrten wurden drei repräsentative gestaute Verkehrsmuster ausgesucht. Mit diesen drei Verkehrsmustern wird weiterhin das Verfahren zur Erkennung der Staufronten und der Klassifikation des Gefährdungspotenzials der Staufronten gezeigt. Einzelne Eigenschaften und separate Phänomene werden gesondert behandelt und sind als solche gekennzeichnet.

5.2.4.1 Staueinfahrten in sich bewegende breite Staus

Zur Untersuchung von Staueinfahrten in sich bewegende breite Staus wurde ein gestautes Verkehrsmuster auf der A81 Richtung Stuttgart ausgewählt. Der gestaute Verkehr ereignete sich bei der Ab- und Auffahrt Mundelsheim (vgl. Abbildung 5.11) über eine Distanz von 20 km in den Abendstunden von 17:30 Uhr bis 19:00 Uhr am 13.11.2016 (vgl. Abbildung 5.12).

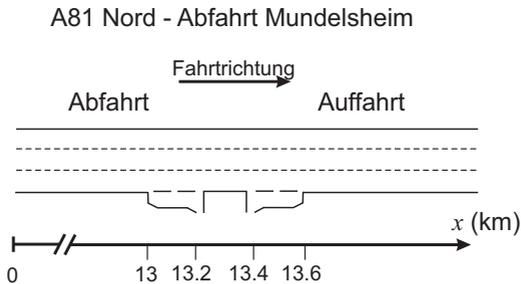


Abbildung 5.11: Autobahn A81 Nord von Heilbronn kommend Richtung Stuttgart. Gezeigt ist die Ab- und Auffahrt Mundelsheim

Das gestaute Verkehrsmuster zeigt qualitativ mehrere Staufrenten:

- Staufrent erster Ordnung
 1. Stromaufwärtige Staufrent des sich bewegenden breiten Staus beginnend um 17:55 Uhr an Kilometer 12 und bis Kilometer 5 laufend (18:30 Uhr)
 2. Stromaufwärtige Staufrent eines synchronisierten Verkehrs ab 18:30 Uhr bei Kilometer 7.5
 3. Stromaufwärtige Staufrent eines synchronisierten Verkehrs ab 18:45 Uhr bei Kilometer 12.5
- Staufrent höherer Ordnung
 1. Stromaufwärtige Staufrent des sich bewegenden breiten Staus beginnend um 18:00 Uhr an Kilometer 14 und bis Kilometer 12 laufend (18:15 Uhr)
 2. Stromaufwärtige Staufrent eines synchronisierten Verkehrs ab 18:20 Uhr bei Kilometer 12 (diese wird zu einer Staufrent erster Ordnung ab 18:45 Uhr)

3. Stromaufwärtige Staufront eines synchronisierten Verkehrs ab 18:25 Uhr bei Kilometer 8 (diese wird zu einer Staufront erster Ordnung ab 18:32 Uhr)

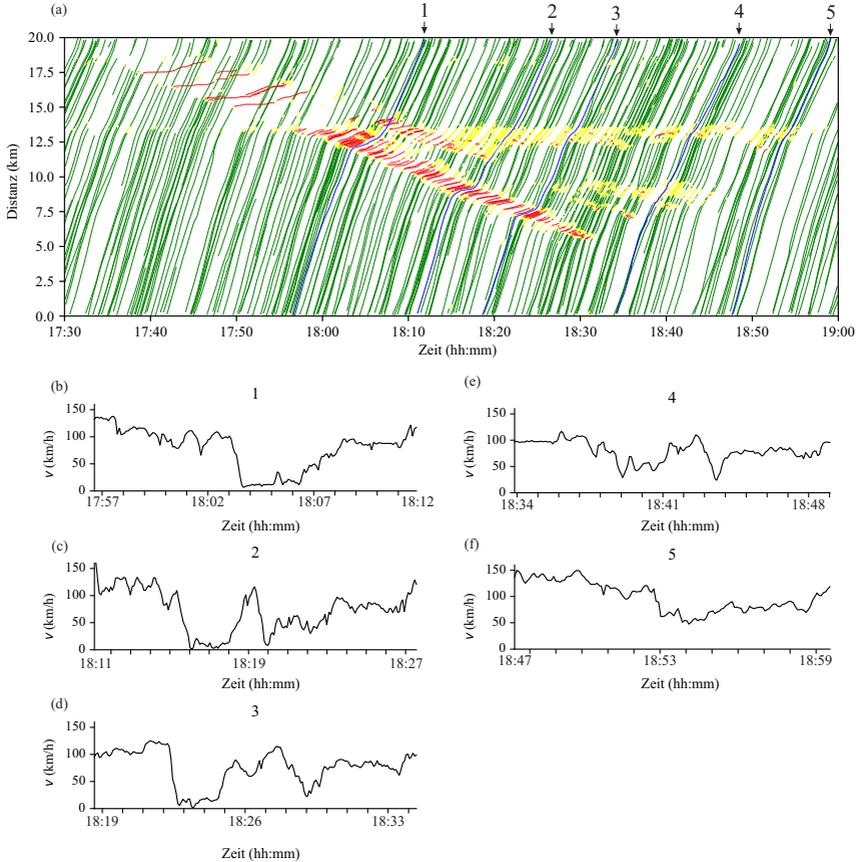


Abbildung 5.12: Gemessene FC Daten auf der A81 Richtung Stuttgart (NB) am 13.11.2016. (a) Gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm über 20 km in der Abendstunde von 17:30 Uhr bis 19:00 Uhr. (b, c, d, e, f) Geschwindigkeitsprofil von Fahrzeugen (Nummerierung gemäß der Pfeile in (a))

Die Geschwindigkeitsprofile der Einzeltrajektorien (vgl. Abbildung 5.12 (b, c, d, e, f)) bestätigen die unterschiedlich vorkommenden Staufronten mit variierenden Geschwindigkeitseinbrüchen. Trajektorien 1, 2 und 3 (blau markiert in Abbildung 5.12 (a)) zeigen für die Einfahrt in den ersten gestauten Bereich (stromaufwärtige Staufront erster Ordnung des sich bewegenden breiten Staus) starke Geschwindigkeitseinbrüche. Im weiteren Verlauf zeigen die drei Trajektorien jedoch ein grundlegend anderes Verhalten: Während Trajektorie 1 nach der Staufront erster Ordnung nur einen kleinen Bereich synchronisierten Verkehrs durchfährt, bevor sie auf die Staufront höherer Ordnung trifft, fahren Trajektorie 2 und 3 zunächst im freien Verkehr weiter. Somit zeigt sich bei Trajektorie 1 zum Zeitpunkt 18:05 Uhr nur ein kleiner Einbruch in der Geschwindigkeit. Trajektorie 2 erfährt einen Geschwindigkeitseinbruch, ähnlich dem Ersten um 18:20 Uhr. Trajektorie 3 erfährt zwei weitere Staufronten höherer Ordnung: Zunächst um 18:25 Uhr eine stromaufwärtige Staufront synchronisierten Verkehrs mit einem kleinen Geschwindigkeitseinbruch, gefolgt von einem etwas größeren Einbruch um 18:28 Uhr ebenfalls in den synchronisierten Verkehr. Mit diesen drei Trajektorien lassen sich bereits sowohl die Kontinuität der Geschwindigkeitseinbrüche einer Staufront (wie im Falle der Staufront erster Ordnung) als auch die Dynamik der Geschwindigkeitseinbrüche von Staufronten höherer Ordnung feststellen.

5.2.4.2 Staueinfahrten in synchronisierten Verkehr

Als weiteres Beispiel wird ein zweites gestautes Verkehrsmuster gezeigt, bei dem sich keine bewegenden breiten Staus entwickeln. In diesem Beispiel ereignete sich der gestaute Verkehr an der Abfahrt Böblingen-Hulb auf der A8 von Herrenberg nach Sindelfingen (vgl. Abbildung 5.13).

Das gestaute Verkehrsmuster zeigt qualitativ eine stromaufwärtige Staufront, die vergleichsweise stabil bei Kilometer 9 ab 06:23 Uhr bis 07:03 Uhr verläuft (vgl. Abbildung 5.14 (a)). Die Geschwindigkeitsprofile der Einzeltrajektorien (Abbildung 5.14 (b, c, d)) zeigen durchweg eine gleichmäßige Verzögerung über eine

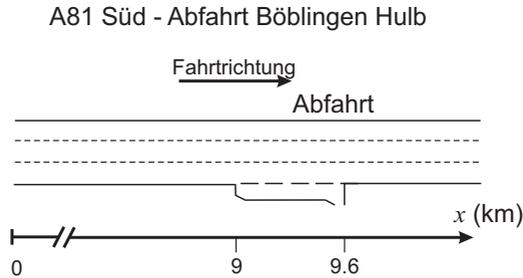


Abbildung 5.13: Autobahn A81 Süd von Herrenberg kommend Richtung Stuttgart. Gezeigt ist die Abfahrt Böblingen-Hulb

Minute, die als ungefährlich betrachtet werden kann. Im Gegensatz zu dem vorherigen gestauten Verkehr mit mehreren stromaufwärtigen Staufronten, ist dieses Beispiel weitaus weniger komplex.

5.2.4.3 Komplexität von gestautem Verkehr

Um die Komplexität des Gefährdungspotenzials von Staufronten in gestautem Verkehr weiter zu vertiefen, wird nochmals auf das vorherige gestaute Verkehrsmuster in Abbildung 5.12 eingegangen: Neben den ersten drei Trajektorien, zeigen Abbildung 5.12 (e, f) zwei weitere Geschwindigkeitsprofile von Einzeltrajektorien zu einem späteren Zeitpunkt. Diese Fahrzeuge erfahren nicht die stromaufwärtige Staufont des sich bewegenden breiten Staus erster Ordnung, sondern stromaufwärtige Staufonten des synchronisierten Verkehrs erster Ordnung. Das zweite genannte Beispiel (Abschnitt 5.2.4.2) zeigt stromaufwärtige Staufonten erster Ordnung, die **keinen** großen Geschwindigkeitseinbruch aufweisen. Während die bereits beschriebenen Beispiele simple gestaute Muster sind, weisen typische gestaute Verkehrsmuster auf Schnellstraßen weitaus komplexere Phänomene und Staufonten auf. Für diesen Fall wird ein weiteres Beispiel dargelegt: auf der A5 Nord Richtung Frankfurt wurde ein ca. 21 km langer Abschnitt extrahiert. Auf diesem Abschnitt sind insgesamt fünf Auffahrten und vier Abfahrten. Ab Kilometer 11.1 ist dieser Abschnitt dreispurig (vgl. Abbildung 5.15).

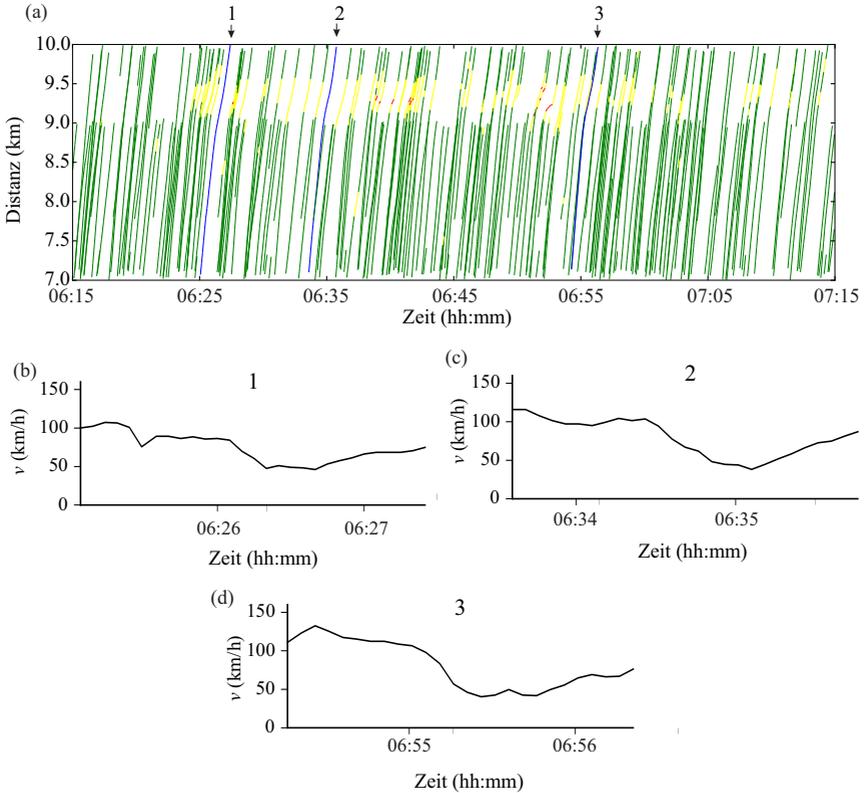


Abbildung 5.14: Gemessene FC Daten auf der A81 Richtung Stuttgart (SB) am 27.04.2017. (a) Gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm über knapp 1 km in der Morgenstunde von 06:15 Uhr bis 07:15 Uhr. (b, c, d) Geschwindigkeitsprofil von Fahrzeugen (Nummerierung gemäß der Pfeile in (a))

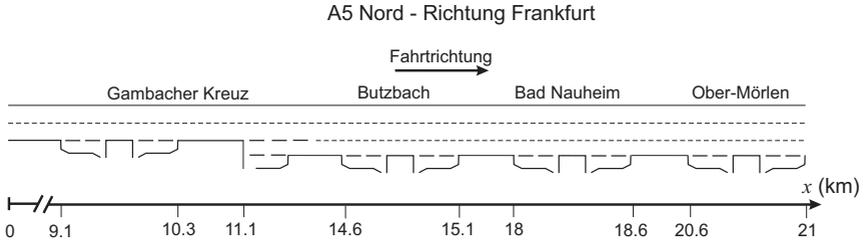


Abbildung 5.15: Autobahn A5 Nord Richtung Frankfurt. Gezeigt sind 21 km Strecke mit Anschlussstellen

Zu diesem Abschnitt zugehörig ist in Abbildung 5.16 (a) das entsprechende Verkehrsmuster gezeigt. Beginnend in der Morgenstunde von 07:30 Uhr bis 9:30 Uhr sind mehrere sich bewegende breite Staus und an den Engstellen synchronisierter Verkehr zu sehen. Typischerweise werden die sich bewegenden breiten Staus nicht von den Engstellen beeinflusst, sondern bewegen sich stromaufwärts durch diese hindurch. Exemplarisch ist eine Einzeltrajektorie im Geschwindigkeitsprofil in (b) dargestellt. Wie in den vorangegangenen Beispielen gezeigt, spiegeln sich auch hier die unterschiedlichen Staufronten erster und höherer Ordnung wider. Während der erste Geschwindigkeitseinbruch (um ca. 08:18 Uhr) der höchste ist, erfährt dieses Fahrzeug weitere Staufronten, die unterschiedlich klassifiziert werden.

5.2.5 Dynamik von Einfahrten an der Staufront

Um die Dynamik von Staueinfahrten an der stromaufwärtigen Staufront zu zeigen, reicht die alleinige Betrachtung der Einzeltrajektorien nicht aus. Die Analyse der vorangegangenen Verkehrsmuster zeigt unterschiedliche Phänomene der Geschwindigkeitseinbrüche von Staueinfahrten. Zunächst ist bei einem simplen Verkehrsmuster mit einem sich bewegenden breiten Stau (wie in Abbildung 5.12) ein ansteigendes und abflachendes Potenzial der Gefährdung zu erkennen.

Abbildung 5.17 zeigt die Geschwindigkeitseinbrüche für das jeweilige Staumuster über die Zeit verteilt. Für das simple Muster mit einem sich bewegenden breiten

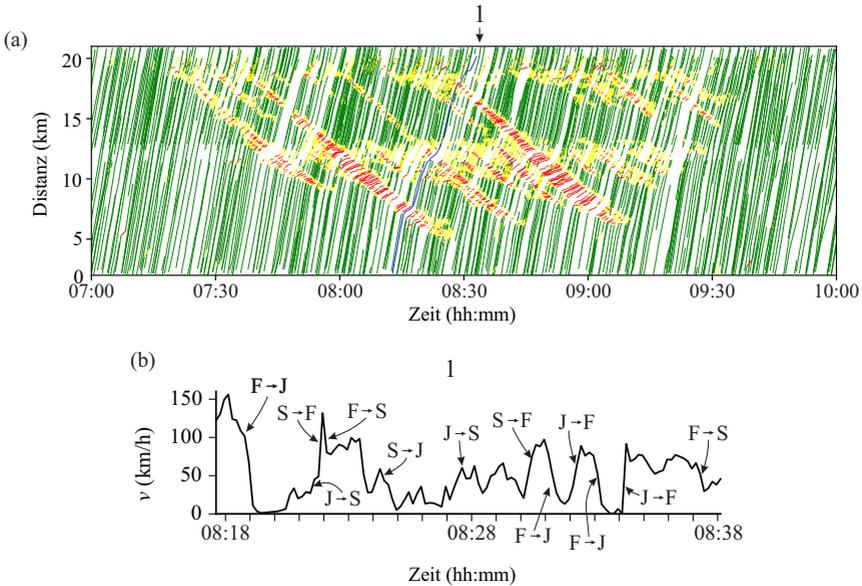


Abbildung 5.16: Gemessene FC Daten auf der A5 Richtung Frankfurt (NB) am 08.05.2017. (a) Gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm über knapp 20 km in der Morgenstunde von 07:00 Uhr bis 10:00 Uhr. (b) Geschwindigkeitsprofil von einem Fahrzeug (Nummerierung gemäß des Pfeils in (a))

Stau und synchronisiertem Verkehr an der Engstelle, lässt sich ein ansteigendes Gefährdungspotenzial von 17:40 Uhr (Beginn des sich bewegenden breiten Stau) bis 18:30 Uhr (Ende des sich bewegenden breiten Staus) beobachten. Danach sind nur noch vereinzelt starke Geschwindigkeitseinbrüche zu erkennen.

Das Verkehrsmuster, das nur einen Bereich des synchronisierten Verkehrs aufweist, zeigt dabei keinerlei Anstieg, sondern verbleibt konstant bei einem Geschwindigkeitseinbruch von rund 90 km/h .

Das komplexe Verkehrsmuster mit mehreren sich bewegenden breiten Staus weist ein ähnliches Verhalten auf wie das erste Verkehrsmuster: Einen Anstieg der Geschwindigkeitseinbrüche zu Beginn, der für ca. 1 Stunde konstant gehalten wird, gefolgt von einem Abflachen gegen Ende des gestauten Verkehrsmusters.

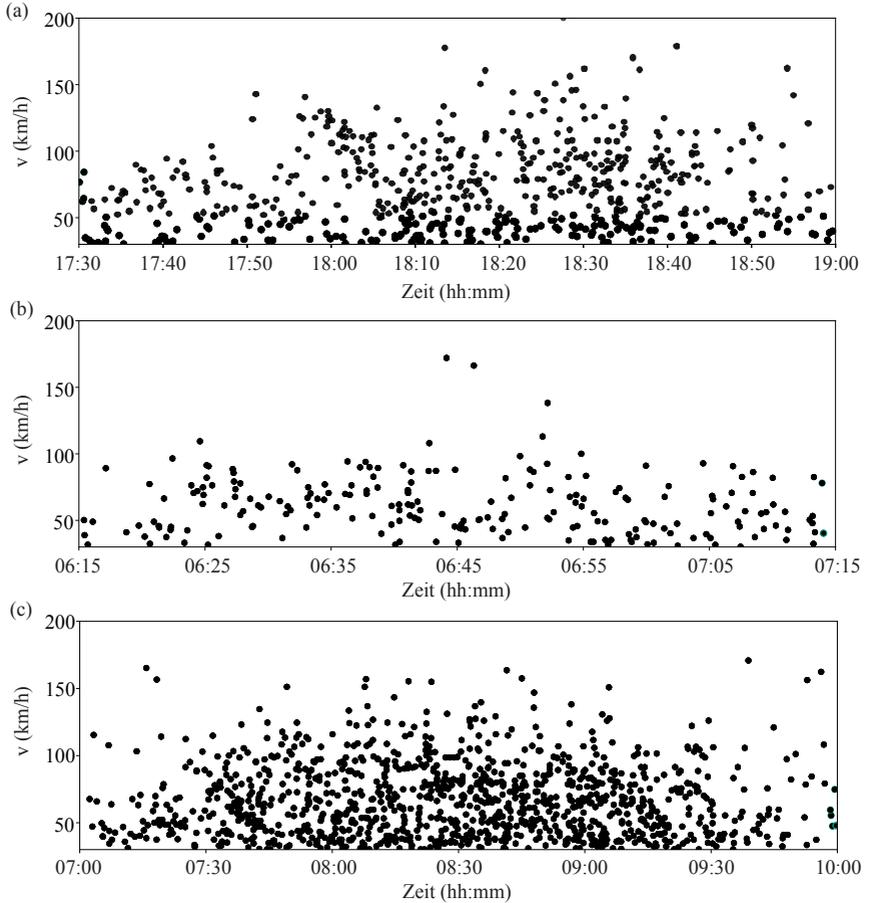


Abbildung 5.17: Geschwindigkeitseinbrüche $\Delta\phi(t_i)$ für die drei untersuchten Tage. (a) A81 Richtung Stuttgart (NB) am 13.11.2016, (b) A81 Richtung Stuttgart (SB) am 27.04.2017, (c) A5 Richtung Frankfurt (NB) am 08.05.2017

Somit lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- ein gestautes Verkehrsmuster beginnt mit niedrigen Geschwindigkeitseinbrüchen
- sich bewegende breite Staus erhöhen die Geschwindigkeitseinbrüche bis zu einem gewissen Maximum (ca. 140 km/h)
- das Abflachen der Geschwindigkeitseinbrüche ist ein Indiz für die Auflösung des gestauten Verkehrsmusters

5.2.5.1 Staufronten in $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen

Ein ähnliches Phänomen lässt sich bei einem gestauten Verkehrsmuster mit $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen (siehe Kapitel 4) beobachten: kleine Bereiche mit Geschwindigkeitseinbrüchen um die 100 km/h sind deutlich mit ansteigender und abflachender Kurve zu identifizieren. Hierzu wird ein weiteres Beispiel auf der A81 Süd Richtung Stuttgart an der Ab-/Auffahrt Sindelfingen gezeigt (vgl. Abbildung 5.18). Von ca. 15:25 Uhr bis 15:45 Uhr lassen sich für 20 Minuten erhöhte Geschwindigkeitseinbrüche beobachten, gefolgt von ca. 10 Minuten in denen keine (vereinzelt kleine) Geschwindigkeitseinbrüche zu sehen sind. Kurz darauf entsteht wiederum ein kleiner Bereich synchronisierten Verkehrs mit erhöhten Geschwindigkeitseinbrüchen für 10 Minuten an der Engstelle. Der Verkehr erholt sich jedoch ein zweites Mal für 10 Minuten, bevor es dann vollends zum Zusammenbruch führt (um 16:15 Uhr). Die Geschwindigkeitseinbrüche zeigen dies mit einem Δv von ca. 120 km/h . Die Abfolge von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen kann somit ein Indiz für einen Zusammenbruch an einer Engstelle sein und gefährliche Situationen vorhersagen.

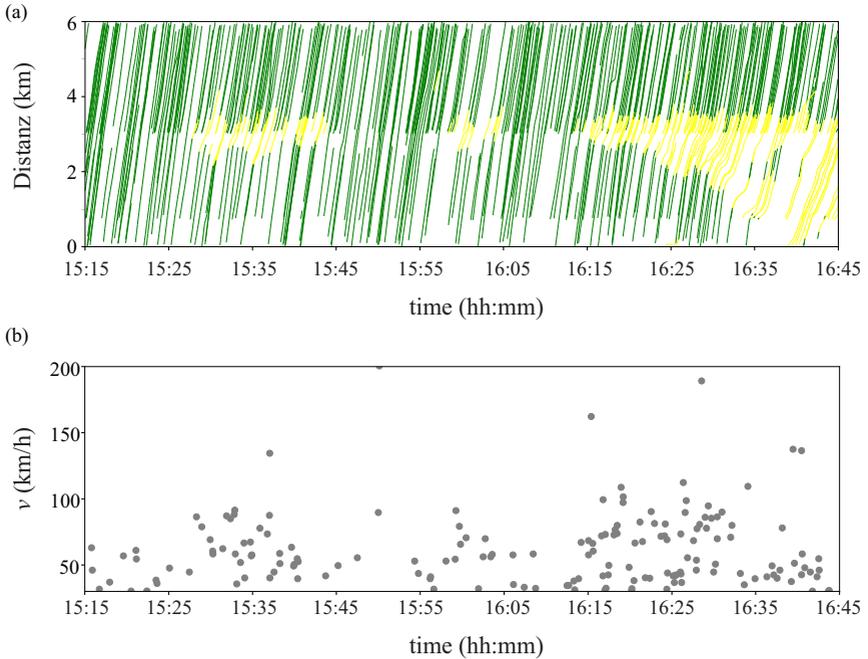


Abbildung 5.18: (a) Ein gestautes Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart an der Abfahrt Sindelfingen mit zwei aufeinanderfolgenden F→S→F Übergängen, (b) Geschwindigkeitseinbrüche $\Delta\phi(t_i)$

5.3 Dynamik der Geschwindigkeitseinbrüche innerhalb eines gestauten Verkehrsmusters

Betrachtet man die Staufront eines synchronisierten Staumusters nun mit dem zusätzlichen Parameter Δv ergibt sich zusammen mit den zeitlich-räumlichen Parametern ein dreidimensionaler Bereich: sozusagen eine Wand. In diesem Zusammenhang wird die Staufront zu einer sich ausbreitenden Wand, die abhängig von Δv höher oder niedriger ist. Jedes Fahrzeug, das zum Zeitpunkt eines gestauten Verkehrsmuster die Engstelle passiert, muss die Wand "durchfahren". Je höher

die Wand ist, desto größer ist der theoretische Geschwindigkeitsunterschied an dieser Stelle.

5.3.1 Das Konzept der Stauwand

Zur Beschreibung einer Stauwand ist der zeitlich-räumliche Verlauf und der Geschwindigkeitseinbruch Δv relevant. Es wurden drei charakteristische Fahrten in einen Stau identifiziert, die in Abbildung 5.19 schematisch dargestellt sind. Die vorangegangenen Beispiele der empirischen Geschwindigkeitseinbrüche an einer Staufront zeigen vornehmlich die Eigenschaften der Trajektorien 1, 2 und 3 in Abbildung 5.19 (a). Fahrzeug 1 bremst langsam über einen längeren Zeitraum ab, Fahrzeug 2 kann weitgehend ungehindert die Engstelle passieren, wohingegen Fahrzeug 3 eine signifikante Verzögerung vornehmen muss. Diese grundlegend verschiedenen Verhalten bei Einfahrt in einen Stau können dabei in kurzen Zeitabständen zusammen vorkommen. Durch den unterschiedlich hohen Wert der Verzögerung, kann über die Zeit der Wert Δv aufgetragen werden, der nun das Potenzial der Gefährdung verdeutlicht: Innerhalb kurzer Zeit kann die Einfahrt in den Stau unterschiedlich wahrgenommen werden. Im generellen Fall eines gestauten Verkehrsmusters kann ein Gefährdungspotenzial an der Staufront durch

$$\Delta v = v_{free} - v_{min} \quad (5.7)$$

bestimmt werden.

Die Kombination ergibt nun einen zeitlichen Verlauf des Gefährdungspotenzials über das gesamte gestaute Verkehrsmuster. Da jedes Fahrzeug an unterschiedlichen Positionen von v_{free} zu v_{min} verzögert und somit die Staufront passiert, verläuft die Stauwand in Raum und Zeit (vgl. Abbildung 5.19 (c)). Zusätzlich ist illustrativ eine gewisse Dicke der Stauwand in Abbildung 5.19 (c) zu sehen; diese wird durch den Beginn des Verzögerungsvorgangs (vgl. Formel 5.3) und dem Eintreten der Minimalgeschwindigkeit v_{min} begrenzt. Somit kann die empirische Funktion $\Delta v(x, t)$ als Stauwand bezeichnet werden, bei der für passierende

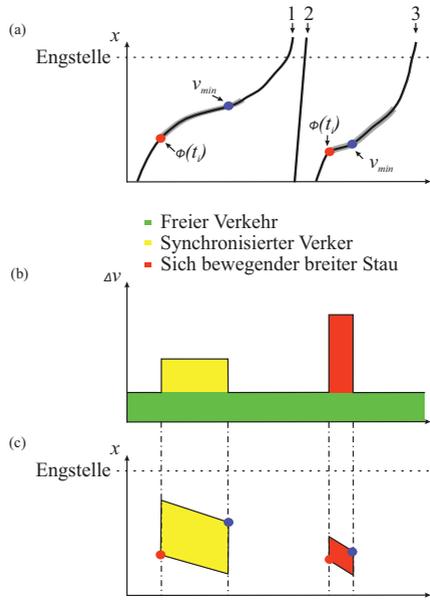


Abbildung 5.19: Qualitatives Schaubild des Konzepts der Stauwand: (a) Drei charakteristische Trajektorien, die eine Engstelle passieren. (b) Qualitative Abbildung von Δv der drei Trajektorien. (c) Zeitlich-räumlicher Verlauf der Stauwand. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)

Fahrzeuge unterschiedlich starke Geschwindigkeitseinbrüche beobachtbar sind. Zusätzlich zeigt Fahrzeug 2 in Abbildung 5.19, dass während kurzen Zeitintervallen eine Stauwand unterbrochen werden kann und Fahrzeuge dementsprechend weitgehend ungehindert die Engstelle passieren können.

5.3.2 Empirischer Nachweis der Dynamik einer Stauwand

Um die Stauwand empirisch darzustellen, wird ein gestautes Verkehrsmuster des synchronisierten Verkehrs am Kreuz Stuttgart auf der Autobahn A8 gezeigt. An

dieser Stelle verläuft die A8 drei- bzw. vierspurig aufgrund der Standstreifenfreigabe bis zum Ende der Abfahrt. Ab Auffahrt verläuft die A8 dann weiter dreispurig (vgl. Abbildung 5.20).

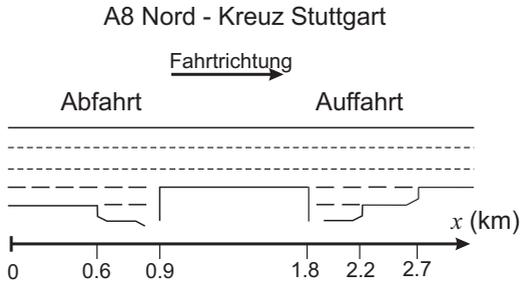


Abbildung 5.20: Autobahn A8 Nord von Kirchheim kommend Richtung Leonberg. Gezeigt ist das Kreuz Stuttgart. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)

Am 14. November 2016 wurde hier am Vormittag von 09:20 Uhr bis 10:50 Uhr ein gestautes Verkehrsmuster des synchronisierten Verkehrs gemessen. Abbildung 5.21 (a) zeigt das komplette Muster im Weg-Zeit Diagramm, (b) zeigt das gleiche gestaute Verkehrsmuster mit Trajektorien, bei denen **kein** signifikanter Geschwindigkeitseinbruch gemessen wurde, (c) zeigt die gemessenen Geschwindigkeitseinbrüche (gemäß Abschnitt 5.1.1) und (d) zeigt den zeitlich-räumlichen Verlauf der Stauwand. Das Verkehrsmuster zeigt einen typischen Verlauf an einer Engstelle mit synchronisiertem Verkehr, bei dem es nicht zu einem kompletten Zusammenbruch des Verkehrs kommt. Vereinzelt erholt sich der Verkehr, das sich in einzelnen Fahrzeuggruppen widerspiegelt, die ungehindert die Engstelle passieren können. Gekennzeichnet sind diese Unterbrechungen in Abbildung 5.21 (b) als Lücken in der qualitativen grauen Stauwand. Im Gegensatz zu (a) sind hier nur Trajektorien zu sehen, die gemäß des Verfahrens zur Erkennung von Bremsvorgängen in diesem untersuchten Abschnitt keine signifikanten Geschwindigkeitseinbrüche aufweisen.

Die Geschwindigkeitseinbrüche zeigen das erwartete Verhalten mit einer steigenden Trendentwicklung von 09:20 Uhr bis ca. 09:40 Uhr mit anschließender abflachenden Trendentwicklung bis ca. 10:00 Uhr. Um 10 Uhr passieren nun

einige Fahrzeuge (4 davon sind Teil der gemessenen Flotte) ohne signifikanten Bremsvorgang die Engstelle. Der weitere Verlauf der Geschwindigkeitseinbrüche zeigt unveränderte Werte im Bereich zwischen $\Delta v = 50 \text{ km/h}$ und $\Delta v = 100 \text{ km/h}$. Der zeitlich-räumliche Verlauf der Stauwand wird in (d) dargestellt. Die Breite der Stauwand korrespondiert zu den Geschwindigkeitseinbrüchen: je breiter die Wand ist, desto größer ist der räumliche Abstand zwischen Beginn des Bremsvorgangs und minimaler Geschwindigkeit. Ein großer Abstand deutet also auf eine lange Phase zum Ausrollen an das Stauende hin. Dementsprechend deutet ein kleinerer Abstand zwischen v_{free} und v_{min} auf eine eher abrupte Verzögerung hin, wie in dem Beispiel zwischen 09:35 Uhr und 09:40 Uhr zu sehen: Dieser Bereich zeigt nicht nur den geringsten Abschnitt, sondern die Stauwand läuft auch stromaufwärts mit einem Wert von -15 km/h , der typisch für sich bewegend breite Staus ist. Der Verkehr bricht jedoch nicht vollständig zusammen, sondern erholt sich nach kurzer Zeit wieder. Es lässt sich anhand der vorliegenden Daten keine Aussage tätigen welche Einflüsse dazu geführt haben, dass kein vollständiger Zusammenbruch erfolgte. Zum Zeitpunkt 09:40 Uhr liegen in diesem Datensatz keine Trajektorien vor. Rückschlüsse auf eine Lücke im gepulskten Verkehr können allerdings nicht gezogen werden, da die Ausstattungsrage nicht ausreichend ist. Erst der weitere Verlauf mit dem abbauenden synchronisierten Verkehr und der stromaufwärts laufenden stromabwärtigen Staufront, in Kombination mit den abschwächenden Bremsvorgängen, bestätigt das Erholen des Verkehrs, bis um ca. 10:00 Uhr. einige Fahrzeuge die Engstelle ungestört passieren können.

Exemplarisch zeigt Abbildung 5.22 drei gemessene Trajektorien an diesem untersuchten Tag, die diesen Abschnitt durchfahren sind. Der Verlauf der mikroskopischen Geschwindigkeit zeigt starke Einbrüche von jeweils 50 km/h und bis fast zum Stillstand (Trajektorie 1b und 1a in Abbildungen 5.21 (a) und 5.22), sowie im Fall von Trajektorie 2 keinerlei Einflüsse und eine nahezu gleichbleibende Geschwindigkeit beim Passieren der Engstelle. Innerhalb einer Stauwand lassen sich also $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge beobachten. Der zeitlich-räumliche Verlauf der Stauwand des synchronisierten Verkehrs folgt, wie in Abbildung 5.21 (d) zu sehen ist,

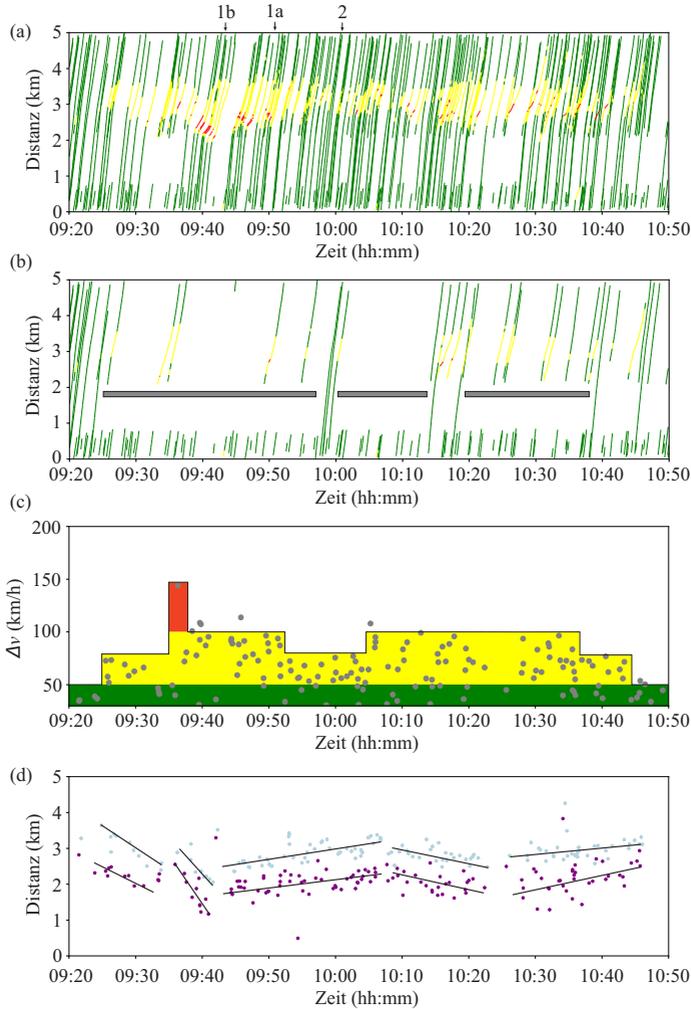


Abbildung 5.21: Gemessene FC-Daten am Kreuz Stuttgart auf der A8. (a) Verkehrsmuster im Weg-Zeit-Diagramm, (b) Verkehrsmuster mit Trajektorien, bei denen **kein** signifikanter Geschwindigkeitseinbruch gemessen wurde, (c) gemessene Geschwindigkeitseinbrüche (gemäß Abschnitt 5.1.1) Einfärbung der Gefährdungsklasse, grün: $\Delta v \leq 50 \text{ km/h}$, gelb: $100 \text{ km/h} > \Delta v \geq 50 \text{ km/h}$ und rot: $\Delta v \geq 100 \text{ km/h}$ (d) zeitlich-räumlicher Verlauf der Stauwand. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)

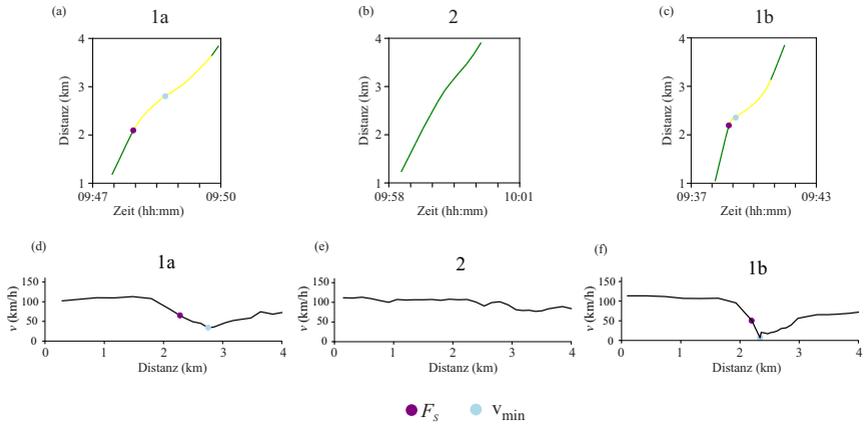


Abbildung 5.22: Entsprechende Trajektorien wie in Abbildung 5.21 markiert. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)

keiner nachvollziehbaren Regel: Eine Vorhersage ist auf Basis der typischen Charakteristiken des gestauten Verkehrs (z. B. eine stromaufwärtige Geschwindigkeit der Staufront von -15 km/h) somit nicht möglich, sondern es bedarf neuer Regeln.

Ein weiteres Beispiel zeigt Abbildung 5.23 mit den entsprechenden mikroskopischen Trajektorien in Abbildung 5.24. Im Gegensatz zum ersten Beispiel auf der A8 erholt sich hier der Verkehr nicht: An der Engstelle bricht der Verkehr zusammen und es entsteht ein sich bewegender breiter Stau ab ca. 18:00 Uhr. Nach dem Zusammenbruch kann kein Fahrzeug die Engstelle ungehindert passieren, wie die beiden exemplarisch herausgenommenen Trajektorien zeigen. Je nach Eintreffen des Fahrzeugs und der jeweiligen Situation muss an der Staufront verzögert werden. Das bereits typische zu beobachtende Muster der zunächst ansteigenden Geschwindigkeitseinbrüche bis zu 175 km/h mit der darauffolgenden abflachenden Flanke beim Auflösen des gestauten Verkehrsmuster, ist auch hier präsent. Im Gegensatz zum ersten Beispiel, ist hier nun nach dem Verkehrszusammenbruch ein sich bewegender breiter Stau entstanden, dessen zeitlich-räumlicher Verlauf mit bestehenden Methoden vorhergesagt werden kann.

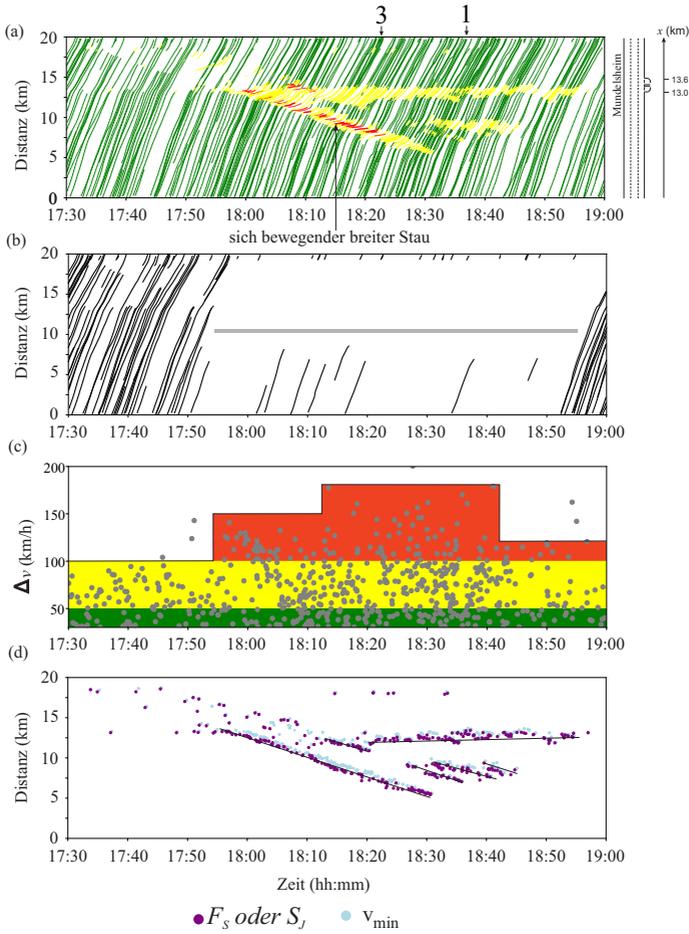


Abbildung 5.23: Gemessene FC-Daten an der Abfahrt Mundelsheim auf der A81. (a) Verkehrsmuster im Weg-Zeit-Diagramm, (b) Verkehrsmuster mit Trajektorien, bei denen **kein** signifikanter Geschwindigkeitseinbruch gemessen wurde, (c) gemessene Geschwindigkeitseinbrüche (gemäß Abschnitt 5.1.1) Einfärbung der Gefährdungsklasse, grün: $\Delta v \leq 50$ km/h, gelb: $100 \text{ km/h} > \Delta v \geq 50 \text{ km/h}$ und rot: $\Delta v \geq 100 \text{ km/h}$ (d) zeitlich-räumlicher Verlauf der Stauwand. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)

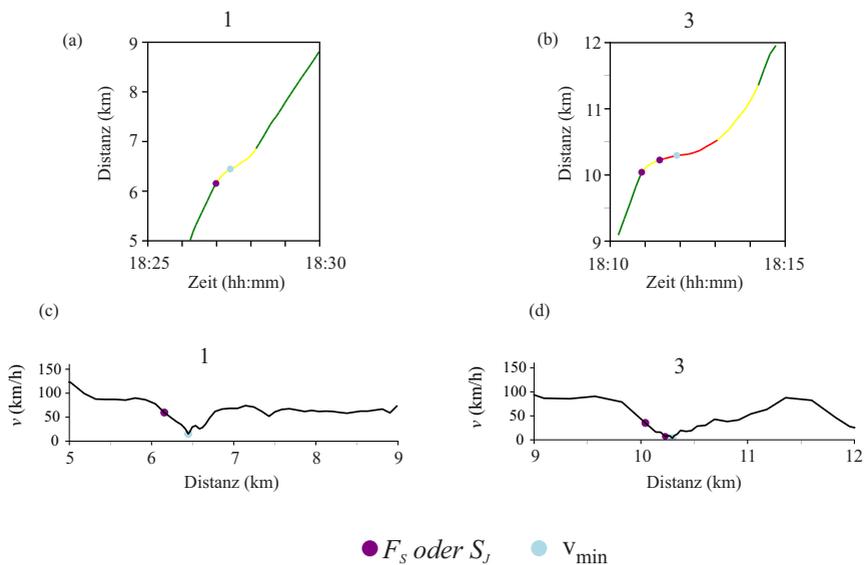


Abbildung 5.24: Entsprechende Trajektorien wie in Abbildung 5.23 markiert. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)

6 Gefährdungsklassen von Staufronten

Die Möglichkeit des serverseitigen Aggregierens und Auswertens von FC Daten aus Massenflotten bietet viele neue Anwendungsmöglichkeiten innerhalb der Verkehrstelematik, wie z. B. die Optimierung des Verkehrsflusses, der Verkehrsplanung oder der Verkehrsbeeinflussung. Durch die ständige Vernetzung moderner Fahrzeuge können inzwischen nicht nur behördliche und zentralisierte Systeme auf die Massendaten und Optimierungen zurückgreifen, sondern entsprechende Services stellen diese Informationen auch einzelnen Fahrzeugen in Echtzeit zur Verfügung. Allem voran steht der Verkehrsdienst, der in heutiger Ausführung zur Unterstützung des eigentlichen Routings dient.

Unter Verwendung mikroskopischer Eigenschaften des Verkehrs können im jeweiligen Fahrzeug neue und verbesserte Anwendungen entwickelt werden, die zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen Molzahn et al. (2017b). Diesen Anwendungen sind die Ergebnisse dieser Arbeit gewidmet. Insbesondere wird hier der Schwerpunkt auf voll vernetzte und (hoch-) automatisierte Fahrzeuge gelegt, die basierend auf Algorithmen, Methoden und Verfahren die Verkehrssicherheit erhöhen sollen. Diese Verfahren wiederum werden durch die kontinuierliche Erhebung und Verarbeitung von FC-Daten (und xFC-Daten) stetig weiterentwickelt und verbessert. Die mikroskopischen Eigenschaften der Staufronten, die in dieser Arbeit untersucht wurden, können zusammen mit den weiteren Erkenntnissen hinsichtlich der Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront für diese Zielsetzung mit vernetzten und automatisierten Fahrzeugen umgesetzt werden.

Eine wichtige Aufgabe dieser Anwendung ist zunächst zu verstehen, wie potentiell gefährlich jede einzelne mikroskopische Staufont in Bezug auf die Verkehrssicherheit ist. Dieser Gefährdungsgrad kann automatisch erkannt und entsprechend Vorschläge zu sicherheitserhöhendem Verhalten getätigt werden. Weiterhin kann nach der Klassifikation des Gefährdungspotenzials an der Staufont die Trajektorienplanung und Fahrstrategie eines (hoch-) automatisierten Fahrzeugs angepasst werden.

Es stellt sich somit die Frage: welcher Gefährdungsgrad lässt sich aus der Untersuchung der mikroskopischen Daten bestimmen? Ziel des folgenden Kapitels ist es, ausführlich dieses Problem "Gefährdungspotenzial der Staufonten" vorzustellen und Lösungen für intelligente Transportsysteme vorzuschlagen. Um eine zuverlässige und anwendungsbezogene Klassifikation des Gefährdungsgrads der Staufont zu gewährleisten, sind die hier verwendeten FC-Daten Basis des Verfahrens.

6.1 Gefährdungspotenzial von Staufonten

Für die Analyse des Gefährdungspotenzials eines gestauten Verkehrsmusters zeigen die Geschwindigkeitseinbrüche für das gesamte Muster eine eindeutige Tendenz (vgl. Kapitel 5.2.5). Zur weiteren detaillierten Betrachtung bedarf es jedoch der Analyse einzelner Staufonten. Dabei wird sowohl auf das Verfolgen einer Staufont (Zusammensetzen von identifizierten Geschwindigkeitseinbrüchen zu einer zusammenhängenden Staufont) als auch auf die Identifikation des Gefährdungspotenzials eingegangen.

6.1.1 Klassifikation des Gefährdungspotenzials in komplexen Verkehrsmustern

Die Klassifikation der unterschiedlichen Geschwindigkeitseinbrüche wird mittels drei Stufen kategorisiert. Qualitativ lassen sich die drei Stufen folgendermaßen beschreiben:

- **Ungefährlich** (G_1)

Die Staufront ist vorhanden und lässt sich erkennen; die Bremsvorgänge sind allerdings nicht stark (Fahrzeug 3 in Abbildung 5.10)

- **Gefährlich** (G_2)

Die Staufront ist für gewöhnlich zweiter oder höherer Ordnung und könnte vereinzelt gefährlich sein (Fahrzeug 1 in Abbildung 5.10)

- **Sehr gefährlich** (G_3)

Die Staufront ist von erster Ordnung und große Geschwindigkeitseinbrüche lassen sich über eine längere Zeit beobachten (Fahrzeug 2 in Abbildung 5.10)

Aus den Verteilungen der Geschwindigkeitseinbrüche lassen sich die Schwellwerte ablesen, die zu den folgenden 3 Unterscheidungen führen. Aufgrund der hohen Dynamik des Verkehrs und der unzureichenden Genauigkeit von GPS, die es nicht ermöglicht die Daten spurgenaue¹ zu erheben, ist eine genaue Definition des Gefährdungspotenzials nicht möglich. Zusätzlich wird eine Situation von Verkehrsteilnehmern individuell als gefährlich wahrgenommen und somit ist das Empfinden einer Verkehrssituation höchst subjektiv. Eine Klassifikation des Gefährdungspotenzials kann daher nur durch grobe Abschätzung vorgenommen werden und einem allgemeinen Trend folgen. Daher wird zu einem gegebenen räumlich-zeitlichen Punkt (x, t) das Gefährdungspotenzial G wie folgt definiert:

$$G(x, t) = \begin{cases} G_3 & \text{wenn } \Delta\phi(t_i) \geq v_3 \\ G_2 & \text{wenn } v_3 > \Delta\phi(t_i) \geq v_2 \\ G_1 & \text{wenn } v_2 > \Delta\phi(t_i) \geq v_1 \\ G_0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.1)$$

¹ Eine spurgenaue Erhebung ist mit Methoden der xFCD-Erhebung möglich: Zum Beispiel durch die zusätzliche Auswertung der Kameradaten des Spurhalteassistenten, kann zu jedem Datenpunkt die relative Spur auf der Fahrbahn übermittelt werden. Alternativ kann auch auf differentiales GPS zurückgegriffen werden, das jedoch im kommerziellen Bereich selten Verwendung findet und damit eine erhebliche Investition beansprucht.

Die Schwellen der Unterscheidung des Gefährdungspotenzials basieren auf den empirischen Untersuchungen der kumulativen Geschwindigkeitskurven von Unfällen mit Frontalaufprall. Aus Gründen der einfacheren Verarbeitung wurden diese auf $v_1 = 0 \text{ km/h}$, $v_2 = 50 \text{ km/h}$ und $v_3 = 100 \text{ km/h}$ gesetzt. G_0 bestimmt hierbei eine Staufont, die keinerlei Gefährdungspotenzial birgt. Wendet man nun dieses Verfahren auf die vorliegenden Daten an, zeigen die jeweiligen Beispiele ein wechselndes Verhalten des Gefährdungspotenzials einer Staufont.

6.1.2 Verfolgung der Staufont

Anhand der drei vorangegangenen Beispiele wird zunächst das Verfahren zur Verfolgung einer Staufont gezeigt (vgl. Kapitel 5.2). Die Rekonstruktion und Verfolgung einer Staufont mittels FC Daten wurde in vielen Veröffentlichungen bereits untersucht (vgl. Kerner et al. (2013), Rempe et al. (2016) und Referenzen). Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Ausführung verzichtet und ausschließlich die Ergebnisse des Verfahrens dargestellt und diskutiert (vgl. Kapitel 5.2). Das räumliche Rauschen der Staufont unterliegt der vorliegenden Datengrundlage: Durch die Intervalle von 5 Sekunden oder 10 Sekunden werden in diesem zeitlichen Rahmen Positionen verwaschen. Hinzu kommt ein möglicher räumlicher Abstand von aufgenommener Position zu rekonstruierter Position aufgrund des Map-matching Verfahrens. Die bereits genannten Verfahren beheben dieses Problem durch Glättung der Staufont während des Verfolgens. Für die Analyse des Gefährdungspotenzials ist die exakte räumlich-zeitliche Rekonstruktion und Entwicklung einer Staufont zweitrangig und wird daher nicht weiter berücksichtigt.

Das erste Beispiel (Abbildung 6.1) zeigt das gestaute Muster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart (vgl. Abschnitt in Abbildung 5.11) bei dem sowohl der synchronisierte Verkehr an der Engstelle als auch die sich bewegenden breiten Staus, die sich an der Engstelle bilden, zu beobachten ist. Um 17:40 Uhr bildet sich eine Staufont, die zunächst an der Engstelle steht und um 18:00 Uhr von einem sich bewegenden breiten Stau aufgehoben wird. Die Staufont des sich bewegenden breiten Staus läuft bis ca. 18:30 Uhr konstant stromaufwärts. In den folgenden

Minuten bildet sich ein weiterer sich bewegender breiter Stau (18:05 Uhr bis 18:20 Uhr), der für ca. 5 Minuten unterbrochen wird und ab 18:25 Uhr für 10 weitere Minuten läuft. Die Staufront an der Engstelle entwickelt sich ab 18:20 Uhr weiter und bleibt konstant. Die Erkennung zeigt eine stabile und konstante Verfolgung der Staufronten.

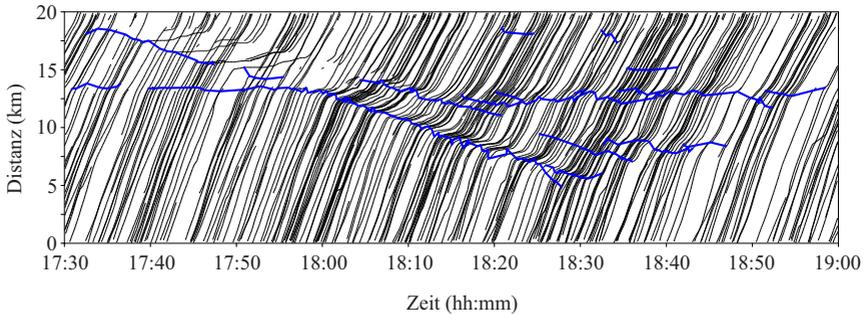


Abbildung 6.1: Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart

Das zweite Beispiel (Abbildung 6.2) zeigt das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart (vgl. Abschnitt in Abbildung 5.13) bei dem ausschließlich synchronisierter Verkehr beobachtbar ist. Die Erkennung zeigt eine kontinuierliche Staufront über das gesamte Verkehrsmuster. Die Fluktuation innerhalb der spezifischen Staufront ist sowohl auf die Auflösung der vorliegenden Daten (vgl. Kapitel 2.2) als auch auf Unterschiede auf den Spuren zurückzuführen.

Das dritte Beispiel (Abbildung 6.3) zeigt das gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt (vgl. Abschnitt in Abbildung 5.15) bei dem sich über die gesamte Dauer des gestauten Verkehrsmusters mehrere sich bewegende breite Staus bilden.

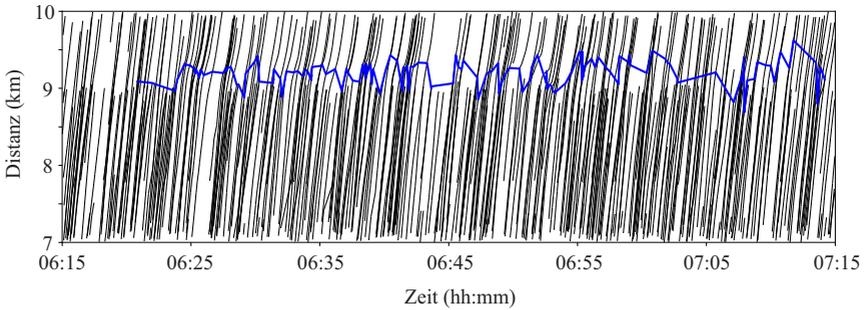


Abbildung 6.2: Identifizierte Staufonten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart

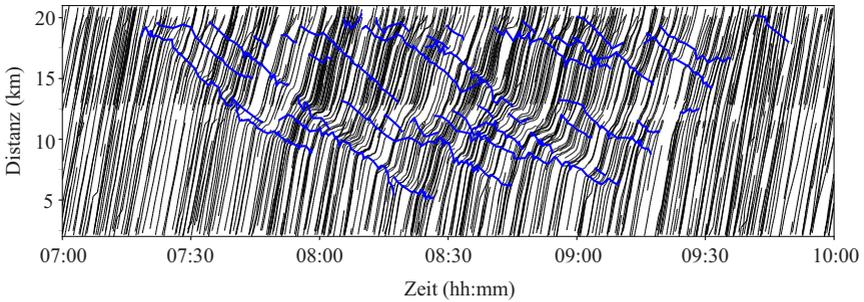


Abbildung 6.3: Identifizierte Staufonten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt

6.1.3 Analyse des Gefährdungspotenzials von Geschwindigkeitseinbrüchen

Neben der Erkennung von Staufonten basierend auf der räumlich-zeitlichen Zuordnung von Geschwindigkeitseinbrüchen, ist für das Gefährdungspotenzial eines Stauendes der Wert Δv relevant. Dieser gibt an, wie stark der Geschwindigkeitsunterschied bei Einfahrt eines Fahrzeugs in den Stau war. In den nachfolgenden Abbildungen 6.4, 6.5 und 6.6 sind für die Staufont bei jeder Einfahrt eines Fahrzeugs der Zeitpunkt und Ort als farbiger Punkt markiert. Die Farbe des Punktes spiegelt dabei die Klassifikation des Gefährdungspotenzials wider. Es gilt G_1 (Ungefährlich) := grün, G_2 (Gefährlich) := gelb und G_3 (Sehr gefährlich) := rot.

Das erste Beispiel (vgl. Abbildung 6.4) zeigt die Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront für das Verkehrsmuster an der A81 Nord in Richtung Stuttgart. Es ist bereits zu erkennen, dass sich die Geschwindigkeitseinbrüche qualitativ über die Dauer einer Staufront unterscheiden lassen. Zu Beginn des Musters können lediglich ungefährliche und gefährliche Staueinfahrten (keine sehr gefährlichen) beobachtet werden, die ab ca. 17:55 Uhr von dem sich bewegenden breiten Stau abgelöst werden. Darauf folgende Staufronten werden als substantiell weniger gefährlich klassifiziert.

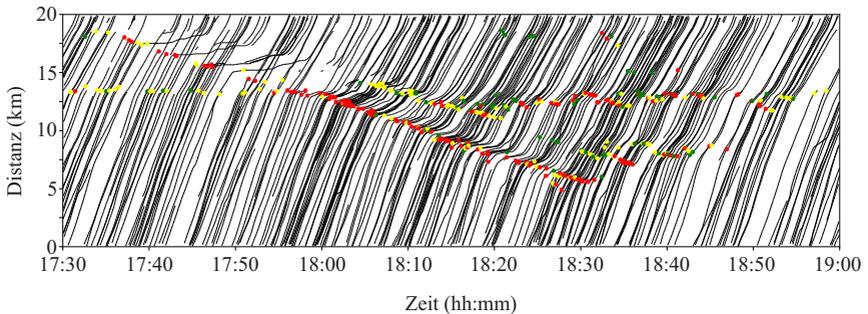


Abbildung 6.4: Identifiziertes Gefährdungspotenzial der Geschwindigkeitseinbrüche gemäß der Klassifikation für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart

Das zweite Beispiel (vgl. Abbildung 6.5) zeigt die Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront für das Verkehrsmuster an der A81 Süd Richtung Stuttgart. Bei diesem Verkehrsmuster trat eine Staufront für das synchronisierte Muster auf. Durchweg zeigen die Geschwindigkeitseinbrüche eine allgemein gefährliche Situation. Es gibt jedoch immer wieder kleine Bereiche mit sehr gefährlichen Geschwindigkeitseinbrüchen, die auf vereinzelte Fahraktionen hindeuten, die den Verkehrsfluss kurzzeitig beeinträchtigen. Für einen kompletten Zusammenbruch reicht es jedoch nicht (metastabiler Verkehrsfluss).

Das dritte Beispiel (vgl. Abbildung 6.6) zeigt die Geschwindigkeitseinbrüche an mehreren Staufronten für das Verkehrsmuster an der A5 Nord Richtung Frankfurt. Vor allem die Staufronten, auf die die Fahrer zuerst auftreffen (Staufronten

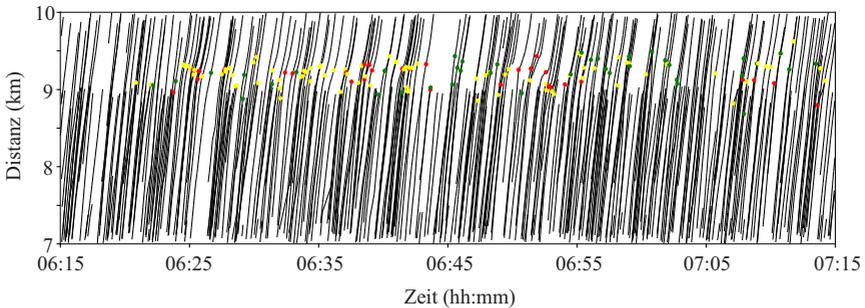


Abbildung 6.5: Identifiziertes Gefährdungspotenzial der Geschwindigkeitseinbrüche gemäß der Klassifikation für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart

erster Ordnung), werden richtigerweise als sehr gefährlich klassifiziert. Staufrenten höherer Ordnung sind generell gefährlich, allerdings können vereinzelt sehr gefährliche Bereiche vorkommen. Vor allem in der Nähe von Engstellen treten ungefährliche Geschwindigkeitseinbrüche auf.

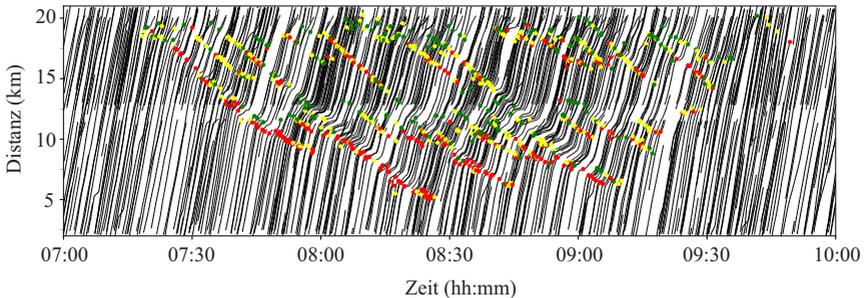


Abbildung 6.6: Identifiziertes Gefährdungspotenzial der Geschwindigkeitseinbrüche gemäß der Klassifikation für das gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt

Prinzipiell spiegelt die Klassifikation einen Trend des Gefährdungspotenzials wider und dient nicht als exakte Aussage, wie stark die Geschwindigkeitseinbrüche am Stauende (an der Staufrent) tatsächlich sind. Dafür stellt neben der Auflösung auch die Spurgenaugigkeit ein Problem dar: Die vorliegenden Daten bieten nicht die ausreichende Genauigkeit für eine spurgenaue Analyse. Dadurch kann das Verfahren die Geschwindigkeitseinbrüche nicht auf unterschiedlichen Spuren

differenzieren. Im realen Verkehr kann es allerdings auf den verschiedenen Fahrspuren zu erheblichen Unterschieden beim Verzögern an das Stauende kommen.

6.2 Trendanalyse des Gefährdungspotenzials einzelner Staufronten

Zur Bestimmung des Gefährdungspotenzials einzelner Staufronten wird die zeitlich-räumliche Erkennung der Staufront mit der Klassifikation der Geschwindigkeitseinbrüche kombiniert. Auf diese Weise ist es möglich für eine isolierte Staufront das Gefährdungspotenzial herauszufiltern, zu analysieren, einen Trend zu erkennen und diesen ggfs. fortzuschreiben. Mit der Verfolgung der Staufront und der Zusammensetzung einzelner Verkehrszustände mehrerer Trajektorien zu einem zeitlich-räumlichen Verlauf, ist das Ergebnis des Verfahrens ein entlang des Verlaufs der Staufront in unregelmäßigen Abständen die Bestimmung der Geschwindigkeitseinbrüche. Die Unregelmäßigkeit ist dadurch begründet, dass das Verfahren einen zeitlich-räumlichen Raum aufspannt, um mögliche Verkehrszustände in der unmittelbaren Nähe der Staufront zuzuordnen. Innerhalb des Raums kann an beliebiger Stelle nun ein Verkehrszustand identifiziert worden sein. Es ergeben sich somit zeitliche Lücken, in denen man keine expliziten Informationen über den Zustand der Staufront hat. Die Möglichkeit zur Erhebung flächendeckender Massendaten ist zurzeit jedoch nur in Kombination mit einer vergleichsweise hohen Abtastrate von 5 Sekunden oder 10 Sekunden möglich, um das Datenaufkommen so gering wie möglich zu halten. Auch zusätzliche Informationen, die eine Lokalisierung verbessern würde, wie z. B. die gefahrene Fahrspur, sind nicht bekannt. Da für jede Staufront zu einem beliebigen Zeitpunkt das Gefährdungspotenzial vorliegen muss, ist es notwendig die zeitlich gestreuten Informationen zu glätten.

6.2.1 Trend des Gefährdungspotenzials empirischer Staufonten

Um den Trend von dem Gefährdungspotenzial zu zeigen, werden die Staufonten der bereits gezeigten gestauten Verkehrsmuster genutzt. Die Staufonten zeigen zunächst ein stabiles Verhalten hinsichtlich der Geschwindigkeitseinbrüche: Abbildung 6.7 (a) zeigt das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart bei der Abfahrt Mundelsheim. Die identifizierten Staufonten sind entsprechend der Entstehung aufsteigend nummeriert. Exemplarisch sind hier zwei Staufonten mit den jeweils zugehörigen Geschwindigkeitseinbrüchen über die Zeit dargestellt (blaue Punkte in Abbildungen b, c). Die Linie stellt den gleitenden Median² der Geschwindigkeitseinbrüche dar. Das Beobachtungsfenster enthält 10 Werte.

Staufont 1 läuft zunächst mit Geschwindigkeitseinbrüchen von 60 km/h, wird über 10 Minuten kontinuierlich höher und endet bei knapp unter 100 km/h; zu diesem Zeitpunkt trifft sie räumlich auf die Engstelle (Abfahrt Mundelsheim). Staufont 2 beginnt um 17:40 Uhr direkt an der Engstelle und verläuft zunächst räumlich neutral. Die Geschwindigkeitseinbrüche zeigen keine hohen Werte (von 30 km/h bis 70 km/h), die nach Eintreffen der Staufont 1 auf die Engstelle höher werden. Ab 17:56 Uhr bewegt sich die Staufont stromaufwärts mit einem substantiellen Anstieg in dem Gefährdungspotenzial bis zu Geschwindigkeitseinbrüchen von 140 km/h. Im weiteren Verlauf der Staufont entwickelt sich ein rückläufiger Trend der Geschwindigkeitseinbrüche (von 18:02 Uhr bis 18:12 Uhr), bevor um 18:16 Uhr wieder ein Anstieg erkennbar ist. Zum Ende der Staufont pendeln sich die Geschwindigkeitseinbrüche bei ca. 100 km/h ein.

Im Gegensatz zu dem vorangegangenen Beispiel, zeigt das zweite Beispiel auf der A81 Süd Richtung Stuttgart an der Abfahrt Böblingen-Hulb lediglich eine

² Hier wird auf den gleitenden Median (im Gegensatz zu dem weit verbreiteten gleitenden Mittelwert für Zeitreihenanalysen) zurückgegriffen, da dieser robuster gegenüber Ausreißern ist. Bei der Trendanalyse des Gefährdungspotenzials sollten einzelne abrupte Bremsmanöver keine starken Auswirkungen auf den allgemeinen Trend der Gefährdung der Staufont haben.

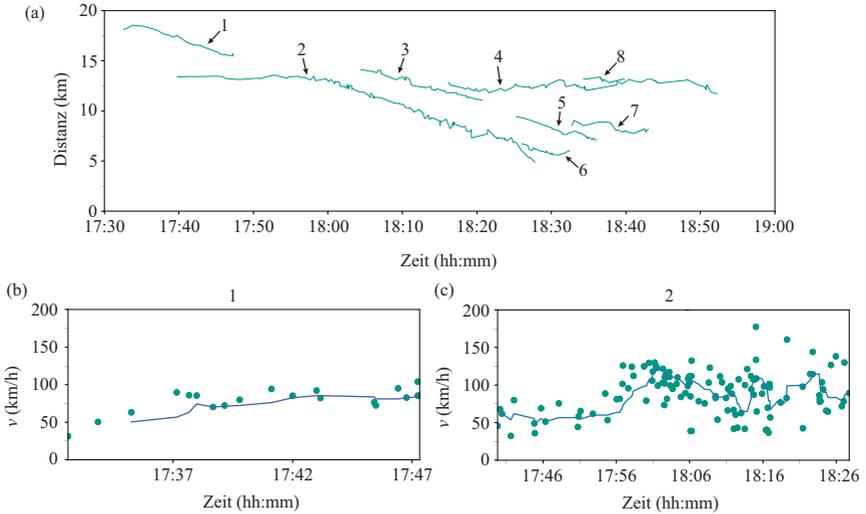


Abbildung 6.7: (a) Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart, (b) Geschwindigkeitseinbrüche für die Staufront 1, (c) Geschwindigkeitseinbrüche für die Staufront 2 (gemäß den Beschriftungen in (a))

kontinuierliche Staufront für den synchronisierten Verkehr (vgl. Abbildung 6.8). Diese zeigt zu Beginn einen gleichmäßigen Verlauf der Geschwindigkeitseinbrüche mit Werten um die 75 km/h . Um ca. 06:50 Uhr lässt sich ein kurzzeitiger Anstieg mit Geschwindigkeitseinbrüchen bis zu vereinzelt 140 km/h beobachten, die im gleitenden Median auf ca. 90 km/h geglättet werden. Anschließend bleiben die Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront konstant bei 60 km/h .

Das komplexe gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt weist weitaus mehr Staufronten auf: Insgesamt wurden 21 identifiziert (vgl. Abbildung 6.9). Exemplarisch sind hier vier Staufronten gezeigt. Staufront 1 ist zunächst die Staufront erster Ordnung, die zu Beginn Geschwindigkeitseinbrüche von ca. 60 km/h aufweist. Ab 07:30 steigt der gleitende Median auf ca. 90 km/h an und steigt kontinuierlich weiter bis ca. 110 km/h . Gegen Ende der Staufront ist ein Einbruch auf ca. 50 km/h zu beobachten. Als Staufront höherer Ordnung wurde die Staufront 6 ausgewählt: Die Geschwindigkeitseinbrüche zeigen einen konstanten Anstieg von ca. 50 km/h auf 90 km/h . Trotz der relativen höheren Ordnung der Staufront,

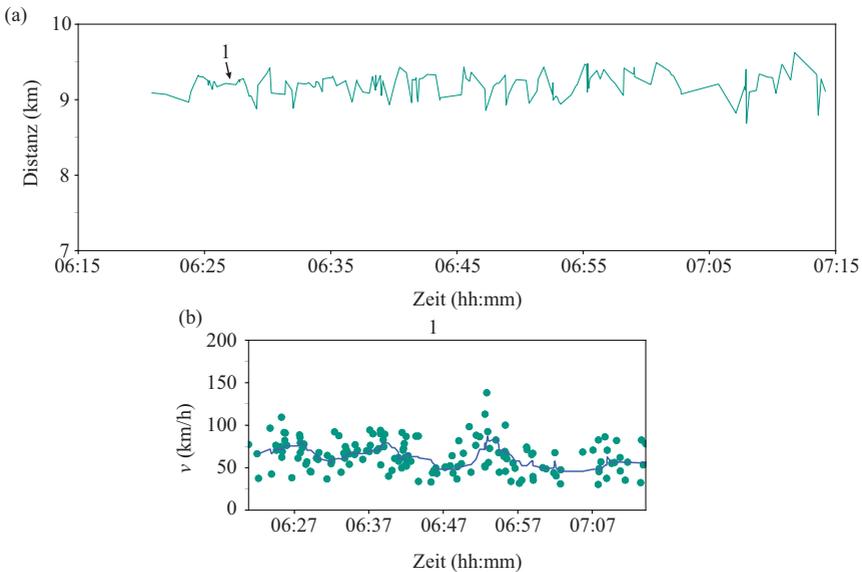


Abbildung 6.8: (a) Identifizierte Staufonten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart, (b) Geschwindigkeitseinbrüche für die einzige Staufont 1 (gemäß der Beschriftung in (a))

liegt der räumliche Abstand zwischen den Staufonten bei bis zu 5 Kilometer – in diesem Raum wird im freien Verkehr gefahren. Der Wechsel von Staufont höherer Ordnung zu erster Ordnung ist bei Staufont 7 zu beobachten: Solange diese Staufont eine höhere Ordnung aufweist (von 08:05 Uhr bis 08:30 Uhr) liegen die Geschwindigkeitseinbrüche bei um die 90 km/h . Sobald der Wechsel in der Ordnung der Staufont stattfindet und nun Fahrzeuge das erste Mal einen Geschwindigkeitseinbruch erleben, springen die Werte auf ca. 140 km/h und pendeln sich zum Ende hin bei 100 km/h ein. Ein ähnliches Verhalten ist bei Staufont 11 zu sehen: Bis 08:45 Uhr gilt eine höhere Ordnung für diese Staufont. Nichtsdestotrotz gibt es einen kontinuierlichen Anstieg der Geschwindigkeitseinbrüche, die vom Wechsel der Ordnung bestärkt wird und bis auf 120 km/h ansteigt.

Anhand dieser plakativen Beispiele der Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufont und der Glättung der empirischen Daten durch den gleitenden Median lässt

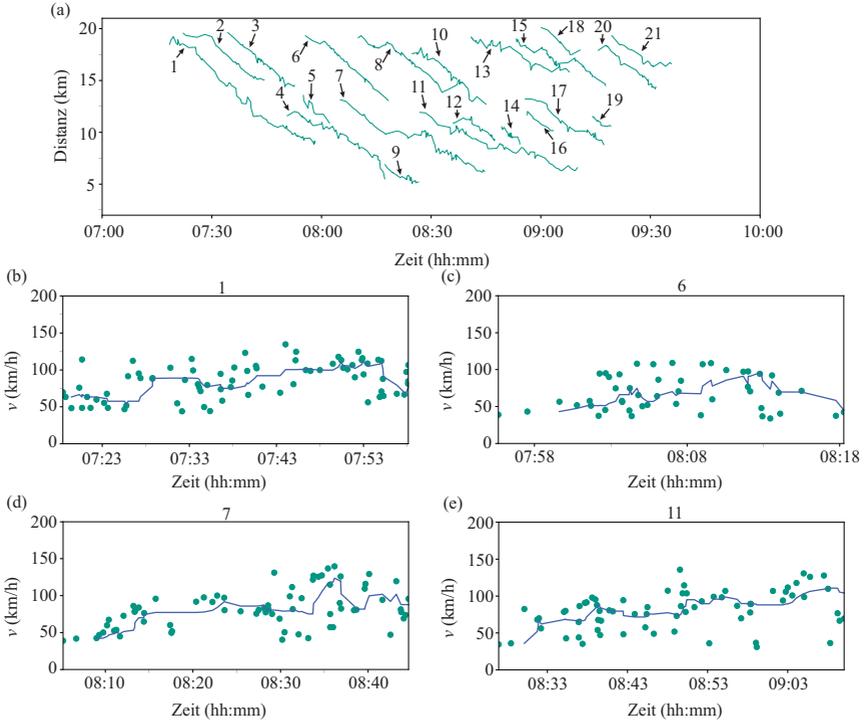


Abbildung 6.9: (a) Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt, (b, d, e) Geschwindigkeitseinbrüche für die Staufronten 1, 6, 7 und 11 (gemäß der Beschriftungen in (a))

sich ein Verlauf der Geschwindigkeitseinbrüche (und damit einhergehend die Klassifikation des Gefährdungspotenzials) erkennen.

6.2.2 Einteilung der Staufrent in Gefährdungsklassen

Die Trendentwicklung wird nun als Indikator des Gefährdungspotenzials herangezogen und teilt die Staufrent in die vorgestellten Gefährdungsklassen (G_1 , G_2 oder G_3) ein.

In der traditionellen Zeitreihenanalyse werden Trendmodelle (bzw. Trend-Saison-Modelle) häufig eingesetzt. Mittels eines mathematischen Modells, das folgende Komponenten enthält: (i) Trendkomponente, (ii) Saisonkomponente und (iii) Rauschkomponente, erfolgt die Modellierung. In dem Fall der Modellierung der Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront wird die Saisonkomponente vernachlässigt, weil sich keine wiederkehrenden Muster innerhalb einer Staufront erkennen lassen.

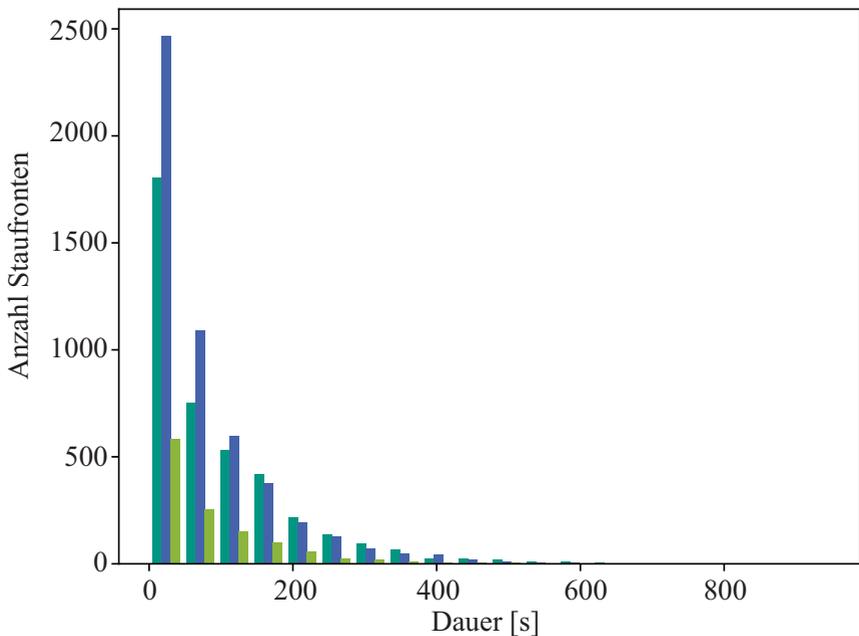
6.3 Statistische Auswertung der Gefährdungsklassen

Die Ergebnisse der Analyse von einzelnen Staufronten zeigt, dass das Gefährdungspotenzial einem gewissen Verlauf folgt. Der Verlauf des Medians bietet nun die Möglichkeit zu jedem Zeitpunkt in der Staufront die Gefährdungsklasse zu bestimmen. Somit wurde jede Staufront, die in den drei entsprechenden Datensätzen vorkommt, extrahiert und mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren analysiert. Dabei wurden die Gefährdungsklassen einer Kategorie entlang der Staufront zusammengefasst: Somit ergeben sich zusammenhängende Staufronten, die aus mehreren Gefährdungsklassen bestehen. Je nach dem wie stark die Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront schwanken, kann eine Staufront mehr oder weniger unterschiedliche Gefährdungsklassen aufweisen. Zusätzlich findet auch ein Wechsel zwischen den Klassen statt. Tabelle 6.1 stellt die Anzahl der unterschiedlichen Gefährdungsklassen und die durchschnittlichen Werte der Geschwindigkeitseinbrüche für die jeweiligen untersuchten Datensätze dar.

Da die Anzahl der untersuchten Tage und die Länge der Strecken verschieden sind, kann man nicht zwischen den Datensätzen vergleichen. Zusätzlich sind die jeweiligen Gegebenheiten der Strecke grundlegend verschieden. Es ist jedoch gut zu erkennen, dass die jeweiligen Anteile der einzelnen Gefährdungsklassen untereinander ähnlich sind: *G1* macht ca. 25 %, *G2* ca. 60 % und *G3* ca. 15 % aus. Die jeweiligen durchschnittlichen Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront

Tabelle 6.1: Anzahl und durchschnittliche Geschwindigkeit der Gefährdungsklassen

Datensatz	Anzahl			Ø Geschwindigkeit			
	A8	A5	M4	A8	A5	M4	
Klassen	1	4.137	1.760	4.303	39,59	39,85	40,04
	2	5.074	3.659	9.041	69,56	72,52	71,42
	3	1.219	1.207	955	128,79	123,01	116,22

**Abbildung 6.10:** Verteilung der Gefährdungsklassen hinsichtlich der Dauer der einzelnen Klassen für den Datensatz der A8. Türkis für G1, blau für G2 und grün für G3

sind bei allen drei Datensätze und Gefährdungsklassen nahezu identisch: Durchschnittlich wird bei der Gefährdungsklasse G1 mit ca. 40 km/h verzögert, bei G2 mit 70 km/h und in der Gefährdungsklasse G3 bremsen die Verkehrsteilnehmer mit ca. 125 km/h ab.

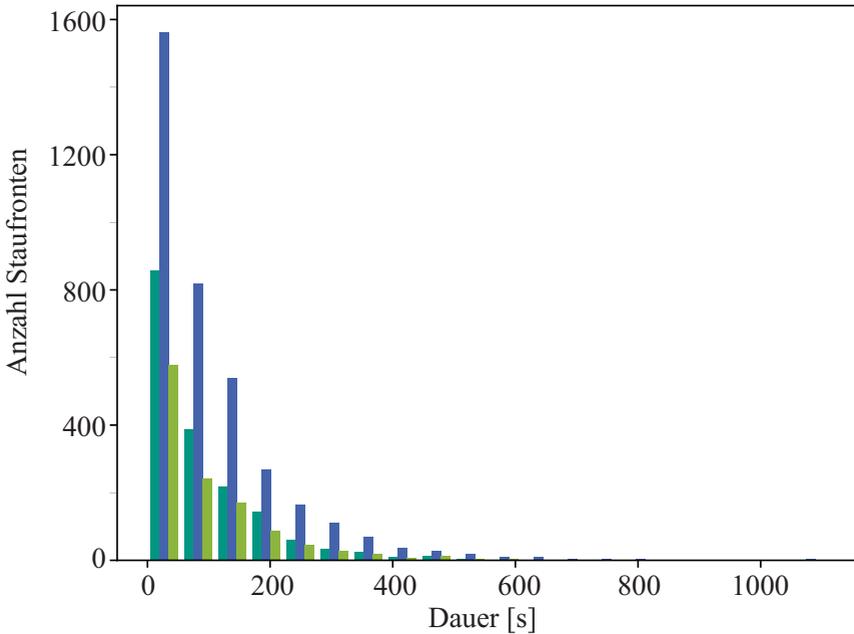


Abbildung 6.11: Verteilung der Gefährdungsklassen hinsichtlich der Dauer der einzelnen Klassen für den Datensatz der A5. Türkis für $G1$, blau für $G2$ und grün für $G3$

Eine weitere interessante Aussage lässt sich aus den Verteilungen der Dauer von den jeweiligen Gefährdungsklassen ableiten. Für die jeweiligen untersuchten Datensätze zeigen Abbildung 6.10 für die A8, 6.11 für die A5 und 6.12 für die M4 die Anzahl der Staufronten über die Dauer (in Sekunden). Türkis zeigt dabei $G1$, blau $G2$ und grün $G3$. Es zeigen sich ähnliche Verteilungen für die jeweiligen Datensätze: Viele kurze Gefährdungsklasse überschatten die wenigen länger andauernden. Dies zeigen auch eindrucksvoll die jeweiligen Boxplots im Anhang A.11 für die A8, A.12 für die A5 und A.13 für die M4. Laut Tabelle A.3 liegt der Median der ersten Gefährdungsklasse bei 60 Sekunden mit dem 1. Quartil bei 20 Sekunden und dem 3. Quartil bei 144 Sekunden. Vergleicht man dies nun mit der Verteilung, sieht man, dass sich diese Werte bereits innerhalb der ersten 3 Bins befinden. Dies lässt sich bei den weiteren Gefährdungsklassen und auch anderen untersuchten Datensätzen beobachten.

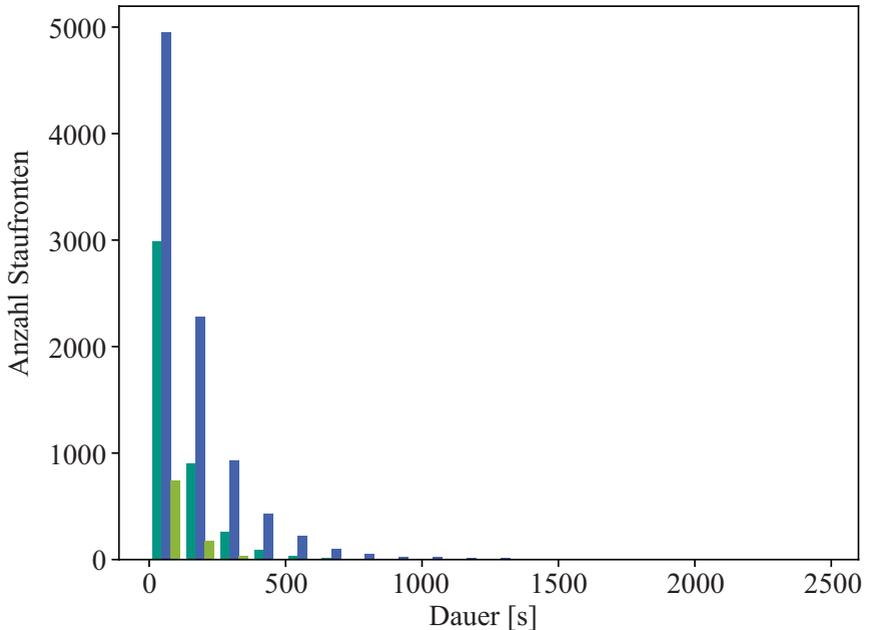


Abbildung 6.12: Verteilung der Gefährdungsklassen hinsichtlich der Dauer der einzelnen Klassen für den Datensatz der M4. Türkis für G1, blau für G2 und grün für G3

6.4 Integration des Gefährdungspotenzials in Stauendewarnsystemen

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren klassifiziert nun die FC Daten aus Massenflotten hinsichtlich des Gefährdungspotenzials. Navigationssysteme, die diesen Service empfangen, können basierend auf entsprechenden Warnungskonzepten (vgl. Tabelle 6.2) den Fahrer auf die Situation vorbereiten. Dabei wird zwischen den drei definierten Gefährdungspotenzialen unterschieden und entsprechende Mechanismen zur Warnung vorgeschlagen. In der klassischen Navigationseinheit eines Fahrzeugs kann eine visuelle Indikation des Stauendes auf der im Zentraldisplay angezeigten Straßenkarte erfolgen. Zusätzlich wird beim

Gefährdungspotenzial G_2 mit entsprechenden Warnhinweisen über die Audioausgabe eine zusätzliche Stufe eingeführt, die beim dritten Gefährdungspotenzial über haptisches Feedback am Lenkrad komplettiert wird. In der Entwicklung von frühen autonomen Fahrfunktionen, die heutzutage serienmäßig eingesetzt werden³, kann aufgrund des Gefährdungspotenzials unterschiedlich vom Fahrzeug reagiert werden: Zunächst kann bei ungefährlichen Stauenden die autonome Fahrfunktion ohne Eingriff des Fahrers fortgeführt werden, da die Systeme ein langsames Heranfahren an ein Stauende problemlos mit den verfügbaren Sensoren bewerkstelligen können. Gleiches gilt für das Gefährdungspotenzial G_2 , bei dem allerdings ein Warnhinweis an den Fahrer ausgegeben wird mit der Aufforderung um erhöhte Aufmerksamkeit. Bei der letzten Gefährdungsklasse wird die volle Kontrolle an den Fahrer übergeben, da die technischen Voraussetzungen der verfügbaren Sensoren ein komfortables Abbremsen nicht gewährleisten können (Molzahn and Rehborn 2017). Ein weiterer Blick auf das Verkehrsmanagement lohnt sich: Da mit diesem Verfahren flächendeckend Stauenden mit dem jeweiligen Gefährdungspotenzial verfügbar sind, können sowohl bestehende als auch zukünftige Methoden und Systeme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit erweitert werden. Als Beispiel wurde hier die variable Geschwindigkeitsanpassung gewählt, die je nach Gefährdungspotenzial früher die Geschwindigkeit herabsenkt und somit das Stauende entschärfen soll.

³ Zum Zeitpunkt des Anfertigens dieser Arbeit sind autonome Fahrfunktion der Level 1 und 2 in kommerziell verfügbaren Fahrzeugen erhältlich.

Tabelle 6.2: Übersicht über das Level des Gefährdungspotenzials und den entsprechenden vorgeschlagenen Maßnahmen

	G1 Nicht gefährlich	G2 Gefährlich	G3 Sehr gefährlich
Fahrzeugspezifisches Infotainmentsystem	Visuelle Indikation des Stauendes auf der Navigationskarte	Visuelle Indikation des Stauendes und einmalige Audioausgabe zur Warnung vor dem Stauende	Visuelle Indikation des Stauendes, haptisches Feedback am Lenkrad und inkrementelle Audioausgabe zur Warnung vor dem Stauende
Autonomes Fahrzeug	Fortführen des autonomen Fahrbetriebs	Fortführen des autonomen Fahrbetriebs mit Hinweis an den Fahrer auf erhöhte Aufmerksamkeit	Übergabe des Fahrbetriebs an den Fahrer
Verkehrsmanagement	Anpassung der variablen erlaubten Höchstgeschwindigkeit bis zu 2 Kilometer vor dem Stauende	Anpassung der variablen erlaubten Höchstgeschwindigkeit bis zu 4 Kilometer vor dem Stauende	Anpassung der variablen erlaubten Höchstgeschwindigkeit bis zu 6 Kilometer vor dem Stauende

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst mittels Positionsdaten aus einer Fahrzeugflotte (FC-Daten) mikroskopische Eigenschaften von Verkehrsphasen herausgestellt und analysiert. Die FC-Daten entstammen einer Flotte vernetzter Fahrzeuge zum Zweck der Erzeugung von Echtzeit-Verkehrsinformationen, indem die Positionsdaten in einem 5- oder 10-sekündlichem Intervall anonymisiert an einen Server übermittelt werden. Auf dem Server wiederum wird die Verkehrslage rekonstruiert und an die vernetzten Fahrzeuge zurück übermittelt, die dann die Verlustzeiten in die Routenberechnung mit einbeziehen.

Im Speziellen wurden lokale Störungen an mehreren Engstellen deutscher Autobahnen analysiert, die häufig vor dem jeweiligen Verkehrszusammenbruch beobachtbar sind. Es stellte sich heraus, dass sog. $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge (Phasenübergänge vom freien zum synchronisierten Verkehr und zurück) an mehreren unterschiedlichen Abschnitten und Engstellen mit dem vorliegenden Datensatz der Fahrzeugflotte messbar sind. Daraus resultiert das Konzept der „Stauwand“ und den entsprechenden Geschwindigkeitseinbrüchen an der Staufront, die zum Gefährdungspotenzial der Staufront führen. Mit der Klassifikation der Geschwindigkeitseinbrüche an der Staufront kann das Gefährdungspotenzial jeder einzelnen Staufront bestimmt werden und somit eine präzise Aussage getätigt werden, wann und wo eine jeweilige Staufront eine potentielle Gefahr für den Verkehrsteilnehmer darstellt.

7.1 Ergebnisse dieser Arbeit

1. Die Analyse von FC-Daten auf deutschen Autobahnen hat ergeben, dass sich lokale Störungen an einer Engstelle vor dem Verkehrszusammenbruch beobachten lassen.
2. In dieser Arbeit wurden mehrere hintereinander vorkommende Regionen von synchronisiertem Verkehr, der sich zu freiem Verkehr erholt, in den FC-Daten nachgewiesen.
3. Die hier verwendeten empirischen FC-Daten zeigen, dass stromaufwärtige Staufronten qualitativ unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich des Geschwindigkeitseinbruchs aufweisen – dargestellt durch Δv : Die Verzögerung eines Fahrzeugs von freiem Verkehr zu gestautem Verkehr an der Staufront entspricht der Funktion $\Delta v(x, t)$, die ein komplexes zeitlich-räumliches Verhalten aufweist. Die empirische Funktion $\Delta v(x, t)$ an der Staufront wird „Stauwand“ genannt.
4. Die Phase des synchronisierten Verkehrs bestimmt maßgeblich den empirischen Geschwindigkeitseinbruch $\Delta v(x, t)$ an der „Stauwand“. Lediglich während kürzerer Unterbrechungen werden die Geschwindigkeitseinbrüche von der Phase der sich bewegenden breiten Staus beeinflusst.
5. Es wurde gezeigt, dass die empirische „Stauwand“ über die Zeit unterschiedlichste Geschwindigkeitseinbrüche an verschiedenen Orten aufweist.
6. Die „Stauwand“ kann sich während kleiner Zeitintervalle auflösen und folglich wieder neu bilden. Der Verkehr an dieser Stelle erholt sich kurzzeitig und vereinzelt können Fahrzeuge die Engstelle ohne größere Beeinträchtigungen passieren.
7. Zur Erhöhung des Komforts und der Sicherheit im Straßenverkehr wurden die Geschwindigkeitseinbrüche an Staufronten analysiert. Zunächst zeigte

sich, dass eine Staufront über die Zeit hinweg unterschiedliche Δv aufweist. Daraus lassen sich drei Klassen des Gefährdungspotenzials ableiten: Ungefährlich, gefährlich und sehr gefährlich.

8. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, kann durch die Kombination des Gefährdungspotenzials und der Verfolgung einer Staufront der Trend des Gefährdungspotenzials einer Staufront über die Zeit hinweg bestimmt werden.

7.2 Ausblick

In den vergangenen Jahren nahm die Entwicklung von Systemen zur Sammlung und Verarbeitung von Echtzeit-Verkehrsdaten stetig zu. Sowohl durch die Verbreitung von Smartphones als auch die Fahrzeugintegration von GPS-Empfängern, verbesserte sich die flächendeckende Abdeckung von Positionsdaten drastisch im Gegensatz zu z. B. stationären Detektordaten. Mit einer entsprechend großen Ausstattung kann demnach jederzeit der Verkehrszustand ermittelt werden.

Gleichwohl können die FC-Daten einer bestimmten Flotte nur einen Bruchteil des gesamten Verkehrsflusses abbilden. Mit dem relativ kleinen Anteil an FC-Daten, der momentan zur Verfügung steht, ist eine zuverlässige automatisierte Erkennung von kurzzeitigen lokalen Störungen nicht möglich. Durch eine Fusion der jeweiligen Daten aus mehreren Quellen (wie z. B. FC-Daten, Detektordaten und videobasiertes Tracking), mit den jeweiligen Stärken, könnten zuverlässigere Ergebnisse erzielt werden. Zur Identifikation von Zustandsübergängen F_S , F_J und S_J wird auf das Verfahren, vorgestellt in Kerner et al. (2013), zurückgegriffen, das auf zeitlichen und räumlichen Abständen basiert, um die Staufront zu verfolgen. Dieses Verfahren zeigte in der Vergangenheit zufriedenstellende Ergebnisse sowohl bei empirischen als auch bei simulierten Verkehrsdaten. Jedoch könnten zukünftig durch die Einführung neuer Verfahren zur Datenverarbeitung und die mittlerweile vorhandene höhere Datendichte genauere Ergebnisse erzielt werden. Denkbar wäre die Erweiterung um einen Algorithmus, der nicht auf starren Schwellwerten basiert.

Wenn ein sich bewegendes breiter Stau aufgrund eines starken Geschwindigkeitseinbruch entsteht, kann eine zuverlässige Kurzzeitvorhersage über den zeitlich-räumlichen Verlauf der Staufront getätigt werden. Somit können Verkehrsteilnehmer vor einer solchen Staufront gewarnt werden (Rempe et al. (2016) und Rehorn et al. (2017)). Voraussetzung dafür sind die Kenntnisse über die Charakteristiken der Propagationsgeschwindigkeit der sich bewegendes breiten Staus. Im Gegensatz dazu weist der synchronisierte Verkehr diese Charakteristiken nicht auf. Dies bedeutet, dass die Vorhersagbarkeit der Staufront synchronisierten Verkehrs weitaus geringer ist als bei sich bewegendes breiten Staus. Für Staufronten, die dem synchronisierten Verkehr zugeordnet sind, bedarf es somit einer weiteren Methode zur Vorhersage des zeitlich-räumlichen Verlaufs.

Die durchschnittliche Zeit zwischen zwei erfassten Fahrzeugen hängt maßgeblich von den gemessenen Tagen (Wochentag oder Wochenende) und den Tageszeiten (Stoßzeiten zu Arbeitsbeginn oder -ende), aber auch von der jeweiligen Infrastruktur und den Eigenheiten des Datensatzes ab. So liegt die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Fahrzeugen in dem in dieser Arbeit verwendeten Datensatz zwischen 8 und 23 Sekunden. Für die Analyse und die Darstellung des Konzepts der „Stauwand“ anhand von Einzelbeispielen ist dieses Intervall ausreichend. Jedoch ist aus den Ergebnissen ersichtlich, dass ein kleineres Intervall (also eine höhere Durchdringungsrate an vernetzten Fahrzeugen) exaktere und robustere Ergebnisse liefern würde. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen eine vielversprechende Basis, die bei höherer Durchdringungsrate zu einem einsatzfähigen Verfahren mit robuster Detektion der „Stauwand“ und damit einhergehend der Erhöhung der Verkehrssicherheit führen kann.

Hinsichtlich des Gefährdungspotenzials von Staufronten wurden die Zustände der Staufront zum jeweiligen Zeitschritt dargelegt, die in je eine Gefährdungsklasse eingeordnet wurden. Hier ist weiterhin denkbar, das Verfahren um eine Kurzzeitprognose zu erweitern. Der zeitliche Verlauf des Gefährdungspotenzials deutet auf einen Trend hin, den es zu analysieren gilt. Dabei sollten Verläufe und Zustandsübergänge des Gefährdungspotenzials sowohl aus historischen Staufronten gelernt werden als auch allgemeingültige Aussagen aus den in dieser Arbeit vorgestellten Statistiken übernommen werden. Die vorliegende Arbeit lieferte eine geeignete

Methode und gute Ergebnisse, wie die Verfügbarkeit zeitlich-räumlicher genauer Verkehrsdaten die Verkehrssicherheit erhöhen kann.

A Anhang

A.1 Empirische Beispiele von Verkehrszusammenbrüchen

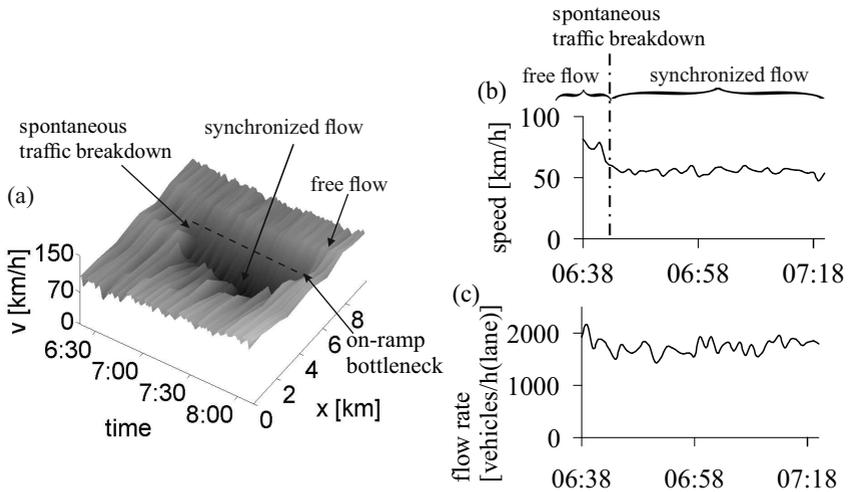


Abbildung A.1: Empirisches Beispiel eines spontanen Verkehrszusammenbruchs an einer Zufahrt (gemessene Detektordaten auf einer dreispurigen Autobahn): (a) Durchschnittliche Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b) Geschwindigkeitsprofil und (c) Verkehrsfluss (Durchschnitt über alle Fahrstreifen) eines Detektors in der Nähe der Zufahrt. Aus Kerner (2004)

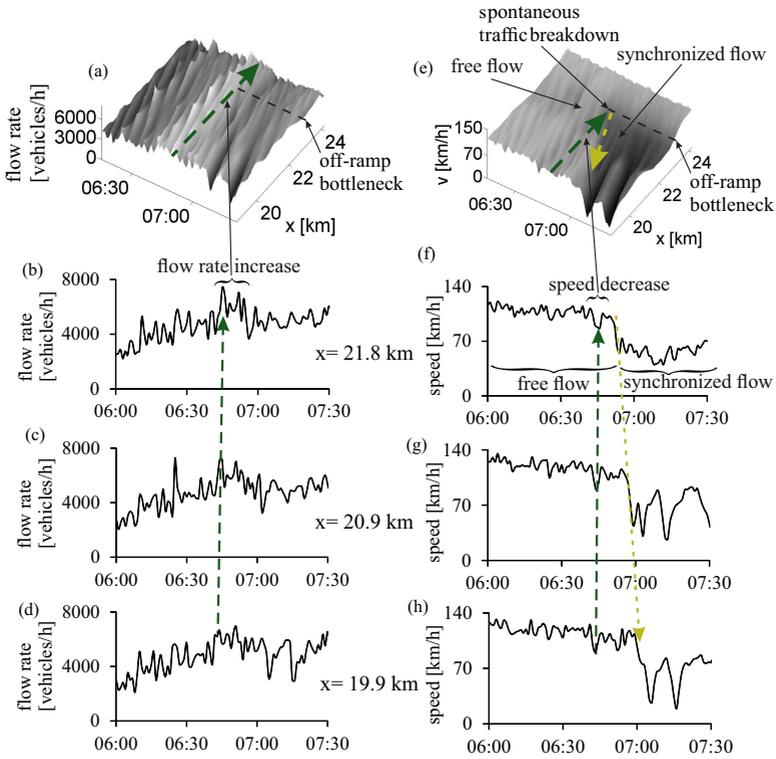


Abbildung A.2: Empirisches Beispiel eines spontanen Verkehrszusammenbruchs. (a-d) Verkehrsfluss und (e-h) durchschnittliche Geschwindigkeit von drei aufeinanderfolgenden Detektoren auf einer dreispurigen Autobahn. Aus Kerner (2004)

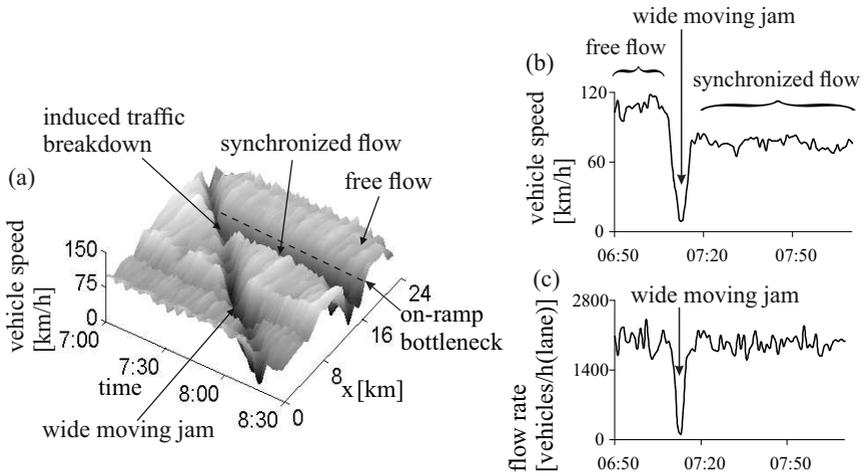


Abbildung A.3: Empirisches Beispiel eines Verkehrszusammenbruchs induziert durch die Ausbreitung eines sich bewegenden breiten Staus an einer Zufahrt. (a) Durchschnittliche Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b) Geschwindigkeitsprofil und (c) Verkehrsfluss (Durchschnitt über alle Fahrstreifen) eines Detektors an der Zufahrt. Aus Kerner (2004)

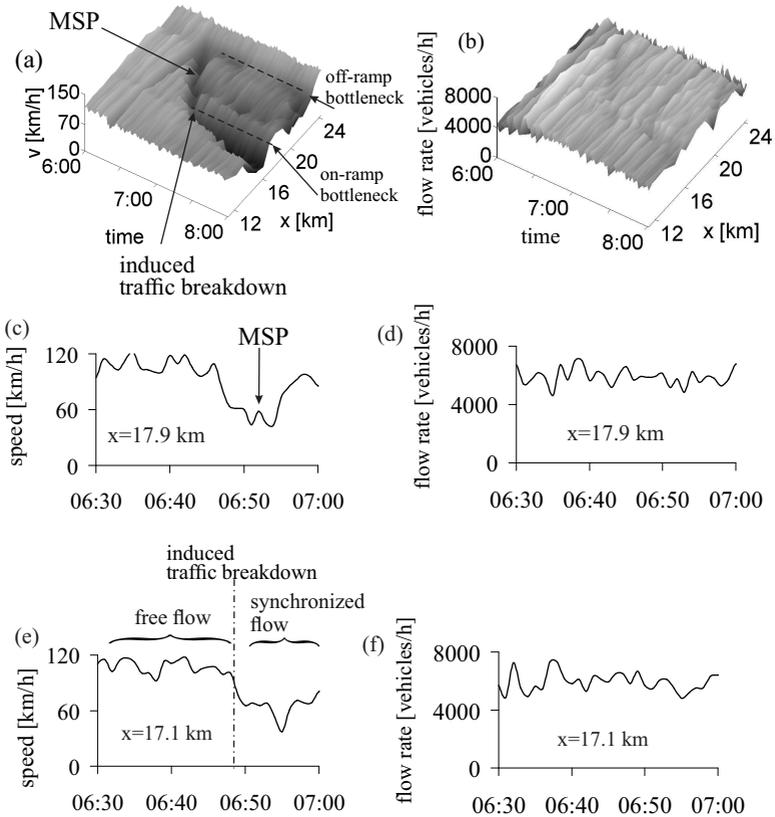


Abbildung A.4: Empirisches Beispiel eines Verkehrszusammenbruchs induziert durch Ausbreitung des synchronisierten Verkehrs (moving synchronized flow pattern (MSP)). (a) Durchschnittliche Geschwindigkeit und (b) Verkehrsfluss in Raum und Zeit. (c, e) Geschwindigkeitsprofil und (d, f) Verkehrsfluss an dem jeweiligen Detektor. Aus Kerner (2004)

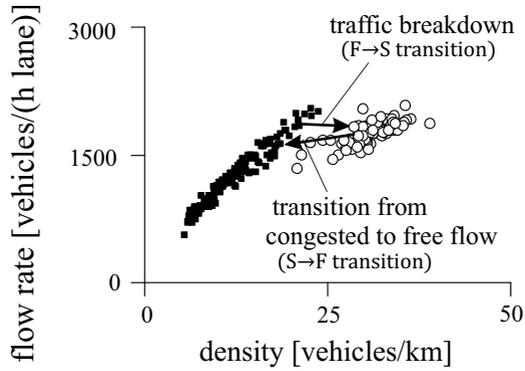


Abbildung A.5: Beispiel des bekannten Hysteresephänomens verursacht durch einen Verkehrszusammenbruch (F→S Übergang) und den Übergang von gestautem zu freiem Verkehr (S→F Übergang) gemessen mit einem Detektor. Aus Kerner (2004)

A.2 Empirische Beispiele der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge

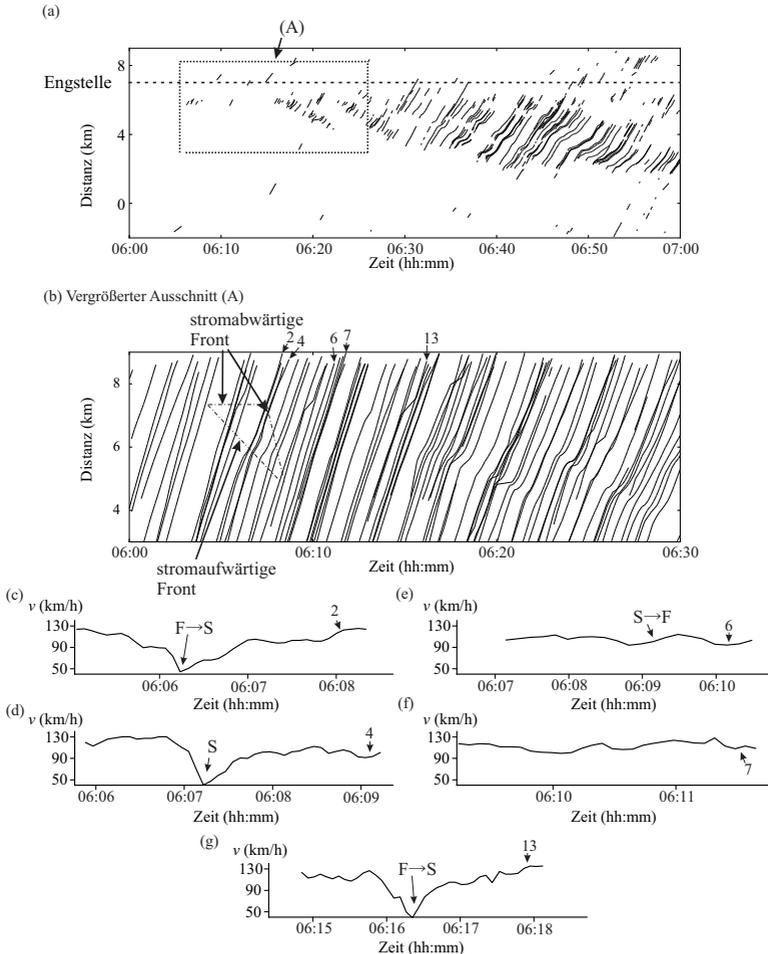


Abbildung A.6: FC Daten am 9.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1): (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm (b) vergrößerter Ausschnitt (A) aus (a). (c-g) Geschwindigkeitsprofile der Fahrzeuges aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)

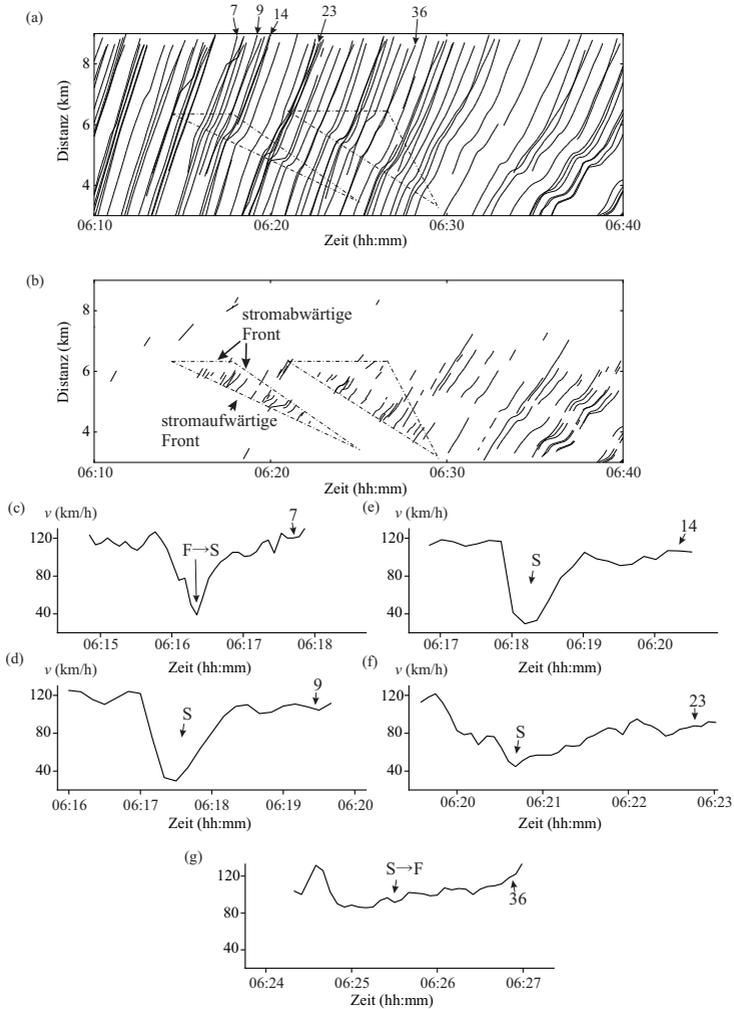


Abbildung A.7: FC Daten am 9.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). Fortsetzung von Abbildung A.6: (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm im vergrößerten Ausschnitt von (A) aus Abbildung A.6 (a). (b) mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten < 85 km/h. (c-g) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (a). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)

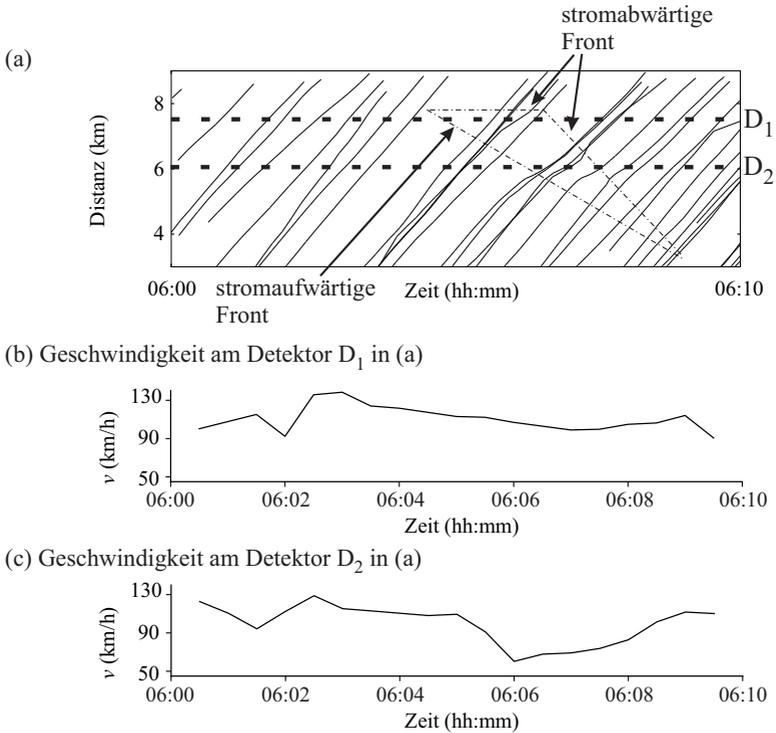


Abbildung A.8: FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). Fortsetzung von Abbildung 4.2: (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm (b) mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten $< 85 \text{ km/h}$ (c-G) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)

Tabelle A.1: Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Staufronten, die jeweilige durchschnittliche Länge und Dauer der Staufronten an dem Tag – A5 Karlsruhe bis Westkreuz Frankfurt

Tag	Staufronten	Ø Dauer (s)	Ø Länge (m)
20.04.2017 (Do)	176	716,66	1.802,77
21.04.2017 (Fr)	111	665,05	2.055,52
22.04.2017 (Sa)	54	738,76	2.321,28
23.04.2017 (So)	29	818,03	2.069,52
24.04.2017 (Mo)	105	818,92	2.138,15
25.04.2017 (Di)	107	710,22	1.407,17
26.04.2017 (Mi)	174	683,65	1.771,26
27.04.2017 (Do)	230	691,35	1.897,85
28.04.2017 (Fr)	90	640,47	1.284,49
29.04.2017 (Sa)	14	578,85	649,57
30.04.2017 (So)	20	576,1	535,75
01.05.2017 (Mo)	10	518,5	457,1
02.05.2017 (Di)	139	706,24	1.720,66
03.05.2017 (Mi)	102	683,39	1.406,10
04.05.2017 (Do)	196	664,36	1.386,89

A.3 Statistiken zu Staufronten

A.3.1 A5 Karlsruhe–Westkreuz Frankfurt

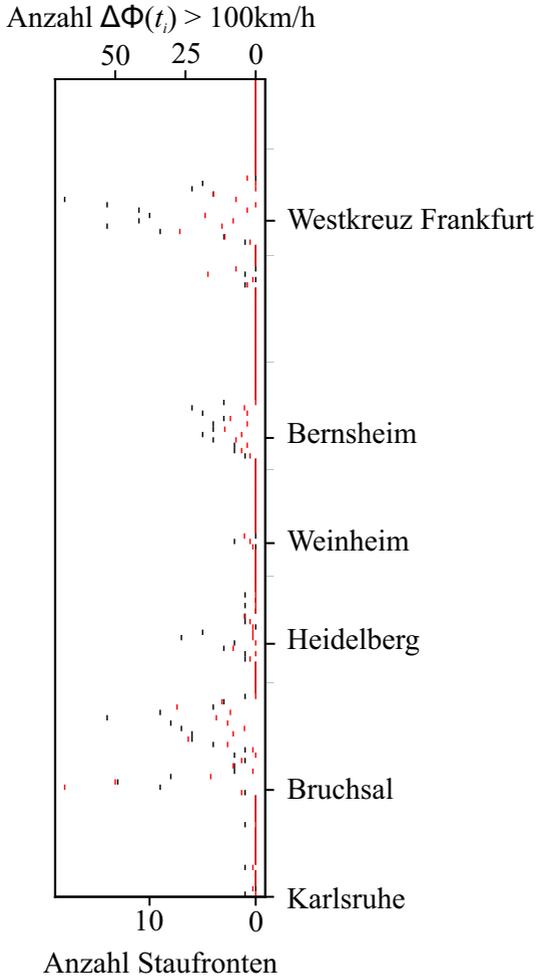


Abbildung A.9: Anzahl Staufronten (schwarz) und Geschwindigkeitseinbrüche über 100 km/h (rot) für A5 Karlsruhe bis Westkreuz Frankfurt

A.3.2 M4 Bristol–London

Tabelle A.2: Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Staufronten, die jeweilige durchschnittliche Länge und Dauer der Staufronten an dem Tag – M4 Bristol bis London

Tag	Staufronten	Ø Dauer (Sekunden)	Ø Länge (Meter)
20.04.2017 (Do)	119	694,69	943,24
21.04.2017 (Fr)	138	714,76	1.212,54
22.04.2017 (Sa)	109	751,0	798,8
23.04.2017 (So)	129	680,33	822,50
24.04.2017 (Mo)	223	785,47	1.430,33
25.04.2017 (Di)	271	719,45	1.560,33
26.04.2017 (Mi)	237	711,01	1.267,62
27.04.2017 (Do)	216	770,0	1.543,08
28.04.2017 (Fr)	164	661,44	1.013,58
29.04.2017 (Sa)	107	662,37	736,37
30.04.2017 (So)	63	640,63	742,88
01.05.2017 (Mo)	126	739,33	915,59
02.05.2017 (Di)	247	710,43	1.514,88
03.05.2017 (Mi)	178	715,64	1.322,76
04.05.2017 (Do)	164	727,36	1.228,63

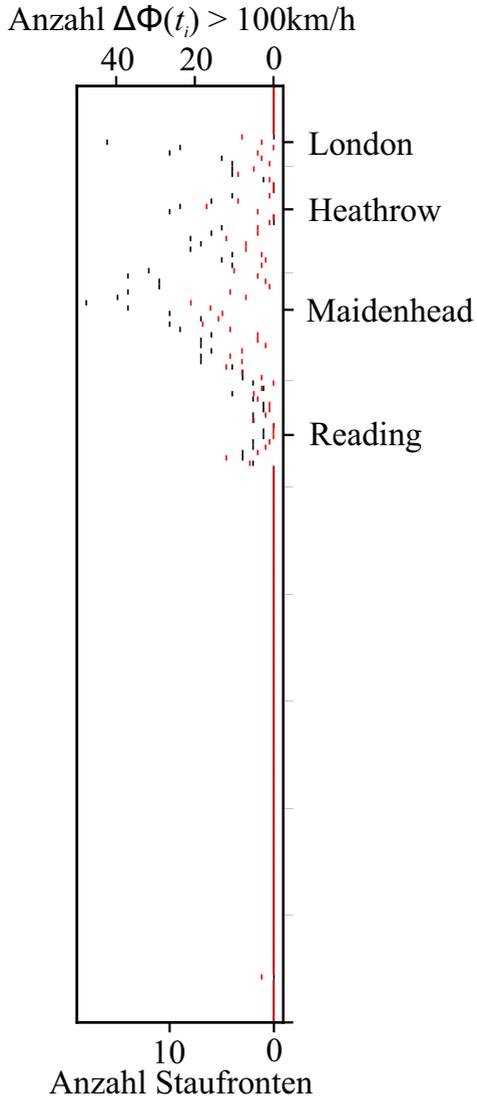


Abbildung A.10: Anzahl Staufronten (schwarz) und Geschwindigkeitseinbrüche über 100 km/h (rot) für M4 Bristol bis London

Tabelle A.3: Entsprechende statistische Werte der Boxplots

	A8			A5			M25		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Maximum	330	249	252	292	325	305	329	465	252
Q3	144	111	112,5	130	147	136	148	213	114
Median	60	49	52	58	70	59	71	110	54
Q1	20	19	18	22	27	23	27	44	21,5
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A.3.3 Dauer der Gefährdungsklassen

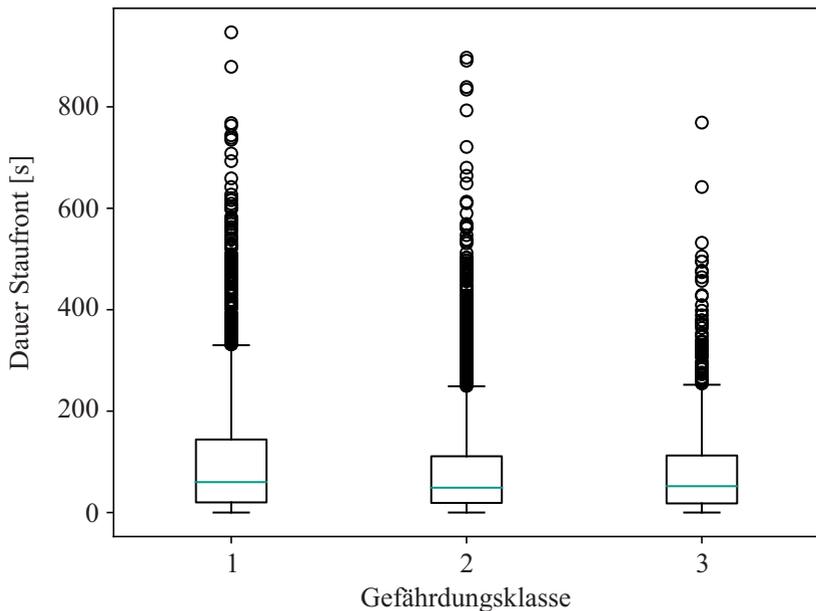


Abbildung A.11: Boxplots der Dauer der Gefährdungsklassen in Sekunden über die Lebenszeit einer Stauffront für den Datensatz der A8

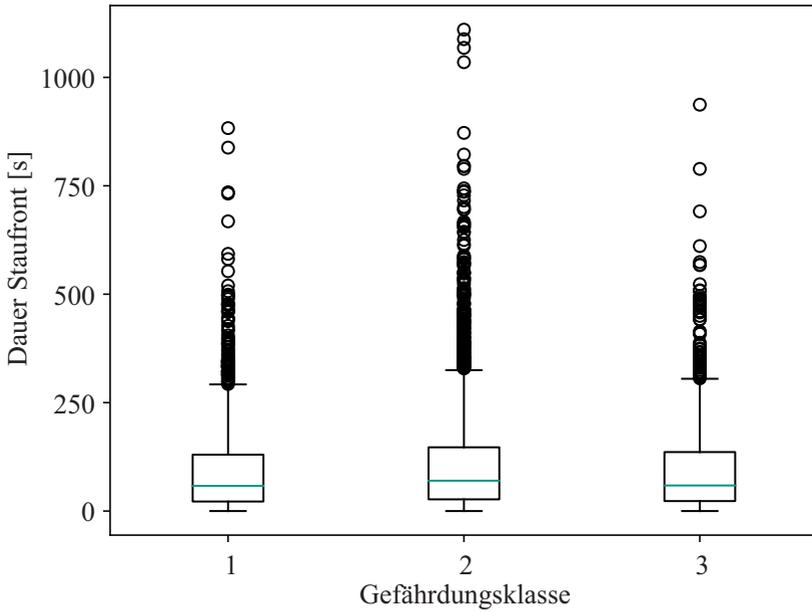


Abbildung A.12: Boxplots der Dauer der Gefährdungsklassen in Sekunden über die Lebenszeit einer Staufront für den Datensatz der A5

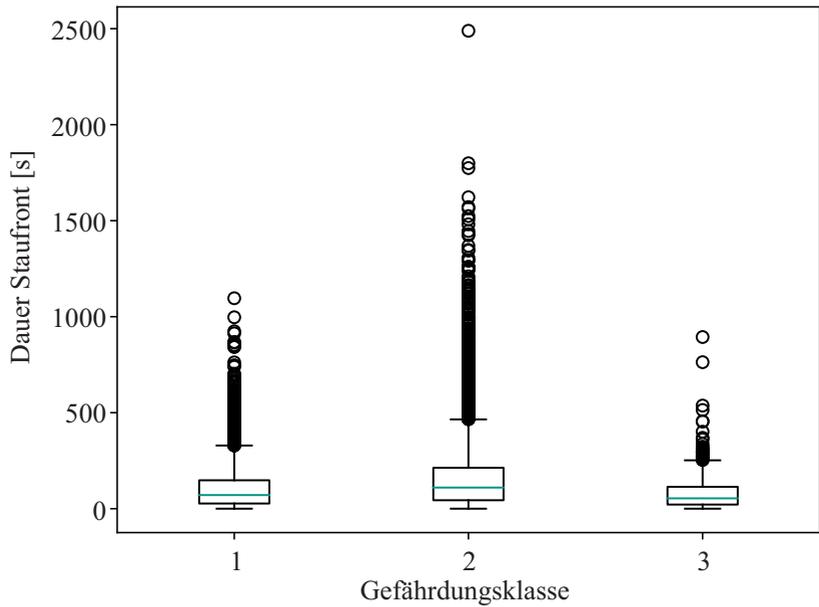


Abbildung A.13: Boxplots der Dauer der Gefährdungsklassen in Sekunden über die Lebenszeit einer Staufront für den Datensatz der M4

Abbildungsverzeichnis

1.1	Unfallstatistik für das Jahr 2016 in Deutschland. Knapp 27 % der offiziell von der Polizei aufgenommenen Unfälle entstehen durch Kollisionen mit stehenden oder vorausfahrenden Fahrzeugen (Statistisches Bundesamt 2017)	3
2.1	Luftbeobachtung einer Schnellstraße mit einer digitalen Videokamera FHWA (2006)	10
3.1	Konzeptuelle Darstellung eines möglichen Stauendewarnsystems: Durch eine frühe Erkennung und Mitteilung an heranfahrende Fahrzeuge kann eine Notbremsung vermieden werden. Abbildung aus Molzahn et al. (2017b), nach Vorlage aus Bogenberger et al. (2012)	18
3.2	Verschiedene Sensortypen mit entsprechenden Aufgaben im Fahrzeug. Abbildung aus Wong (2017)	20
3.3	Kumulative Geschwindigkeitskurven für Autofahrer in Fahrzeugen mit Frontalaufprall. Abbildung übernommen aus Richards (2010)	26
3.4	(a) Verkehrssimulationen der klassischen Verkehrsflussinstabilität Herman et al. (1959), Gazis et al. (1961) in freiem Verkehr mit einem Verkehrsflussmodell der General Motors (GM) Klasse; (b, c) S→F Instabilität in synchronisiertem Verkehr der Drei-Phasen Verkehrstheorie. Abbildung übernommen aus Kerner (2015b)	32

- 3.5 Verkehrsflusssimulation der $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergänge mit einer dauerhaften Geschwindigkeitsstörung an der Engstelle. (a) Eine der Simulationsrealisationen; WSP: „widening synchronized flow pattern“. (b) Ein vergrößerter Ausschnitt von WSP_1 aus (a); Die strich-punktierten Linien zeigen Regionen von sich auflösenden synchronisiertem Verkehr aufgrund von $F \rightarrow S \rightarrow F$ Übergängen. (c, d) Ein vergrößerter Ausschnitt aus (b), der eine Region des sich auflösenden synchronisierten Verkehrs zeigt. (e) Fahrzeugtrajektorien zu (c, d). (f) Trajektorien zu (c, d) als Geschwindigkeitsprofil. Pfeile $F \rightarrow S$ und $S \rightarrow F$ zeigen jeweils die entsprechenden Phasenübergänge. Adaptiert aus Kerner (2015b) . . . 34
- 4.1 Autobahn A8 Nord von München kommend Richtung Karlsruhe. Gezeigt ist das Kreuz Stuttgart mit der automatischen Standstreifenfreigabe vor der eigentlichen Abfahrt 38
- 4.2 FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1): (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten $< 85 \text{ km/h}$. Die Engstelle ist markiert mit der gestrichelten Linie. (b) Vergrößerter Ausschnitt (A). (c-i) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a) 40
- 4.3 FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). Fortsetzung von Abbildung 4.2: (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm (b) mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten $< 85 \text{ km/h}$. (c - g) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a) 42
- 4.4 FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). (a) Weg-Zeit Diagramm mit einem sich auflösenden synchronisiertem Muster. (b, c) Gemittelte Geschwindigkeiten berechnet im 1-Minuten-Intervall aus den FC Daten. Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a). 44

5.1	Schematische Darstellung einer Fahrzeugtrajektorie im Geschwindigkeitsprofil	50
5.2	Untersuchter Streckenabschnitt A8 von Ulm bis Karlsruhe – 150 km (Karte: Open Street Map)	51
5.3	Anzahl Trajektorien und Datenpunkte an den untersuchten Tagen	52
5.4	Verteilung von Bremsvorgängen am 03.05.2017 über die 150 km der A8 (Abbildung 5.2)	53
5.5	Verteilung von Bremsvorgängen während der untersuchten Woche über 150 km der A8 (Abbildung 5.2)	54
5.6	Zuordnung von Bremsvorgängen zu Staufronten. a) Staufront zum Zeitpunkt t_1 . b) Aufspannung des Beobachtungsraums mit zugeordneten Bremsvorgängen	56
5.7	Unterschiedliche Arten von Staufronten	57
5.8	Verteilung von Dauer und Länge von Staufronten	58
5.9	Anzahl Staufronten (schwarz) und Geschwindigkeitseinbrüche über 100 km/h (rot) auf der untersuchten Strecke	60
5.10	(a) Typisches gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm mit drei exemplarischen Trajektorien. (b, c, d) Schematischer Geschwindigkeitsverlauf der drei Trajektoren aus (a)	62
5.11	Autobahn A81 Nord von Heilbronn kommend Richtung Stuttgart. Gezeigt ist die Ab- und Auffahrt Mundelsheim	64
5.12	Gemessene FC Daten auf der A81 Richtung Stuttgart (NB) am 13.11.2016. (a) Gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm über 20 km in der Abendstunde von 17:30 Uhr bis 19:00 Uhr. (b, c, d, e, f) Geschwindigkeitsprofil von Fahrzeugen (Nummerierung gemäß der Pfeile in (a))	65
5.13	Autobahn A81 Süd von Herrenberg kommend Richtung Stuttgart. Gezeigt ist die Abfahrt Böblingen-Hulb	67
5.14	Gemessene FC Daten auf der A81 Richtung Stuttgart (SB) am 27.04.2017. (a) Gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm über knapp 1 km in der Morgenstunde von 06:15 Uhr bis 07:15 Uhr. (b, c, d) Geschwindigkeitsprofil von Fahrzeugen (Nummerierung gemäß der Pfeile in (a))	68
5.15	Autobahn A5 Nord Richtung Frankfurt. Gezeigt sind 21 km Strecke mit Anschlussstellen	69

5.16	Gemessene FC Daten auf der A5 Richtung Frankfurt (NB) am 08.05.2017. (a) Gestautes Verkehrsmuster im Weg-Zeit Diagramm über knapp 20 km in der Morgenstunde von 07:00 Uhr bis 10:00 Uhr. (b) Geschwindigkeitsprofil von einem Fahrzeug (Nummerierung gemäß des Pfeils in (a))	70
5.17	Geschwindigkeitseinbrüche $\Delta\phi(t_i)$ für die drei untersuchten Tage. (a) A81 Richtung Stuttgart (NB) am 13.11.2016, (b) A81 Richtung Stuttgart (SB) am 27.04.2017, (c) A5 Richtung Frankfurt (NB) am 08.05.2017	71
5.18	(a) Ein gestautes Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart an der Abfahrt Sindelfingen mit zwei aufeinanderfolgenden F→S→F Übergängen, (b) Geschwindigkeitseinbrüche $\Delta\phi(t_i)$	73
5.19	Qualitatives Schaubild des Konzepts der Stauwand: (a) Drei charakteristische Trajektorien, die eine Engstelle passieren. (b) Qualitative Abbildung von Δv der drei Trajektorien. (c) Zeitlich-räumlicher Verlauf der Stauwand. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)	75
5.20	Autobahn A8 Nord von Kirchheim kommend Richtung Leonberg. Gezeigt ist das Kreuz Stuttgart. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)	76
5.21	Gemessene FC-Daten am Kreuz Stuttgart auf der A8. (a) Verkehrsmuster im Weg-Zeit-Diagramm, (b) Verkehrsmuster mit Trajektorien, bei denen kein signifikanter Geschwindigkeitseinbruch gemessen wurde, (c) gemessene Geschwindigkeitseinbrüche (gemäß Abschnitt 5.1.1) Einfärbung der Gefährdungsklasse, grün: $\Delta v \leq 50 \text{ km/h}$, gelb: $100 \text{ km/h} > \Delta v \geq 50 \text{ km/h}$ und rot: $\Delta v \geq 100 \text{ km/h}$ (d) zeitlich-räumlicher Verlauf der Stauwand. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)	78
5.22	Entsprechende Trajektorien wie in Abbildung 5.21 markiert. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)	79

5.23	Gemessene FC-Daten an der Abfahrt Mundelsheim auf der A81. (a) Verkehrsmuster im Weg-Zeit-Diagramm, (b) Verkehrsmuster mit Trajektorien, bei denen kein signifikanter Geschwindigkeitseinbruch gemessen wurde, (c) gemessene Geschwindigkeitseinbrüche (gemäß Abschnitt 5.1.1) Einfärbung der Gefährdungsklasse, grün: $\Delta v \leq 50 \text{ km/h}$, gelb: $100 \text{ km/h} > \Delta v \geq 50 \text{ km/h}$ und rot: $\Delta v \geq 100 \text{ km/h}$ (d) zeitlich-räumlicher Verlauf der Stauwand. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)	80
5.24	Entsprechende Trajektorien wie in Abbildung 5.23 markiert. Adaptiert aus Molzahn et al. (2019)	81
6.1	Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart	87
6.2	Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart	88
6.3	Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt	88
6.4	Identifiziertes Gefährdungspotenzial der Geschwindigkeitseinbrüche gemäß der Klassifikation für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart	89
6.5	Identifiziertes Gefährdungspotenzial der Geschwindigkeitseinbrüche gemäß der Klassifikation für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart	90
6.6	Identifiziertes Gefährdungspotenzial der Geschwindigkeitseinbrüche gemäß der Klassifikation für das gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt	90
6.7	(a) Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Nord Richtung Stuttgart, (b) Geschwindigkeitseinbrüche für die Staufront 1, (c) Geschwindigkeitseinbrüche für die Staufront 2 (gemäß den Beschriftungen in (a))	93
6.8	(a) Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A81 Süd Richtung Stuttgart, (b) Geschwindigkeitseinbrüche für die einzige Staufront 1 (gemäß der Beschriftung in (a))	94

6.9	(a) Identifizierte Staufronten (in blau) für das gestaute Verkehrsmuster auf der A5 Nord Richtung Frankfurt, (b, d, d, e) Geschwindigkeitseinbrüche für die Staufronten 1, 6, 7 und 11 (gemäß der Beschriftungen in (a))	95
6.10	Verteilung der Gefährdungsklassen hinsichtlich der Dauer der einzelnen Klassen für den Datensatz der A8. Türkis für G1, blau für G2 und grün für G3	97
6.11	Verteilung der Gefährdungsklassen hinsichtlich der Dauer der einzelnen Klassen für den Datensatz der A5. Türkis für G1, blau für G2 und grün für G3	98
6.12	Verteilung der Gefährdungsklassen hinsichtlich der Dauer der einzelnen Klassen für den Datensatz der M4. Türkis für G1, blau für G2 und grün für G3	99
A.1	Empirisches Beispiel eines spontanen Verkehrszusammenbruchs an einer Zufahrt (gemessene Detektordaten auf einer dreispurigen Autobahn): (a) Durchschnittliche Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b) Geschwindigkeitsprofil und (c) Verkehrsfluss (Durchschnitt über alle Fahrstreifen) eines Detektors in der Nähe der Zufahrt. Aus Kerner (2004)	109
A.2	Empirisches Beispiel eines spontanen Verkehrszusammenbruchs. (a-d) Verkehrsfluss und (e-h) durchschnittliche Geschwindigkeit von drei aufeinanderfolgenden Detektoren auf einer dreispurigen Autobahn. Aus Kerner (2004)	110
A.3	Empirisches Beispiel eines Verkehrszusammenbruchs induziert durch die Ausbreitung eines sich bewegenden breiten Staus an einer Zufahrt. (a) Durchschnittliche Geschwindigkeit in Raum und Zeit. (b) Geschwindigkeitsprofil und (c) Verkehrsfluss (Durchschnitt über alle Fahrstreifen) eines Detektors an der Zufahrt. Aus Kerner (2004)	111

A.4	Empirisches Beispiel eines Verkehrszusammenbruchs induziert durch Ausbreitung des synchronisierten Verkehrs (moving synchronized flow pattern (MSP)). (a) Durchschnittliche Geschwindigkeit und (b) Verkehrsfluss in Raum und Zeit. (c, e) Geschwindigkeitsprofil und (d, f) Verkehrsfluss an dem jeweiligen Detektor. Aus Kerner (2004)	112
A.5	Beispiel des bekannten Hysteresephänomens verursacht durch einen Verkehrszusammenbruch (F→S Übergang) und den Übergang von gestautem zu freiem Verkehr (S→F Übergang) gemessen mit einem Detektor. Aus Kerner (2004)	113
A.6	FC Daten am 9.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1): (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm (b) vergrößerter Ausschnitt (A) aus (a). (c-g) Geschwindigkeitsprofile der Fahrzeuges aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)	114
A.7	FC Daten am 9.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). Fortsetzung von Abbildung A.6: (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm im vergrößerten Ausschnitt von (A) aus Abbildung A.6 (a). (b) mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten < 85 km/h. (c-g) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (a). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)	115
A.8	FC Daten am 15.12.2015 auf dem Abschnitt A8 Kreuz Stuttgart (vgl. Abbildung 4.1). Fortsetzung von Abbildung 4.2: (a) Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit Diagramm (b) mit einem Geschwindigkeitsfilter. Gezeigt sind Geschwindigkeiten < 85 km/h (c-G) Geschwindigkeitsprofil der Fahrzeuge aus (b). Adaptiert aus Molzahn et al. (2017a)	116
A.9	Anzahl Staufronten (schwarz) und Geschwindigkeitseinbrüche über 100 km/h (rot) für A5 Karlsruhe bis Westkreuz Frankfurt	118
A.10	Anzahl Staufronten (schwarz) und Geschwindigkeitseinbrüche über 100 km/h (rot) für M4 Bristol bis London	120
A.11	Boxplots der Dauer der Gefährdungsklassen in Sekunden über die Lebenszeit einer Staufront für den Datensatz der A8	121

A.12 Boxplots der Dauer der Gefährdungsklassen in Sekunden über
die Lebenszeit einer Staufront für den Datensatz der A5 122

A.13 Boxplots der Dauer der Gefährdungsklassen in Sekunden über
die Lebenszeit einer Staufront für den Datensatz der M4 123

Tabellenverzeichnis

2.1	Zeiträume und Tage insgesamt erhoben in den Jahren 2015 bis 2017 . . .	15
5.1	Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Trajektorien und Datenpunkte zur Analyse der Bremsvorgänge	52
5.2	Zeitlich-räumliche Kriterien für die Zuordnung von Bremsvorgängen zu Staufronten	55
5.3	Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Staufronten, die jeweilige durchschnittliche Länge und Dauer der Staufronten an dem Tag	58
6.1	Anzahl und durchschnittliche Geschwindigkeit der Gefährdungsklassen	97
6.2	Übersicht über das Level des Gefährdungspotentials und den entsprechenden vorgeschlagenen Maßnahmen	101
A.1	Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Staufronten, die jeweilige durchschnittliche Länge und Dauer der Staufronten an dem Tag – A5 Karlsruhe bis Westkreuz Frankfurt . . .	117
A.2	Ausgewertete Tage und der dazugehörigen Anzahl der Staufronten, die jeweilige durchschnittliche Länge und Dauer der Staufronten an dem Tag – M4 Bristol bis London	119
A.3	Entsprechende statistische Werte der Boxplots	121

Eigene Veröffentlichungen

Journalartikel

S.-E. Molzahn, B.S. Kerner, H. Rehborn, S.L. Klenov, and M. Koller. Analysis of speed disturbances in empirical single vehicle probe data before traffic breakdown. *IET Intelligent Transport Systems*, 11(9), 2017a. ISSN 1751956X. doi: 10.1049/iet-its.2016.0315.

S.-E. Molzahn, B.S. Kerner, and H. Rehborn. Phase based jam warnings: an analysis of synchronized flow with floating car data. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Accepted manuscript, 2019.

Sven-Eric Molzahn, Hubert Rehborn, and Micha Koller. Jam Tail Warnings Based on Vehicle Probe Data. In *Transportation Research Procedia*, volume 27, pages 808–815, 2017b. doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.005.

Konferenzbeiträge

Sven-Eric Molzahn, Boris S. Kerner, and Hubert Rehborn. Microscopic jam warning for automated driving. *Traffic and Granular Flow '17*, 2018a.

Sven-Eric Molzahn, Boris S. Kerner, Hubert Rehborn, Sergey L. Klenov, and Micha Koller. F→S→F Transitions in Vehicle Probe Data. *Traffic and Granular Flow '17*, 2018b.

Literaturverzeichnis

- ADAC. ADAC Staubilanz 2015, 2015. URL https://www.adac.de/infote-strat/adac-im-einsatz/motorwelt/staubilanz_2015.aspx. Zugriff: 07.02.2016.
- Soyoung Ahn and Mj Cassidy. Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers. *17th International Symposium of Transportation and Traffic Theory*, pages 1–23, 2007. URL <http://trid.trb.org/view.aspx?id=820158>.
- Silja Assenmacher. DIWA - Direkte Information und Warnung für Autofahrer. Technical report, Technische Universität München, 2008.
- Markus Auer, Klaus Bogenberger, Hubert Rehborn, Micha Koller, and Jochen Palmer. Mobilitätskennwerte für den motorisierten Individualverkehr aus Flottendaten. *Straßenverkehrstechnik*, 61(2):87–93, 2017a.
- Markus Auer, Hubert Rehborn, Sven-Eric Molzahn, and Klaus Bogenberger. Boosting Performance of Map Matching Algorithms by Parallelization on Graphics Processors. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, pages 462–467, 2017b. ISBN 9781509048045. doi: 10.1109/IVS.2017.7995761.
- James H. Banks. Flow processes at a freeway bottleneck. *Transportation Research Record*, (1287):20–28, 1990. ISSN 0361-1981.
- Hillel Bar-Gera. Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: A case study from Israel. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(6):380–391, 2007. ISSN 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2007.06.003.

- Klaus Bogenberger, Alexander Dinkel, Ingo Totzke, Frederik Naujoks, and Dominik Mühlbacher. Sicherheitswirkungen von verkehrsinformationen: Entwicklung und evaluation verschiedener warnkonzepte für stauendewarnungen. 2012.
- Manfred Boltze, Wolfgang Kittler, and Nadine Roth. Strategien zur stauvermeidung. *Straßenverkehrstechnik*, 5:265–273, 2008.
- Susanne Breitenberger, Bernhard Grüber, and Martina Neuherz. Extended Floating Car Data – Potenziale für die Verkehrsinformationen und notwendige Durchdringungsraten. *Straßenverkehrstechnik*, 48(Straßenverkehrstechnik): 522–531, 2004.
- Werner Brilon, Justin Geistefeldt, and Matthias Regler. Reliability of Freeway Traffic Flow: A stochastic Concept of Capacity. *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, (July):125–144, 2005.
- Petr Bures. The architecture of traffic and travel information system based on protocol tpeg. In *Proceedings of the 2009 Euro American Conference on Telematics and Information Systems: New Opportunities to increase Digital Citizenship*, page 21. ACM, 2009.
- Denos C.Gazis. Traffic theory. *Springer Science & Business Media*, page 275, 2002.
- Robert E Chandler, Robert Herman, and Elliott W Montroll. Traffic dynamics: studies in car following. *Operations research*, 6(2):165–184, 1958.
- Danjue Chen, Jorge Laval, Zuduo Zheng, and Soyoung Ahn. A behavioral car-following model that captures traffic oscillations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(6):744–761, 2012a. ISSN 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2012.01.009.
- Danjue Chen, Jorge A. Laval, Soyoung Ahn, and Zuduo Zheng. Microscopic traffic hysteresis in traffic oscillations: A behavioral perspective. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(10):1440–1453, 2012b. ISSN 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2012.07.002.

- Benjamin Coifman and Lizhe Li. A critical evaluation of the next generation simulation (ngsim) vehicle trajectory dataset. *Transportation Research Part B: Methodological*, 105:362–377, 2017.
- Benjamin A Coifman and Yun Wang. Average velocity of waves propagating through congested freeway traffic. In *Transportation and Traffic Theory. Flow, Dynamics and Human Interaction. 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 2005.
- DataFromSky. Advanced traffic analysis of aerial video data, 2018. URL <http://datafromsky.com/>. Zugriff: 10.09.2018.
- Peter Davies, Chris Hill, and Grant Klein. Standards for the radio data system-traffic message channel. Technical report, SAE Technical Paper, 1989.
- Corrado De Fabritiis, Roberto Ragona, and Gaetano Valenti. Traffic estimation and prediction based on real time floating car data. In *Intelligent Transportation Systems, 2008. ITSC 2008. 11th International IEEE Conference on*, pages 197–203. IEEE, 2008.
- Tu-Uyen Dinh, Romain Billot, Eric Pillet, and Nour-Eddin El Faouzi. Real-Time Queue-End Detection on Freeways with Floating Car Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2470:46–56, 2014. ISSN 0361-1981. doi: 10.3141/2470-05. URL <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2470-05>.
- Jörn Drewes. Verkehrssicherheit im systemischen Kontext. 2009.
- Leslie C Edie. Car-following and steady-state theory for noncongested traffic. *Operations Research*, 9(1):66–76, 1961.
- Leslie C Edie and Robert S Foote. Traffic flow in tunnels. In *Highway Research Board Proceedings*, volume 37, 1958.
- Leslie C Edie and Robert S Foote. Effect of shock waves on tunnel traffic flow. In *Highway Research Board Proceedings*, volume 39, 1960.

- Leslie C Edie, Robert Herman, and Tenny N Lam. Observed multilane speed distribution and the kinetic theory of vehicular traffic. *Transportation Science*, 14(1):55–76, 1980.
- Lily Elefteriadou. An Introduction to Traffic Flow Theory. 84, 2014. ISSN 0160-5682. doi: 10.1007/978-1-4614-8435-6. URL <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-8435-6>.
- Lily Elefteriadou, Roger P Roess, and William R McShane. Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions. *Transportation Research Record*, 1484(1484):80–89, 1995. ISSN 03611981.
- Lily Elefteriadou, Alexandra Kondyli, Werner Brilon, Fred L. Hall, Bhagwant Persaud, and Scott Washburn. Enhancing Ramp Metering Algorithms with the Use of Probability of Breakdown Models. *Journal of Transportation Engineering*, 140(4):04014003, 2014. ISSN 0733-947X. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000653. URL <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/{%}28ASCE{%}29TE.1943-5436.0000653>.
- DU Fastenrath. Floating car data on a larger scale. *ITS-World Congress*, pages 1–10, 1997. URL <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%&}btnG=Search{%&}q=intitle:Floating+Car+Data+on+a+Larger+Scale{%#}0>.
- FHWA. Next Generation SIMulation Fact Sheet, 2006. URL <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06135/index.cfm>. Zugriff: 10.09.2018.
- M Friedrich, P Jehlicka, T Otterstaetter, and J Schlaich. Mobile Phone Data for Telematic Applications. *Imeti 2008: International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation, Vol I, Proceedings*, pages 337—342 378, 2008.
- D J Gabauer and H C Gabler. Comparison of delta-v and occupant impact velocity crash severity metrics using event data recorders. *Annual proceedings. Association for the Advancement of Automotive Medicine*, 50:57–71, 2006. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16968629>.

- Hampton Clay Gabler, Carolyn Hampton, and TA Roston. Estimating crash severity: can event data recorders replace crash reconstruction? In *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, volume 2003, pages 12–p. National Highway Traffic Safety Administration, 2003.
- Nathan Gartner, Carrol J. Messer, and Ajay K. Rathi. Traffic Flow Theory; A State-of-the-Art Report. *Transportation Research Board*, 2001. URL http://www.tft.pdx.edu/docs/revise_monograph_2001.pdf.
- Denos C Gazis, Robert Herman, and Renfrey B Potts. Car-following theory of steady-state traffic flow. *Operations research*, 7(4):499–505, 1959.
- Denos C Gazis, Robert Herman, and Richard W Rothery. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations research*, 9(4):545–567, 1961.
- Fred L Hall and Kwaku Agyemang-Duah. Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity. *Transportation Research Record*, 1320:91–98, 1991. ISSN 0361-1981.
- Robert Herman, Elliott W Montroll, Renfrey B Potts, and Richard W Rothery. Traffic dynamics: analysis of stability in car following. *Operations research*, 7(1):86–106, 1959.
- Andreas Hölzel. Fast eine Millionen Kilometer Stau, 2015. URL <https://presse.adac.de/meldungen/verkehr/fast-eine-million-kilometer-stau.html>. Zugriff: 05.10.2015.
- Laurence Howe. Estimating traffic delays from loop-based traffic flow monitors. *Traffic engineering & control*, 47(7):273–276, 2006.
- W Huber, M Ladke, and R Ogger. Extended Floating Car Data for the Acquisition of Traffic Information. *Proc. of 6th World Congress on Intelligent Transportation Systems (ITS)*, pages 1–9, 1999. URL <https://trid.trb.org/view.aspx?id=695348>.
- Andrea Hütter. Verkehr auf einen Blick. Technical report, Statistisches Bundesamt, 04 2013.

Rui Jiang, Mao Bin Hu, H. M. Zhang, Zi You Gao, Bin Jia, and Qing Song Wu. On some experimental features of car-following behavior and how to model them. *Transportation Research Part B: Methodological*, 80:338–354, 2015. ISSN 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2015.08.003.

Stefan Kaufmann, Boris S Kerner, Hubert Rehborn, Micha Koller, and Sergey L Klenov. Aerial observations of moving synchronized flow patterns in over-saturated city traffic. *Transportation research part C: emerging technologies*, 86:393–406, 2018.

Boris Kerner. Congested traffic flow: Observations and theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1678):160–167, 1999.

Boris S Kerner. Experimental features of self-organization in traffic flow. *Physical review letters*, 81(17):3797, 1998.

Boris S Kerner. Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks. *Physical Review E*, 65(4):046138, 2002.

Boris S Kerner. The physics of traffic: Empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory, understanding complex systems, 2004.

Boris S Kerner. *Introduction to modern traffic flow theory and control: the long road to three-phase traffic theory*. Springer Science & Business Media, 2009.

Boris S Kerner. *The physics of traffic: empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory*. Springer, 2012.

Boris S. Kerner. Criticism of generally accepted fundamentals and methodologies of traffic and transportation theory: A brief review, 2013. ISSN 03784371.

Boris S. Kerner. Microscopic theory of traffic-flow instability governing traffic breakdown at highway bottlenecks: Growing wave of increase in speed in synchronized flow. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 92(6), 2015a. ISSN 15502376. doi: 10.1103/PhysRevE.92.062827.

- Boris S Kerner. Microscopic theory of traffic-flow instability governing traffic breakdown at highway bottlenecks: Growing wave of increase in speed in synchronized flow. *Physical Review E*, 92(6):062827, 2015b.
- Boris S. Kerner. Breakdown in traffic networks: Fundamentals of transportation science. *Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science*, pages 1–652, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-54473-0.
- Boris S Kerner and H Rehborn. Experimental features and characteristics of traffic jams. *Physical Review E*, 53(2):R1297, 1996a.
- Boris S Kerner and Hubert Rehborn. Experimental properties of complexity in traffic flow. *Physical Review E*, 53(5):R4275, 1996b.
- Boris S Kerner and Hubert Rehborn. Experimental properties of phase transitions in traffic flow. *Physical Review Letters*, 79(20):4030, 1997.
- Boris S KERNER, Hubert REHBORN, Mario ALEKSIC, and Andreas HAUG. Methods for tracing & forecasting congested traffic patterns. *Traffic engineering & control*, 42(8):282–287, 2001a.
- Boris S KERNER, Hubert REHBORN, Mario ALEKSIC, Andreas HAUG, and Rainer LANGE. Online automatic tracing and forecasting of traffic patterns. *Traffic engineering & control*, 42(10):345–350, 2001b.
- Boris S Kerner, Hubert Rehborn, Mario Aleksic, and Andreas Haug. Recognition and tracking of spatial–temporal congested traffic patterns on freeways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(5):369–400, 2004.
- Boris S Kerner, Hubert Rehborn, Ralf-Peter Schäfer, Sergey L Klenov, Jochen Palmer, Stefan Lorkowski, and Nikolaus Witte. Traffic dynamics in empirical probe vehicle data studied with three-phase theory: Spatiotemporal reconstruction of traffic phases and generation of jam warning messages. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(1):221–251, 2013.
- Boris S Kerner, Micha Koller, Sergey L Klenov, Hubert Rehborn, and Michael Leibel. The physics of empirical nuclei for spontaneous traffic breakdown in

- free flow at highway bottlenecks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 438:365–397, 2015.
- BS Kerner, C Demir, RG Herrtwich, SL Klenov, H Rehborn, M Aleksic, and A Haug. Traffic state detection with floating car data in road networks. In *Intelligent Transportation Systems, 2005. Proceedings. 2005 IEEE*, pages 44–49. IEEE, 2005.
- KOM. Aktionsplan zur Einführung intelligenter Verkehrssysteme in Europa. Technical report, Kommission der europäischen Gemeinschaften, 2008.
- M Koshi, M Iwasaki, and I Ohkura. Some findings and an overview on vehicular flow characteristics. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Transportation and Traffic Flow Theory*, volume 198, pages 403–426. University of Toronto: Toronto, Ontario, 1983.
- Jorge A. Laval, Christopher S. Toth, and Yi Zhou. A parsimonious model for the formation of oscillations in car-following models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70:228–238, 2014. ISSN 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2014.09.004.
- Guillaume Leduc. Road traffic data: Collection methods and applications. *Working Papers on Energy, Transport and Climate Change*, 1(55), 2008.
- Z B Li, K Chung, and M J Cassidy. Collisions in Freeway Traffic: Influence of Downstream Queues and Interim Means to Address Them. *Transportation Research Record*, 5003(2396):1–9, 2013. ISSN 00014575. doi: 10.3141/2396-01. URL <http://dx.doi.org/10.3141/2396-01>.
- Henry X Liu, Adam Danczyk, Rashmi Brewer, and Ray Starr. Evaluation of Cell Phone Traffic Data in Minnesota. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No 2086*, 2086:1–7, 2008. ISSN 03611981. doi: 10.3141/2086-01. URL <http://dx.doi.org/10.3141/2086-01>.
- Michelle Mekker, Howell Li, John McGregor, Mischa Kachler, and Darcy Bullock. Implementation of a real-time data driven system to provide queue alerts to

- stakeholders. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2018-March:1–6, 2018. doi: 10.1109/ITSC.2017.8317648.
- MI NRW. Unfallstatistik 2017, 2018. URL <https://www.land.nrw/de/pressmitteilung/schwere-lkw-unfaelle-stauenden-ruecken-den-fokus-der-nordrhein-westfaelischen>. Zugriff: 11.09.2018.
- S.-E. Molzahn and Hubert Rehborn. Verfahren zum Betrieb eines Fahrzeugs, 2017.
- S.-E. Molzahn, Micha Koller, and Hubert Rehborn. Verfahren zur Ermittlung von Staufronten und zur Übermittlung von Staufronten betreffenden Daten an eine Anzahl von Fahrzeugen, 2018.
- Moovel Lab. Open Data Cam, 2018. URL <https://opendatacam.moovella.com/>. Zugriff: 10.09.2018.
- Christopher Nowakowski, Daniel Vizzini, Somak Gupta, and Raja Sengupta. Evaluation of Real-Time Freeway End-of-Queue Alerting System to Promote Driver Situational Awareness. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2324:37–43, 2012. ISSN 0361-1981. doi: 10.3141/2324-05. URL <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2324-05>.
- Bhagwant Persaud, Sam Yagar, and Russel Brownlee. Exploration of the Breakdown Phenomenon in Freeway Traffic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1634:64–69, 1998. ISSN 0361-1981. doi: 10.3141/1634-08. URL <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1634-08>.
- H Rehborn, SL Klenov, and RA Meyers. Encyclopedia of complexity and system science, 2009.
- Hubert Rehborn and Micha Koller. A study of the influence of severe environmental conditions on common traffic congestion features. *Journal of advanced transportation*, 48(8):1107–1120, 2014.

- Hubert Rehborn, Sergey L Klenov, and Jochen Palmer. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the usa, the uk, and germany. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(23):4466–4485, 2011.
- Hubert Rehborn, Sergey L. Klenov, and Micha Koller. *Traffic Prediction of Congested Patterns*, pages 1–59. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-642-27737-5.
- Felix Rempe, Philipp Franek, Ulrich Fastenrath, and Klaus Bogenberger. Online freeway traffic estimation with real floating car data. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on*, pages 1838–1843. IEEE, 2016.
- DC Richards. Relationship between speed and risk of fatal injury: pedestrians and car occupants. 2010.
- Meead Saberi and Robert L Bertini. Empirical analysis of the effects of rain on measured freeway traffic parameters. In *Transportation research board 89th annual meeting*, number 10-2331, 2010.
- SafetyNet. Speeding, 2009. URL https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/specialist/knowledge/pdf/speeding.pdf. Zugriff: 08.12.2019.
- Ralf-Peter Schäfer, Kai-Uwe Thiessenhusen, and Peter Wagner. A Traffic Information System By Means of Real-Time Floating-Car Data. *ITS world congress*, m:1–8, 2002. URL http://elib.dlr.de/6499/01/chicago_final.pdf.
- Johannes Schlaich, Thomas Otterstatter, and Markus Friedrich. Generating Trajectories from Mobile Phone Data. *TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers*, 339:1–18, 2010. URL http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads/201001_JS_TO_Fr_TRB-Generating_Trajectories_from_Mobile_Phone_Data.pdf.

- David L Smith, Wassim G Najm, and Richard A Glassco. Feasibility of driver judgment as basis for a crash avoidance database. *Transportation research record*, 1784(1):9–16, 2002.
- Statistisches Bundesamt. Verkehr–Verkehrsunfälle 2016, 2017.
- Statistisches Bundesamt. Unfallursachen – Fehlverhalten der Fahrzeugführer bei Unfällen mit Personenschaden, 2018. URL <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/FehlverhaltenFahrzeugfuehrer.html>. Zugriff: 07.09.2018.
- Alireza Talebpour, Hani S Mahmassani, Fiorella Mete, and Samer H Hamdar. Near-crash identification in a connected vehicle environment. *Transportation Research Record*, 2424(1):20–28, 2014.
- Junfang Tian, Rui Jiang, Bin Jia, Ziyou Gao, and Shoufeng Ma. Empirical analysis and simulation of the concave growth pattern of traffic oscillations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 93:338–354, 2016. ISSN 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2016.08.001.
- Martin Treiber and Arne Kesting. Trajectory and floating-car data. In *Traffic Flow Dynamics*, pages 7–12. Springer, 2013.
- Martin Treiber, Arne Kesting, and R Eddie Wilson. Reconstructing the traffic state by fusion of heterogeneous data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(6):408–419, 2011.
- J Treiterer. Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetry techniques. final report ees278. *Transportation Research Center, Department of Civil Engineering, Ohio State University*, 1975.
- Joseph Treiterer. Investigation of Traffic Dynamics by Aerial Photogrammetry Techniques. *Report (Ohio State University. Engineering Experiment Station)*, 1967. URL <http://books.google.pt/books?id=rviBQQAAAJ>.

- Joseph Treiterer and Jeffrey Myers. The hysteresis phenomenon in traffic flow. *Transportation and traffic theory*, 6:13–38, 1974.
- Gerald L. Ullman, Vichika Iragavarapu, and Robert E. Brydia. Safety Effects of Portable End-of-Queue Warning System Deployments at Texas Work Zones. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2555:46–52, 2016. ISSN 0361-1981. doi: 10.3141/2555-06. URL <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2555-06>.
- Dipl. Ing. Thomas Unger. Konstellationen bei Auffahrunfällen. In *Berichte der ADAC Unfallforschung*. ADAC, 03 2011.
- ARA Van Der Horst. A time-based analysis of road user behaviour at intersections. In *ICTCT Conference Proceedings (Krakow)*, pages 91–104, 1990.
- JWC Van Lint and Serge P Hoogendoorn. A robust and efficient method for fusing heterogeneous data from traffic sensors on freeways. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(8):596–612, 2010.
- Madeline Volk and Ingo Totzke. Nutzerakzeptanz von Car-2-X-Technologien: Welche Anforderungen machen Fahrerassistenzsysteme beliebter als andere? *Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion*, page 19, 2014.
- William Wong. The changing nature of automotive technology, 2017. URL <https://www.electronicdesign.com/automotive/changing-nature-automotive-technology>. Zugriff: 04.10.2018.
- Bo Yang and Christopher Monterola. Efficient intersection control for minimally guided vehicles: A self-organised and decentralised approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72:283–305, 2016. ISSN 0968090X. doi: 10.1016/j.trc.2016.10.004.
- Yufei Yuan, JWC Van Lint, R Eddie Wilson, Femke van Wageningen-Kessels, and Serge P Hoogendoorn. Real-time lagrangian traffic state estimator for freeways. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1):59–70, 2012.

- Zuduo Zheng, Soyoung Ahn, Danjue Chen, and Jorge Laval. Freeway traffic oscillations: Microscopic analysis of formations and propagations using Wavelet Transform. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45 (9): 1378–1388, 2011. ISSN 01912615. doi: 10.1016/j.trb.2011.05.012.
- Benjamin Zielke, Robert Bertini, and Martin Treiber. Empirical measurement of freeway oscillation characteristics: an international comparison. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2088):57–67, 2008.
- B Zimolong. Verkehrskonflikttechnik - Grundlagen und Anwendungsbeispiele. *Unfall und Sicherheitsforschung Strassenverkehr*, 35, 1982. URL <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1040943>.
- J M Zogg. GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten. *ReVision*, 3(2):11–116, 2009. ISSN 01333852. doi: 10.1177/103841116800300201. URL <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%&}btnG=Search{%&}q=intitle:GPS+und+GNSS:+Grundlagen+der+Ortung+und+Navigation+mit+Satelliten{%#}0>.

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen

ISSN 0341-5503

Die Hefte 1 bis 68 der Schriftenreihe können über das Institut für Verkehrswesen zum Preis von 11,00 Euro sowie über den Buchhandel bestellt werden (<https://www.ifv.kit.edu/schriftenreihe.php>).

Mit * gekennzeichnete Hefte sind leider vergriffen.

- Heft 1*** **Paul Stephan Baron**
Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-Empfangsanlagen.
- Heft 2*** **Karl Eugen Stoffers**
Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen.
- Heft 3*** **Reinhard Köhler**
Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung.
- Heft 4*** **Rolf Böttger**
Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Straßenkreuzungen.
- Heft 5** **Manfred Droste**
Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs.
- Heft 6*** 10 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN.
- Heft 7*** **Ingward Bey**
Simulationstechnische Analyse der Luftfrachtabfertigung.

- Heft 8*** **Rainer Wiedemann**
Simulation des Straßenverkehrsflusses.
- Heft 9*** **Uwe Köhler**
Stabilität von Fahrzeugkolonnen.
- Heft 10** **Wolf Thomas**
Sensitivitätsanalyse eines Verkehrs-planungsmodells.
- Heft 11** **Peter Pape**
Weglängen-Reduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung.
- Heft 12** **Theo Koffler**
Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg.
- Heft 13*** **Walter Hänicke**
Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit.
- Heft 14*** **Gerd Bahm**
Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme.
- Heft 15** **Wolf Laubert**
Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen.
- Heft 16*** **Bernd-Michael Sahling**
Verkehrsablauf in Netzen ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren.
- Heft 17*** **Erich Michael Zahn**
Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze.
- Heft 18*** **Wolfgang Handschmann**
Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers.

- Heft 19*** **Gottfried Willmann**
Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen.
- Heft 20*** **Udo Sparmann**
ORIENT – Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose.
- Heft 21*** **Richard E. Allsop**
Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen. (1980)
- Heft 22*** **Udo-Michael Adolph**
Systemsimulation des Güterschwerverkehrs auf Straßen.
- Heft 23*** **Claus-Dieter Jahnke**
Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstandswarnsystemen.
- Heft 24*** **Wilhelm Leutzbach**
Verkehr auf Binnenwasserstraßen.
- Heft 25*** 20 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN –
Ein Institut stellt sich vor.
- Heft 26*** **Hans Hubschneider**
Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Personennahverkehr.
- Heft 27*** **Peter Mott**
Signalsteuerungsverfahren zur Priorisierung des Öffentlichen Personennahverkehrs.
- Heft 28** **Adolf D. May**
Traffic Management Research at the University of California.
- Heft 29** **Michael Haas**
LAERM – Mikroskopisches Modell zur Berechnung des Straßenverkehrslärms.

- Heft 30** **Dietmar Bosserhoff**
Statistische Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen
im Öffentlichen Personennahverkehr – Ein Vergleich.
- Heft 31*** **Karsten Baass**
Ermittlung eines optimalen Grünbandes auf
Hauptverkehrsstraßen.
- Heft 32** **Thomas Benz**
Mikroskopische Simulation von Energieverbrauch und
Abgasemission im Straßenverkehr (MISEVA).
- Heft 33** **Gerd Stucke**
Bestimmung der städtischen Fahrtenmatrix durch
Verkehrszählungen.
- Heft 34** **William Young**
Modelling the Circulation of Parking Vehicles –
A Feasibility Study.
- Heft 35** **Peter G. Gipps**
Simulation of Pedestrian Traffic in Buildings.
- Heft 36*** 25 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN.
- Heft 37*** **Klaus Möller**
Signalgruppenorientiertes Modell zur Optimierung von
Festzeitprogrammen an Einzelknotenpunkten.
- Heft 38** **Wolfgang G. Bleher**
Messung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug –
Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation.)
- Heft 39** **Walter Maier**
Bemessungsverfahren für Befragungszählstellen mit Hilfe eines
Warteschlangenmodells.

- Heft 40** **Kay W. Axhausen**
Eine ereignisorientierte Simulation von Aktivitätenketten zur Parkstandwahl.
- Heft 41** **Udo J. Becker**
Beobachtung des Straßenverkehrs vom Flugzeug aus: Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrsgrößen.
- Heft 42** **Dirk Heidemann**
Ein mathematisches Modell des Verkehrsflusses.
- Heft 43** **Mostafa Sabry Aly**
Headway Distribution Model and Interrelationship between Headway and Fundamental Traffic Flow Characteristics.
- Heft 44** **Jürgen Zoellmer**
Ein Planungsverfahren für den ÖPNV in der Fläche.
- Heft 45** **Stephan Schnittger**
Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen.
- Heft 46** **Tien-Pen Hsu**
Optimierung der Detektorlage bei verkehrsabhängiger Lichtsignalsteuerung.
- Heft 47** **Reiner Grigo**
Zur Addition spektraler Anteile des Verkehrslärms.
- Heft 48** 30 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN.
- Heft 49** **Yuntong Liu**
Eine auf FUZZY basierende Methode zur mehrdimensionalen Beurteilung der Straßenverkehrssicherheit.
- Heft 50** **Frank Höfler**
Leistungsfähigkeit von Ortsdurchfahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen – untersucht mit Hilfe der Simulation.

- Heft 51** **Andreas Rekersbrink**
Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten.
- Heft 52** **Frank Nickel**
Stationsmanagement von Luftverkehrsgesellschaften – Eine systemanalytische Betrachtung und empirische Untersuchung der Stationsmanagement-Systeme internationaler Luftverkehrsgesellschaften.
- Heft 53** **Uwe Reiter**
Simulation des Verkehrsablaufs mit individuellen Fahrbeeinflussungssystemen.
- Heft 54** **Rainer Schwarzmann**
Der Einfluß von Nutzerinformationssystemen auf die Verkehrsnachfrage.
- Heft 55** **Bastian Chlond**
Zeitverwendung und Verkehrsgeschehen – Zur Abschätzung des Verkehrsumfangs bei Änderungen der Freizeitdauer.
- Heft 56** **Susanne Kickner**
Kognition, Einstellung und Verhalten – Eine Untersuchung des individuellen Verkehrsverhaltens in Karlsruhe.
- Heft 57** **Seonha Lee**
Wechselwirkungen zwischen Verkehr und Telekommunikation in einer asiatischen Stadtumgebung.
- Heft 58*** **Oliver Lipps**
Modellierung der individuellen Verhaltensvariationen bei der Verkehrsentstehung.
- Heft 59** **Timothy Oketch**
A Model for Heterogeneous Traffic Containing Non-Motorised Vehicles.

- Heft 60** **Volker Waßmuth**
Modellierung der Wirkungen verkehrsreduzierender Siedlungskonzepte.
- Heft 61** **Olaf Eberhard**
Wirkungsanalyse individuell-dynamischer Zielführungssysteme im Straßenverkehr.
- Heft 62** **Wilko Manz**
Mikroskopische längsschnittorientierte Abbildung des Personenverkehrs.
- Heft 63** **Torsten Heine-Nims**
Einbeziehung kurzfristiger Verhaltensänderungen bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage.
- Heft 64** **Peter Vortisch**
Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen.
- Heft 65** **Jörg Last**
Barrieren und Potenziale intermodaler Angebotskonzepte im Personenfernverkehr.
- Heft 66** **Tobias Kuhnimhof**
Längsschnittmodellierung der Verkehrsnachfrage zur Abbildung multimodalen Verhaltens.
- Heft 67** **Stefan Geweke**
Wirksamkeit von Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Preisen zur Nutzung von Kapazitätsreserven im Straßennetz.
- Heft 68** **Dirk Wittowsky**
Dynamische Informationen im ÖPNV – Nutzerakzeptanz und Modellierung.

Ab Band 69 erscheint die Reihe bei KIT Scientific Publishing.

- Band 69 Peter Ottmann**
Abbildung demographischer Prozesse in Verkehrsentstehungsmodellen mit Hilfe von Längsschnittdaten.
ISBN 978-3-86644-555-0
- Band 70 Martin Kagerbauer**
Mikroskopische Modellierung des Außenverkehrs eines Planungsraums.
ISBN 978-3-86644-553-6
- Band 71 Matthias Wirtz**
Flexible Tarife in elektronischen Fahrgeldmanagementsystemen und ihre Wirkung auf das Mobilitätsverhalten.
ISBN 978-3-7315-0206-7
- Band 72 Ulrike Leyn**
Einfluss von Instationarität auf die Wartezeit an Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage.
ISBN 978-3-7315-0675-1
- Band 73 Martin Hartmann**
Modellunterstützte Beurteilung der Verkehrsqualität auf Netzabschnitten von Bundesautobahnen.
ISBN 978-3-7315-0868-7
- Band 74 Christine Eisenmann**
Mikroskopische Abbildung von Pkw-Nutzungsprofilen im Längsschnitt.
ISBN 978-3-7315-0841-0
- Band 75 Tim Hilgert**
Erstellung von Wochenaktivitätenplänen für Verkehrsnachfragemodelle.
ISBN 978-3-7315-0973-8

Band 76 **Sven-Eric Molzahn**

Verkehrsphasenbasierte Datenanalyse von zeitlich-räumlichen
Strukturen der Staufronten.

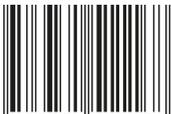
ISBN 978-3-7315-1116-8



Schon seit mehreren Jahren tragen Floating-Car-Daten in der Fahrzeugnavigation zu einer sehr guten Kenntnis der aktuellen Reisezeiten im Straßennetz bei, die in vielen, oft kostenfreien Diensten genutzt werden kann.

Es ist aber auch denkbar, über die Reisezeiten hinaus wertvolle Informationen aus fahrenden Fahrzeugen für die Verbesserung des Verkehrsablaufs zu generieren, insbesondere wenn die Fahrzeuge möglichst detaillierte Daten zur Verfügung stellen. Das ist oft der Fall bei proprietären Daten aus Fahrzeugflotten, die unter anderem zu Diagnosezwecken von den Herstellern erhoben werden. In der vorliegenden Arbeit konnten solche Daten eines Fahrzeugherstellers verwendet werden, um ein System zur Warnung vor Stauenden zu entwickeln. Aus den detailliert übermittelten Trajektorien der Einzelfahrzeuge werden Verzögerungsvorgänge bei der Einfahrt in einen Stau analysiert. Die Situationen, in denen die Verzögerungen auftreten, werden basierend auf einer Theorie des Verkehrsflusses interpretiert und nach Gefährlichkeit klassifiziert. Ergebnis ist ein Verfahren, mit dem in Echtzeit vor besonders gefährlichen Stauende-Situationen gewarnt werden kann.

ISBN 978-3-7315-1116-8



9 783731 511168 >

ISSN 0341-5503

ISBN 978-3-7315-1116-8

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier