

Mikroskopische Verkehrsflusssimulation von Autobahnen mit Streckenbeeinflussungsanlagen

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTOR-INGENIEURIN

von der KIT-Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften,
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Claude Marie Laure Weyland, M.Sc.

geb. in Dudelange, Luxemburg

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Korreferentin:

25. Juli 2023

Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch

Prof. Dr.-Ing. Silja Hoffmann

Kurzfassung

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) werden auf viel befahrenen Autobahnen eingesetzt, um den Verkehrsfluss zu optimieren und die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Eine SBA erfasst den Verkehr und ermittelt mithilfe eines Steuerungsmodells automatisch Geschwindigkeitsbeschränkungen, Überholverbote und Warnungen, die über Wechselverkehrszeichen an der Autobahn angezeigt werden. Die Verkehrsteilnehmenden reagieren auf diese dynamischen Anzeigen und es resultiert eine beeinflusste Verkehrssituation. Ziel dieser Dissertation ist die Abbildung der Wirkung einer SBA in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell.

Die Grundlage für das Verkehrsflussmodell bildet ein etwa 30 Kilometer langer Autobahnabschnitt der A5 in der Nähe von Frankfurt am Main. Zunächst werden umfangreiche Verkehrs- und Schaltdaten ausgewertet, die notwendige Erkenntnisse zum Verkehrsablauf und zur Wirkung der SBA-Anzeigen liefern. Neben einer Betrachtung der Verkehrszusammensetzung, des Verkehrsflusses, der Fahrstreifenaufteilung und des Abstandsverhaltens werden die Quelle-Ziel-Beziehungen auf dem Abschnitt ermittelt. Zusätzlich wird ein Algorithmus für die temporäre Öffnung des Seitenstreifens entwickelt, um die in Realität manuell durchgeführten Schaltungen in der Steuerung abzubilden. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Modellierung und Kalibrierung des Verkehrsflussmodells.

Eine wichtige Komponente ist die Analyse der Akzeptanz der dynamischen Anzeigen einer SBA. Eine Simulation, in der alle Fahrzeuge ausnahmslos ihre Geschwindigkeit an die Geschwindigkeitsbeschränkungen anpassen, alle Lkw sich an das Lkw-Überholverbot halten und der Seitenstreifen als vollwertiger Fahrstreifen akzeptiert wird, wird keine realitätsnahen Ergebnisse liefern. Diese Aspekte werden anhand der Verkehrsdaten untersucht und darauf aufbauend ein

Akzeptanzmodell hergeleitet, das eine realitätsnahe Befolgung wiedergibt und zur simulativen Abbildung von SBA eingesetzt werden kann.

In einem weiteren Schritt wird das Steuerungsmodell SARAH nachgebildet und anhand von realen Detektor- und Schaltdaten validiert. Zusätzlich erfolgt der Modellaufbau des untersuchten Abschnitts mit allen notwendigen Komponenten einer SBA in PTV Vissim. Das Verkehrsflussmodell, das Akzeptanzmodell und das Steuerungsmodell werden anschließend gekoppelt und anhand empirischer Daten zum Verkehrsfluss kalibriert und validiert. Die folgenden Größen zeigen dabei den größten Einfluss bei der Kalibrierung: die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, die Fahrstreifenwechselformen an den Anschlussstellen, die Folgezeitlücken-Verteilungen (*CCI*), die Parameter der Verzögerung bei notwendigen Fahrstreifenwechsel, der Sicherheitsabstandsfaktor und die Freifahrtzeit.

Es resultiert ein Verkehrsflussmodell, das die Verkehrssituation auf einer viel befahrenen deutschen Autobahn inkl. des Schaltverhaltens der SBA und der Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden an einem typischen Werktag realitätsnah abbildet. Ein solches Modell ermöglicht es, verkehrsbeeinflussende Maßnahmen vor einer Realimplementierung simulativ zu untersuchen. Als konkretes Anwendungsbeispiel wird die Ergänzung der konventionellen SARAH-Steuerung um emissionsabhängige Steuerungsmaßnahmen untersucht. Die Simulationen zeigen eine positive Wirkung auf die Emissionen, die auf die Reduktion von Stau durch eine restriktivere Harmonisierung des Verkehrs zurückzuführen ist. Alle betrachteten verkehrlichen Emissionen können leicht gesenkt werden, ohne dass sich die Reisezeiten wesentlich ändern. Dieses Anwendungsbeispiel verdeutlicht, dass das entwickelte Verkehrsflussmodell für die Untersuchung der Auswirkungen von verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen gut geeignet ist.

Diese Dissertation liefert eine Methode zum Aufbau und zur Kopplung aller notwendigen Komponenten für die Abbildung einer Autobahn mit SBA in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell. Neben dem entwickelten Akzeptanzmodell ist die detaillierte Beschreibung der Modellkalibrierung und der relevanten Parameter hervorzuheben. Damit wird ein Leitfaden für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation von Autobahnverkehr in Vissim bereitgestellt, der sowohl für beeinflussten als auch unbeeinflussten Autobahnverkehr eingesetzt werden kann.

Abstract

Freeway control systems are installed on heavily frequented freeways to optimize traffic flow and enhance road safety. Freeway control systems monitor traffic conditions and automatically determine speed limits, overtaking restrictions, and warnings, displayed on variable message signs along the freeway. Road users respond to these dynamic displays, resulting in an influenced traffic situation. This thesis aims to model the impact of freeway control systems using microscopic traffic flow simulation.

The traffic flow model is based on a 30-kilometer section of the federal freeway A5 near Frankfurt am Main. Initially, extensive traffic and traffic control data are analyzed to gain insights into how freeway control affects traffic patterns. In addition to examining traffic composition, traffic flow, lane distribution, and headways, origin-destination relationships along the section are identified. Furthermore, an algorithm is developed to simulate the temporary opening of the hard shoulder lane, mimicking the manual control operations performed in reality. These findings serve as the input for modeling and calibrating the traffic flow model.

A critical component is the analysis of acceptance levels towards the variable message signs. A simulation in which all vehicles adjust their speed to the speed limits, all trucks adhere to the overtaking restrictions, and the hard shoulder lane is fully accepted as a regular lane would not yield realistic results. These aspects are examined based on traffic data, leading to the development of an acceptance model that reflects realistic compliance and can be used to simulate the effects of the freeway control system.

Further, the control algorithm is replicated and validated against field data from detectors and variable message signs. Additionally, the model of the section under

investigation is implemented in PTV Vissim, including all necessary components of a freeway control system. The traffic flow model, acceptance model, and control algorithm are then connected. The model is calibrated and validated against empirical data of traffic flow. The following factors have shown the greatest influence during calibration: desired speed distributions, lane change distances at intersections, gap time distributions (CC1), deceleration parameters for necessary lane changes, safety distance reduction factor, and free driving time.

The result is a traffic flow model that realistically represents the traffic situation on a heavily frequented German freeway, including freeway control measures and the reactions of road users on a typical workday. Such a model enables the simulation-based examination of traffic control measures before their actual implementation. As a use case, the addition of emission-based control measures to the conventional control algorithm is investigated. The simulations demonstrate a positive effect on emissions, attributed to reduced congestion through stricter traffic harmonization. All considered traffic-related emissions can be slightly reduced without significantly affecting travel times. This example illustrates that the developed traffic flow model is suitable for investigating the effects of traffic control measures.

This thesis provides a method for implementing and connecting all necessary components to represent a freeway with a freeway control system in a microscopic traffic flow model. In addition to the developed acceptance model, a detailed description of model calibration and relevant parameters is given. Thus, a guide for microscopic traffic flow simulation of freeway traffic in Vissim is provided, which can be applied to both influenced and uninfluenced freeway traffic.

Vorwort und Danksagung

Ich habe die Arbeiten zu dieser Dissertation zwischen 2017 und 2023 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehrswesen (IfV) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. In dieser Zeit habe ich mich mit vielen verschiedenen Themen beschäftigt, ich habe viel ausprobiert, viel gelernt und mich in vielen Hinsichten weiterentwickelt. Ein Projekt, das mich in dieser Zeit immer begleitet hat und mir sehr am Herzen liegt, ist *U-SARAH*. Das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Rahmen der Forschungsinitiative mFUND geförderte Projekt beschäftigt sich mit der simulativen Optimierung einer umwelt- und lärmabhängigen Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen. Meine Dissertation ist in den Kontext von U-SARAH eingebettet.

Ich bedanke mich bei allen, die mich auf dem anstrengenden, manchmal frustrierenden, aber auch sehr schönen Weg zu dieser Dissertation begleitet haben. Mein erster Dank geht an meinen Hauptreferenten Prof. Dr.-Ing. Peter Vortisch für seine Unterstützung in der ganzen Zeit. Dabei habe ich vor allem den Freiraum für meine Entwicklung und die Unterstützung bei der Wahl meiner Schwerpunkte schätzen gelernt. Bei meiner Korreferentin Prof. Dr.-Ing. Silja Hoffmann bedanke ich mich neben den hilfreichen inhaltlichen Anmerkungen für die unterstützenden Worte in der Schlussphase meiner Arbeit. Ein besonderer Dank gilt meinen Kolleg:innen am IfV, von denen viele in den letzten Jahren zu sehr guten Freund:innen geworden sind. Meinen Verkehrstechnik-Kolleg:innen Sebastian Buck, Verena Zeidler, Marvin Baumann, Josephine Grau und Lea Fuchs danke ich für viele interessante Gespräche, spannende Diskussionen, konstruktives Feedback, Verständnis und Unterstützung in anstrengenden Zeiten und sehr viel Humor bei der Arbeit und beim Feierabendbier. Den Mitstreiter:innen meiner *Promo-Gruppe* Anna Reiffer, Miriam Magdolen, Nadine Kostorz-Weiss und Tim Wörle danke ich für viele

Abende und Wochenenden, an denen wir gemeinsam unseren Zielen ein bisschen nähergekommen sind. Ich wünsche Euch alles Gute und glaube fest daran, dass die Schriftenreihe des IfV bald um Eure Werke wachsen wird. Ein weiterer herzlicher Dank geht an Kim Kandler, die mich in der Schlussphase mit Essen, einem offenen Ohr und einem schnellen Korrektur-Dienst versorgt hat. Auch möchte ich Matthias Glatz, einem der größten Experten für Streckenbeeinflussungsanlagen in Deutschland, dafür danken, dass er mich an seinem Wissen hat teilhaben lassen. Bei Alexander Müller bedanke ich mich für die Hilfe beim Sortieren meiner Gedanken, die zwischen Autobahnverkehr und sonstigen Herausforderungen ab und zu durcheinandergekommen sind. Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die Unterstützung in anstrengenden Zeiten und das Verständnis dafür, dass meine Dissertation oft meine volle Aufmerksamkeit erfordert hat. Dabei geht ein besonderer Dank an meine Eltern und Schwestern für das Vertrauen und die Zuversicht in den akademischen Weg, den ich gewählt habe. Auch meinen Großeltern bin ich sehr dankbar, dass sie mich auf meinem Weg immer unterstützt und bestärkt haben. Zuletzt bedanke ich mich bei meinem Freund Sebastian für viele wertvolle inhaltliche Diskussionen und Anregungen und für seine Geduld mit der er mich in allen Phasen dieser Arbeit unterstützt hat.

Karlsruhe, im September 2023
Claude Weyland

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Vorwort und Danksagung	v
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Begriffserläuterungen	xxiii
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Methode und Aufbau	4
2 Stand der Technik zu Streckenbeeinflussungsanlagen	7
2.1 Einführung und Begriffsdefinitionen	7
2.2 Eigenschaften von Autobahnverkehr in Deutschland	12
2.2.1 Rahmenbedingungen	12
2.2.2 Verkehrsfluss auf Autobahnen	13
2.3 Funktionsweise einer SBA	23
2.3.1 Deutsche Regelwerke	23
2.3.2 Wechselverkehrszeichen zur Streckenbeeinflussung	25
2.3.3 Schaltungsarten und Schaltprogramme	28
2.3.4 Ablauf der Streckenbeeinflussung	31

2.4	Steuerungsmodelle	35
2.4.1	Steuerungsmodell MARZ	35
2.4.2	Steuerungsmodell SARAH	41
2.5	Wirkungen von SBA	53
2.5.1	Befolgung der Verkehrsteilnehmenden	54
2.5.2	Verkehrsfluss und Kapazität	63
2.5.3	Verkehrssicherheit	69
2.5.4	Umweltwirkung	72
2.6	Internationale Literatur im Kontext von SBA	74
3	Stand der Technik zur mikroskopischen	
	Verkehrsflussmodellierung	79
3.1	Einführung	79
3.2	Anforderungen an die Modellierung von Autobahnverkehr	82
3.3	Modellierung von Autobahnverkehr in PTV Vissim	84
3.3.1	Stochastik	84
3.3.2	Fahrzeugfolgeverhalten	86
3.3.3	Fahrstreifenwahl- und Fahrstreifenwechselverhalten	90
3.3.4	Geschwindigkeitsverhalten und Befolgung	96
3.3.5	Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten	97
3.3.6	Verkehrsbeeinflussung	99
3.3.7	Modellkalibrierung und -validierung	100
3.4	Ermittlung von Wunschgeschwindigkeiten	103
3.5	Simulative Untersuchungen von Autobahnverkehr mit SBA	110
4	Empirische Analysen	117
4.1	Untersuchter Autobahnabschnitt	117
4.2	Datengrundlage und Datenaufbereitung	119
4.3	Verkehrsanalysen	124
4.3.1	Tagesganglinien und tägliche Verkehrsstärken	124
4.3.2	Verkehrszusammensetzung	125
4.3.3	Verkehrszustände	129
4.3.4	Fahrstreifenaufteilung	139
4.3.5	Abstandsverhalten	144
4.3.6	Reisezeiten	150

4.4	Temporäre Seitenstreifenfreigabe	153
4.5	Quelle-Ziel-Beziehungen	158
4.6	Datengrundlage für das Verkehrsflussmodell	159
5	Akzeptanzanalysen	163
5.1	Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkungen	163
5.1.1	Geschwindigkeitsverteilungen	164
5.1.2	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen	169
5.2	Befolgung der temporären Seitenstreifenfreigabe	177
5.3	Befolgung des Lkw-Überholverbots	180
5.4	Akzeptanzmodell	182
6	Mikroskopisches Verkehrsflussmodell	185
6.1	Vorgehensweise	185
6.2	Nachbildung des Steuerungsmodells SARAH	187
6.2.1	Aufbau	187
6.2.2	Validierung	188
6.3	Aufbau des Verkehrsflussmodells	191
6.3.1	Netzaufbau	191
6.3.2	Fahrverhalten	193
6.3.3	Modellierung der SBA mit TSF	195
6.4	Kopplung der Komponenten	197
6.5	Kalibrierung	199
6.5.1	Vorgehensweise	199
6.5.2	Plausibilisierung	201
6.5.3	Fahrverhalten	202
6.5.4	Wunschgeschwindigkeiten	213
6.5.5	Verflechtungsmatrizen und Fahrzeugzuflüsse	216
6.5.6	Ergebnisse	217
6.6	Validierung	227
7	Simulative Untersuchung einer Umweltsteuerung	231
7.1	Motivation und Methode	231
7.2	Berechnung der Verkehrsemissionen	234
7.3	Modellierung	235
7.4	Ergebnisse	237

8	Fazit und Ausblick	243
8.1	Fazit	243
8.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	247
	Literaturverzeichnis	251
A	Anhang	277
A.1	Schaltbildfolgen	277
A.2	Ganglinien der Verkehrsstärke	281
A.3	Verkehrszustände	285
A.4	Nettozeitlücken	290
A.5	Reisezeiten	291
A.6	Verkehrskenngrößen bei Öffnung und Schließung der TSF	297
A.7	Geschwindigkeitsverteilungen	301
A.7.1	Datengrundlage der Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD	301
A.7.2	Geschwindigkeitsverteilungen aus Detektordaten	304
A.8	Fahrstreifenaufteilung mit und ohne TSF	307
A.9	Kalibriertes Akzeptanzmodell	315
A.10	Verkehrszustände in der Simulation	317

Abbildungsverzeichnis

2.1	Systemebenen einer SBA	8
2.2	Aufbau einer SBA	10
2.3	Fundamentaldiagramm	16
2.4	q-v-Diagramme zur Beurteilung von Verkehrsüberlastungen	19
2.5	Fahrstreifenaufteilung	21
2.6	Anordnung der WZG über einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn	26
2.7	WVZ nach StVO für WZG Typ A	27
2.8	WVZ nach StVO für WZG Typ B	27
2.9	WVZ nach StVO für WZG Typ C	27
3.1	Modellskizze zum Fahrzeugfolgemodell <i>Wiedemann 99</i>	88
3.2	Geschwindigkeitsabhängige Verteilungsfunktionen für die Lkw-Beschleunigungen in Vissim	98
4.1	Untersuchter Autobahnabschnitt der A5	118
4.2	Schaltzeitpunkte der Anzeigenwechsel innerhalb einer Minute	122
4.3	FCD-Sendeintervalle auf der A5	123
4.4	Typische Tagesganglinien 2021	124
4.5	Schwerverkehrsanteil aus Detektordaten 2019	126
4.6	Zusammensetzung Pkw- und Lkw-ähnlicher Fahrzeuge aus EFZD 2017	127
4.7	Schwerverkehrsanteil - Vergleich Detektordaten und EFZD	128
4.8	Messfehler am Beispiel des Schwerverkehrsanteils	129
4.9	Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Süden vormittags	130
4.10	Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Norden nachmittags	131

4.11	Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkungen	134
4.12	k-q-Diagramme in Abhängigkeit der A-Anzeige	136
4.13	q-v-Diagramme in Abhängigkeit der A-Anzeige	137
4.14	q-v-Diagramme in Abhängigkeit der B-Anzeige	138
4.15	Fahrstreifenaufteilung auf der A5	140
4.16	Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit des Schwerverkehrsanteils	141
4.17	Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit der A-Anzeige	142
4.18	Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit der B-Anzeige	143
4.19	Verteilung der Nettozeitlücken kleiner fünf Sekunden	145
4.20	Nettozeitlücken in Abhängigkeit der Verkehrsstärke	146
4.21	Nettozeitlücken in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse und des Fahrstreifens	147
4.22	Nettozeitlücken in Abhängigkeit der A- und B-Anzeige	148
4.23	Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD - Segmente 1 bis 2	151
4.24	Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD - Segmente 3 bis 5	152
4.25	Häufigkeitsverteilung der Verkehrsstärke vor Öffnung und Schließung der TSF	155
4.26	Häufigkeitsverteilung der mittleren Kfz-Geschwindigkeit vor Öffnung und Schließung der TSF	155
4.27	Häufigkeitsverteilung der mittleren Pkw-Geschwindigkeit vor Öffnung und Schließung der TSF	156
4.28	Häufigkeitsverteilung der lokalen Verkehrsdichte vor Öffnung und Schließung der TSF	156
5.1	Kfz-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD	165
5.2	Pkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD	166
5.3	Lkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD	167
5.4	Unverarbeitete Wunschgeschwindigkeitsverteilungen von Pkw bei einer Dunkelschaltung ohne Geschwindigkeitsbeschränkung	171
5.5	Geschwindigkeits- und Wunschgeschwindigkeitsverteilungen von Pkw bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h	172
5.6	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen von Pkw bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h	174

5.7	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkung und der Dichteklasse	175
5.8	Fahstreifenaufteilung der Kfz mit und ohne TSF	178
5.9	Fahstreifenaufteilung der Pkw und Lkw mit und ohne TSF	179
5.10	Fahstreifenaufteilung der Lkw mit und ohne Lkw-Überholverbot	181
6.1	Komponenten der Modellierung und Datenfluss	186
6.2	Vergleich zwischen den Schaltbildern der realen SBA und der SARAH-Implementierung	189
6.3	Modellierung einer TSF in Vissim	196
6.4	Ablauf der Simulation	198
6.5	Ausfahrt am Nordwestkreuz Frankfurt mit besonderer Markierung	201
6.6	Nettozeitlücken in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse und des Fahstreifens für simulierte und empirische Verkehrsdaten	204
6.7	CCI-Verteilungen in Abhängigkeit des Fahstreifens	206
6.8	Fahstreifenwechseldistanz für Lkw und Pkw	209
6.9	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkung, Fahrzeugklasse und Dichteklasse	215
6.10	Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Süden in einem beispielhaften Simulationslauf	220
6.11	Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Norden in einem beispielhaften Simulationslauf	221
6.12	q-v-Diagramme aus der Simulation - Segmente 1 bis 2	222
6.13	q-v-Diagramme aus der Simulation - Segmente 3 bis 5	223
6.14	Fahstreifenaufteilung in der Simulation	225
7.1	Ablauf der Simulation mit einem Emissionsmodell	236
7.2	Verkehrsemissionen mit und ohne Umweltsteuerung	238
7.3	Reisezeiten mit und ohne Umweltsteuerung	239
7.4	Schaltunterschiede im raumzeitlichen Verlauf in einem beispielhaften Simulationslauf	240
A.1	Schaltbildfolge für die Harmonisierung 120 km/h	278
A.2	Schaltbildfolge für die Harmonisierung 100 km/h	278
A.3	Schaltbildfolge für die Harmonisierung 80 km/h	278
A.4	Schaltbildfolge für die Ausfahrtharmonisierung 80 km/h	279

A.5	Schaltbildfolge für die Stauwarnung	279
A.6	Schaltbildfolge für das Lkw-Überholverbot	279
A.7	Schaltbildfolge für die Niederschlagswarnung	280
A.8	Schaltbildfolge für die Fahrstreifensperrung	280
A.9	Schaltbildfolge für das Baustellenprogramm	280
A.10	Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 1	281
A.11	Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 2	281
A.12	Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 3	282
A.13	Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 4	282
A.14	Wochenganglinien - Segmente 1 bis 2	283
A.15	Wochenganglinien - Segmente 3 bis 5	284
A.16	Raumzeitlicher Verlauf der A- und B-Anzeigen in FR Süden vormittags	285
A.17	Raumzeitlicher Verlauf der A- und B-Anzeigen in FR Norden nachmittags	286
A.18	Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Süden nachmittags	287
A.19	Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Norden vormittags	288
A.20	q-v-Diagramme in Abhängigkeit der A-Anzeige und der Fahrzeugklasse	289
A.21	Nettozeitlücken von Pkw-ähnlichen und Lkw-ähnlichen Fahrzeugklassen	290
A.22	Reisezeiten aus FCD - Segmente 1 bis 2	291
A.23	Reisezeiten aus FCD - Segmente 3 bis 5	292
A.24	Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (17. - 19.09.2019) - Segmente 1 bis 2	293
A.25	Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (17. - 19.09.2019) - Segmente 3 bis 5	294
A.26	Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (24. - 26.09.2019) - Segmente 1 bis 2	295
A.27	Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (24. - 26.09.2019) - Segmente 3 bis 5	296
A.28	Kfz-Geschwindigkeitsverteilungen aus Detektordaten	304
A.29	Pkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus Detektordaten	305
A.30	Lkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus Detektordaten	306
A.31	Fahrstreifenaufteilung der Kfz mit und ohne TSF - FR Norden Segment 2	307

A.32 Fahrstreifenaufteilung der Kfz mit und ohne TSF - FR Norden	
Segment 3	308
A.33 Fahrstreifenaufteilung der Kfz mit und ohne TSF - FR Süden	
Segment 2	309
A.34 Fahrstreifenaufteilung der Kfz mit und ohne TSF - FR Süden	
Segment 3	310
A.35 Fahrstreifenaufteilung der Pkw und Lkw mit und ohne TSF - FR	
Norden Segment 2	311
A.36 Fahrstreifenaufteilung der Pkw und Lkw mit und ohne TSF - FR	
Norden Segment 3	312
A.37 Fahrstreifenaufteilung der Pkw und Lkw mit und ohne TSF - FR	
Süden Segment 2	313
A.38 Fahrstreifenaufteilung der Pkw und Lkw mit und ohne TSF - FR	
Süden Segment 3	314
A.39 Auswahl an raumzeitlichen Verläufen der Verkehrssituation in	
FR Süden in verschiedenen Simulationsläufen	317

Tabellenverzeichnis

2.1	Priorisierung der Schaltanforderungen	34
2.2	Automatikprogramme nach MARZ 99	36
2.3	Verfahren zur Situationserkennung nach dem MARZ 2018	38
2.4	Internationale Verkehrsbeeinflussungssysteme	74
3.1	Modellparameter des Fahrzeugfolgmodells <i>Wiedemann 74</i>	87
3.2	Modellparameter des Fahrzeugfolgmodells <i>Wiedemann 99</i>	89
3.3	Modellparameter des Fahrstreifenwechselverhaltens in Vissim	93
3.4	Streckenattribute mit Einfluss auf das Fahrstreifenwechselverhalten in Vissim	95
4.1	Tägliche Verkehrsstärken 2019	125
4.2	Fahrzeugklassifizierung nach TLS 2012	126
4.3	Eigenschaften der untersuchten TSF	154
6.1	Übereinstimmungen zwischen den A-Anzeigen der realen SBA und der SARAH-Implementierung	190
6.2	Kalibrierte Parameterwerte des Fahrzeugfolgeverhaltens in Vissim	207
6.3	Kalibrierte Parameterwerte des Fahrstreifenwechselverhaltens in Vissim	212
7.1	Ergebnisse der Simulationen mit Umweltsteuerung	241
A.1	Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Öffnung der TSF - FR Süden	297
A.2	Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Öffnung der TSF - FR Norden	298

A.3	Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Schließung der TSF - FR Süden	299
A.4	Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Schließung der TSF - FR Norden	300
A.5	Datengrundlage für Kfz-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD . .	301
A.6	Datengrundlage für Pkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD . .	302
A.7	Datengrundlage für Lkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD . .	303
A.8	Zuordnung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen im Akzeptanzmodell	315

Abkürzungsverzeichnis

AK	Autobahnkreuz
AQ	Anzeigequerschnitt(e)
AS	Anschlussstelle
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (Österreich)
BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CO₂	Kohlenstoffdioxid
COM	component object model
d. h.	das heißt
Di-Mi-Do	Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag
DK	Dichteklasse
EFZD	Einzelfahrzeugdaten
FCD	floating car data

FR	Fahrtrichtung
FS	Fahrstreifen
Fz	Fahrzeug(e)
ggfs.	gegebenenfalls
h	Stunde
H100	Harmonisierungsprogramm 100 km/h
H120	Harmonisierungsprogramm 120 km/h
H80	Harmonisierungsprogramm 80 km/h
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
HFB	Hauptfahrbahn
HFS	Hauptfahrstreifen (rechter Fahrstreifen)
i. d. R.	in der Regel
inkl.	inklusive
Kfz	Kraftfahrzeug(e)
km	Kilometer
Lkw	Lastkraftwagen
Lkw-ÜV	Lkw-Überholverbot
Lnf	leichte Nutzfahrzeuge
LSA	Lichtsignalanlage

m	Meter
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen
min	Minute(n)
mph	miles per hour
MQ	Messquerschnitt(e)
NO_x	Zusammenfassung verschiedener Stickstoffoxide wie bspw. Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO ₂)
Pkw	Personenkraftwagen
Pkw-E	Pkw-Einheit
PM₁₀	Feinstaub (Partikel mit aerodynamischem Durchmesser < 10 Mikrometer)
QS	Querschnitt
RMSE	root mean square error
RMSPE	root mean square percentage error
RWVA	Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen
RWVZ	Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen
RZ	Reisezeit
s	Sekunde(n)
SARAH	Streckensteuerung mit antizipierendem regelbasiertem Ansatz in Hessen

SBA	Streckenbeeinflussungsanlage(n)
SKA	Ausschaltkriterium
SKE	Einschaltkriterium
SSt	Streckenstation(en)
StVO	Straßenverkehrsordnung
SV	Schwerverkehr bzw. Schwerverkehrsanteil
t	Tonne(n)
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
TSF	temporäre Seitenstreifenfreigabe
u. a.	unter anderem
ÜFS	Überholfahrstreifen
ÜV	Überholverbot
UZ	Unterzentrale(n)
VAP	Verkehrsabhängige Programmierung
VBA	Verkehrsbeeinflussungsanlage(n)
VRZ	Verkehrsrechnerzentrale(n)
WVZ	Wechselverkehrszeichen
WZG	Wechselverkehrszeichengeber
ZL	Zeitlücke (Nettozeitlücke)

Begriffserläuterungen

Akzeptanz	Verhaltensänderung der Verkehrsteilnehmenden im Zusammenhang mit den angezeigten Vorschrift- oder Gefahrenzeichen; Bereitschaft, dynamische Schaltbilder hinzunehmen und zu befolgen.
Anzeige	Synonym: Schaltbild, Schaltbildkombination, Wechselverkehrszeichen
Anzeigenfolge	Synonym: Schaltbildfolge
Anzeigequerschnitt	Lokaler fahrtrichtungsbezogener Querschnitt auf dem beeinflussten Abschnitt, der mit einer Schilderbrücke und einer Gruppe von Wechselverkehrszeichengebern zur Anzeige von Schaltbildern ausgestattet ist.
Ausschaltbedingung	Synonym: Ausschaltkriterium, Schaltkriterium
Ausschaltkriterium	Das Steuerungsmodell vergleicht die Verkehrsdaten mit den Schwellenwerten für die Rücknahme der Schaltprogramme und stellt eine Schaltanforderung, wenn die Bedingungen erfüllt sind. Synonym: Ausschaltbedingung, Schaltkriterium
Automatikprogramm	Schaltprogramm mit definierter Zusammenstellung von Schaltbildern und Schaltbildfolgen, die bei Erfüllung der Einschaltkriterien als Schaltanforderungen herausgegeben werden. Bei Automatikprogrammen erfolgt die Aktivierung und Deaktivierung der

	Wechselverkehrszeichen automatisch auf Basis der erfassten Verkehrs- und Umfelddaten.
Befolgung	Synonym: Befolungsgrad
Befolungsgrad	Anteil an Verkehrsteilnehmenden, die die vorgeschriebene Geschwindigkeit einschließlich einer Toleranz unterschreiten. Es kann ebenfalls die Befolgung des Lkw-Überholverbots oder anderer Maßnahmen betrachtet werden. Der Befolungsgrad hängt von der Akzeptanz der angeordneten Maßnahmen und der aktuellen Verkehrssituation ab. Synonym: Befolgung
Belegungsgrad	Summe der Verweildauern aller Fahrzeuge auf einem Detektor während eines Erfassungsintervalls im Verhältnis zur Gesamtdauer des Erfassungsintervalls.
Bemessungsverkehrsstärke	Die Bemessungsverkehrsstärke fließt in das SARAH-Steuerungsmodell ein. Die Berechnung ist in Kapitel 2.4.2 erläutert. Im Kontext dieser Dissertation handelt es sich bei dem Begriff nicht um die <i>maßgebende Bemessungsverkehrsstärke</i> des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [HBS, 2015].
Blindschaltung	Schaltung ohne sichtbare Anzeige
Bruttozeitlücke	Zeitlicher Abstand zwischen den durch einen Detektor erfassten Vorder- bzw. Hinterkanten zweier aufeinander folgender Fahrzeuge.
Detektoren	Hardware zur Erfassung des Verkehrs und der Umfeldsituation
Einschaltbedingung	Synonym: Einschaltkriterium, Schaltkriterium

Einschaltkriterium	Das Steuerungsmodell vergleicht die Verkehrsdaten mit den Schwellenwerten für die Aktivierung der Schaltprogramme und stellt eine Schaltanforderung, wenn die Bedingungen erfüllt sind. Synonym: Einschaltbedingung, Schaltkriterium
fahrtrichtungsbezogen	bezogen auf alle Fahrstreifen einer Fahrtrichtung an einem Mess- oder Anzeigequerschnitt
Geschwindigkeitstrichter	schrittweise Reduzierung der Geschwindigkeit Synonym: Trichterung
Handschaltung	Synonym: manuelle Schaltung
Harmonisierung	Verbesserung der Stabilität des Verkehrsflusses durch eine Reduzierung der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrzeugen.
Kurzzeitdaten	Von der SBA zu Steuerungszwecken erfasste Verkehrsdaten, die die Grundlage für die Schaltprogramme sind.
Laengsabgleich	Abstimmung der Anzeigen aufeinanderfolgender Anzeigequerschnitte
Latenz	Durch die Messung, Datenübertragung und Datenverarbeitung entstehende Verzögerung zwischen Datenerfassung und Anzeige der Schaltbilder.
manuelle Schaltung	Auslösung von Schaltbefehlen durch das Bedienpersonal Synonym: Handschaltung
Messintervall	Parametrisierbare Zeitspanne, auf die die erfassten Verkehrsdaten aggregiert werden.

Messquerschnitt	Lokaler fahrtrichtungsbezogener Querschnitt auf dem beeinflussten Abschnitt, an dem Verkehrsdaten erfasst werden.
Mindeststandzeit	Eine Schaltanforderung für die Beendigung eines Schaltprogramms wird erst generiert, wenn das Ausschaltkriterium erfüllt ist und das Schaltprogramm bereits für eine gewisse die Zeitdauer (Mindeststandzeit) ununterbrochen angezeigt wurde.
Nebenfahrbahn	Fahrbahn im Bereich von Anschlussstellen, die baulich von der Hauptfahrbahn getrennt ist. Synonym: Verteilerfahrbahn
Nettozeitluecke	Zeitlicher Abstand zwischen der durch einen Detektor erfassten Hinterkante eines vorausfahrenden Fahrzeugs und der Vorderkante des nachfolgenden Fahrzeugs.
Operator:in	Bedienperson in der Verkehrsrechnerzentrale
Priorisierung	An einem Anzeigequerschnitt können mehrere Schaltprogramme Schaltanforderungen stellen. Diese Schaltanforderungen werden priorisiert, sodass i. d. R. die restriktivste Schaltanforderung Vorrang hat.
Pulk	In einem Fahrzeugpulk werden alle Fahrzeuge mit Ausnahme des bzw. der ersten Fahrzeuge in ihrem Geschwindigkeitsverhalten durch mindestens ein vorausfahrendes Fahrzeug beeinflusst [FGSV, 2020]. Eine solche Fahrzeugkolonne charakterisiert sich durch geringe Zeitlücken und ein einheitliches Geschwindigkeitsniveau im Pulk.
Querabgleich	Abstimmung der einzelnen Anzeigen eines Anzeigequerschnitts

querschnittsbezogen	Synonym: richtungsbezogen
richtungsbezogen	bezogen auf alle Fahrstreifen einer Richtungsfahr- bahn Synonym: querschnittsbezogen
Richtungsfahrbahn	Baulich von der Gegenfahrbahn getrennte Fahrbahn in eine Fahrtrichtung einer Autobahn.
Rohdaten	unbearbeitete Daten
Schaltanforderung	Das Steuerungsmodell stellt für jeden Anzeigequer- schnitt je nach Verkehrs- und Umfeldsituation Anfor- derungen für Schaltprogramme. Alle Schaltanforde- rungen werden priorisiert und abgeglichen, anschlie- ßend resultiert ein Schaltbefehl.
Schaltbefehl	Das Steuerungsmodell gibt die Information zur Än- derung einer oder mehrerer Anzeigen an die Anzei- gequerschnitte heraus.
Schaltbild	Verkehrszeichen oder Text, die je nach Verkehrssi- tuation auf einem Wechselverkehrszeichengeber an- gezeigt werden. Synonym: Anzeige, Wechselverkehrszeichen
Schaltbildfolge	Abfolge von Schaltbildern, die Verkehrsteilnehmen- de beim Durchfahren einer SBA an aufeinanderfol- genden Anzeigequerschnitten passieren. Synonym: Anzeigenfolge
Schaltbildkombination	Gesamtheit aller Schaltbilder, die zu einem Zeitpunkt an einem Anzeigequerschnitt abgebildet sind. Synonym: Anzeige, Schaltbild, Wechselverkehrszei- chen

Schaltgrund	Schaltprogramm, das den finalen Schaltbefehl an einem Anzeigequerschnitt ausgelöst hat.
Schaltkriterium	Synonym: Einschaltbedingung, Einschaltkriterium, Ausschaltbedingung, Ausschaltkriterium
Schaltprogramm	Je nach Verkehrs- und Umfeldsituation können verschiedene Schaltprogramme mit unterschiedlichen Beeinflussungsstrategien geschaltet werden. Ein Schaltprogramm erzeugt definierte Schaltanforderungen für einen oder mehrere Anzeigequerschnitte. Bsp.: Stauprogramm, Harmonisierungsprogramm Synonym: Steuerungsprogramm
Schaltverzögerung	Eine Schaltanforderung wird erst generiert, wenn das Einschaltkriterium für eine gewisse die Zeitdauer (Schaltverzögerung) ununterbrochen erfüllt ist.
Schwellenwert	Grenzwert, der bei Über- oder Unterschreitung eine Schaltanforderung auslöst.
Steuerungsalgorithmus	Synonym: Steuerungsmodell, Steuerungslogik
Steuerungsintervall	Parametrisierbares Zeitintervall, in dem das Steuerungsmodell mit neuen Verkehrsdaten durchlaufen wird. Das Steuerungsintervall entspricht dem Messintervall einer SBA.
Steuerungslogik	Synonym: Steuerungsmodell, Steuerungsalgorithmus
Steuerungsmodell	In einer SBA hinterlegte Logik zur Steuerung des Verkehrs. Eingangsgrößen in das Steuerungsmodell sind u. a. der Verkehrszustand und die Umfelddaten. Es resultieren Schaltbilder zur Beeinflussung des Verkehrs. Synonym: Steuerungsalgorithmus, Steuerungslogik

Steuerungsprogramm Synonym: Schaltprogramm

Streckenbeeinflussungsanlage

Anlage zur Verkehrsbeeinflussung auf einem Abschnitt einer Autobahn.

Streckenstation

Eine Streckenstation ist eine lokale Einrichtung an einer Bundesfernstraße zur Datenerfassung (Verkehrs- und Umfelddaten), Datenaggregation und Weitergabe von Schaltbefehlen an Wechselverkehrszeichen. Streckenstationen sind einer Unterzentrale untergeordnet.

stromabwaerts

in Fahrtrichtung

stromaufwaerts

entgegen der Fahrtrichtung

temporaere Seitenstreifenfreigabe

Anlage an Bundesfernstraßen zur zeitlich begrenzten Freigabe des befestigten Seitenstreifens für den fließenden Verkehr

Trichterung

Synonym: Geschwindigkeitstrichter

Umfelddaten

Messwerte, die den Umfeldzustand in einem Bereich beschreiben.

Beispiele: Sichtweite, Witterung, Temperatur, ...

Unterzentrale

Eine Unterzentrale stellt die Systemebene zwischen einer Verkehrsrechnerzentrale und den Streckenstationen dar und umfasst die Hardware und Software zur Steuerung einer SBA. Von Unterzentralen aus werden die Datenerfassung, -übertragung und -ausgabe gesteuert.

Verkehrsbeeinflussung

Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung haben zum Ziel, das Fahrverhalten, die Routenwahl oder Verkehrsmittelwahl der Verkehrsteilnehmenden zu verändern.

Verkehrsrechnerzentrale

Eine Verkehrsrechnerzentrale ist der zentrale Punkt im Bundesfernstraßennetz eines Bundeslandes. Von dort wird der Betrieb der Verkehrsbeeinflussungs- und Verkehrsleitsysteme überwacht. Eingriffe in die Steuerung sind von der Verkehrsrechnerzentrale aus möglich. Die Unterzentralen sind einer Verkehrsrechnerzentrale untergeordnet.

Verkehrsstärke

fahrstreifen- oder richtungsbezogene Menge aller Fahrzeuge innerhalb eines Zeitintervalls

Verriegelungsmatrix

Matrix mit allen nicht erlaubten Schaltbildkombinationen von Wechselverkehrszeichen für einen Anzeigequerschnitt

Verteilerfahrbahn

Synonym: Nebenfahrbahn

Wechselverkehrszeichen

Synonym: Anzeige, Schaltbild

Wechselverkehrszeichengeber

Hardware zur dynamischen Anzeige von Wechselverkehrszeichen

1 Einführung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) werden auf viel befahrenen Autobahnen eingesetzt, um den Verkehrsfluss zu optimieren und die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Eine SBA verfügt über Mess- und Anzeigequerschnitte, die mit Detektoren und Wechselverkehrszeichengebern ausgestattet sind. An den Messquerschnitten werden die Verkehrssituationen erfasst und mithilfe eines Steuerungsmodells Schaltbilder ermittelt. Neben den Verkehrsdaten (Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit) fließen auch die Umfeldbedingungen wie Wetter und aktuelle sicherheitsrelevante Informationen, bspw. Verkehrsunfälle oder Baustellen, in das Steuerungsmodell ein. Basierend auf den erfassten Daten werden automatisch Geschwindigkeitsbeschränkungen, Überholverbote und Warnungen an den Anzeigequerschnitten angeordnet. Die Verkehrsteilnehmenden reagieren auf diese dynamischen Anzeigen und es entsteht eine beeinflusste Verkehrssituation.

Die Möglichkeiten der Modifikation und der Parametrisierung des Steuerungsmodells einer SBA sind vielfältig. Änderungen am Algorithmus wirken sich auf die Verkehrsbeeinflussung und damit auf den resultierenden Verkehrsfluss aus. Die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmenden variiert für unterschiedliche Schaltprogramme und Schaltbilder und hängt zudem noch von weiteren Faktoren, insbesondere von der wahrgenommenen Verkehrssituation, ab. Es ist jedoch schwierig, verschiedene Steuerungsmodelle in umfangreichem Maße im Realbetrieb zu testen, da mögliche fehlerhafte Schaltungen weitreichende Auswirkungen haben können. Fehlschaltungen können Stau auslösen, offensichtliche Fehlanzeigen können

zu einem Akzeptanzverlust führen und im schlimmsten Fall können Fehlschaltungen Unfälle begünstigen.

Ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell einer Autobahn inkl. aller Steuerungsmaßnahmen ermöglicht es, die Auswirkungen verschiedener Steuerungsmodelle vor einer realen Implementierung ausführlich zu erproben und zu optimieren. Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen werden zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkung von Maßnahmen eingesetzt. Komplexe Verkehrsabläufe können dabei durch die Abbildung auf Einzelfahrzeugebene realitätsnah modelliert werden. Alle relevanten Streckeneigenschaften und verkehrlichen Kenngrößen werden im Modell hinterlegt bzw. anhand von empirischen Verkehrsdaten kalibriert. In Fällen, in denen analytische Bewertungsmethoden nicht ausreichend oder nicht durchführbar sind, können komplexe Zusammenhänge, beeinflussende Faktoren und Wechselwirkungen in der Simulation untersucht werden.

Im Bereich von innerstädtischen Verkehrsanlagen sind mikroskopische Simulationen gängige Praxis bei der Planung, Optimierung und Bewertung von Verkehrsabläufen. Innerorts ist der Verkehrsfluss maßgeblich vom Verkehrsablauf an Knotenpunkten geprägt, an denen der Verkehr nach eindeutigen Regeln abfließt. Um die Wirkung einer Maßnahme beurteilen zu können, müssen diese Regeln und die entsprechenden Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden in der Simulation richtig abgebildet werden. Ein Beispiel sind Lichtsignalanlagen: Zeigt ein Signalgeber Rot, gibt es nach den Verkehrsregeln nur eine mögliche Aktion: Anhalten. Die Verkehrsteilnehmenden reagieren einheitlich auf dieses Signal: sie halten an. Auf Autobahnen sind die Reaktionen auf die geltenden Verkehrsregeln weniger eindeutig definierbar. Der Aktionsspielraum ist bspw. bei Geschwindigkeitsbeschränkungen größer. Die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit darf unterschritten werden und gleichzeitig streut die Befolgung der Geschwindigkeitsanzeigen stark. Die Modellierung und Kalibrierung eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells einer Autobahn ist daher umfangreich und das Potenzial dieses Werkzeugs ist bislang nicht ausgeschöpft.

Ziel dieser Dissertation ist es, die Wirkung einer SBA auf den Verkehrsfluss zu untersuchen und diese Wirkung in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell

abzubilden. Es wird eine Methode zum Modellaufbau und zur Kopplung der Simulation mit dem Steuerungsmodell entwickelt und vorgestellt. Dabei ist sowohl die realitätsnahe Abbildung der Befolgung der dynamischen Anzeigen als auch die Kalibrierung des Verkehrs und des nachgebildeten Steuerungsmodells essenziell für die Aussagekraft der Simulation. Das Ergebnis ist ein Verkehrsflussmodell, das die Verkehrssituation mit allen Steuerungsmaßnahmen realitätsnah abbildet.

Mithilfe solcher Modelle können in Zukunft verkehrsbeeinflussende Maßnahmen simulativ bewertet werden. Mögliche Fragestellungen sind die Auswirkungen von verschiedenen Steuerungsmodellen und Parametrisierungen, die Bedeutung der Position und des Abstands der Mess- und Anzeigequerschnitte oder die Konsistenz der Schaltbildfolgen, die Verkehrsteilnehmende auf ihren Trajektorien durch einen beeinflussten Streckenabschnitt sehen.

Als konkretes Anwendungsbeispiel wird mithilfe des entwickelten Verkehrsflussmodells untersucht, inwiefern die Integration von Verkehrsemissionen in die Steuerungskriterien zu einer Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen auf dem Streckenabschnitt führen kann. Viele Ansätze zur Senkung von Verkehrsemissionen beruhen auf langfristigen und dauerhaften Maßnahmen wie bspw. Fahrverboten und Umweltzonen. Es soll die Frage beantwortet werden, ob mithilfe von dynamischer Verkehrsbeeinflussung die Luftemissionen des Autobahnverkehrs gesenkt werden können, ohne den Verkehr unnötig auszubremsen. Eine solche Weiterentwicklung konventioneller Steuerungsmodelle könnte in bereits existierende SBA implementiert werden.

Diese Dissertation basiert auf Arbeiten, die vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) im Rahmen der Forschungsinitiative mFUND gefördert wurden. Die Verkehrsdaten und Informationen zu dem Steuerungsmodell SARAH wurden von der Autobahn GmbH zur Verfügung gestellt.

1.2 Methode und Aufbau

Zur Abbildung der Wirkung einer SBA in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell werden in dieser Dissertation drei Komponenten erarbeitet. Es wird ein Verkehrsflussmodell einer deutschen Bundesautobahn, die mit einer SBA ausgestattet ist, aufgebaut und anhand von Verkehrsdaten kalibriert. Zusätzlich wird das hinterlegte Steuerungsmodell in Python implementiert und die Parameter und Schwellenwerte des Algorithmus werden mithilfe von realen Verkehrs- und Schaltdaten validiert. Die dritte Komponente ist ein Akzeptanzmodell, das die Reaktion der Verkehrsteilnehmenden auf die dynamischen Anzeigen der SBA abbildet. Das Verkehrsflussmodell, das Steuerungsmodell und das Akzeptanzmodell werden anschließend verknüpft. Das Ergebnis ist ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell einer deutschen Bundesautobahn, inkl. aller verkehrssteuernden Maßnahmen. Vor allem die Abbildung der Reaktion der Verkehrsteilnehmenden auf dynamische SBA-Anzeigen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ist bisher wenig erforscht.

Eine Literaturstudie liefert einen Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik. Zunächst werden die Grundlagen zu Streckenbeeinflussungsanlagen in Kapitel 2 behandelt. Es werden die Eigenschaften von deutschem Autobahnverkehr thematisiert und erläutert, wie SBA funktionieren. Des Weiteren wird geklärt, welche Steuerungsmodelle in Deutschland zum Einsatz kommen und wie diese aufgebaut sind. Zudem wird aufbereitet, welche wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Wirkung und Befolgung von SBA bekannt sind und welche internationalen Erfahrungen vorliegen. In Kapitel 3 erfolgt eine Literatursichtung zur mikroskopischen Modellierung und Kalibrierung von Autobahnen. Ein Fokus liegt dabei auf Ansätzen zur Abbildung von Maßnahmen der dynamischen Verkehrsbeeinflussung in der Simulation. Zusätzlich wird die Ermittlung von Wunschgeschwindigkeiten als Eingangsgröße in ein Modell thematisiert.

Als Vorbereitung auf die Modellentwicklung wird ein Autobahnabschnitt der Bundesautobahn A5 mit SBA festgelegt, der für die Untersuchung geeignet ist. Kapitel 4 behandelt die Datenanalyse der Verkehrs- und Schaltdaten dieser SBA.

Neben einer Betrachtung u. a. des Verkehrsflusses, der Fahrstreifenaufteilung, der Verkehrszusammensetzung und des Abstandsverhaltens liegt ein Schwerpunkt auf der Ermittlung der Quelle-Ziel-Beziehungen auf dem Abschnitt. Zusätzlich wird mithilfe der Verkehrsdaten und der Informationen zur Öffnung und Schließung der temporären Seitenstreifenfreigabe ein Algorithmus für die Befahrung des Seitenstreifens entwickelt. Die Erkenntnisse und Ergebnisse dienen als Grundlage für die Abbildung dieser Aspekte im Modell.

Kapitel 5 befasst sich mit verschiedenen Akzeptanzanalysen. Es werden die drei Aspekte Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkungen, Befolgung der TSF und Befolgung des Lkw-Überholverbots untersucht. Die Erkenntnisse fließen zusammen mit den Informationen aus der Literatursichtung in ein Akzeptanzmodell ein, das an das Verkehrsflussmodell gekoppelt wird.

Die Modellierung des untersuchten Autobahnabschnitts wird in Kapitel 6 vorgestellt. Zunächst wird das Steuerungsmodell, das in Form eines Lastenhefts zur Verfügung steht, nachgebildet und validiert. In einem weiteren Schritt erfolgt der Modellaufbau des untersuchten Streckenabschnitts mit allen notwendigen Komponenten einer SBA. Über eine Schnittstelle werden sowohl das Steuerungsmodell als auch das Akzeptanzmodell an die Simulation gekoppelt. In einem letzten Schritt wird die Kopplung aus Verkehrsflussmodell, Steuerungsmodell und Akzeptanzmodell anhand empirischer Daten kalibriert und validiert.

Das entwickelte Verkehrsflussmodell wird in Kapitel 7 für die simulative Untersuchung einer Umweltsteuerung eingesetzt. In diesem Anwendungsbeispiel erfolgt die Berechnung der Verkehrsemissionen in der Simulation anhand des Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA). Das Steuerungsmodell wird um Emissionskriterien erweitert und der durch diese neue Umweltsteuerung beeinflusste Verkehr wird simulativ analysiert.

Kapitel 8 schließt die Dissertation mit einem Fazit und Ausblick ab.

2 Stand der Technik zu Streckenbeeinflussungsanlagen

2.1 Einführung und Begriffsdefinitionen

Das deutsche Bundesfernstraßennetz wurde bis 2020 von den Bundesländern im Auftrag des Bundes verwaltet. Seit 2021 ist die Autobahn GmbH des Bundes zuständig für die Planung, den Bau, den Betrieb, den Erhalt und die Finanzierung von Autobahnen [Autobahn GmbH, 2021]. Ein wichtiges Aufgabenfeld im Bereich des Betriebs von Autobahnen sind Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung. Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) können wie folgt untergliedert und charakterisiert werden [MARZ, 2018]:

- Netzbeeinflussungsanlagen zur Beeinflussung der Routenwahl
- Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) zur Beeinflussung der gefahrenen Geschwindigkeiten und des Fahrverhaltens
- Anlagen zur temporären Seitenstreifenfreigabe (TSF) zur zeitlich begrenzten und bedarfsangepassten Erhöhung der Kapazität
- Knotenbeeinflussungsanlagen zur Zuflussregelung und zur variablen Fahrstreifenzuteilung
- temporäre verkehrstelematische Systeme bspw. zur Absicherung von Arbeitsstellen
- Kombinationen aus den vorherigen Anlagen

Eine Verkehrsrechnerzentrale (VRZ) stellt dabei die zentrale Komponente der VBA in einem Bundesland dar und ist für den Betrieb, die Koordination, die Überwachung und die Optimierung der Systeme zuständig. Unterzentralen (UZ) bilden die Systemebene unterhalb einer Verkehrsrechnerzentrale und umfassen die Hardware und Software zur Verkehrsbeeinflussung. Streckenstationen (SSt) sind lokale Einrichtungen an Bundesfernstraßen zur Datenerfassung (Verkehrs- und Umfelddaten), Datenaggregation und Datenausgabe in Form von dynamischen Anzeigen. Mehrere Streckenstationen sind einer Unterzentrale untergeordnet. Abbildung 2.1 zeigt die beschriebenen Systemebenen am Beispiel einer SBA. [MARZ, 2018; RWVA, 1997; TLS, 2012]

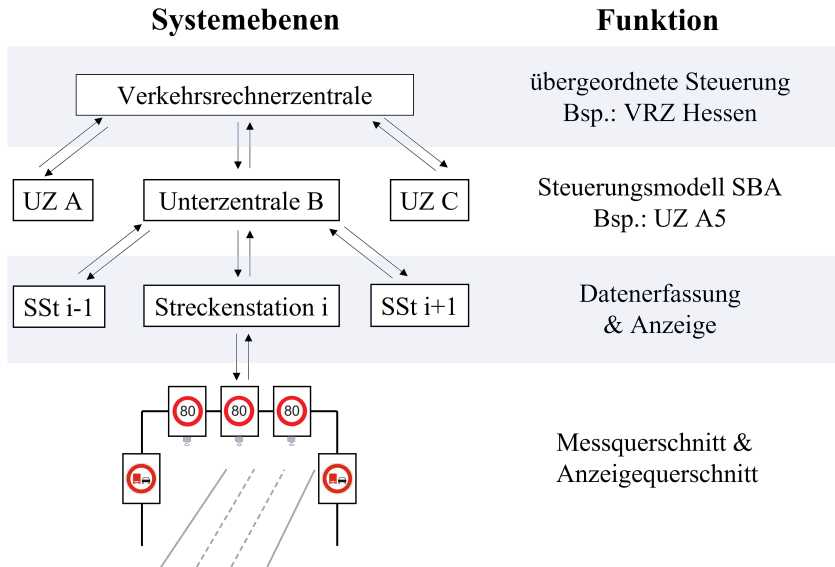


Abbildung 2.1: Systemebenen einer SBA (eigene Darstellung nach Informationen aus [MARZ, 2018; RWVA, 1997; TLS, 2012])

SBA sind eine wichtige Maßnahme der Verkehrsbeeinflussung auf stark belasteten und stauanfälligen Bundesfernstraßen. Sie erfüllen dabei folgende Aufgaben:

- Beeinflussung der Geschwindigkeiten zur Harmonisierung des Verkehrsflusses bei hohen Verkehrsstärken
- Stauwarnung mit Geschwindigkeitstrichter vor dem Stauende
- Geschwindigkeitsbeschränkung bei schlechten Witterungsverhältnissen (bspw. Nässe)
- Lkw-Überholverbot (Lkw-ÜV) bei hohen Verkehrsstärken und hohen Schwerverkehrsanteilen zur Verbesserung des Verkehrsflusses
- Sortierraumbeschränkungen an hochbelasteten Ein- und Ausfahrbereichen
- Nebelwarnung
- Warnung vor glatter Fahrbahn
- Warnung in besonderen Situationen (bspw. Unfall oder Baustelle)
- temporäre Freigabe des Seitenstreifens bei hohen Verkehrsstärken

Im Gegensatz zu statischen Geschwindigkeitsbeschränkungen ist die zeitliche Variabilität der Anzeigen ein Grundsatz von SBA. Der Verkehr wird nur beeinflusst, wenn es die Verkehrssituation erfordert [RWVA, 1997]. Die dynamischen Anzeigen der Wechselverkehrszeichen sind für die Verkehrsteilnehmenden genauso verbindlich wie Anordnungen durch statische Verkehrszeichen.

Streckenabschnitte, die mit einer SBA ausgestattet sind, verfügen alle 800 bis 2.500 Meter über eine Streckenstation, die i. d. R. Messquerschnitte (MQ) und Anzeigequerschnitte (AQ) umfasst [RWVA, 1997]. Die Messquerschnitte erfassen Kenngrößen des Verkehrsflusses und der Umfeldbedingungen. Ein Steuerungsalgorithmus wertet die Verkehrs- und Umfeldsituation aus und es resultieren an die aktuelle Situation angepasste Wechselverkehrszeichen (WVZ), die an den Anzeigequerschnitten angezeigt werden. Es ist Aufgabe der Streckenstationen, die Daten

zu erfassen und die Schaltbefehle an die Wechselverkehrszeichengeber (WZG) der Anzeigequerschnitte weiterzuleiten [TLS, 2012].

Abbildung 2.2 erläutert den Aufbau einer SBA am Beispiel eines Stauprogramms. Abbildung 2.2a zeigt eine Stausituation, die von dem Messquerschnitt n detektiert wird. Daraufhin wird das Schaltprogramm *Stauwarnung* geschaltet. Dieses entspricht einem Geschwindigkeitstrichter mit Stauwarnung stromaufwärts des Staus. Es ist das Ziel, die gefahrenen Geschwindigkeiten im Zulauf des Staus zu reduzieren. Abbildung 2.2b zeigt die Komponenten der SBA.

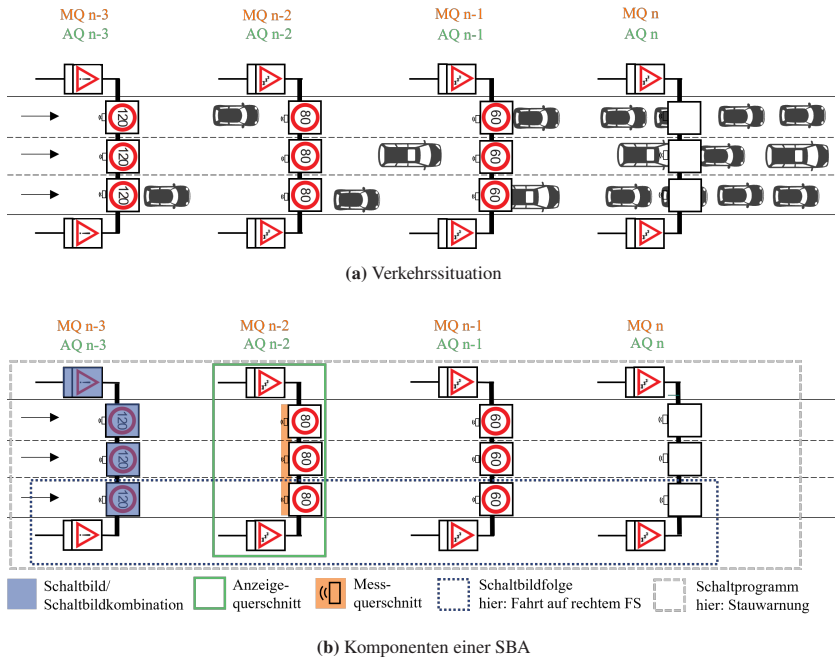


Abbildung 2.2: Aufbau einer SBA (eigene Darstellungen)

Die Verkehrsteilnehmenden reagieren auf die dynamischen Anzeigen und es entsteht eine beeinflusste Verkehrssituation. Ausschlaggebend für die Wirkung einer SBA ist die Akzeptanz der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen und

die daraus resultierende Befolgung. Nicht nachvollziehbare Geschwindigkeitsbeschränkungen erzielen i. d. R. eine geringere Befolgung als Geschwindigkeitsbeschränkungen, bei denen die Verkehrsteilnehmenden erkennen, dass sie aus der vorherrschenden Verkehrssituation resultieren.

Ein Ziel einer SBA ist es, den Verkehr zu harmonisieren und dadurch den Verkehrsfluss zu optimieren und die Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Eine Harmonisierung des Verkehrsflusses trägt zudem zu einer Reduktion der Unfallgefahr und der Umweltbelastung durch den Verkehr bei. Ein weiteres Ziel ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Schaltung von Gefahrenwarnungen im Bereich von SBA (bspw. Warnung vor Unfall oder Baustelle).

Die Voraussetzung für die Ausstattung eines Autobahnabschnitts mit einer SBA ist ein hohes Störpotenzial. Dieses Störpotenzial kann ein überdurchschnittliches Unfallgeschehen, ein überdurchschnittlich hohes Verkehrsaufkommen mit hoher Stauanfälligkeit oder ein überdurchschnittliches Gefahrenpotenzial durch Witterungseinflüsse sein. Des Weiteren muss der Einsatz und Betrieb einer SBA wirtschaftlich sein. In die Nutzen-Kosten-Berechnung gehen dabei vorrangig die Abschätzung vermeidbarer Unfälle und erzielbarer Reisezeitgewinne ein. Die Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmenden ist eine weitere Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb einer SBA. [RWVA, 1997]

Die folgenden Unterkapitel beschäftigen sich im Detail mit einzelnen Aspekten einer SBA. Weitere Quellen, die neben den deutschen Regelwerken (siehe Kapitel 2.3.1) eine gute Einführung in die Thematik liefern und als weiterführende Literatur herangezogen werden können, sind u. a. Schick [2003], Riegelhuth und Glatz [2015], Riegelhuth und Sandrock [2018], Listl u. a. [2020], Schwietering u. a. [2021] und Hilgers u. a. [2022].

2.2 Eigenschaften von Autobahnverkehr in Deutschland

2.2.1 Rahmenbedingungen

Um die Wirkungsweise von SBA verstehen und einordnen zu können, sind zunächst die allgemeinen Eigenschaften von deutschem Autobahnverkehr von Relevanz. Dabei ist vorrangig die Abwesenheit einer allgemeinen Geschwindigkeitsbeschränkung für Pkw auf Autobahnen (§ 3 StVO [2013]) hervorzuheben. Die Geschwindigkeit von Lkw ist hingegen auf 80 km/h beschränkt. Dadurch kommt es je nach Verkehrssituation zu großen Streuungen der gefahrenen Geschwindigkeiten, was zum einen Verkehrsstörungen begünstigt und zum anderen die Unfallgefahr und -schwere erhöht. Im Zusammenhang mit SBA erfordern die zum Teil sehr hohen Pkw-Geschwindigkeiten Harmonisierungsprogramme wie bspw. die Harmonisierung auf 120 km/h. In Ländern mit allgemeinen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen spielt die Harmonisierung der Geschwindigkeiten daher eine weniger wichtige Rolle als in Deutschland.

Zusätzlich gilt in Deutschland ein Rechtsfahrgebot (§ 2 StVO [2013]). Schnelle Fahrzeuge bewegen sich zum Überholen nach links, wohingegen sich langsame Fahrzeuge rechts einordnen. Es entsteht ein Geschwindigkeitsgefälle von links nach rechts. Die Fahrgeschwindigkeit hängt also stark von der Fahrstreifenwahl ab, wodurch Fahrstreifenwechsel angeregt werden.

Deutsche Autobahnen haben i. d. R. vier- oder sechsstreifige Querschnitte auf der freien Strecke. In Ballungsräumen existieren vereinzelt achtstreifige Autobahnabschnitte. Lkw fahren i. d. R. rechts und überholen wenig. Je nach Schwerverkehrsanteil kann der rechte Fahrstreifen durch Lkw ausgelastet sein. Tendenziell ist feststellbar, dass die Pkw den rechten Fahrstreifen weniger nutzen. Pkw fahren trotz Rechtsfahrgebot vermehrt auf dem mittleren oder linken Fahrstreifen, auch wenn die Verkehrssituation und die Wunschgeschwindigkeit eine Einordnung rechts ermöglichen würden.

Ein weiteres Merkmal sind geringe Abstände zwischen den Anschlussstellen auf deutschen Autobahnen. Vor allem in Ballungsräumen sind Anschlussstellendichten von wenigen Kilometern keine Seltenheit. Dies bringt viele notwendige Fahrstreifenwechsel bedingt durch die Routen der Verkehrsteilnehmenden mit sich. Diese Verflechtungen durch ab- und zufließenden Verkehr stellen potenzielle Störungen des Verkehrsflusses dar.

Störanfällige Autobahnabschnitte können vorrangig zur Verbesserung des Verkehrsflusses und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit mit einer SBA ausgestattet werden. 2015 waren etwa 2.300 Autobahnkilometer, was 8,8 % der deutschen Autobahnen entspricht, mit einer SBA ausgestattet [Kollmus u. a., 2017]. Eine Maßnahme zur Erhöhung der Kapazität eines Autobahnabschnitts ist die temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF). Bei Kapazitätsengpässen kann der Seitenstreifen zeitlich begrenzt für den Verkehr freigegeben werden, ohne die Straßeninfrastruktur auszubauen. TSF sind oft in SBA integriert, ein TSF-Betrieb ohne SBA ist ebenfalls möglich.

Die besonderen Rahmenbedingungen erfordern eine Betrachtung der Wirkungen von SBA speziell für Deutschland. Die Untersuchungen und Modellierungen im Rahmen dieser Dissertation konzentrieren sich daher auf deutschen Autobahnverkehr. Der Unterschied zu Autobahnen im internationalen Kontext spielt zudem eine wichtige Rolle bei der Einordnung der Literatur und der Interpretation und Übertragung der Ergebnisse.

2.2.2 Verkehrsfluss auf Autobahnen

Mikroskopische Analysen des Verkehrsflusses betrachten einzelne Fahrzeuge mit ihrem individuellen Fahrverhalten. Die Verkehrsteilnehmenden reagieren aufeinander und auf ihr Umfeld und passen ihr Fahrverhalten an die Verkehrsbedingungen an. Der Verkehrsfluss resultiert aus den Bewegungen der einzelnen Fahrzeuge. Die relevantesten Faktoren des Fahrverhaltens in Bezug auf den Verkehrsfluss auf Autobahnen sind das Längs- und Querverhalten.

Im Längsverkehr beschreibt das Folgeverhalten den Abstand, den Fahrzeuge während eines Folgevorgangs zum vorausfahrenden Fahrzeug halten. Dieser Abstand sollte einen Mindestsicherheitsabstand, der für die Kollisionsfreiheit im Falle eines spontanen Abbremsens des Vorderfahrzeugs notwendig ist, nicht unterschreiten. Das Folgeverhalten ist geschwindigkeitsabhängig und wird i. d. R. in Form von zeitlichem Abstand (Zeitlücken) beschrieben. Dabei wird zwischen Brutto- und Nettozeitlücken unterschieden. Die Bruttozeitlücke beinhaltet die Länge des folgenden Fahrzeugs, sie geht vom gleichen Bezugspunkt zwischen zwei Fahrzeugen (hintere Stoßstange) aus. Die Nettozeitlücke betrachtet den Abstand zwischen zwei Fahrzeugen, sie reicht von der hinteren Stoßstange des vorderen Fahrzeugs bis zur vorderen Stoßstange des folgenden Fahrzeugs. Bei hohen Geschwindigkeiten unterscheiden sich die Brutto- und Nettozeitlücke nur wenig. Würden alle Verkehrsteilnehmenden mit einer konstanten Bruttozeitlücke von zwei Sekunden fahren, würde sich eine Kapazität von 1.800 Kfz/h pro Fahrstreifen einstellen. Neben dem individuellen Sicherheitsempfinden der Verkehrsteilnehmenden wirken sich u. a. das Einschätzungsvermögen von Geschwindigkeiten bzw. Entfernungen und temporäre Unaufmerksamkeiten auf das Abstandsverhalten aus. Die gefahrenen Abstände von menschlichen Fahrenden oszillieren daher, was Verkehrsstörungen im Bereich der Kapazitätsgrenze begünstigt.

Im Querverkehr wird das Fahrstreifenwechselverhalten der Verkehrsteilnehmenden betrachtet. Es wird zwischen notwendigen und freiwilligen Fahrstreifenwechsel unterschieden [Sparmann, 1978]. Notwendige Fahrstreifenwechsel werden durch die Route eines Fahrzeugs bedingt. Freiwillige Fahrstreifenwechsel sind hingegen durch Geschwindigkeitsvorteile auf einem anderen Fahrstreifen oder als Teil eines kooperativen Fahrverhaltens, bspw. um andere Verkehrsteilnehmende beim Verflechten zu unterstützen, motiviert. Fahrstreifenwechsel stellen in mittleren und hohen Verkehrsstärkebereichen eine lokale Störung des Verkehrsflusses dar und wirken sich negativ auf die Kapazität eines Autobahnabschnitts aus. Vereinfachend kann angenommen werden, dass ein Fahrzeug, das den Fahrstreifen wechselt, während dem Wechselvorgang den Platzbedarf eines Fahrzeugs auf beiden Fahrstreifen einnimmt. Aus dem individuellen Querverhalten resultiert eine Aufteilung der Fahrzeuge auf die verfügbaren Fahrstreifen.

Das Geschwindigkeitsverhalten kann mithilfe des Konzepts von Wunschgeschwindigkeiten erklärt werden. Unter der Wunschgeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit verstanden, die eine Person wählt, wenn sie unbeeinflusst durch andere Verkehrsteilnehmende auf einer flachen Strecke fährt [Geistefeldt, 2007]. Verkehrsteilnehmende versuchen sich mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fortzubewegen; sie fahren nicht freiwillig schneller und nicht freiwillig langsamer. Die Wunschgeschwindigkeit einer Person hängt dabei von ihrem individuellen Fahrverhalten, den technischen Möglichkeiten des Fahrzeugs und externen Faktoren wie der Streckengeometrie, der Geschwindigkeitsbeschränkung und den Witterungsbedingungen ab [Geistefeldt, 2015; Hoogendoorn, 2005a]. Die Akzeptanz der Geschwindigkeitsbeschränkungen spiegelt sich in den Wunschgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden wider. Eine gute Akzeptanz bedeutet, dass die individuellen Wunschgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden die geltende Höchstgeschwindigkeit nicht oder nur geringfügig überschreiten. Je nach Verkehrssituation werden Verkehrsteilnehmende durch langsamere, vorausfahrende Fahrzeuge ausgebremst und können sich nicht mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fortbewegen. In solchen Fällen fahren sie beeinflusst. Die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten resultieren aus den individuellen Wunschgeschwindigkeiten in Kombination mit verkehrsabhängigen Einschränkungen bedingt durch die Verkehrsstärke und -dichte. Aus dem individuellen Geschwindigkeitsverhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmenden resultieren Geschwindigkeitsverteilungen.

Die makroskopische Betrachtung des Verkehrsflusses basiert auf aggregierten Kenngrößen des Verkehrs. Dabei wird eine Verkehrssituation an einem lokalen Autobahnquerschnitt durch die makroskopischen Verkehrsgrößen Verkehrsstärke q , lokale Verkehrsdichte k und mittlere Geschwindigkeit v beschrieben. Es besteht der in Formel 2.1 dargestellte Zusammenhang zwischen den Verkehrsgrößen.

$$q \text{ [Kfz/Zeit]} = k \text{ [Kfz/Distanz]} \cdot v \text{ [Distanz/Zeit]} \quad (2.1)$$

Das Fundamentaldiagramm bietet eine Darstellung der Beziehung zwischen den drei Größen. Es ist dreidimensional und kann in drei unterschiedlichen zweidimensionalen Diagrammen dargestellt werden. Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel eines q-v-, k-q- und k-v-Diagramms. Dabei handelt es sich um zu 5-Minuten-Intervallen aggregierte Verkehrsdaten aus zwei Wochen eines Messquerschnitts der A5. Dieser Querschnitt hat drei Hauptfahrstreifen zuzüglich einer TSF und ist zeitweise verkehrlich überlastet.

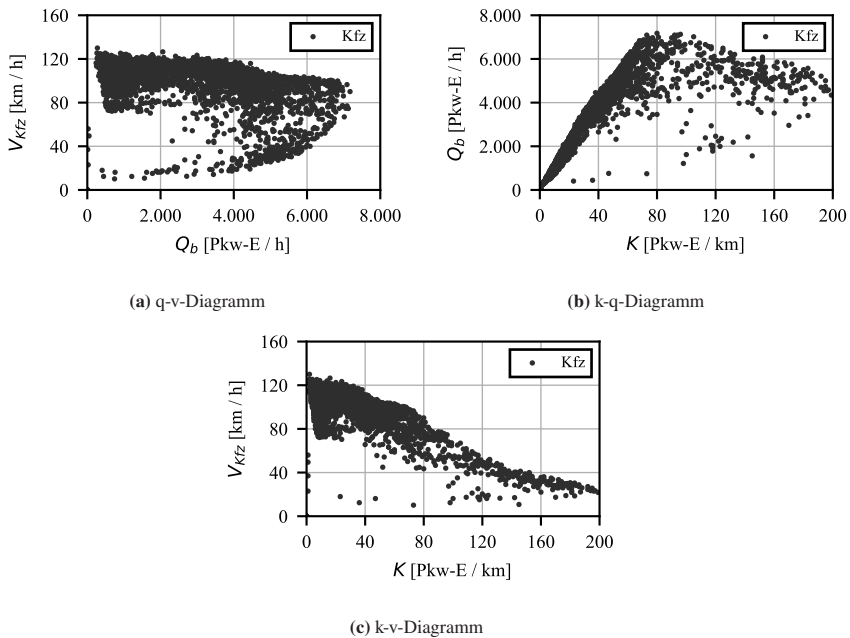


Abbildung 2.3: Fundamentaldiagramm des MQ 143 der A5 (eigene Darstellungen)

Vereinfachend kann das q-v-Diagramm (Abbildung 2.3a) eines überlasteten Autobahnquerschnitts als annähernd parabelförmig beschrieben werden, sodass es für eine Verkehrsstärke zwei mögliche Äste der Geschwindigkeit gibt. Die maximale Verkehrsstärke am Querschnitt entspricht dem Scheitelpunkt der Parabel. Die zugehörige Geschwindigkeit liegt auf mehrstreifigen Autobahnen i. d. R. im Bereich

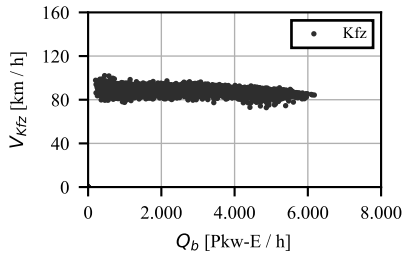
von 80 km/h. Der obere Geschwindigkeitsast entspricht einem frei fließenden, stabilen Verkehr. Auf dem unteren Ast ist der Verkehr zusammengebrochen und es herrscht ein instabiler Verkehrsfluss. Im k-q-Diagramm (Abbildung 2.3b) zeigt sich der stabile Bereich als dichte Punktwolke entlang einer Geraden. Die zu einem Datenpunkt gehörige Geschwindigkeit entspricht der Steigung einer Gerade vom Ursprung zu diesem Datenpunkt. Der instabile Verkehrsfluss zeigt sich als weit verteilte Punktwolke im Bereich von hohen Verkehrsdichten. Das k-v-Diagramm (Abbildung 2.3c) zeigt ein Abfallen der Geschwindigkeit mit zunehmender Verkehrsdichte. Eine Unterscheidung des stabilen vom instabilen Verkehrsfluss ist schwieriger als in den vorherigen Diagrammen. [Schick, 2003]

Diese Einteilung des Verkehrsflusses in einen stabilen und einen instabilen Bereich entspricht nicht mehr dem Stand der Technik. Weiterführende Ansätze betrachten eine feinere Einteilung der Verkehrszustände. Kerner [1999] beschreibt bspw. drei Phasen des Verkehrs: *freier Verkehr* (Überholmöglichkeiten und unterschiedliches Geschwindigkeitsniveau auf den Fahrstreifen), *synchronisierter Verkehr* (gleiches Geschwindigkeitsniveau auf allen Fahrstreifen) und *Stau* (geringe Geschwindigkeiten bei hohen Verkehrsdichten). Die Modelle *ASDA* (Automatische Staudynamikanalyse) und *FOTO* (forecasting of traffic objects) [Kerner u. a., 2010] zur Detektion und Fortschreibung von Staus auf Schnellstraßen basieren auf der Drei-Phasen-Verkehrstheorie nach Kerner [1999] und können zur Bestimmung des zeitlich-räumlichen Verlaufs von gestautem Verkehr zwischen lokalen Messquerschnitten eingesetzt werden [Riegelhuth und Glatz, 2015]. Eine feinteiligere Gliederung in Verkehrsphasen liefern bspw. Kim und Keller [2001], welche die Verkehrszustände in Abhängigkeit der Verkehrsdichte beschreiben und zwischen den folgenden fünf Zuständen unterscheiden: *freier Verkehr* (stabiler Verkehrsfluss bei geringen Verkehrsdichten), *teilgebundener Verkehr* (steigende Interaktionen zwischen den Fahrzeugen bei weitestgehend stabilem Verkehr), *synchronisierter Verkehr* (einheitliches Geschwindigkeitsniveau auf allen Fahrstreifen bei wenig Überholmöglichkeiten), *stockender Verkehr* (sinkende Verkehrsstärke bei niedrigen Geschwindigkeiten) und *stehender Verkehr* (Verkehrszusammenbruch mit Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten von nahezu null).

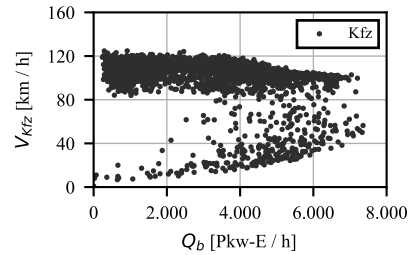
Es können keine eindeutigen Grenzen für die Übergänge zwischen den Verkehrszuständen festgelegt werden, weil zufallsbedingte Ereignisse im Verkehr einen großen Einfluss haben. Diese stochastischen Eigenschaften des Verkehrsflusses bewirken, dass der Verkehr bei gleichen Rahmenbedingungen unterschiedlich fließen kann. Verkehrszustände, die an einem Tag zum Stau führen, können an einem anderen Tag ohne Zusammenbruch abgewickelt werden. Die Gründe hierfür sind vielfältig und können u. a. mit Unterschieden im Fahrendenkollektiv, der Fahrweise, der Sichtbedingungen oder der Witterungsbedingungen erklärt werden.

Die Kapazität eines Autobahnabschnitts ist die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom unter den gegebenen baulichen, verkehrlichen und betrieblichen Bedingungen erreichen kann“ [FGSV, 2020]. Die Bestimmung der Kapazität eines Autobahnabschnitts birgt die Schwierigkeit, dass nicht sicher ist, ob die größte gemessene Verkehrsstärke auch der größtmöglichen Verkehrsstärke entspricht. Die empirisch maximale Verkehrsstärke kann als Annäherung an die Kapazität gesehen werden, wenn am untersuchten Querschnitt Verkehrsüberlastungen auftreten. Ob verkehrliche Überlastungen an einem Querschnitt vorhanden sind, kann mithilfe des q-v-Diagramms ermittelt werden. Ein Querschnitt mit verkehrlichen Überlastungen, die vom Querschnitt selbst ausgehen, weist eine vollständig geschlossene Form auf (siehe Abbildung 2.3a). Abbildung 2.4 zeigt zwei Beispiele von Messquerschnitten, von denen keine verkehrliche Überlastung ausgeht. Dabei handelt es sich um zu 5-Minuten-Intervallen aggregierte Verkehrsdaten aus zwei Wochen der A5. Abbildung 2.4a zeigt einen Querschnitt, an dem kein instabiler Verkehrsfluss auftritt. Abbildung 2.4b stellt einen Querschnitt dar, an dem der Übergangsbereich zwischen stabilem und instabilem Verkehrsfluss fehlt. Dies deutet darauf hin, dass der instabile Verkehrsfluss durch Rückstau bedingt ist und nicht von einer Überlastung des Querschnitts selbst ausgeht [Schick, 2003].

Die Kapazität wird i. d. R. in verkehrstechnischen Bemessungsverfahren als deterministische Größe betrachtet (vgl. HCM [2010] und HBS [2015]). Ansätze zur konventionellen Kapazitätsanalyse werden bspw. von Brilon und Ponzlet [1995] und van Aerde [1995] beschrieben. Wu und Geistefeldt [2022] stellen ein zweiteiliges Modell zur Ermittlung der Kapazitäten im q-v-Diagramm vor, das sowohl den fließenden als auch den gestauten Verkehr berücksichtigt.



(a) MQ 153 ohne Verkehrszusammenbruch



(b) MQ 138 ohne Scheitelpunkt

Abbildung 2.4: q-v-Diagramme der MQ 138 und 153 der A5 zur Beurteilung von Verkehrsüberlastungen (eigene Darstellungen)

Die stochastischen Eigenschaften des Verkehrsflusses bewirken jedoch, dass die Kapazität eines Autobahnabschnitts schwankt und somit die Beschreibung der Kapazität als Verteilungsfunktion zielführend sein kann. Eine solche Verteilungsfunktion der Kapazität beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs an einem Autobahnquerschnitt in Abhängigkeit der Verkehrsstärke. Stochastische Kapazitätsanalysen basieren auf der Auswertung von möglichst vielen Verkehrszusammenbrüchen, wobei jeweils die Verkehrsstärke im Zeitintervall vor einem Zusammenbruch als momentane Kapazität definiert wird. Eine Herangehensweise ist die Auswertung der Häufigkeit von Zusammenbrüchen in Verkehrsstärkeklassen (vgl. Lorenz und Elefteriadou [2000]). Des Weiteren haben Brilon und Zurlinden [2003] ein Verfahren zur Ermittlung von Verteilungsfunktionen der Kapazität entwickelt, das auf mathematischen Methoden der Lebensdaueranalyse basiert. Das Verfahren befasst sich mit der Schätzung der „Überlebenswahrscheinlichkeit des Verkehrsflusses“. Dabei stellt die Kapazität die „Lebensdauer des Verkehrsflusses“ dar. Details zu dem Verfahren können u. a. in Brilon und Zurlinden [2003], Brilon u. a. [2005], Brilon u. a. [2007a] und Geistefeldt [2007] nachgelesen werden. [Geistefeldt, 2007, 2021]

Übersteigt die Verkehrsnachfrage die (momentane) Kapazität eines Autobahnabschnitts, kommt es zu einem Verkehrszusammenbruch und es entsteht Stau.

Gründe hierfür können Engpässe bspw. aufgrund einer Fahrstreifenreduktion, eines Unfalls oder einer Baustelle oder Überlastungen an Ein- oder Ausfahrten sein. Eine Überschreitung der Kapazität kann ebenfalls auf der freien Strecke ohne sichtbaren Engpass vorkommen, wenn sich die Verkehrsstärke bereits nahe der Kapazität bewegt und der Verkehrsfluss somit anfällig für Störungen ist. Ein Fahrfehler oder eine abrupte Reaktion können eine solche Störung darstellen. Bei hohen Verkehrsdichten pflanzt sich eine solche Störung als Stauwelle stromaufwärts fort und wird dabei verstärkt.

Im Gegensatz zu Staus bewegen sich Fahrzeugpuls in Fahrtrichtung. Eine solche Fahrzeugkolonne charakterisiert sich durch geringe Zeitlücken und ein einheitliches Geschwindigkeitsniveau. Fahrzeuge im Pulk werden mit Ausnahme des bzw. der ersten Fahrzeuge in ihrem Geschwindigkeitsverhalten durch mindestens ein vorausfahrendes Fahrzeug beeinflusst [FGSV, 2020]. Fahrzeugpuls sind aufgrund ihrer hohen Verkehrsdichte anfällig für Verkehrsstörungen und stellen bedingt durch die ausgehende Unfallgefahr ein Sicherheitsrisiko dar. Die kurzfristige Erkennung von Stautestehungen, Stauwellen und Fahrzeugpuls und die Prognose ihrer Ausbreitung im Verkehr sind essenziell für die erfolgreiche Beeinflussung von Autobahnverkehr mithilfe von SBA.

Ein verkehrliches Phänomen im Zusammenhang mit Verkehrszusammenbrüchen ist der *Capacity Drop*. Nach einem Zusammenbruch des Verkehrs ist die maximale Verkehrsstärke in der Stauauflösung geringer als vor dem Zusammenbruch. Diese Reduktion der Kapazität ist auf ein vorsichtigeres Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmenden zurückzuführen. [Schwietering, 2010]

Einen großen Einfluss auf den Verkehrsfluss auf Autobahnen hat die Fahrzeugzusammensetzung. Unterschiedliche Fahrzeug- und Fahrendenkollektive wie bspw. Urlaubsverkehr, Pendelverkehr oder Gütertransport können ein unterschiedliches Fahrverhalten und unterschiedliche Fahrdynamiken haben. Eine entscheidende Größe ist i. d. R. der Schwerverkehrsanteil. Lkw sind schwerer als Pkw, so dass ihre Beschleunigungs- und Verzögerungsmöglichkeiten im Vergleich zu Pkw eingeschränkt sind. Dies ist vor allem auf Steigungs- und Gefällestrecken von Relevanz. Des Weiteren ist die Geschwindigkeit von Lkw im Gegensatz zu Pkw

auf 80 km/h beschränkt und in Kombination mit dem Rechtsfahrgebot ergibt es sich, dass Lkw überwiegend den rechten Fahrstreifen auf Autobahnen nutzen. Lkw haben zudem einen größeren Platzbedarf als Pkw. Daher kann es für verkehrliche Analysen zweckmäßig sein, die Verkehrsstärke in *Pkw-Einheiten pro Zeiteinheit* anstatt in *Kfz pro Zeiteinheit* zu betrachten (siehe Kapitel 2.4 für Berechnung). Die Klassifizierung der Kfz in Pkw und Lkw erfolgt anhand des zulässigen Gesamtgewichts, die Grenze liegt bei 3,5 Tonnen.

Die Fahrstreifenaufteilung auf deutschen Autobahnen wird stark vom geltenden Rechtsfahrgebot und von den großen Streuungen in den gefahrenen Geschwindigkeiten beeinflusst. Empirische Untersuchungen zeigen eine Korrelation zwischen dem Gesamtverkehrsaufkommen und dem relativen Verkehrsaufkommen auf den einzelnen Fahrstreifen [Beentjes, 2012; Duret u. a., 2012; Geistefeldt, 2007; Leutzbach und Busch, 1984; Pompigna und Rupi, 2017; Wu, 2005; Yousif u. a., 2013].

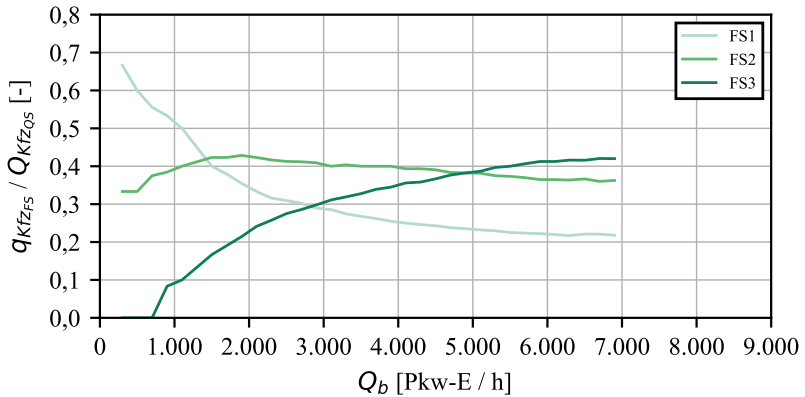


Abbildung 2.5: Fahrstreifenaufteilung an MQ 128 der A5 (eigene Darstellung)

Abbildung 2.5 zeigt ein Beispiel der Fahrstreifenaufteilung an einem Messquerschnitt der A5 basierend auf minutenfeinen Daten aus fünf Wochen. Je nach Verkehrsstärke ergibt sich eine andere (ungleichmäßige) Verteilung des Verkehrs

auf die Fahrstreifen. Unabhängig von der Anzahl der Fahrstreifen fährt die Mehrheit der Verkehrsteilnehmenden bei geringen Verkehrsstärken auf dem rechten Fahrstreifen (FS1 in Abbildung 2.5). Mit zunehmender Verkehrsstärke reduziert sich die Wahlfreiheit der Verkehrsteilnehmenden in Bezug auf die Fahrstreifenwahl. Daher wird die Fahrstreifenaufteilung mit zunehmender Verkehrsstärke gleichmäßiger. Bei hohen Verkehrsstärken fährt der größte Anteil der Verkehrsteilnehmenden auf dem linken Fahrstreifen.

Die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen erfolgt in Deutschland nach dem analytischen Bemessungsverfahren des *Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*. Das maßgebende Qualitätskriterium ist dabei der Auslastungsgrad, der sich aus dem Quotienten von Bemessungsverkehrsstärke und Kapazität berechnet. Im HBS sind Kapazitätswerte in Abhängigkeit der Fahrstreifenanzahl, der Längsneigung, der Geschwindigkeitsregelung, der Lage des Abschnitts und des Schwerverkehrsanteils angegeben. Die Qualität des Verkehrsablaufs wird anhand von sechs Qualitätsstufen (A bis F) bewertet. Zusätzlich liefert das HBS q-V-Beziehungen im stabilen Verkehrsfluss in Abhängigkeit der Eigenschaften der Autobahnstrecke. So können mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärke berechnet werden. [HBS, 2015]

Die Eigenschaften von deutschem Autobahnverkehr sind zum einen für die Einordnung der Wirkungen von verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen durch SBA (siehe Kapitel 2.5) von Relevanz. Zum anderen ist ein tiefgehendes Verständnis des Verkehrsflusses auf Autobahnen essenziell für die Erstellung des mikroskopischen Verkehrsflussmodells (siehe Kapitel 6). Basierend auf den in diesem Kapitel beschriebenen Eigenschaften werden in Kapitel 3.2 die Anforderungen an die Modellierung von Autobahnverkehr definiert.

2.3 Funktionsweise einer SBA

2.3.1 Deutsche Regelwerke

Die wichtigsten Regelwerke für die Planung, den Bau und den Betrieb von SBA in Deutschland sind die folgenden:

- Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [TLS, 2012]
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA) [RWVA, 1997]
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ) [RWVZ, 1997]
- Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [MARZ, 1999, 2018]

Die *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS)* gelten für die Ausstattung von Bundesfernstraßen mit Einrichtungen zur Erfassung von Verkehrs- und Umfelddaten und zur Kommunikation mit den Verkehrsteilnehmenden. Sie legen den Aufbau, die Funktionen und die Schnittstellen von Streckenausrüstungen fest. Ziel der TLS ist die Vorgabe und Vereinheitlichung der Datenerfassung, -übertragung, -aufzeichnung und -ausgabe, um so eine Kompatibilität und Erweiterbarkeit zwischen unterschiedlichen Herstellern zu gewährleisten. Auf Bundesfernstraßen dürfen nur Streckenausrüstungen montiert werden, die den Anforderungen der TLS genügen. [TLS, 2012]

Die *Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA)* behandeln bautechnische Grundsätze von Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA). Es werden die Voraussetzungen für die Ausstattung eines Streckenabschnittes mit einer VBA beschrieben. Neben der allgemeinen Systembeschreibung wird die Systemhierarchie mit ihren einzelnen Ebenen, Grundsätzen und Abhängigkeiten erläutert. Zusätzlich werden die Anordnung und der Abstand der WVZ, die Datenerfassung und lokale Aggregation, die Kommunikation zwischen den

WVZ und die Datenübertragung geregelt. Einzelheiten hierzu werden im MARZ [MARZ, 2018] und in den TLS [TLS, 2012] festgelegt. Die Stufen der Planung, die Betriebsarten von VBA und die Priorisierung von Schaltanforderungen werden ebenfalls in den RWVA behandelt. [RWVA, 1997]

Die *Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ)* beinhalten verkehrsrechtliche Regelungen und Grundsätze zur dynamischen Anzeige von Verkehrszeichen an Bundesfernstraßen. Sie legen fest, welche Verkehrszeichen auf den WVZ angezeigt werden können und wie die genaue Darstellung (bspw. Größe und Anordnung) erfolgen soll (siehe Kapitel 2.3.2). Zur Anwendung von WVZ innerhalb von SBA werden die Grundsätze zu Anzeigefolgen und zum Längs- und Querabgleich erläutert. Neben SBA werden Wechselwegweisungen zur Verkehrslenkung behandelt. [RWVZ, 1997]

Das *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ)* gibt Standards für den Stand der Technik und die Verfahren in der Verkehrsbeeinflussung vor. Das Merkblatt gilt für die Errichtung, Erweiterung, Modernisierung und Vernetzung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen zur Verkehrsbeeinflussung an Bundesfernstraßen. Es enthält Vorgaben und Rahmenbedingungen zur Gestaltung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen und hat zum Ziel, das Zusammenspiel aller Komponenten zu optimieren und deren Systemarchitektur zu harmonisieren. Eine detaillierte Beschreibung der Inhalte des MARZ ist in Kapitel 2.4.1 zu finden. [MARZ, 1999, 2018]

Die folgenden Vorschriften, Richtlinien und Hinweispapiere sind ebenfalls von Relevanz und können als weiterführende Literatur herangezogen werden:

- Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) mit Allgemeiner Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO) [StVO, 2013; VwV-StVO]
- Richtlinien für die wegweisende Beschilderung außerhalb von Autobahnen (RWB) [RWB, 2000]
- Richtlinien für die wegweisende Beschilderung auf Autobahnen (RWBA) [RWBA, 2000]

- Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) [RSA, 1995]
- Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen [FGSV, 2017]
- Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung [FGSV, 2012b]
- Hinweise für Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen [FGSV, 1992]
- Dynamische Wegweiser mit integrierten Stauinformationen (dWiSta) [Grah und Sander, 2007; Hartz und Schmidt, 2005]

2.3.2 Wechselverkehrszeichen zur Streckenbeeinflussung

Die Kommunikation der SBA mit den Verkehrsteilnehmenden findet an den Anzeigequerschnitten statt. Über die Wechselverkehrszeichengeber (WZG) werden dynamisch an die Verkehrssituation angepasste Schaltbilder angezeigt. Diese WZG werden in drei Typen unterteilt: WZG A, WZG B und WZG C. WZG A zeigen i. d. R. Geschwindigkeitsbeschränkungen und Fahrstreifensperrungen oder deren Aufhebung an, während WZG B i. d. R. Gefahrenzeichen oder deren Aufhebung darstellen. WZG C dienen i. d. R. zur Anzeige von Zusatzinformationen in Form von Text. [MARZ, 2018]

Die Anordnung der WZG A, B und C in Anzeigequerschnitten auf deutschen Bundesautobahnen wird in den RWVA festgelegt [RWVA, 1997]. Auf hessischen Bundesautobahnen weicht die Anordnung der WZG zum Teil von den RWVA ab. Beide Anordnungen sind in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Abbildung bezieht sich auf dreistreifige Richtungsfahrbahnen ohne TSF.

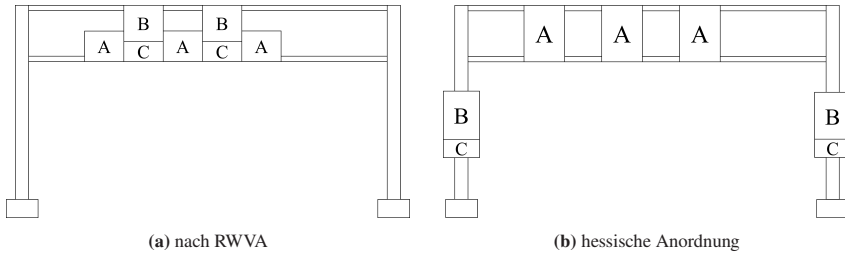


Abbildung 2.6: Anordnung der WZG über einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn (eigene Darstellungen nach [Leichter u. a., 2001; RWVA, 1997])

Mithilfe von dynamischen Anzeigen auf WZG können folgende Maßnahmen ergriffen werden [RWVA, 1997]:

- Geschwindigkeitsbeschränkung
- Überholverbot
- Stauwarnung
- Warnung von Gefahren (bspw. Unfall oder Baustelle)
- Warnung vor witterungsbedingten Gefahren (bspw. Nässe, Glätte, Nebel)
- Fahrstreifensperrung oder -öffnung (bspw. bei TSF)
- Fahrstreifenzuteilung (bspw. in Baustellen)

Die entsprechenden Verkehrszeichen sind in Abbildung 2.7 für WZG Typ A, in Abbildung 2.8 für WZG Typ B und in Abbildung 2.9 für WZG Typ C dargestellt [RWVZ, 1997; StVO, 2013].

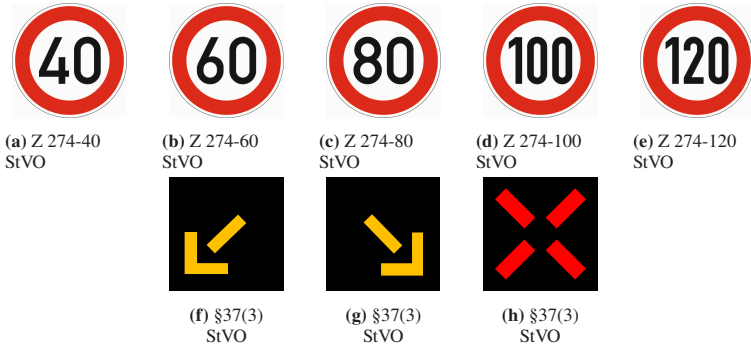


Abbildung 2.7: WVZ nach StVO für WZG Typ A ([StVO, 2013] und eigene Darstellungen nach [RWVA, 1997])

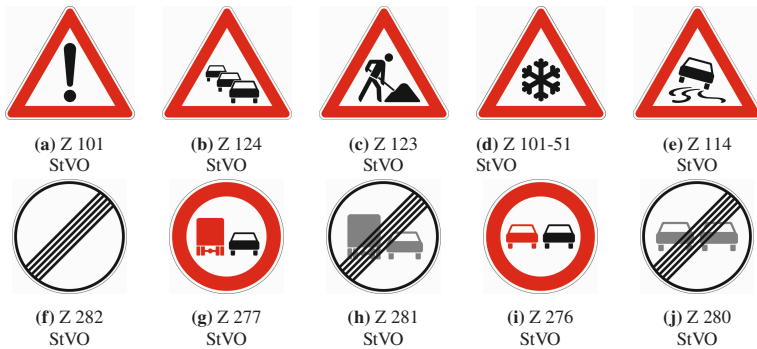


Abbildung 2.8: WVZ nach StVO für WZG Typ B ([StVO, 2013])

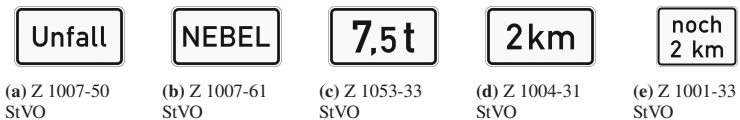


Abbildung 2.9: WVZ nach StVO für WZG Typ C ([StVO, 2013])

2.3.3 Schaltungsarten und Schaltprogramme

Je nach Verkehrs- und Umfeldsituation können verschiedene Schaltungsarten und Schaltprogramme mit unterschiedlichen Beeinflussungsstrategien geschaltet werden. Die Schaltungsarten können in Automatikprogramme und manuelle Schaltprogramme unterteilt werden [MARZ, 2018]. Bei Automatikprogrammen erfolgt die Aktivierung und Deaktivierung der Wechselverkehrszeichen automatisch auf Basis der erfassten Verkehrs- und Umfelddaten. Die Schaltung von manuellen Schaltprogrammen wird hingegen durch das Bedienpersonal ausgeführt. Ein Schaltprogramm umfasst Schaltbildkombinationen für Anzeigequerschnitte mit aufeinander abgestimmten Wechselverkehrszeichen. Zusätzlich wird die Schaltbildfolge mehrerer benachbarter Anzeigequerschnitte aufeinander abgestimmt.

Im Folgenden wird ein Überblick über klassische Schaltprogramme nach MARZ [2018] gegeben. Die eingesetzten Schaltprogramme können je nach Steuerungsmodell abweichen. In Anhang A.1 sind Schaltbildfolgen für ausgewählte Schaltprogramme dargestellt.

Automatikprogramme

Im Automatikbetrieb ist zwischen voll- und halbautomatischen Schaltprogrammen zu unterscheiden. Bei vollautomatischen Schaltprogrammen ist kein Eingriff des Bedienpersonals erforderlich. Für halbautomatische Schaltprogramme übernimmt die Anlage die Zustandsanalyse und gibt eine entsprechende Schaltempfehlung heraus. Die Ausführung des vorgeschlagenen Schaltprogramms übernimmt und überwacht das Bedienpersonal. Ein Beispiel eines halbautomatischen Schaltprogramms ist die temporäre Seitenstreifenfreigabe. Im Folgenden werden die gängigsten Automatikprogramme kurz erläutert. [MARZ, 2018]

- **Harmonisierung der Geschwindigkeit**

Das Ziel der Harmonisierungsprogramme ist, die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Fahrzeugen zu reduzieren und dadurch die Stabilität des Verkehrsflusses bei hohen Belastungen zu verbessern und die Störunganfälligkeit zu reduzieren. So kann ein möglicher Verkehrszusammenbruch hinausgezögert oder bestenfalls ganz verhindert werden. Es sind drei Harmonisierungsstufen (120 km/h, 100 km/h und 80 km/h) nach MARZ [2018] vorgesehen. Zur Harmonisierung 120 wird der Fahrzeugpulk im Verkehrsfluss verfolgt, indem Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 120 km/h stromabwärts des auslösenden Messquerschnitts angezeigt werden. Für die Harmonisierungen 100 und 80 werden die Geschwindigkeitsbeschränkungen stromaufwärts des auslösenden Messquerschnitts über einen Geschwindigkeitstrichter schrittweise reduziert.

- **Stauwarnung**

Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit werden die Verkehrsteilnehmenden mithilfe eines Geschwindigkeitstrichters und Stauwarnungen auf ein Stauende aufmerksam gemacht. Es ist das Ziel, Auffahrunfälle am Stauende zu verhindern. Der Geschwindigkeitstrichter wird stromaufwärts des Stauendes aufgebaut.

- **Nebelwarnung**

Das Anzeigen von Warnungen vor witterungsbedingten Gefahren wie bspw. Nebel dient ebenfalls der Erhöhung der Verkehrssicherheit. Zusätzlich werden in Abhängigkeit der Sichtbedingungen Geschwindigkeitsbeschränkungen geschaltet.

- **Niederschlagswarnung**

Eine weitere witterungsbedingte Gefahr, die durch ein Automatikprogramm abgedeckt wird, ist Regen. Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit werden neben Niederschlagswarnungen auch Geschwindigkeitsbeschränkungen in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität geschaltet.

- **Lkw-Überholverbot**

Lkw-Überholverbote werden automatisch bei hohen Schwerverkehrsanteilen geschaltet, um die Beeinträchtigung der Pkw durch langsamere Lkw zu reduzieren und damit den Verkehrsfluss zu verbessern.

- **Ein- und Ausfahrhilfen**

Schaltprogramme zur Ein- und Ausfahrhilfe haben zum Ziel, die Verkehrssicherheit und die Leistungsfähigkeit auf hochbelasteten Ein- und Ausfahrbereichen zu erhöhen. An Einfahrten können so bspw. die gefahrenen Geschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn und der Einfahrt angeglichen werden, um das Einfädeln zu erleichtern. An Ausfahrten kann die Geschwindigkeit auf dem rechten (ggfs. auch dem mittleren) Fahrstreifen im Anschlussstellenbereich zusätzlich beschränkt werden, um große Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den ausfahrenden und den auf der Hauptfahrbahn verbleibenden Fahrzeugen zu verhindern.

- **Temporäre Seitenstreifenfreigabe**

Die temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) ist eine Maßnahme zur Kapazitätserhöhung auf Autobahnabschnitten. Zur Verbesserung des Verkehrsflusses bei Kapazitätsengpässen kann der Seitenstreifen zeitlich begrenzt für den Verkehr freigegeben werden. Das Steuerungsmodell schlägt die Freigabe des Seitenstreifens in Abhängigkeit der Auslastung vor. Die Aktivierung der TSF erfolgt jedoch durch das Bedienpersonal [MARZ, 2018]. Die Öffnung der TSF kann nicht automatisch erfolgen, weil vor der Freigabe mittels Videotechnik sichergestellt werden muss, dass sich keine Hindernisse (bspw. Pannenfahrzeuge) auf dem Seitenstreifen befinden [Geistefeldt und Glatz, 2010]. Nach MARZ [2018] wird die Geschwindigkeit während der Freigabe des Seitenstreifens aus Verkehrssicherheits- und Harmonisierungsgründen auf 100 km/h beschränkt.

Manuelle Schaltprogramme

Bei manuellen Schaltprogrammen führt ein:e Operator:in die Aktivierung und Deaktivierung durch. Es wird zwischen Sonder- und Handschaltungen unterschieden. Sonderschaltungen kommen bspw. bei der Absicherung von Baustellen, Gefahrenwarnungen oder Fahrstreifensperrungen zum Einsatz. Für diese besonderen Situationen werden vordefinierte Schaltprogramme hinterlegt, die an die örtlichen Verhältnisse angepasst sind und durch das Bedienpersonal manuell geschaltet werden können. Diese Sonderschaltungen können jederzeit durch konkurrierende Schaltungen mit höherer Priorität überschrieben werden. Handschaltungen beziehen sich hingegen auf einzelne Wechselverkehrszeichen und können nicht von Automatikprogrammen überschrieben werden. [RWVA, 1997]

2.3.4 Ablauf der Streckenbeeinflussung

Der automatische Betrieb von SBA läuft nach folgendem Regelkreis ab [MARZ, 1999, 2018; Riegelhuth und Glatz, 2015]:

1. Erfassung des Verkehrs und der Umfeldbedingungen
2. Situationserkennung und Maßnahmenauswahl durch den Steuerungsalgorithmus
3. Priorisierung der Schaltanforderungen
4. Längs- und Querabgleich
5. dynamische Schaltung von Wechselverkehrszeichen
6. Verkehrsbeeinflussung durch Reaktion der Verkehrsteilnehmenden

Das Steuerungsintervall beträgt dabei je nach Anlage zwischen 15 Sekunden und einer Minute. Zusätzlich entsteht durch die Messung, Datenübertragung und Datenverarbeitung eine zeitliche Verzögerung zwischen Datenerfassung und Anzeige der Schaltbilder. Diese Latenz beträgt etwa eine Minute.

Zunächst wird der Verkehr an lokalen Messquerschnitten erfasst. Die Messquerschnitte einer SBA sind mit Detektoren ausgestattet, die die Verkehrsstärke und die mittlere Geschwindigkeit fahstreifenfein und separat für Pkw und Lkw erfassen und für ein Steuerungsintervall aggregieren. Es kommen bspw. Induktionsdopfelschleifen oder Radarsensoren zum Einsatz (siehe FGSV [2012a]). Zusätzlich werden Umfeldbedingungen wie Sichtweiten und Niederschlagsmengen, die sich auf den Verkehrsfluss auswirken, erhoben. Diese Informationen werden durch sicherheitsrelevante Meldungen der Polizei oder Verkehrsbehörden zu Verkehrsunfällen oder Baustellen ergänzt. [TLS, 2012]

Im nächsten Schritt werden weitere Kenngrößen wie bspw. die lokale Verkehrsdichte oder Bemessungsverkehrsstärke ¹ basierend auf den erfassten Verkehrsdaten berechnet. Diese dienen ebenfalls als Eingangsgröße in das Steuerungsmodell.

Es folgt die Situationserkennung und Maßnahmenauswahl durch das Steuerungsmodell. Die Verkehrsdaten und Kenngrößen werden an jedem Querschnitt (zum Teil auch an jedem Fahstreifen eines Querschnitts) mit den Schwellenwerten der unterschiedlichen Steuerungsprogramme verglichen. Wenn Ein- oder Ausschaltbedingungen erfüllt sind, werden automatisch Schaltanforderungen für die entsprechenden Schaltprogramme gestellt. Es können gleichzeitig mehrere Schaltprogramme (bspw. Stauwarnung und Harmonisierung) an einem Anzeigequerschnitt Schaltanforderungen stellen. Zusätzlich fließen Informationen zu den Umfeldbedingungen in das Steuerungsmodell ein. Die Parametrisierung der Schwellenwerte kann je nach Anlage und Messquerschnitt variieren. Neben den Automatikprogrammen kann das Bedienpersonal mithilfe von manuellen Schaltprogrammen in die Streckensteuerung eingreifen.

Die Schwellenwerte der Einschalt- und Ausschaltkriterien müssen so parametrisiert werden, dass die resultierenden Schaltbilder nicht flattern (Hysterese). Für manche Schaltprogramme sind zusätzlich Schaltverzögerungen hinterlegt. Die

¹ Der Begriff *Bemessungsverkehrsstärke* beschreibt in diesem Kontext eine Eingangsgröße in das SARAH-Steuerungsmodell. Die Berechnung ist in Kapitel 2.4.2 erläutert. Es handelt es sich bei dem Begriff nicht um die *maßgebende Bemessungsverkehrsstärke* des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [HBS, 2015].

Schaltanforderung wird in diesen Fällen erst generiert, wenn das Einschaltkriterium für eine gewisse die Zeitdauer ununterbrochen erfüllt ist. Es existieren ebenfalls Mindeststandzeiten für manche Schaltprogramme. Die Schaltanforderung für die Beendigung des Schaltprogramms wird in diesen Fällen erst generiert, wenn das Ausschaltkriterium erfüllt ist und das Schaltprogramm bereits für eine gewisse Zeitdauer ununterbrochen angezeigt wurde.

Anschließend werden alle Schaltanforderungen eines Anzeigequerschnitts priorisiert, sodass i. d. R. die restriktivste Schaltanforderung Vorrang hat. Bei Gefahrenzeichen hat das WVZ Vorrang, das vor der am schlechtesten erkennbaren Gefahr warnt oder das die Anordnung der niedrigsten Geschwindigkeitsbeschränkung erfordert. Bei gleichzeitiger manueller und automatischer Schaltanforderung hat die manuelle Anforderung Priorität. Grundsätzlich gilt folgende Prioritätenreihung [RWVA, 1997]:

1. Handschaltungen
2. Sonderschaltungen
3. Automatikprogramme

Für die WZG gelten die Priorisierungen aus Tabelle 2.1.

Im nächsten Schritt erfolgt ein Längs- und Querabgleich aller verbleibenden Schaltanforderungen. Beim Längsabgleich stimmt das Steuerungsmodell die Anzeigen aufeinanderfolgender Anzeigequerschnitte aufeinander ab. Beim Querabgleich werden die Anzeigen eines Anzeigequerschnitts aneinander angepasst. So kann eine kontinuierliche und in sich schlüssige Schaltbildfolge erzielt und sich widersprechende Schaltbildfolgen vermieden werden. Beispiele für Regeln des Längsabgleichs nach dem MARZ [2018] sind, dass Geschwindigkeitsbeschränkungen und Lkw-Überholverbote an mindestens zwei aufeinander folgenden Anzeigequerschnitten geschaltet werden sollen und dass Geschwindigkeitsbeschränkungen, die nach oben abweichen, entsprechend den Nachbar-Anzeigequerschnitten korrigiert werden sollen. Zusätzlich wird eine Verträglichkeits- und Konsistenzprüfung der Schaltbilder mithilfe von Verriegelungsmatrizen durchgeführt. Diese

Verriegelungsmatrizen verhindern, dass verkehrsgefährdende und nicht zulässige Schaltbildkombinationen und Schaltbildfolgen angezeigt werden können. Der Längs- und Querabgleich erfolgt in einem iterativen Prozess. [MARZ, 2018]

Tabelle 2.1: Priorisierung der Schaltanforderungen nach [MARZ, 2018; RWVA, 1997]

	WZG Typ A	WZG Typ B	WZG Typ C
↓ -- abnehmende Priorität	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrstreifen-sperrung (rotes Kreuz) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stau 	<ul style="list-style-type: none"> • Unfall
	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrstreifen-wechsel (Gelbpfeil) 	<ul style="list-style-type: none"> • Baustelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Nebel
	<ul style="list-style-type: none"> • 40 km/h 	<ul style="list-style-type: none"> • Schleudergefahr 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewichtsangabe
	<ul style="list-style-type: none"> • 60 km/h 	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahrenstelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernungs-angabe
	<ul style="list-style-type: none"> • 80 km/h 	<ul style="list-style-type: none"> • Lkw-Überholverbot 	<ul style="list-style-type: none"> • dunkel
	<ul style="list-style-type: none"> • 100 km/h 	<ul style="list-style-type: none"> • Ende aller Streckenverbote 	
	<ul style="list-style-type: none"> • 120 km/h 	<ul style="list-style-type: none"> • Ende des Lkw-Überholverbots 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Aufhebung Geschwindigkeitsbeschränkung 	<ul style="list-style-type: none"> • dunkel 	
	<ul style="list-style-type: none"> • dunkel 		

Es folgt der Schaltbefehl für die resultierenden Schaltbilder (Geschwindigkeitsbeschränkungen, Warnungen und Überholverbote) an jedem Anzeigequerschnitt. Die Schaltbilder werden schließlich über WZG an den Anzeigequerschnitten angezeigt. Die Verkehrsteilnehmenden reagieren auf die dynamischen Anzeigen und es entsteht eine beeinflusste Verkehrssituation.

2.4 Steuerungsmodelle

In Deutschland sind die Anforderungen an die Steuerungsmodelle einer SBA im *Merkblatt zur Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen* (MARZ) hinterlegt. Das MARZ enthält grundlegende Vorgaben für die Datenerfassung und für den Aufbau des Steuerungsmodells und stellt die Basis für die in Deutschland angewendeten Steuerungsmodelle dar. Anpassungen und Erweiterungen aufgrund von örtlichen Gegebenheiten sind möglich. Es existieren regionale Weiterentwicklungen des MARZ, wie bspw. das hessische Steuerungsmodell SARAH [Riegelhuth und Glatz, 2015] oder das bayrische Steuerungsmodell INCA [Denaes u. a., 2009a,b; Vukanovic u. a., 2005].

2.4.1 Steuerungsmodell MARZ

Die erste Fassung des MARZ wurde 1999 eingeführt und bildet aktuell die Grundlage für alle deutschen Verkehrsrechnerzentralen. Aufgrund von umfangreichen funktionalen und technischen Erweiterungen auf Ebene der Verkehrsrechnerzentralen wurde eine Fortschreibung des MARZ erforderlich. Die überarbeitete Fassung wurde als MARZ 2018 veröffentlicht und löst seither das MARZ 99 ab. Dabei sind Weiterentwicklungen bspw. aus SARAH in das neue MARZ 2018 eingeflossen. [Listl u. a., 2020; MARZ, 1999, 2018; Schwietering u. a., 2021]

Das Steuerungsmodell des MARZ 99 basiert im Wesentlichen auf dem Vergleich von richtungsbezogenen Messwerten bzw. berechneten Kenngrößen mit Schwellenwerten zur Situationserkennung. Ein Nachteil des MARZ 99 ist dabei, dass die Algorithmen der Schaltprogramme bei gleichen Eingangsgrößen an einem Messquerschnitt immer die gleiche Situation erkennen. Die anschließende Maßnahmenauswahl ist an die Situation geknüpft und es wird eine fest definierte Schaltbildkombination am entsprechenden Anzeigequerschnitt angefordert. Diese

Tabelle 2.2: Automatikprogramme nach MARZ 99

Schaltprogramm	Eingangsgrößen
Harmonisierung 120 km/h	Bemessungsverkehrsstärke Q_b
Harmonisierung 100 km/h	Bemessungsverkehrsstärke Q_b , mittlere Kfz-Geschwindigkeit V_{Kfz} , lokale Verkehrsdichte K
Harmonisierung 80 km/h	Bemessungsverkehrsstärke Q_b , mittlere Kfz-Geschwindigkeit V_{Kfz} , lokale Verkehrsdichte K
Harmonisierung 60 km/h	Bemessungsverkehrsstärke Q_b , mittlere Kfz-Geschwindigkeit V_{Kfz} , lokale Verkehrsdichte K
Stauwarnung	fahrstreifenbezogener Belegungsgrad b , mittlere Kfz-Geschwindigkeit V_{Kfz} , abschnittsbezogene Störfallerkennung $V^{k_{diff}}$, Verkehrsstufe
Nässewarnung	Niederschlagsstufe, Helligkeit, prognostizierte Pkw-Geschwindigkeit $V_{Pkw,P}$
Lkw-ÜV bei Nässe	Eingangsgrößen der Nässewarnung, prognostizierte Bemessungsverkehrsstärke $Q_{b,P}$, prognostizierte Lkw-Verkehrsstärke $Q_{Lkw,P}$
Nebelwarnung	Sichtweite
Lkw-Überholverbot	Lkw-Anteil A_{Lkw} , prognostizierte Bemessungsverkehrsstärke $Q_{b,P}$

enge Kopplung von Situationserkennung, Maßnahmenauswahl und Schaltbildanforderung bringt mit sich, dass die einzelnen Schaltprogramme zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen können und dieser Konflikt in der nachgelagerten Priorisierung aufgelöst werden muss. [Schwietering u. a., 2021]

Tabelle 2.2 zeigt die Automatikprogramme, die nach dem MARZ 99 verfügbar sind. Die Berechnung der aufgeführten Kenngrößen und die zu den Schaltprogrammen gehörigen Schaltbildkombinationen und -folgen können in dem MARZ 99 nachgeschlagen werden. Bei den Schaltkriterien handelt es sich, mit Ausnahme des Belegungsgrads b für die Stauwarnung, um richtungsbezogene Kenngrößen. Neben den Automatikprogrammen führt das MARZ 99 die Sonderprogramme *Baustelle*, *Unfall* und *Grundprogramme* auf. Unter Grundprogrammen sind feste Schaltbildkombinationen bzw. -folgen für Teilstrecken zu verstehen, die durch das Bedienpersonal festgelegt werden. Zusätzlich werden die Handschaltungen *Glätte* und *Blindschaltung* aufgeführt. Unter Blindschaltung ist die Ausführung des Steuerungsmodells ohne sichtbare Schaltung der Anzeigen zu verstehen, i. d. R. wird dies zu Testzwecken durchgeführt. Die Ein- und Ausschaltswellenwerte der Schaltprogramme sind für jeden Messquerschnitt variabel parametrisierbar. Die Werte für die Grundversorgung der Schaltprogramme können in dem MARZ 99 nachgelesen werden.

Das Steuerungsmodell des MARZ 2018 sieht eine Entkopplung der Situationserkennung und der Maßnahmenauswahl vor. So können die erkannten Situationen abgeglichen und zeitlich-räumlich fusioniert werden, bevor die Auswahl einer Maßnahme stattfindet. Es kann also vorab in einer Situationsbewertung bestimmt werden, welche Situationen sich bei einer bestimmten Kombination an erkannten Situationen tatsächlich auf den Verkehr auswirken, womit die Qualität der Maßnahmenauswahl gesteigert werden kann. Es können weiterhin mehrere Situationen (bspw. verkehrlich bedingt und witterungsbedingt) eine Maßnahme anfordern. Den Maßnahmen sind anfänglich keine Schaltbilder, sondern Beeinflussungsziele zugeordnet. Ein Maßnahmenabgleich identifiziert und löst Konflikte zwischen Maßnahmen, die zeitlich und räumlich überschneidend angefordert wurden. Anschließend werden den resultierenden Maßnahmen passende Schaltbildkombinationen zugeordnet. [Listl u. a., 2020; Schwietering u. a., 2021]

Tabelle 2.3: Verfahren zur Situationserkennung nach dem MARZ 2018

Verfahren	Eingangsgroßen	Ergebnis
Verkehrsstufen zur Verkehrssituationsübersicht	mittlere Kfz-Geschwindigkeit V_{Kfz} , lokale Verkehrsdichte K	Verkehrsstufe 1-4
richtungsbazogene Verkehrslage (Harmonisierung)	Bemessungsverkehrsstärke Q_b , mittlere Pkw-Geschwindigkeit V_{Pkw} , lokale Verkehrsdichte K	Verkehrssituation 1-5
richtungsbazogene Stauerkenennung	Belegungsgrad B , Verkehrsstärken Q_{Kfz} , Q_{Pkw} & Q_{Lkw} , mittlere Geschwindigkeit V_{Kfz} , V_{Pkw} & V_{Lkw} , Verkehrsstufe	Stau ja/nein
fahrfreifebezogene Verkehrslage (Harmonisierung)	Bemessungsverkehrsstärke q_b , mittlere Kfz-Geschwindigkeit v_{Kfz} , lokale Verkehrsdichte k	Verkehrszustand Harmonisierung 120, 100, 80 oder 60 km/h
fahrfreifebezogene Stauerkenennung	Bemessungsverkehrsstärke Q_b , mittlere Kfz-Geschwindigkeit v_{Kfz} , angezeigte Geschwindigkeit (Schaltbild)	Stau ja/nein

Verfahren	Eingangsgrößen	Ergebnis
Unruhe im Verkehr	Standardabweichung v_{Kfz} auf linkem FS, Kfz-Verkehrsstärke q_{Kfz} auf linkem FS, Kfz-Verkehrsstärke Q_{Kfz}	Unruhe im Verkehr ja/nein
dynamisches Fundamental- diagramm (lokal)	Bemessungsverkehrsstärke Q_b , mittlere Kfz-Geschwindigkeit V_{Kfz}	Verkehrszustand 1-6
dynamisches Fundamental- diagramm (streckenbezogen)	Kfz-Geschwindigkeit V_{Kfz} aus Fahrtzeit, Verkehrsdichte K auf Streckenabschnitt	Verkehrszustand 1-7
Warnung vor Stau bei schwachem Verkehr	Verkehrsstärke Q_{Kfz}	Stauwarnung ja/nein
LOGIT-basierte Situationserkennung	abschnittsbezogene Störfallerkennung $V_{k,diff}$, Eingangsgrößen der anderen Verfahren	Verkehrssituation, Schaltempfehlung, Zusatzinformation im Fall von Stau
hoher Lkw-Anteil	Bemessungsverkehrsstärke Q_b , Lkw-Anteil A_{Lkw} , Lkw-Verkehrsstärke Q_{Lkw}	hoher Lkw-Anteil ja/nein

Verfahren	Eingangsgroßen	Ergebnis
langsam fahrendes Fahrzeug	Einzelfahrzeugdaten vom rechten FS auf Steigungsstrecken	langsam fahrendes Fahrzeug ja/nein
Witterungszustand Nässe	Niederschlagsintensität, Wasserfilmdicke	Nässestufe (trocken, nass 1 - 4)
Witterungszustand Nebel	Sichtweite	Sichtweitenstufe SW 0 - 5
Windwarnung	Spitzenwindgeschwindigkeiten, Windrichtung	Windstärke 0 - 12

Tabelle 2.3 zeigt Situationserkennungsverfahren zur automatischen Ermittlung von Witterungs- und Verkehrszuständen auf Autobahnabschnitten mit SBA nach dem MARZ 2018. Die Ein- und Ausschaltsschwellenwerte der Situationserkennungsverfahren sind für jeden Messquerschnitt variabel vom Bedienpersonal parametrisierbar. Die Werte für die Grundversorgung können in dem MARZ 2018 nachgeschlagen werden. Die Auswahl an Situationserkennungsverfahren kann an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. [MARZ, 2018]

Es wird auf eine detaillierte Darstellung der Algorithmen nach MARZ 2018 verzichtet, da der vorliegenden Dissertation das Steuerungsmodell SARAH (siehe Kapitel 2.4.2) zugrunde liegt.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch kein Umstieg für die in Deutschland nach MARZ 99 betriebenen SBA auf das MARZ 2018 erfolgt. Eine erste praktische Erprobung des MARZ 2018 erfolgt zurzeit durch die österreichische ASFINAG [Gergely und Schwietering, 2021; Riegelhuth und Sandrock, 2018].

2.4.2 Steuerungsmodell SARAH

Das hessische Steuerungsmodell SARAH (Streckensteuerung mit Antizipierendem Regelbasiertem Ansatz in Hessen) ist eine Weiterentwicklung der Algorithmen nach MARZ 99. Im Gegensatz zum MARZ 99 erfolgt die Steuerung der verkehrsbezogenen Automatikprogramme in SARAH über fahrstreifenbezogene Schwellenwerte. Eine Ausnahme ist das Lkw-Überholverbot. SARAH ermöglicht somit eine bessere Anpassung an die unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus auf den einzelnen Fahrstreifen und an die unterschiedliche Fahrstreifennutzung durch die Verkehrsteilnehmenden. [Riegelhuth und Glatz, 2015]

SARAH ist wie auch das MARZ ein regelbasiertes Steuerungsmodell, das die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Anzeigen gewährleistet. Durch den antizipierenden Ansatz fließt zusätzlich die Verkehrsdynamik in die Auswahl der Schaltbildfolgen ein. Der Algorithmus antizipiert die Fortbewegung der Fahrzeuge im Fall einer detektierten Verkehrsstörung. Fahrzeugpuls bewegen sich bspw.

in Fahrtrichtung fort, wohingegen Verkehrsstörungen sich stromaufwärts ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit unterscheidet sich dabei in beiden Fällen. Zusätzlich sind die erfassten Verkehrsdaten durch die zeitliche Aggregation zum Teil bereits ein Messintervall (i. d. R. eine Minute) alt, wenn sie in den Algorithmus eingehen. Beispiele für die Berücksichtigung der Verkehrsdynamik sind, dass die Harmonisierung 120 stromabwärts des auslösenden Messquerschnitts angezeigt wird, wohingegen die Harmonisierung 80 in Form eines Geschwindigkeitstrichters stromaufwärts geschaltet wird. [Riegelhuth und Glatz, 2015]

In Kapitel 6.2 wird das im folgenden beschriebene SARAH-Steuerungsmodell nachgebildet. Für die Implementierung und anschließende Validierung ist ein tiefgehendes Verständnis von SARAH und dem Zusammenspiel der einzelnen Komponenten notwendig. SARAH ist in einem verkehrstechnischen Lastenheft [Leichter u. a., 2001] abgebildet, das als Grundlage für die Steuerung von SBA in Hessen dient. Neben den verkehrstechnischen Vorgaben zum Steuerungsalgorithmus enthält das Lastenheft Standardparameterwerte für die Schaltprogramme. Die Parametrisierung von SBA kann je nach örtlichen Gegebenheiten abweichen. Im Folgenden wird das Steuerungsmodell SARAH im Detail betrachtet (siehe Leichter u. a. [2001]). Die Erfassung und Verarbeitung von Umfelddaten wird dabei vernachlässigt, weil diese Schritte in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation nicht von Relevanz sind.

Rohdaten

Die Streckenstationen messen Kurzzeitdaten in konstanten, parametrisierbaren Messintervallen und übermitteln diese an die Unterzentrale. Es werden die folgenden Kenngrößen für jedes Messintervall, jeden Messquerschnitt und jeden Fahrstreifen übermittelt:

Kfz-Verkehrsstärke	q_{Kfz}	[Kfz/Messintervall]
Lkw-Verkehrsstärke	q_{Lkw}	[Lkw/Messintervall]
mittlere Pkw-Geschwindigkeit	v_{Pkw}	[km/h]
mittlere Lkw-Geschwindigkeit	v_{Lkw}	[km/h]

Plausibilitätsprüfungen

In SARAH werden die erfassten Kurzzeitdaten nach Vorgaben des MARZ plausibilitätsgeprüft. Dabei werden bspw. folgende Bedingungen überprüft:

$$q_{Lkw} > 0 \Rightarrow v_{Lkw} > 0 \quad (2.2)$$

$$q_{Kfz} - q_{Lkw} > 0 \Rightarrow v_{Pkw} > 0 \quad (2.3)$$

Wenn eine Bedingung nicht erfüllt ist, werden die entsprechenden Daten als implausibel gekennzeichnet.

Ersatzwertverfahren

Implausible oder fehlerhafte Daten werden nach Vorgabe des MARZ ersetzt, bevor sie in die Datenaufbereitung eingehen. In das Ersatzwertverfahren fließen Werte aus dem vorherigen Messintervall sowie Werte des Nachbarfahrstreifens ein. Bei Ausfall eines kompletten Messquerschnitts gehen i. d. R. Messwerte eines Nachbarquerschnitts in das Ersatzwertverfahren ein. In einem alternativen Ersatzwertverfahren basiert die Bestimmung der Verkehrsdaten auf Referenzganglinien.

Sowohl die Plausibilitätsprüfung als auch das Ersatzwertverfahren sind in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation nicht von Relevanz, weil eine fehlerhafte Datenerfassung ausgeschlossen werden kann.

Datenaufbereitung

Im nächsten Schritt erfolgt eine Datenaufbereitung der lokalen, plausibilitätsgeprüften Verkehrsdaten.

Es werden die folgenden **fahrstreifenbezogenen Kenngrößen** in jedem Messintervall für jeden Messquerschnitt und jeden Fahrstreifen berechnet:

Pkw-Verkehrsstärke [Pkw/Messintervall T]

$$q_{Pkw} = q_{Kfz} - q_{Lkw} \quad (2.4)$$

Verkehrsstärke [Fahrzeuge/min]

$$q_{Pkw} = \frac{q_{Pkw}}{T} \quad (2.5)$$

$$q_{Lkw} = \frac{q_{Lkw}}{T} \quad (2.6)$$

$$q_{Kfz} = \frac{q_{Kfz}}{T} \quad (2.7)$$

mittlere Kfz-Geschwindigkeit [km/h]

$$v_{Kfz} = \frac{v_{Pkw} \cdot q_{Pkw} + v_{Lkw} \cdot q_{Lkw}}{q_{Kfz}} \quad (2.8)$$

Bemessungsverkehrsstärke [Pkw-Einheiten/h]

$$q_b = \begin{cases} 60 \cdot q_{Pkw} + [k_1 + k_2 \cdot (v_{Pkw} - v_{Lkw})] \cdot 60 \cdot q_{Lkw}, & \text{für } v_{Pkw} - v_{Lkw} \geq 0 \\ 60 \cdot q_{Pkw} + k_1 \cdot 60 \cdot q_{Lkw}, & \text{für } v_{Pkw} - v_{Lkw} < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

lokale Verkehrsdichte [Pkw-E/km]

$$k = \begin{cases} \frac{q_b}{v_{Kfz}}, & \text{für } q_b > 0 \text{ und } v_{Kfz} \neq 0 \\ 0, & \text{für } (q_b = 0 \text{ oder } v_{Kfz} = 0) \text{ und } k_{t-1} < k_{\text{grenz}} \\ k_{\text{maxFS}}, & \text{für } (q_b = 0 \text{ oder } v_{Kfz} = 0) \text{ und } k_{t-1} \geq k_{\text{grenz}} \end{cases} \quad (2.10)$$

mit T : Messintervall [min]

- k_1, k_2 : Parameter, Voreinstellung: $k_1 = 2,00, k_2 = 0,01$
 k_{t-1} : lokale Verkehrsdichte im vorherigen Messintervall
 k_{grenz} : Schwellenwert für k im vorherigen Messintervall
 (je MQ & FS parametrisierbar)
 k_{maxFS} : maximale lokale Verkehrsdichte pro FS
 (je MQ & FS parametrisierbar)

Es werden ebenfalls die folgenden **richtungsbezogenen Kenngrößen** in jedem Messintervall für jeden Messquerschnitt berechnet:

Verkehrsstärke [Fahrzeuge/min]

$$Q_{Kfz} = \sum q_{Kfz} \quad (2.11)$$

$$Q_{Lkw} = \sum q_{Lkw} \quad (2.12)$$

$$Q_{Pkw} = Q_{Kfz} - Q_{Lkw} \quad (2.13)$$

mittlere Geschwindigkeit [km/h]

$$V_{Kfz} = \frac{\sum (v_{Kfz} \cdot q_{Kfz})}{\sum q_{Kfz}} \quad (2.14)$$

$$V_{Lkw} = \frac{\sum (v_{Lkw} \cdot q_{Lkw})}{\sum q_{Lkw}} \quad (2.15)$$

$$V_{Pkw} = \frac{\sum (v_{Pkw} \cdot q_{Pkw})}{\sum q_{Pkw}} \quad (2.16)$$

Bemessungsverkehrsstärke [Pkw-Einheiten/h]

$$Q_b = \begin{cases} 60 \cdot Q_{Pkw} + [k_1 + k_2 \cdot (V_{Pkw} - V_{Lkw})] \cdot 60 \cdot Q_{Lkw}, & \text{für } V_{Pkw} - V_{Lkw} \geq 0 \\ 60 \cdot Q_{Pkw} + k_1 \cdot 60 \cdot Q_{Lkw}, & \text{für } V_{Pkw} - V_{Lkw} < 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

lokale Verkehrsdichte [Pkw-E/km]

$$K = \begin{cases} \frac{Q_b}{V_{Kfz}}, & \text{für } Q_b > 0 \text{ und } V_{Kfz} \neq 0 \\ 0, & \text{für } (Q_b = 0 \text{ oder } V_{Kfz} = 0) \text{ und } K_{t-1} < K_{grenz} \\ K_{max}, & \text{für } (Q_b = 0 \text{ oder } V_{Kfz} = 0) \text{ und } K_{t-1} \geq K_{grenz} \end{cases} \quad (2.18)$$

mit k_1, k_2 : Parameter, Voreinstellung: $k_1 = 2,00, k_2 = 0,01$
 K_{t-1} : lokale Verkehrsdichte im vorherigen Messintervall
 K_{grenz} : Schwellenwert für K im vorherigen Messintervall
 (je MQ parametrisierbar)
 K_{max} : maximale lokale Verkehrsdichte
 (je MQ parametrisierbar)

Datenglättung

Auf der A5 wird auf eine Glättung der Kurzzeitdaten verzichtet. Die berichtigten Originalmesswerte gehen als Eingangsgrößen in die Schaltprogramme ein.

Schaltprogramme

Im Folgenden werden die Logiken der verkehrsbedingten Schaltprogramme des Steuerungsmodells SARAH beschrieben. Die witterungsbedingten Schaltprogramme *Nebelwarnung* und *Niederschlagswarnung* werden aufgrund des Fokus dieser Dissertation nicht beschrieben. Die Parameterwerte der Schaltprogramme werden auf die örtlichen Gegebenheiten angepasst und variieren demzufolge je nach Anlage und Messquerschnitt. Es wird daher auf eine Abbildung der Parameterwerte verzichtet. Die Einschaltsschwellenwerte werden im Allgemeinen höher gesetzt als die Ausschaltsschwellenwerte, um ein häufiges Ändern der Anzeigen zu vermeiden. In Anhang A.1 sind Schaltbildfolgen für ausgewählte Schaltprogramme dargestellt.

- **Harmonisierung 120**

Eingangsgröße für das Harmonisierungsprogramm 120 ist die fahstreifenbezogene Bemessungsverkehrsstärke q_b . Es sind dabei unterschiedliche Ein- und Ausschaltsschwellenwerte $q_{b_{H120_ein}}$ und $q_{b_{H120_aus}}$ für die verschiedenen Fahrstreifen definiert. Es sind Ein- und Ausschaltverzögerungen T_{H120_ein} und T_{H120_aus} hinterlegt, sodass erst eine Schaltanforderung generiert wird, wenn das Ein- oder Ausschaltkriterium für eine gewisse Dauer ohne Unterbrechung erfüllt ist. Bei Nässe und Regen werden die Schwellenwerte über die Abminderungsfaktoren Nässefaktor γ_{H120} , Nachtfaktor ϵ_{H120} bzw. Nässe- und Nachtfaktor ρ_{H120} reduziert.

Für die Harmonisierung 120 sind die folgenden Ein- und Ausschaltkriterien definiert:

$SKE_{H120}: q_b > q_{b_{H120_ein}}, \quad \text{für mind. 1 FS}$ $SKA_{H120}: q_b < q_{b_{H120_aus}}, \quad \text{für alle FS}$
--

Die Harmonisierung 120 sieht eine Beschränkung der Geschwindigkeit auf 120 km/h über mindestens zwei Kilometer ausgehend vom auslösenden Messquerschnitt vor.

- **Harmonisierung 100**

Eingangsgröße für das Harmonisierungsprogramm 100 ist die fahstreifenbezogene lokale Verkehrsdichte k . Es sind dabei unterschiedliche Ein- und Ausschaltsschwellenwerte k_{H100_ein} und k_{H100_aus} für die verschiedenen Fahrstreifen definiert. Es sind Ein- und Ausschaltverzögerungen T_{H100_ein} und T_{H100_aus} hinterlegt. Bei Nässe und Regen werden die Schwellenwerte über die Abminderungsfaktoren Nässefaktor γ_{H100} , Nachtfaktor ϵ_{H100} bzw. Nässe- und Nachtfaktor ρ_{H100} reduziert.

Für die Harmonisierung 100 sind die folgenden Ein- und Ausschaltkriterien definiert:

$$\begin{aligned}
 SKE_{H100}: & \quad k > k_{H100_ein}, \quad \text{für mind. 1 FS} \\
 SKA_{H100}: & \quad k < k_{H100_aus}, \quad \text{für alle FS}
 \end{aligned}$$

Die Harmonisierung 100 sieht eine Beschränkung der Geschwindigkeit auf 100 km/h an zwei Anzeigequerschnitten ausgehend vom auslösenden Messquerschnitt vor. Stromaufwärts wird die Geschwindigkeit an einem Anzeigequerschnitt auf 120 km/h beschränkt, um so einen Geschwindigkeitstrichter auf 100 km/h herzustellen.

- **Harmonisierung 80**

Eingangsgrößen für das Harmonisierungsprogramm 80 sind die fahrstreifenbezogene lokale Verkehrsdichte k und die fahrstreifenbezogene mittlere Kfz-Geschwindigkeit v_{Kfz} . Es sind dabei unterschiedliche Ein- und AusschaltSchwellenwerte k_{H80_ein} bzw. $v_{Kfz_{H80_ein}}$ und k_{H80_aus} bzw. $v_{Kfz_{H80_aus}}$ für die verschiedenen Fahrstreifen definiert und Ein- und Ausschaltverzögerungen T_{H80_ein} und T_{H80_aus} hinterlegt. Bei Nässe und Regen werden die Schwellenwerte über die Abminderungsfaktoren Nässefaktor γ_{H80} , Nachtfaktor ϵ_{H80} bzw. Nässe- und Nachtfaktor ρ_{H80} reduziert.

Für die Harmonisierung 80 sind die folgenden Ein- und Ausschaltkriterien definiert:

$$\begin{aligned}
 SKE_{H80}: & \quad k > k_{H80_ein} \text{ und } v_{Kfz} < v_{Kfz_{H80_ein}}, \quad \text{für mind. 1 FS} \\
 SKA_{H80}: & \quad k < k_{H80_aus} \text{ und } v_{Kfz} > v_{Kfz_{H80_aus}}, \quad \text{für alle FS}
 \end{aligned}$$

Die Harmonisierung 80 sieht eine Beschränkung der Geschwindigkeit auf 80 km/h am Anzeigequerschnitt stromaufwärts des auslösenden Messquerschnitts vor. Der vorherige Anzeigequerschnitt wird auf 120 km/h beschränkt, um einen Geschwindigkeitstrichter auf 80 km/h herzustellen.

- **Ein- und Ausfahrharmonisierung**

An Messquerschnitten im Bereich von Ein- und Ausfahrten können bei Bedarf zusätzlich fiktive Messquerschnitte angelegt werden, die nicht die gesamte Richtungsfahrbahn, sondern nur die Fahrstreifen der Ein- bzw. Ausfahrt beinhalten. In solchen Fällen geht zusätzlich zum klassischen Messquerschnitt (auf der Hauptfahrbahn) die Ein- bzw. Ausfahrt als separater (fiktiver) Messquerschnitt in die Harmonisierungsprogramme ein. Wenn ein fiktiver Messquerschnitt eine Harmonisierung anfordert während auf der Hauptfahrbahn keine Schwellenwerte überschritten werden, wird die Geschwindigkeit auf der Ein- bzw. Ausfahrt entsprechend der Schaltbildfolge des jeweiligen Harmonisierungsprogramms beschränkt. Über einen Querabgleich wird am gesamten Anzeigequerschnitt eine von rechts nach links steigende Geschwindigkeitsanordnung aufgebaut. Für die Ein- und Ausfahrharmonisierung werden vorrangig die Harmonisierung 80 und 100 eingesetzt.

- **Stauwarnung**

Eingangsgrößen für die Stauwarnung sind die querschnittsbezogene Bemessungsverkehrsstärke Q_b , die fahrfstreifenbezogene mittlere Kfz-Geschwindigkeit v_{Kfz} , die angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung und die Anzahl der Fahrstreifen. Die Parameter Q_f und Q_g beschreiben Verkehrsstärkengrenzen für dreistreifige Richtungsfahrbahnen. Zusätzlich sind unterschiedliche Ein- und Ausschaltsschwellenwerte $v_{Kfz_{Stau_ein}}$ und $v_{Kfz_{Stau_aus}}$ für die verschiedenen Fahrstreifen und im Messintervall geschalteten Geschwindigkeitsbeschränkungen definiert. Einschaltsschwellenwerte existieren für angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h und Dunkelschaltung (freie Fahrt). Ausschaltsschwellenwerte finden Einsatz für angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 60 km/h (Geschwindigkeitstrichter vor Stau) und Dunkelschaltung (im Stau). Die Stauwarnung generiert Schaltanforderungen ohne Ein- und Ausschaltverzögerung.

Für die Stauwarnung auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen sind die folgenden Ein- und Ausschaltkriterien definiert:

SKE_{Stau} :	$(Q_b < Q_f$ und $v_{Kfz} < v_{Kfz_{Stau_{ein}}}$, für alle FS)
	oder $(Q_b \geq Q_f$ und $v_{Kfz} < v_{Kfz_{Stau_{ein}}}$, für mind. 2 FS)
SKA_{Stau} :	$(Q_b < Q_f$ und $v_{Kfz} > v_{Kfz_{Stau_{aus}}}$, für mind. 1 FS)
	oder $(Q_g > Q_b \geq Q_f$ und $v_{Kfz} > v_{Kfz_{Stau_{aus}}}$, für mind. 2 FS)
	oder $(v_{Kfz} > v_{Kfz_{Stau_{aus}}}$, für alle FS)

Die Stauwarnung sieht einen Geschwindigkeitstrichter auf 60 km/h stromaufwärts des auslösenden Messquerschnitts vor. Zusätzlich wird zu Beginn des Geschwindigkeitstrichters (120 km/h) eine Gefahrenwarnung geschaltet. Ab der Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h sehen die Verkehrsteilnehmenden zusätzlich eine Stauwarnung. Die zum auslösenden Messquerschnitt gehörigen WZG A werden dunkel geschaltet, die WZG B zeigen eine Stauwarnung an. In der Stauauflösung stromabwärts des Staus wird eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h an einem Anzeigequerschnitt angezeigt.

- **Ausfahrtstau**

Vergleichbar mit der Ein- und Ausfahrharmonisierung kann auch die Stauwarnung über fiktive Messquerschnitte auf Ausfahrten angewendet werden. Diese fiktiven Messquerschnitte gehen zusätzlich zur Hauptfahrbahn in das Stauprogramm ein. Fordert eine Ausfahrt eine Stauwarnung an, so wird die Geschwindigkeit auf den Ausfahrtstreifen über einen Geschwindigkeitstrichter auf 60 km/h beschränkt. Auf der Hauptfahrbahn ist in diesem Fall i. d. R. eine Harmonisierung 80 oder 100 geschaltet. Über einen Querabgleich wird am gesamten Anzeigequerschnitt eine von rechts nach links steigende Geschwindigkeitsanordnung sichergestellt.

- **Lkw-Überholverbot**

Eingangsgrößen für das Lkw-Überholverbot sind die richtungsbezogenen Pkw- und Lkw-Verkehrsstärken Q_{Pkw} und Q_{Lkw} . Es sind dabei unterschiedliche Einschaltsschwellenwerte $Q_{Pkw_{UV_ein}}$ und $Q_{Lkw_{UV_ein}}$ und Ausschaltsschwellenwerte $Q_{Pkw_{UV_aus}}$ und $Q_{Lkw_{UV_aus}}$ definiert. Es ist eine Ausschaltverzögerung T_{UV_aus} hinterlegt.

Für das Lkw-Überholverbot sind die folgenden Ein- und Ausschaltkriterien definiert:

$$\begin{array}{l} SKE_{UV}: \quad Q_{Pkw} > Q_{Pkw_{UV_ein}} \text{ und } Q_{Lkw} > Q_{Lkw_{UV_ein}} \\ SKA_{UV}: \quad Q_{Pkw} < Q_{Pkw_{UV_aus}} \text{ oder } Q_{Lkw} < Q_{Lkw_{UV_aus}} \end{array}$$

Die Einschaltverzögerung T_{H80_ein} ist auf 0 Minuten parametrisiert, so dass das Lkw-Überholverbot ohne Verzögerung eingeschaltet wird. Das Lkw-Überholverbot wird über mindestens drei Kilometer ausgehend vom auslösenden Messquerschnitt geschaltet.

- **Temporäre Seitenstreifenfreigabe**

Das Steuerungsmodell schlägt die Freigabe und Schließung des Seitenstreifens in Abhängigkeit der fahrestreifenbezogenen Bemessungsverkehrsstärke q_b und der fahrestreifenbezogenen mittleren Kfz-Geschwindigkeit v_{Kfz} vor [Röbig, 2009]. Die tatsächliche Aktivierung und Deaktivierung der TSF erfolgt durch das Bedienpersonal und beruht neben den Schaltempfehlungen auf Erfahrung, Ganglinien des Verkehrsflusses und Sicherheitsaspekten (bspw. Hindernisfreiheit auf dem Seitenstreifen). Es sind dabei unterschiedliche Einschaltsschwellenwerte $q_{b_{TSF_ein}}$ und $v_{Kfz_{TSF_ein}}$ und Ausschaltsschwellenwerte $q_{b_{TSF_aus}}$ und $v_{Kfz_{TSF_aus}}$ für die verschiedenen Fahrestreifen definiert und Ein- und Ausschaltverzögerungen T_{TSF_ein} und T_{TSF_aus} hinterlegt.

Für die Schaltempfehlung der TSF sind folgende Ein- und Ausschaltkriterien definiert:

$$\begin{array}{l} SKE_{TSF}: \quad q_b > q_{b_{TSF_ein}} \text{ oder } v_{Kfz} < v_{Kfz_{TSF_ein}}, \quad \text{für alle FS} \\ SKA_{TSF}: \quad q_b < q_{b_{TSF_aus}} \text{ und } v_{Kfz} > v_{Kfz_{TSF_aus}}, \quad \text{für alle FS} \end{array}$$

Die Öffnung und Schließung des Seitenstreifens wird den Verkehrsteilnehmenden über Prismenwender kommuniziert. Die Freigabe und Schließung erfolgen nicht für alle Querschnitte gleichzeitig. Die Öffnung beginnt an dem letzten Prismenwender eines Abschnittes. Pro Minute wird gegen die Fahrtrichtung ein weiterer Anzeigequerschnitt freigegeben. Die Schließung erfolgt hingegen querschnittsweise in Fahrtrichtung. Während der Öffnungs- und Schließprozedur des Seitenstreifens wird die Geschwindigkeit auf dem Abschnitt auf 100 km/h beschränkt. Bei freigegebenem Seitenstreifen wird die Geschwindigkeit in Hessen auf 120 km/h beschränkt.

Priorisierung

Die Schaltanforderungen der einzelnen Schaltprogramme werden anschließend priorisiert. Für die Geschwindigkeitsbeschränkungen hat die restriktivste Schaltanforderung Vorrang. Bei Gefahrenzeichen hat das WVZ Vorrang, das vor der am schlechtesten erkennbaren Gefahr warnt oder das die Anordnung der niedrigsten Geschwindigkeitsbeschränkung erfordert. Für SARAH sind die Priorisierungen aus Tabelle 2.1 gültig.

Querabgleich

Im nächsten Schritt erfolgt ein Querabgleich aller Schaltanforderungen an einem Anzeigequerschnitt. Die Geschwindigkeitsbeschränkungen müssen innerhalb eines Anzeigequerschnitts gleich oder von rechts nach links monoton (nicht streng monoton) steigend sein. Die maximale Differenz zwischen den Anzeigen liegt

bei 40 km/h. Fehler im Querabgleich werden durch zulässige Kombinationen von Geschwindigkeitsbeschränkungen ersetzt.

Längsabgleich

Die Schaltanforderungen aller Anzeigequerschnitte eines Streckenabschnitts werden zusätzlich im Längsschnitt abgeglichen. Die Anzeigen aufeinanderfolgender Anzeigequerschnitte werden so aneinander angepasst, dass kontinuierliche und in sich schlüssige Schaltbildfolgen resultieren. SARA H sieht vor, dass eine Unterbrechung der Anzeigekette nur zulässig ist, wenn an mindestens drei Anzeigequerschnitten (Voreinstellung) keine Schaltanforderungen vorliegen. Wird diese Anzahl unterschritten, muss eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h an den betroffenen Anzeigequerschnitten angefordert werden. Des Weiteren dürfen die Geschwindigkeitsbeschränkungen an zwei aufeinander folgenden Anzeigequerschnitten höchstens 40 km/h voneinander abweichen, um die Bildung eines Geschwindigkeitstrichters im Vorlauf zu gewährleisten. Die *Ausreißerregel* besagt, dass Geschwindigkeitsbeschränkungen, die im Vergleich zu den Nachbarquerschnitten nach oben abweichen, korrigiert werden müssen.

Schaltbefehl

Für die angeforderten Geschwindigkeitsbeschränkungen, Warnungen und Überholverbote erfolgt im letzten Schritt der Schaltbefehl und die Schaltbilder werden schließlich an den Anzeigequerschnitten angezeigt.

2.5 Wirkungen von SBA

Auf Autobahnabschnitten mit hohen Verkehrsbelastungen haben SBA positive Auswirkungen auf den Verkehr und erzielen dadurch einen volkswirtschaftlichen Nutzen [Riegelhuth und Glatz, 2015]. Die Ziele von SBA lassen sich in

die Verbesserung des Verkehrsflusses, die Erhöhung der Verkehrssicherheit und die Reduktion der Umweltbelastungen unterteilen [Riegelhuth und Glatz, 2015]. Die Voraussetzung für die Erreichung dieser Ziele ist eine hohe Befolgung der dynamischen Anzeigen. Daher wird in diesem Unterkapitel zusätzlich auf die Erkenntnisse aus der Literatur im Hinblick auf die Akzeptanz und Befolgung der SBA-Anzeigen eingegangen. Der Fokus liegt auf deutschen Untersuchungen, da sich die Rahmenbedingungen zwischen deutschen und internationalen Autobahnen unterscheiden (siehe Kapitel 2.2). In Kapitel 2.6 wird auf internationale Erkenntnisse zu SBA eingegangen.

2.5.1 Befolgung der Verkehrsteilnehmenden

Ausschlaggebend für die Wirkung einer SBA ist die Akzeptanz der dynamischen Anzeigen und die daraus resultierende Befolgung. In dieser Dissertation wird die Bereitschaft, dynamische Vorschrift- und Gefahrenzeichen zu befolgen und die dadurch ausgelöste Verhaltensänderung im Vergleich zum unbeeinflussten Zustand als Akzeptanz bezeichnet. Unter Befolgung wird die messbare Verhaltensänderung, d. h. der Anteil an Verkehrsteilnehmenden, die die vorgeschriebene Geschwindigkeit einschließlich einer Toleranz unterschreiten, verstanden.

Verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen erreichen bei guter Steuerungsqualität eine hohe Akzeptanz. Statische und zeitabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen werden im Vergleich schlechter akzeptiert. Die Akzeptanz ist abhängig von der für die Verkehrsteilnehmenden erkennbaren Übereinstimmung zwischen den dynamischen Anzeigen und der vorherrschenden Verkehrssituation [RWVA, 1997] und der daraus resultierenden Vertrauenswürdigkeit in die SBA [Riegelhuth und Glatz, 2015]. Ziel ist das Anordnen von transparenten und nachvollziehbaren Geschwindigkeitsbeschränkungen. Eine hohe Befolgung durch die Verkehrsteilnehmenden und eine hohe Zuverlässigkeit der Schaltbilder sind Voraussetzungen für einen erfolgreichen SBA-Betrieb [RWVA, 1997].

Die Arbeit von Zackor [1972] beschäftigt sich mit den Auswirkungen der SBA auf dem Autobahnabschnitt Salzburg-München (heutige A8). Es handelt sich dabei

um die erste stationäre Anlage zur dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkung in Deutschland. Den Untersuchungen zufolge ergibt sich eine weitestgehende Einhaltung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen einschließlich einer Toleranz von 10 km/h. Die angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung wird von Zackor als *Richtgeschwindigkeit* beschrieben. Neben der Einhaltung der Höchstgeschwindigkeit sollen auch langsamere Verkehrsteilnehmende zur Einhaltung dieser Richtgeschwindigkeit animiert werden.

Zackor und Schwenzer [1988] untersuchen die SBA auf der A8 bei Stuttgart und stellen eine hohe Befolgung fest. Mit Berücksichtigung einer Toleranz von 10 km/h verzeichnen die Autoren eine hohe Akzeptanz der Geschwindigkeitsbeschränkungen. Sie weisen auf einen Vertrauensverlust aufgrund fehlender Übereinstimmung zwischen der Anzeige und der vorherrschenden Verkehrssituation hin. Zudem kommentieren die Autoren die übliche Staffelung der Geschwindigkeitsanzeigen von 120, 80 und 60 km/h. Eine feinere Staffelung wäre technisch möglich, sie könnte jedoch zu einer Überforderung der Verkehrsteilnehmenden und somit zu einer Verringerung der Akzeptanz führen.

Untersuchungsgegenstand von Mangold u. a. [1996] sind die Funktionsweise und Zuverlässigkeit von SBA unter Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung. Da die Wirksamkeit einer SBA u. a. durch die Akzeptanz beeinflusst wird, haben die Autor:innen das Ziel, den Begriff Akzeptanz zu quantifizieren, um SBA diesbezüglich eindeutig beurteilen zu können. Mangold u. a. [1996] definieren Akzeptanz als *Grad der Befolgung* einer angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung. Sie thematisieren drei mögliche Beurteilungsmethoden zur Akzeptanzermittlung:

1. Anzahl der Fahrzeuge, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten
2. Berechnung des Verhältnisses der zulässigen Geschwindigkeit zum 85 %-Quantil der Geschwindigkeit
3. Bestimmung eines Akzeptanzindex basierend auf der unterschiedlichen Gewichtung von festgelegten Geschwindigkeitsüberschreitungsklassen

Die Autor:innen kommen zu dem Ergebnis, dass der Befolgungsgrad hauptsächlich durch situationsbedingte Umfeldbedingungen beeinflusst wird. Sie stellen fest, dass die Akzeptanz mit Ausnahme einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h bei verkehrlich bedingten Geschwindigkeitsbeschränkungen größer ist als bei witterungsbedingten Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die Untersuchungen ergeben des Weiteren, dass die Akzeptanz mit zunehmender Geschwindigkeitsbeschränkung und vom rechten zum linken Fahrstreifen abnimmt. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass Verkehrsteilnehmende Nebelsituationen mit einem höheren Respekt gegenüberreten als Regensituationen.

Drews [1997] beleuchtet die Auswirkungen von Lkw-Überholverböten auf Autobahnabschnitten. Er stellt eine hohe Akzeptanz des Lkw-Überholverböts fest. Zudem beobachtet er keine Unterschiede in der Befolgung zwischen in- und ausländischem Schwerverkehr.

Die Akzeptanz der SBA auf der A4 und A61 im Großraum Köln wird in der Arbeit von Lange und Struif [1997] thematisiert. Die Untersuchungen ergeben eine sehr durchmischte Akzeptanz bei niedrigen Verkehrsstärken. Bei hohen Verkehrsstärken haben bereits wenige Verkehrsteilnehmende mit einer hohen Akzeptanz der Geschwindigkeitsbeschränkungen eine große Wirkung. Sie bremsen ganze Fahrzeugpuls ab und erzielen somit eine Erhöhung des gesamten Befolgungsgrads.

Balz und Ermer [1998] ermitteln die Wirkung von verschiedenen Schaltbildkombinationen in Feldversuchen auf der A6 Schwabach. Um die Handschaltungen für die Verkehrsteilnehmenden plausibel wirken zu lassen, wurden ein Polizeifahrzeug mit Rundumlicht bei Unfallwarnung und ein Sicherungsfahrzeug der Autobahnmeisterei bei Stau- und Baustellenwarnung auf dem untersuchten Streckenabschnitt eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Befolgung, vor allem für die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h. Die zusätzliche Anzeige von Warnhinweisen hat dabei eine positive Wirkung auf die Akzeptanz. Als besonders wirksam stellt sich die zusätzliche Anzeige einer Unfallwarnung heraus. Warnhinweise ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen haben dagegen eine geringere Wirkung als die Kombination aus Gebot und Hinweis. Die Autoren können keine Änderung des Lkw-Verkehrs auf dem Überholfahrstreifen bei Schaltung

eines Lkw-Überholverbots feststellen, wobei mit und ohne Lkw-Überholverbot die Nutzung des Überholfahrstreifens nahezu ausschließlich durch Pkw erfolgt.

Steinhoff u. a. [2002] beschäftigen sich mit der Wirksamkeit von präventiven SBA-Schaltungen, dabei liegt ein Fokus auf der Akzeptanz. Unter präventiven Schaltungen werden in diesem Kontext Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 80 km/h bis 120 km/h verstanden, für die kein unmittelbarer Grund für die Verkehrsteilnehmenden erkennbar ist. Die Untersuchungen basieren auf Verkehrs- und Anzeigedaten von drei Autobahnabschnitten mit SBA (A1, A3 und A8). Die Autor:innen bemängeln an vorherigen Untersuchungsmethoden, dass die Abweichung zwischen gefahrenen und angezeigten Geschwindigkeiten kein Maß für die Akzeptanz darstellen muss, sondern auch verkehrlich bedingt sein kann. Steinhoff u. a. [2002] stellen eine Akzeptanzuntersuchung mithilfe der linearen Regressionsmethode unter Berücksichtigung der verkehrlichen Situation und der Witterung vor. Hierfür wird zunächst ein unbeeinflusstes Fundamentaldiagramm für Pkw-Geschwindigkeiten ohne Geschwindigkeitsbeschränkung als Referenzfall ermittelt. Anhand dieses Referenzfalls werden die erwarteten Geschwindigkeiten ermittelt und den Geschwindigkeiten aus dem beeinflussten Fundamentaldiagramm gegenübergestellt. Anschließend untersuchen die Autor:innen die absolute und die relative Akzeptanz. Bei der absoluten Akzeptanz handelt es sich um die Differenz zwischen der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit und der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung. Die relative Akzeptanz beschreibt die mittlere Änderung des Geschwindigkeitsniveaus der Pkw gegenüber dem unbeeinflussten Fundamentaldiagramm ($v_{Referenz}$). Steinhoff u. a. [2002] stellen auf den untersuchten Autobahnabschnitten eine geringe Befolgung der dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen fest. Die Reduktion des Geschwindigkeitsniveaus beträgt etwa 2 km/h je Verringerung der angezeigten Höchstgeschwindigkeit um 10 km/h. Dabei können Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 80 km/h aufgrund der vermehrten Beeinflussung der untersuchten Verkehrssituationen durch Stau und Rückstau nicht ohne Weiteres beurteilt werden. Des Weiteren kommen die Autor:innen zu dem Ergebnis, dass Zusatzzeichen einen positiven Einfluss auf die Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkung haben. Die Schaltung von

Lkw-Überholverboden und Gefahrenzeichen (Gefahrenstelle, Baustelle und Stau) weisen eine verbesserte Wirksamkeit auf.

Steinhoff u. a. [2002] verweisen auf eine Befragung von Färber und Färber [2000], die die Gründe für die Missachtung der SBA-Anzeigen thematisiert. Die Wahrnehmung der Anzeigequerschnitte, die Bereitschaft zur Befolgung der Schaltbilder und die Reaktion auf die Schaltbilder sind Untersuchungsgegenstände der Befragung. Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass 84 % der Befragten den Anzeigequerschnitt wahrgenommen haben, sich davon aber 17 % nicht mehr korrekt an die Inhalte erinnern können. 38 % der Befragten, die sich korrekt an die Schaltbilder erinnern konnten, waren nicht bereit, die Geschwindigkeitsbeschränkung zu beachten. 62 % waren bereit, ihr Fahrverhalten anzupassen, dies entspricht etwa 43 % aller Befragten. Hegewald [2021] nutzt diese Befragungsergebnisse für den Aufbau eines Befolgungsmodells für SBA (siehe Kapitel 3.5).

Steinhoff [2003] befasst sich in ihrer Dissertation mit der online Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver SBA-Schaltungen aufbauend auf Steinhoff u. a. [2002]. Die Autorin leitet *Indikatoren für die Fahrerakzeptanz* ab, indem sie zunächst ein Über- bzw. Unterschreitungs niveau berechnet. Die betrachteten Überschreitungs niveaus orientieren sich dabei an den Punkten, die eine Person bei Missachtung der Geschwindigkeitsbeschränkungen nach dem damaligen Bußgeld- und Punktekatalog des Straßenverkehrsrechts erhalten hätte. Dabei stellt die Autorin fest, dass Verkehrsteilnehmende häufig knapp unter 20 km/h schneller fahren, als die Geschwindigkeitsbeschränkung es vorgibt. Die Über- bzw. Unterschreitungsrate ergibt sich anschließend aus dem Verhältnis aller erfassten Fahrzeuge eines jeweiligen Über- bzw. Unterschreitungs niveaus zur Anzahl aller Fahrzeuge im betrachteten Intervall. Unter Verwendung des Ansatzes der *relativen Akzeptanz* [Steinhoff u. a., 2002] definiert die Autorin für die Bewertung der Akzeptanz zudem den *Akzeptanzindex (AI)*, der als Maß für die Einhaltung der Geschwindigkeitsbeschränkung unter Berücksichtigung der verkehrlichen Situation beschrieben wird. Dieser Akzeptanzindex kann Werte von 0 (geringe Akzeptanz) bis 1 (hohe Akzeptanz) sowie -1 (Fehlschaltung) annehmen. Wenn die mittlere Pkw-Geschwindigkeit v_{pkw} weniger als 20 km/h unterhalb der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung v_{zul} liegt, wird $AI = 1$ gesetzt, sind

es mehr als 20 km/h unterhalb der Geschwindigkeitsbeschränkung v_{zul} , beträgt $AI = -1$. Wenn die mittlere Pkw-Geschwindigkeit unter der Referenzgeschwindigkeit $v_{Referenz}$ (unbeeinflusstes Fundamentaldiagramm, siehe [Steinhoff u. a., 2002]) liegt, kann AI nach Formel 2.19 bestimmt werden.

$$AI = \frac{v_{Referenz} - v_{Pkw}}{v_{Referenz} - v_{zul}} \quad (2.19)$$

Die Über- und Unterschreitungs niveaus und der Akzeptanzindex fließen schließlich in die Online-Bewertungsmethode der Wirksamkeit und Akzeptanz nach Steinhoff [2003] ein.

Schick [2003] analysiert u. a. die Auswirkungen von Lkw-Überholverböten auf die Fahrstreifenaufteilung und damit die Befolgung der Lkw-Fahrenden gegenüber dieser Anzeige. Der Autor vergleicht die Lkw-Anteile auf den mittleren und rechten Fahrstreifen mit und ohne SBA. Die Untersuchung zeigt eine leichte Verschiebung der Lkw vom mittleren auf den rechten Fahrstreifen bei Schaltung eines Lkw-Überholverbots. Es wird darauf hingewiesen, dass ein Lkw-Überholverbot überwiegend bei hohen Verkehrsstärken geschaltet wird.

Geistefeldt und Glatz [2010] befassen sich mit den Auswirkungen von TSF auf den Verkehrsablauf und auf das Unfallgeschehen. Sie nutzen für die Auswertungen Verkehrsdaten der A5 im Bereich Frankfurt und der A3 im Bereich Offenbach. Zur Ermittlung der Akzeptanz der TSF untersuchen die Autoren zum einen den Lkw-Anteil auf dem temporär freigegebenen Seitenstreifen und vergleichen diesen mit dem Lkw-Anteil auf dem rechten Fahrstreifen bei geschlossenem Seitenstreifen. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Akzeptanz der Lkw. Zum anderen betrachten sie den Pkw-Anteil und schlussfolgern eine niedrigere Akzeptanz als für die Lkw. Die Autoren merken jedoch an, dass der Pkw-Anteil auf dem Seitenstreifen mit 3 % bis 10 % in einer vergleichbaren Größenordnung liegt wie auf dem rechten Fahrstreifen einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn. Insgesamt beträgt der Anteil der Verkehrsstärke auf dem Seitenstreifen etwa 14 %. Mit Verweis auf die Forschung von Geistefeldt [2007] stellen die Autoren fest, dass der Seitenstreifen

damit nur geringfügig weniger ausgelastet ist als der rechte Fahrstreifen einer vierstreifigen Richtungsfahrbahn.

Kappich u. a. [2010] beschäftigen sich mit Bewertungsmethoden für die online Auswertung von präventiven SBA-Schaltungen hinsichtlich der Harmonisierungswirkung. Hintergrund ist die Idee einer permanenten Bewertung der Güte und Qualität von SBA im laufenden Betrieb. Laut den Autoren ist die Akzeptanz vor allem im Zusammenhang mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen maßgebend, um die gewünschte Wirkung auf den Verkehrsablauf zu erzielen. Eine angepasste Geschwindigkeit bedeutet dabei jedoch nicht unbedingt, dass eine hohe Akzeptanz vorhanden ist. Es können auch Umfeldbedingungen wie bspw. schlechte Sichtbedingungen ausschlaggebend sein. Kappich u. a. [2010] zufolge liegt dann eine hohe Akzeptanz der SBA-Schaltungen vor, wenn die Verkehrsteilnehmenden ohne Verkehrsbeeinflussung schneller fahren würden. Die Autoren beschreiben die zwei Bewertungsansätze *relative Wirkung* und *absolute Wirksamkeit*. Der erste Ansatz kommt der Methode von Steinhoff [2003] nahe und beinhaltet einen Mit-Ohne-Vergleich. Der zweite Ansatz richtet sich nach absoluten Bewertungsgrößen und wurde für die weiteren Untersuchungen verwendet. Hierfür wurde u. a. in Anlehnung an Steinhoff [2003] ein *Akzeptanzindex* definiert, der sowohl die Befolgung der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen als auch den Befolgungsgrad des Lkw-Überholverbots beinhaltet. Die Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkungen wird als relative Anzahl an Fahrzeugen, deren Geschwindigkeit höchstens 10 km/h von der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung abweicht, definiert. Dabei wird lediglich der äußere Überholfahrstreifen betrachtet, da eine Geschwindigkeitsüberschreitung mit großer Wahrscheinlichkeit auf dem linken Fahrstreifen stattfindet. Zur Bestimmung des Befolgungsgrads des Lkw-Überholverbots wird der Anteil der Lkw betrachtet, die sich nicht an dieses Verbot halten. Das entwickelte Bewertungsverfahren kommt im beschriebenen Forschungsprojekt nicht zum Einsatz.

Die verkehrlichen Wirkungen und die Akzeptanz der temporären Seitenstreifenfreigaben sind Gegenstand der Analyse von Recker u. a. [2015]. Die Auswertungen basieren auf Verkehrsdaten eines sechsstreifigen Abschnitts mit TSF der A8 und

eines regulär achtstreifigen Abschnitts der A9 im Großraum München. Es werden die Verkehrsstärkeanteile auf dem Seitenstreifen der regulär dreistreifigen Richtungsfahrbahnen und auf dem rechten Fahrstreifen der vierstreifigen Richtungsfahrbahnen gegenübergestellt. Die Autor:innen stellen Verkehrsstärkeanteile zwischen 17 % und 23 % auf dem rechten Fahrstreifen der vierstreifigen Richtungsfahrbahnen fest. Auf dem Seitenstreifen der regulär dreistreifigen Richtungsfahrbahnen können hingegen nur 13,5 % bis 19 % Verkehrsstärkeanteile ermittelt werden. Die Untersuchung zeigt, dass der Seitenstreifen von Lkw-Fahrenden gut genutzt wird, während von den Pkw-Fahrenden eine niedrige Akzeptanz ausgeht. Die Pkw akzeptieren den Seitenstreifen hingegen besser, wenn die Lkw-Belastung geringer ist. Außerdem vermuten die Autor:innen einen positiven Zusammenhang zwischen der Akzeptanz der TSF und der Streckenkenntnis. Recker u. a. [2015] kommen zu dem Schluss, dass der Seitenstreifen nicht wie ein vollwertiger Fahrstreifen akzeptiert wird.

Riegelhuth und Glatz [2015] befassen sich mit der Akzeptanz von statischen und dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Im Rahmen der Erweiterung der SBA auf der A5 wurde vorübergehend eine TSF mit statischen Geschwindigkeitsbeschränkungen zwischen dem Bad Homburger Kreuz und dem Nordwestkreuz Frankfurt betrieben. Die Autoren vergleichen die Verkehrsdaten dieses Abschnitts mit Daten des gleichen Zeitraums von der A3 zwischen dem Offenbacher Kreuz und der Anschlussstelle Hanau. Auf diesem Vergleichsabschnitt ist eine in die SBA integrierte TSF in Betrieb. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die statischen Anzeigen schlechter akzeptiert werden als die dynamischen. Vor allem auf dem linken Fahrstreifen nehmen die gefahrenen Geschwindigkeiten stark zu. Die Befolgung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit einschließlich 20 km/h Toleranz sinkt auf dem linken Fahrstreifen von etwa 87 % bei verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf etwa 30 % bei statischen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Des Weiteren schreiben die Autoren, dass ein Steuerungsalgorithmus so gut akzeptiert werden sollte, dass keine weiteren Maßnahmen zur Durchsetzung der Geschwindigkeitsbeschränkungen notwendig sind. Stationäre Einrichtungen zur Geschwindigkeitsüberwachung können eine fehlende Akzeptanz der SBA-Anzeigen nicht ausgleichen. Es ist davon auszugehen, dass die

Verkehrsteilnehmenden mit einer punktuellen Befolgung reagieren würden und damit einer Harmonisierung des Verkehrsflusses entgegengewirkt wird.

Riggins u. a. [2016] analysieren u. a. die Befolgung auf einem 33 km langen Abschnitt der A99 bei München. Die Ergebnisse zeigen, dass die Befolgung geringer für niedrige (bspw. 60 km/h) als für hohe Geschwindigkeitsbeschränkungen (bspw. 120 km/h) ist. Insgesamt ist die Befolgung hoch, was jedoch auch auf die Überwachung der Geschwindigkeitsbeschränkungen mithilfe von festinstallierten Radaren zurückzuführen ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Akzeptanz und Befolgung von SBA-Anzeigen Gegenstand vieler Untersuchungen sind. Ein Ansatz ist die Betrachtung der Einhaltung der Geschwindigkeitsbeschränkungen, i. d. R. einschließlich einer Toleranz, zur Feststellung der Befolgung (siehe Kappich u. a. [2010]; Mangold u. a. [1996]; Zackor [1972]; Zackor und Schwenzer [1988]). Die Übereinstimmung der gefahrenen Geschwindigkeiten mit den Geschwindigkeitsbeschränkungen ist jedoch nicht ausschließlich abhängig von der Akzeptanz, sondern kann auch durch die verkehrliche Situation oder Witterung bedingt sein. Laut Kappich u. a. [2010] liegt dann eine hohe Akzeptanz vor, wenn die Verkehrsteilnehmenden ohne Verkehrsbeeinflussung schneller fahren würden. Dieser Aspekt kann mithilfe von Mit-Ohne-Vergleichen berücksichtigt werden. Eine ausführliche Auseinandersetzung mit diesem Thema liefern Steinhoff u. a. [2002] und Steinhoff [2003], deren Methode eine Gegenüberstellung von beeinflusstem und unbeeinflusstem Fundamentaldiagramm beinhaltet. Ein Problem bei dieser Vorgehensweise ist, dass SBA i. d. R. lediglich bei wenig Verkehr ausgeschaltet sind und somit nur Referenzdaten aus Schwachlastzeiten für ein unbeeinflusstes Fundamentaldiagramm vorliegen. Riegelhuth und Glatz [2015] nutzen daher neben der Untersuchungsstrecke mit SBA einen vergleichbaren Autobahnabschnitt ohne SBA zur Ermittlung der Befolgung. Eine weitere Untersuchungsmethode sind Feldversuche mit SBA-Schaltungen, die unabhängig von der verkehrlichen Situation angezeigt werden. So kann die Reaktion auf die Anzeigen separat von der Reaktion auf die verkehrliche Situation untersucht werden. Balz und Ermer [1998] führen solche Versuche durch. Relevant für die Thematik ist ebenfalls die

Erkenntnis von Lange und Struif [1997], dass bei hohen Verkehrsstärken bereits wenige Verkehrsteilnehmende mit einer hohen Akzeptanz eine große Wirkung haben, da sie ganze Fahrzeugpuls abbremsen.

Die Untersuchungen führen zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen in Bezug auf die Akzeptanz. Allgemein ist die Akzeptanz von statischen Anzeigen schlechter als von dynamischen Anzeigen [Riegelhuth und Glatz, 2015]. Des Weiteren haben Zusatzzeichen eine positive Wirkung auf die Akzeptanz [Balz und Ermer, 1998; Steinhoff u. a., 2002]. Die Akzeptanz von Lkw-Überholverböten wird in der Literatur als hoch eingeschätzt [Drews, 1997; Schick, 2003]. Zusätzlich weisen Lkw eine höhere Akzeptanz der TSF als Pkw auf [Geistefeldt und Glatz, 2010; Recker u. a., 2015].

2.5.2 Verkehrsfluss und Kapazität

Die Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsfluss und auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sind auf die Harmonisierungswirkung zurückzuführen. Ein Ziel von SBA ist die Reduktion von Geschwindigkeitsunterschieden zwischen Fahrzeugen und dadurch eine Verbesserung der Stabilität des Verkehrs.

Die positive Wirkung von Geschwindigkeitsbeschränkungen auf die Leistungsfähigkeit und Kapazität von Streckenabschnitten wurde schon früh in diversen Untersuchungen festgestellt. Verkehrsanalysen von Zackor [1972] zeigen eine Erhöhung der Stabilität des Verkehrsflusses im Zusammenhang mit Geschwindigkeitsbeschränkungen. Er stellt zudem fest, dass bei Beschränkung der Höchstgeschwindigkeit höhere mittlere Geschwindigkeiten bei hohen Verkehrsdichten erreicht werden als ohne Beschränkung. Cremer [1979] beobachtet eine Anpassung des Geschwindigkeitsniveaus und des Abstandsverhaltens in Verbindung mit Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die maximale Verkehrsstärke stellt er bei einer Beschränkung auf 80 km/h fest. Bode und Haller [1983] ermitteln höhere maximale Verkehrsdichten und -stärken bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung

auf 80 km/h. Zackor und Schwenzer [1988] stellen im Zusammenhang mit Geschwindigkeitsbeschränkungen höhere Geschwindigkeitsniveaus bei einem harmonischeren Verkehrsfluss fest. Diese Stabilisierung des Verkehrs führt in den Untersuchungen zu einer Erhöhung der Kapazität.

Untersuchungsgebiet der Arbeit von Mangold u. a. [1996] ist neben den Umfeldbedingungen auch der Einfluss von Geschwindigkeitsbeschränkungen auf die Leistungsfähigkeit von Autobahnen. Die Autor:innen stellen eine Streckung des stabilen Verkehrsflusses im Fundamentaldiagramm bedingt durch Geschwindigkeitsbeschränkungen fest. Diese Erhöhung der Kapazität kann für Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 120 km/h und 100 km/h im Vergleich zu unbeschränkten Verkehrssituationen beobachtet werden. Restriktivere Tempolimits führen in den Untersuchungen zu keinen weiteren positiven Effekten. Mangold u. a. [1996] geben jedoch zu bedenken, dass die maximale Verkehrsstärke in unbeschränkten Verkehrssituationen nicht bekannt ist, weil der Verkehr ab einer gewissen Verkehrsstärke durch die SBA beeinflusst wird.

Die Ergebnisse von Drews [1997] zeigen, dass ein Lkw-Überholverbot eine Erhöhung der Pkw-Geschwindigkeiten bewirkt, während die Lkw geringfügig langsamer werden. Die Ausprägung der Effekte ist abhängig vom Schwerverkehrsanteil und von der Steigung der Strecke. Insgesamt stellt der Autor einen homogeneren Verkehrsfluss aufgrund von Lkw-Überholverboten fest.

Balz und Ermer [1998] registrieren eine deutliche Reduktion der Geschwindigkeitsniveaus und der Streuungen der Geschwindigkeiten durch SBA im Vergleich zum unbeeinflussten Zustand. Eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h mit zusätzlicher Unfallwarnung zeigt die größte Abnahme. Das Geschwindigkeitsniveau sinkt um etwa 10 km/h auf dem rechten Fahrstreifen und etwa 25 km/h auf dem Überholfahrstreifen bei gleichzeitigem Rückgang der Standardabweichung im Vergleich zum unbeeinflussten Zustand. Die Autoren beschreiben dies als Indiz für eine harmonisierende Wirkung der Verkehrsbeeinflussung. Weniger Wirkung zeigt die Anordnung von Warnhinweisen ohne gleichzeitige Schaltung von Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die Anzeige eines Lkw-Überholverbots führt zu

einer signifikanten Abnahme der Standardabweichungen der Geschwindigkeiten und hat damit ebenfalls eine harmonisierende Wirkung.

Pischner u. a. [2003] untersuchen neun Autobahnabschnitte mit SBA im Hinblick auf den Verkehrsablauf. Dem gegenüber stellen sie Referenzdaten von zwei unbeeinflussten Autobahnabschnitten in Bayern. Als Bewertungskriterium wird u. a. die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärkeklasse betrachtet. Die Autoren können anhand der Verkehrsdaten keine deutliche Erhöhung der maximalen Verkehrsstärke feststellen. Lediglich für SBA auf verkehrlich nicht so stark belasteten Autobahnabschnitten können Reserven von 5 % bis 10 % identifiziert werden. Die beeinflussten Abschnitte weisen jedoch deutlich höhere Geschwindigkeiten im mittleren Verkehrsstärkebereich im Gegensatz zu unbeeinflussten Abschnitten auf. Des Weiteren zeigen die beeinflussten Abschnitte eine gleichmäßigere Fahrstreifenaufteilung bei mittleren und hohen Verkehrsstärken. Die Autoren stellen ebenfalls eine positive Harmonisierungswirkung mit einem deutlichen Rückgang der Schwankungen im Verkehrsfluss (Verkehrsstärke und Geschwindigkeiten) fest. Sie beobachten zusätzlich eine signifikante Abnahme der Wahrscheinlichkeit von Zusammenbrüchen des Verkehrs bei mittleren und hohen Verkehrsstärken.

Steinhoff [2003] beschäftigt sich u. a. mit der Qualität des Verkehrsablaufs in Zusammenhang mit präventiven SBA-Schaltungen. Die Autorin stellt eine Harmonisierungswirkung durch die präventiven Geschwindigkeitsbeschränkungen fest. Sie quantifiziert die Wirkung mit einem Rückgang der Standardabweichung der Geschwindigkeiten um ein Drittel. Zusätzlich beobachtet sie eine Zunahme des Geschwindigkeitsniveaus bei hohen Verkehrsstärken um 5 km/h bis 10 km/h bei beeinflusstem Verkehrsfluss. Daraus schließt die Autorin auf eine Verringerung der Stauanfälligkeit und eine Verbesserung der Verkehrsqualität.

Schick [2003] erforscht in seiner Dissertation u. a. die Auswirkungen von SBA auf die Kapazität und die Leistungsfähigkeit von Autobahnen. Hierzu werden Minutendaten von neun Autobahnabschnitten (insgesamt 244 Messquerschnitte) miteinander verglichen, davon vier Abschnitte mit SBA, ein Abschnitt ohne SBA und vier Abschnitte, die teilweise Messquerschnitte in Bereichen mit und

ohne SBA haben. Die Auswertungen bestehen aus Mit-Ohne-Vergleichen. Zur Untersuchung der Kapazität wird die maximale empirische Verkehrsstärke und zur Betrachtung der Leistungsfähigkeit eine Modellierung des Verkehrsflusses mithilfe von q - v -Funktionen herangezogen. Der Autor kann anhand der ausgewerteten Daten weder eine kapazitätssteigernde Wirkung noch eine Zunahme der Leistungsfähigkeit feststellen. Ein Autobahnabschnitt, der zusätzlich zu einer SBA auch mit einer TSF ausgestattet ist, weist hingegen eine deutliche Zunahme der Kapazität und Leistungsfähigkeit auf.

Zudem betrachtet Schick [2003] die Homogenität und Stabilität des Verkehrsflusses. Bei der Analyse der Homogenität des Verkehrs beobachtet der Autor eine erfolgreiche Harmonisierungswirkung der Geschwindigkeiten. Autobahnabschnitte mit SBA zeigen eine gleichmäßigere Fahrstreifenaufteilung. Auf Autobahnabschnitten ohne SBA kommt es hingegen zu Überlastungen des linken Fahrstreifens bei gleichzeitiger Unterauslastung des mittleren und rechten Fahrstreifens, wodurch der Verkehr bei hohen Belastungen anfälliger für Störungen ist. Zur Untersuchung der Stabilisierungswirkung hat der Autor eine Methode entwickelt, die die Phasenübergänge von stabilem zu instabilem Verkehr in Abhängigkeit der Verkehrsstärke betrachtet. Die Anwendung der Methode ergibt eine deutlich geringere Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenbruch auf Autobahnabschnitten mit SBA. Der Autor schlussfolgert, dass SBA den Verkehrsfluss stabilisieren und den Verkehr im Bereich der Kapazitätsgrenze länger aufrecht halten.

Geistefeldt und Glatz [2010] untersuchen den Verkehrsablauf auf Autobahnen, die mit einer TSF ausgestattet sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale Verkehrsstärke durch die TSF um etwa 1.000 Kfz/h erhöht wird. Die Kapazität von Autobahnen mit TSF wird mithilfe von stochastischen Kapazitätsuntersuchungen nach Brilon u. a. [2007a] analysiert. Die Verteilungsfunktionen der Kapazität ergeben etwa 20 % bis 25 % höhere Werte als für vergleichbare Messquerschnitte von dreistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne TSF.

Geistefeldt [2011] wertet die Kapazität auf Autobahnabschnitten mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsregelungen zum einen mithilfe von q - v -Beziehungen und

zum anderen durch Anwendung von Methoden der stochastischen Kapazitätsanalyse aus. Der Autor verweist dabei auf Forschungsergebnisse von Brilon und Geistefeldt [2010] (siehe auch Geistefeldt [2009]), die auf der Untersuchung von insgesamt 50 Autobahnabschnitten basieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die klassische Betrachtung der Kapazität im Fundamentaldiagramm ähnliche Ergebnisse für Abschnitte mit vergleichbaren geometrischen und verkehrlichen Bedingungen liefert. Dabei sind die durchschnittlichen Kapazitäten auf Abschnitten mit dynamischen und statischen Geschwindigkeitsbeschränkungen geringfügig höher als auf Abschnitten ohne Geschwindigkeitsbeschränkung. Die stochastische Kapazitätsanalyse zeigt, dass der primäre Effekt von dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen nicht eine Erhöhung der Kapazität, sondern eine signifikante Reduktion der Varianz der Kapazitätsverteilungsfunktion ist. Eine hohe Varianz erhöht das Risiko des Verkehrszusammenbruchs bei Verkehrsstärken unterhalb der durchschnittlichen Kapazität. Bei mittleren Verkehrsstärken reduzieren SBA daher das Risiko von Verkehrszusammenbrüchen.

Riegelhuth und Glatz [2015] analysieren die Kapazität auf der A5 im Bereich Frankfurt. Sie stellen eine deutliche Erhöhung der Streckenkapazität durch den Betrieb der SBA fest. Sie definieren die Streckenkapazität als größte Verkehrsstärke in 60 aufeinanderfolgenden Minutenintervallen bei vorhandenem Rückstau. Nach Inbetriebnahme wird eine Kapazitätssteigerung von 13 % erreicht. Eine kontinuierliche Optimierung des Steuerungsalgorithmus führt zu einer Kapazitätserhöhung um weitere 8 %. Nach Einführung einer TSF ist die Strecke nicht mehr ausgelastet, gleichzeitig kann eine Steigung der höchsten Verkehrsstärke um 5 % festgestellt werden. Neben der Harmonisierungswirkung stellen die Autoren eine gleichmäßigere Fahrstreifenaufteilung auf SBA-Abschnitten fest, was eine positive Auswirkung auf die Kapazität der Abschnitte hat.

Weitere wissenschaftliche Arbeiten befassen sich vorrangig mit Methoden zur Bewertung des Nutzens von SBA. Bertini u. a. [2006] stellen bspw. eine Vorgehensweise zur Erkennung und Analyse von wiederkehrenden Engpässen auf Autobahnen mit SBA vor. Die Autoren vergleichen Geschwindigkeitsbeschränkungen mit den tatsächlichen verkehrlichen Bedingungen und untersuchen, wie sich SBA auf das Fahrverhalten und die Engpassbildung auswirken. Ackaah und

Bogenberger [2016] stellen Methoden vor, um verschiedene Merkmale von SBA unabhängig voneinander zu bewerten (siehe auch Ackaah u. a. [2015, 2016]). Der Fokus liegt dabei auf der Störfallerkennung, der Warnung und der Harmonisierung des Verkehrsflusses. Die Erkennung von Störungen wird mithilfe des Verhältnisses zwischen der räumlich-zeitlichen Ausbreitung des tatsächlichen Staus und den Stauinformationen der SBA bewertet. Die Warnschaltungen werden durch die Betrachtung der stromabwärts der Warnung herrschenden Verkehrssituation untersucht. Die Harmonisierungswirkung wird bewertet, indem die Verringerung der Geschwindigkeitsunterschiede und die schrittweise Reduktion der Geschwindigkeitsbeschränkungen vor Engpässen betrachtet wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich viele Untersuchungen mit den Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsablauf beschäftigen. Die Harmonisierungswirkung von dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen ist dabei unstrittig (siehe Balz und Ermer [1998]; Cremer [1979]; Pischner u. a. [2003]; Schick [2003]; Steinhoff [2003]; Zackor und Schwenzer [1988]). Auch die Zunahme der Stabilität des Verkehrsflusses mit einer Erhöhung des Geschwindigkeitsniveaus bei hohen Verkehrsstärken (siehe Mangold u. a. [1996]; Pischner u. a. [2003]; Schick [2003]; Zackor [1972]; Zackor und Schwenzer [1988]) und eine gleichmäßigere Fahrstreifenaufteilung (siehe Pischner u. a. [2003]; Riegelhuth und Glatz [2015]; Schick [2003]) sind Ergebnisse von einigen Analysen. Die Frage der Auswirkungen von SBA auf die Kapazität von Autobahnen ist hingegen nicht klar zu beantworten. Während einige Untersuchungen zu dem Schluss kommen, dass SBA die Kapazität erhöhen (siehe Bode und Haller [1983]; Riegelhuth und Glatz [2015]; Zackor und Schwenzer [1988]), kommen andere zu dem Ergebnis, dass keine Kapazitätserhöhung erzielt werden kann (siehe Pischner u. a. [2003]; Schick [2003]). Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass SBA den Verkehrsfluss verbessern und dadurch die Stauanfälligkeit und Zusammenbruchwahrscheinlichkeit abnimmt (siehe Geistefeldt [2011]; Pischner u. a. [2003]; Schick [2003]).

Wie auch bei den Untersuchungen zur Akzeptanz ist die Datengrundlage für Verkehrsflussanalysen schwierig. SBA zeigen i. d. R. nur in Schwachlastzeiten

keine Geschwindigkeitsbeschränkungen an, wodurch die Erstellung von unbeeinflussten Fundamentaldiagrammen als Referenz nicht möglich ist. Der Vergleich von unterschiedlichen Schaltzuständen birgt das Problem, dass den von der SBA ermittelten Schaltzuständen unterschiedliche Verkehrszustände zugrunde liegen. Da hochbelastete Autobahnabschnitte in Deutschland i. d. R. bereits mit SBA ausgestattet sind, sind Vorher-Nachher-Untersuchungen für die Analyse der heutigen Wirkung ungeeignet. Denkbar wären in diesem Zusammenhang Feldversuche, in denen verschiedene Schaltbilder unabhängig von der verkehrlichen Situation geschaltet werden. Solchen Versuchen stehen allerdings Sicherheitsbedenken und das Risiko des Akzeptanzverlusts durch die Verkehrsteilnehmenden entgegen.

2.5.3 Verkehrssicherheit

Das Unfallgeschehen auf Autobahnen wird durch drei Konfliktsituationen dominiert. *Fahrerunfälle* sind bedingt durch den Kontrollverlust über das eigene Fahrzeug. *Auffahrerunfälle* ereignen sich i. d. R. am Stauende oder an Ein- bzw. Ausfahrten, wenn hohe Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrzeugen vorliegen. *Fahrstreifenwechselunfälle* passieren i. d. R. während Überholvorgängen oder auf Verflechtungsstrecken.

Die Erhöhung der Verkehrssicherheit im Bereich von SBA ist zum einen auf die Warnung vor Gefahren (bspw. Stau, Unfall, Pannenfahrzeug, ungünstige Witterungsbedingungen, ...) und zum anderen auf die Harmonisierung des Verkehrsflusses und die dadurch reduzierte Wahrscheinlichkeit der Stautentstehung zurückzuführen [Riegelhuth und Glatz, 2015]. Verkehrssicherheitsuntersuchungen sind die in der Literatur am häufigsten betrachteten Auswirkungen von SBA. Zahlreiche Untersuchungen bestätigen den positiven Einfluss der Streckenbeeinflussung auf die Verkehrssicherheit.

Durth u. a. [1994] beschäftigen sich mit dem Unfallgeschehen auf der A5 zwischen dem Westkreuz Frankfurt und dem Bad Homburger Kreuz. Die Vorher-Nachher-Untersuchung zeigt eine Abnahme der Unfallrate um etwa 20 %. Dabei ist ein überproportionaler Rückgang schwerer Unfälle zu verzeichnen. Zudem stellen die

Autoren eine gute Wirkung der Stauwarnung fest; Unfälle an Stauenden haben nach Inbetriebnahme der SBA überdurchschnittlich stark abgenommen.

Mangold u. a. [1996] stellen im Vorher-Nachher-Vergleich eine positive Entwicklung des Unfallgeschehens durch SBA fest. Auch im Vergleich zum Gesamtautobahnnetz ist die Bilanz positiv. Vor allem der Rückgang der Unfallschwere wird als positiv gewertet. Zudem zeigen die Unfallanalysen, dass die Wirksamkeit bei hohen Verkehrsstärken höher ist als bei geringen. Die Mehrzahl der Unfälle stehen dabei im zeitlichen Zusammenhang mit schlechten Witterungsbedingungen.

Siegener u. a. [2000] analysieren die Wirkung von SBA auf die Verkehrssicherheit bei verschiedenen Verkehrsbelastungen. Es werden Unfälle mit Personenschaden in Vorher-Nachher-Zeiträumen von jeweils mindestens zwei Jahren auf zehn Autobahnabschnitten mit SBA untersucht. Dabei wird für jeden Unfall die vorhandene Verkehrsstärke aus Dauerzählstellen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass für hohe Verkehrsstärken eine signifikante Reduktion der Unfallrate durch die Einführung einer SBA möglich ist, wenn der Autobahnabschnitt nicht bereits ohne SBA eine niedrige Unfallrate aufweist. Bei geringen und mittleren Verkehrsstärken sind keine signifikanten Änderungen feststellbar. Für alle Verkehrsstärken ist zudem eine Reduktion der Unfallrate um über 80 % bei Nebel zu verzeichnen. Die Unfallrate von Massenanfällen (Beteiligung von sechs oder mehr Fahrzeugen) kann ebenfalls durch SBA um 54 % reduziert werden.

Steinhoff [2003] thematisiert u. a. *Indikatoren für die Verkehrssicherheit*. Anhand von Einzelfahrzeugdaten betrachtet sie die Standardabweichung der Geschwindigkeiten, die Anteile kleiner Zeitlücken, die Einhaltung des relativen Sicherheitsabstandes und die Anteile der Auffahrzeiten mit einer Kollisionszeit unter 10 Sekunden. Die Autorin beobachtet eine Reduktion des Anteils kleiner Zeitlücken (< 1 s) um 5 % bis 20 % und gefährlich kleiner Zeitlücken ($< 0,5$ s) um 2 %.

Geistefeldt und Glatz [2010] befassen sich mit dem Unfallgeschehen auf einem Autobahnabschnitt der A3 mit TSF. Die Autoren geben unter Verweis auf Lemke [2007] an, dass TSF nur in Einzelfällen zu einer geringfügigen Zunahme der Unfallraten führen können und sich i. d. R. nicht negativ auswirken. Die Unfallraten auf dem Abschnitt sind mit Einführung der TSF in etwa konstant geblieben.

Geistefeldt und Glatz [2010] geben zudem an, dass ein hohes Sicherheitsniveau erreicht wird, wenn eine TSF in eine SBA integriert wird und somit Gefahrenstellen effektiv abgesichert werden können. Außerhalb der Spitzenstunden kann der Seitenstreifen wie gewohnt als Sicherheitsraum genutzt werden.

Riegelhuth und Glatz [2015] untersuchen die Verkehrssicherheit auf der A5 zwischen der Anschlussstelle Friedberg und dem Westkreuz Frankfurt. Bei einer Vorher-Nachher-Untersuchung der Unfallraten verzeichnen sie einen Rückgang der Unfälle mit Personenschaden um 29 %. Zudem stellen sie eine Reduktion der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen 13 % und 30 % fest. Für eine Erweiterung der betrachteten SBA in Richtung Norden ergeben Vorher-Nachher-Untersuchungen sogar einen Rückgang der Geschwindigkeitsunterschiede von 35 % bis 45 %. Ungeachtet einer Verkehrszunahme von 10 % ist der Anteil kritischer Zeitlücken auf dem Abschnitt nicht gestiegen.

Riegelhuth und Sandrock [2018] evaluieren Verkehrsmanagementmaßnahmen u. a. in Hessen. Sie merken an, dass die Nutzenbeiträge der hessischen SBA im Wesentlichen auf die Reduktion der Unfälle mit Personenschaden und schwerem Sachschaden zurückzuführen ist. Diesen Rückgang quantifizieren die Autoren mit bis zu 30 %.

Untersuchungsgegenstand der Arbeit von Waleczek und Geistefeldt [2020] ist die Wirkung von TSF auf die Verkehrssicherheit. Dazu analysieren sie Unfalldaten von sieben hessischen Untersuchungsstrecken mit TSF inkl. Vorlaufstrecken über lange Zeiträume von bis zu 13 Jahren. Die Untersuchungen zeigen, dass keine Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit durch TSF in den Spitzenstunden vorliegt. Alle Untersuchungsstrecken zeigen ein hohes Sicherheitsniveau auf; die Unfallraten und Unfallkostenraten sind unter dem Durchschnitt der Bundesautobahnen. Zudem kann eine positive Beeinflussung des Unfallgeschehens auf der Vorlaufstrecke nachgewiesen werden. Auf den Abschnitten der TSF selbst kommt es zu keiner wesentlichen Veränderung der Unfallhäufigkeit. Es bleibt zu erwähnen, dass die Untersuchungsstrecken über eine SBA verfügen. Es ist davon auszugehen, dass SBA einen positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen haben.

2.5.4 Umweltwirkung

Ein weiterer Nutzen von SBA liegt in der Reduktion der Verkehrsemissionen. Thudium [2006] weist eine Abhängigkeit der Luftemissionen von der gefahrenen Geschwindigkeit nach. Die starke Abhängigkeit zwischen den Emissionsfaktoren und den Geschwindigkeiten deutet darauf hin, dass positive Umweltwirkungen durch verkehrssteuernde Maßnahmen erzielbar sind. Im Umkehrschluss erzeugen aber auch Maßnahmen mit dem Ziel eines verbesserten Verkehrsflusses, wie bspw. SBA, eine Reduktion der Umweltemissionen und des Kraftstoffverbrauchs, da sie den Verkehrsfluss harmonisieren und dadurch hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen reduzieren.

Riegelhuth und Glatz [2015] befassen sich mit der Umweltwirkung der SBA auf der A5 im Raum Frankfurt. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die verkehrsbedingten PM₁₀- und NO_x-Emissionen um knapp 10 % gegenüber den Werten ohne SBA gesunken sind. Die Autoren führen dies auf die hohe Akzeptanz der dynamischen Anzeigen und die dadurch bedingte Harmonisierung des Verkehrsflusses und entspanntere Fahrweise der Verkehrsteilnehmenden zurück.

In Deutschland sind bislang keine verkehrssteuernden Maßnahmen auf Autobahnen im Einsatz, die hauptsächlich durch eine Verbesserung der Umweltwirkung motiviert sind. Es existieren jedoch Beispiele aus Österreich.

Im Großraum Graz nahm die österreichische ASFINAG 2008 die *Verkehrsbeeinflussungsanlage Umwelt Steiermark* in Betrieb, die in Abhängigkeit der Feinstaubwerte auf 92 Autobahnkilometern Geschwindigkeitsbeschränkungen anzeigt. In Österreich informiert der Zusatztext IG-L (Immissionsschutzgesetz - Luft) darüber, dass eine Geschwindigkeitsbeschränkung aufgrund von hohen Schadstoffemissionen angeordnet ist. Die Schaltzustände der Anlage basieren zum einen auf der gemessenen Luftqualität, zum anderen auf den erfassten Verkehrsdaten, die mit Windmodellen kombiniert werden. Diese Daten dienen als Eingabe in einen speziell entwickelten Umwelt-Steuerungsalgorithmus, der bei schlechter Luftqualität die höchstzulässige Geschwindigkeit auf 100 km/h reduziert. Die Daten werden halbstündlich aktualisiert. [Diegmann u. a., 2020; Höferl, 2008]

Eine Analyse der Anlage für das Jahr 2021 zeigt eine Reduktion der NO_x -Emissionen um 9,0 % und der Feinstaub-Emissionen um 6,9 % im Vergleich zu einer statischen Geschwindigkeitsbeschränkung. Des Weiteren konnte der Kraftstoffverbrauch der Pkw um 4,4 % gesenkt werden. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass vor allem im Winter umweltbedingte Geschwindigkeitsbeschränkungen aufgrund von erhöhten Luftschadstoffbelastungen geschaltet werden. [Kurz und Reifeltshammer, 2022]

Im österreichischen Bundesland Tirol wurde 2007 im Raum Innsbruck (A12 und A13) eine verkehrs- und immissionsabhängige Geschwindigkeitsbeeinflussungsanlage in Betrieb genommen, die vorwiegend bei erhöhter Luftschadstoffbelastung Geschwindigkeitsbeschränkungen angezeigt hat. Bei hoher Belastung wurde die höchstzulässige Geschwindigkeit auf 100 km/h beschränkt. Geschwindigkeitskontrollen wurden eingesetzt, um die Einhaltung der Geschwindigkeitsbeschränkungen zu gewährleisten und so das Potenzial zur Emissionsreduktion auszuschöpfen. [Nagl u. a., 2007; Thudium, 2006]

Im Jahr 2014 wurde die immissionsabhängige dynamische Geschwindigkeitsbeschränkung auf der A12 und A13 durch eine statische Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h ersetzt. Grund dafür war, dass die Grenzwerte für die Luftbelastungen mit dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen nicht eingehalten werden konnten. [Tiroler Landesregierung, 2014]

Auf der Stadtautobahn A1 bei Salzburg wurden 2015 im Rahmen des österreichischen Luftreinhalteprogramms dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen auf einem etwa 10 km langen Abschnitt eingeführt. Je nach lufthygienischer Situation wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit von regulär 100 km/h auf 80 km/h reduziert. Im Betriebszeitraum zwischen Mai 2016 und April 2017 war die Geschwindigkeit durchschnittlich 47 % der Zeit auf 80 km/h beschränkt. Dabei konnten 75 % des Effekts einer statischen Beschränkung erreicht und die NO_x - und NO_2 -Immissionen um etwa 5 % gesenkt werden. [Kranabetter, 2017]

Riegelhuth und Glatz [2015] stellen die Schadstoffreduktionen der A5 in Frankfurt und der A12 in Tirol [Thudium, 2006; Thudium und Chélala, 2012] gegenüber. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Reduktion der verkehrsbedingten

Umweltbelastungen in beiden Fällen auf einem ähnlichen Niveau liegen. Wohingegen in Tirol intensive Geschwindigkeitsüberwachungen Teil der umweltbasierten Verkehrssteuerung sind, wird auf der A5 auf die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmenden gesetzt. Auf der A5 liegt zudem eine höhere Fahrstreifenbelastung und eine deutlich geringere Schaltdauer von Geschwindigkeitsbeschränkungen vor. Die Autoren schlussfolgern, dass ein verkehrlich optimierter SBA-Betrieb bei guter Akzeptanz die gleichen positiven Umweltwirkungen erzielen kann wie eine umweltbasierte SBA-Steuerung.

2.6 Internationale Literatur im Kontext von SBA

SBA und vergleichbare Verkehrsbeeinflussungssysteme sind ebenfalls in anderen Ländern im Einsatz. Grundsätzlich haben die eingesetzten Systeme ähnliche Steuerungsziele, Systemaufbauten und Steuerungsmodelle wie in Deutschland. Tabelle 2.4 zeigt eine Auswahl an internationalen Verkehrsbeeinflussungssystemen und Veröffentlichungen, die von den Erfahrungen zu den eingesetzten Systemen berichten. Ausgewählte Quellen, die einen guten Einblick in internationale Erkenntnisse zu SBA bieten, werden im Folgenden vorgestellt.

Tabelle 2.4: Internationale Verkehrsbeeinflussungssysteme

Land	Bezeichnung	Literaturverweise
Australien	Variable Speed Limits (VSL)	Lennie und Han [2009]
Belgien	Dynamic Speed Limit (DSL) System	De Pauw u. a. [2018]
Großbritannien	Variable Mandatory Speed Limits (VMSL)	Harbord u. a. [2006], Maunsell und Parkman [2007]

Land	Bezeichnung	Literaturverweise
Finnland	Variable Speed Limit System	Schirokoff u. a. [2006]
Frankreich	Panneaux à messages variables (PMV)	Rivey [2010]
Niederlande	Motorway Control System (MCS)	Schelling u. a. [2011], Hoogendoorn u. a. [2013]
Österreich	Streckenbeeinflussungs- anlage (SBA)	Riegelhuth und Sandrock [2018]
Schweden	Motorway Control System (MCS)	Nissan und Koutsopoulos [2011], Nissan [2013], Strömgren und Lind [2016]
Schweiz	Geschwindigkeits- harmonisierung und Gefahrenwarnung (GHGW)	ASTRA [2015], ASTRA [2018], Riegelhuth und Sandrock [2018]
Spanien	Dynamic Speed Limit (DSL) Management	Garcia-Castro und Monzon [2013] Soriguera u. a. [2013] Soriguera u. a. [2017]
USA	Variable Speed Limit (VSL) System	Chang u. a. [2011], DeGaspari u. a. [2013], Lu und Shladover [2014], Kianfar u. a. [2015], Pu u. a. [2021]

Lu und Shladover [2014] fassen Ergebnisse aus früheren Studien zu dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen zusammen und berücksichtigen dabei sowohl europäische als auch amerikanische Untersuchungen. Die Autor:innen schlussfolgern, dass in Europa und Amerika eine positive Wirkung auf die Verkehrssicherheit nachgewiesen werden kann. Die Bewertung des Verkehrsflusses schneidet in Europa positiv ab, während die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss in amerikanischen Studien umstritten sind. Insgesamt geben Lu und Shladover [2014] einen guten Einblick in die Thematik. Grumert u. a. [2018] befassen sich mit vier bestehenden Steuerungsalgorithmen im internationalen Kontext mit dem Ziel herauszufinden, welche Eigenschaften von Steuerungsalgorithmen Auswirkungen auf die Qualität der Verkehrsbeeinflussung haben. Die Autor:innen liefern im Zuge dessen einen sehr umfangreichen und informativen Einblick in internationale SBA und viele weiterführende Quellen zu dem Thema. Riegelhuth und Sandrock [2018] stellen mithilfe eines vergleichenden Überblicks den aktuellen Stand der Entwicklung von Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen vor. Die Autoren konzentrieren sich dabei auf die Verkehrsbeeinflussung in Österreich, der Schweiz und Deutschland.

Im deutschen und internationalen Kontext sind zudem einige Forschungsansätze zu den Steuerungsmodellen von SBA zu finden (siehe bspw. Zusammenstellung von Khondaker und Kattan [2015] oder Vrbanić u. a. [2021]). So beschäftigen sich einige Autor:innen mit modellbasierten Steuerungsverfahren für SBA (siehe bspw. Breton u. a. [2002] und Hegyi u. a. [2005]). Ein weiterer Ansatz ist die analytische Ermittlung von Schaltzuständen auf Basis der Kontinuumstheorie. Ein Beispiel ist der Algorithmus *SPECIALIST* (speed controlling algorithm using shock-wave theory) zur Auflösung von Stauwellen mithilfe von dynamischer Geschwindigkeitsbeeinflussung von Hegyi u. a. [2008] (siehe auch Hegyi und Hoogendoorn [2010]). Die Verkehrsbeeinflussung kann ebenfalls im Sinne eines klassischen Regelkreises betrachtet werden (siehe bspw. Carlson u. a. [2011], Müller u. a. [2016], Dörschel und Abel [2020] und Schwietering u. a. [2021]). Ein vierter Ansatz sind Reinforcement-Learning-Methoden für die Steuerung von SBA (siehe bspw. Überblick zum Stand der Technik von Kušić u. a. [2020]).

Verkehrsflussbetrachtungen werden im internationalen Kontext bspw. von Papageorgiou u. a. [2008] durchgeführt. Die Autoren untersuchen die Auswirkungen von SBA auf den Verkehrsfluss vorrangig, indem sie die Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Belegung einer europäischen Autobahn mit SBA analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen bei geringer Belegung zu einer Verringerung des Durchflusses, hingegen bei hoher Belegung zu einer Erhöhung des Durchflusses führen. Insgesamt kann der kritische Belegungsgrad durch SBA erhöht werden. Die größte Wirkung auf den Verkehrsfluss hat laut den Autoren die Beschränkung auf 50 mph (etwa 80 km/h), während sich durch die Beschränkung auf 60 mph (etwa 97 km/h) beinahe keine Unterschiede zum unbeeinflussten Zustand feststellen lassen. Soriguera u. a. [2013] betrachten den Verkehrsfluss auf einer Autobahnstrecke mit SBA nahe Barcelona. Die Autoren können keine Reduktion und Harmonisierung des Verkehrsflusses feststellen. Des Weiteren ist kein empirischer Effekt im überlasteten Zustand zu erkennen. Als mögliche Gründe führen die Autor:innen Rahmenbedingungen wie Engpässe, Verflechtungsstrecken, Ein- und Ausfahrten, Fahrstreifenreduktionen und Akzeptanzprobleme auf. Soriguera u. a. [2017] untersuchen auf dem gleichen Abschnitt die Auswirkungen von niedrigen Geschwindigkeitsbeschränkungen (40, 60 und 80 km/h). Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Maximalgeschwindigkeit zu einer höheren Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Fahrstreifen bei mittleren Verkehrsstärken führt. Zudem können sich die Verkehrsteilnehmenden bei niedrigen Geschwindigkeiten mit geringen Zeitlücken fortbewegen und dabei einen hohen und stabilen Verkehrsfluss erzielen.

Guerrieri und Mauro [2016] befassen sich mit den Auswirkungen einer TSF auf die Kapazität und Verkehrssicherheit auf einem insgesamt 128 km langen Abschnitt der italienischen Brennerautobahn. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Kapazitätserhöhung von bis zu 35 % bei Öffnung des Seitenstreifens. Gleichzeitig sind keine wesentlichen Änderungen der allgemeinen Sicherheitsbedingungen festzustellen. Strömgren und Lind [2016] untersuchen den Umbau eines zweistreifigen Autobahnabschnitts mit Seitenstreifen nahe Stockholm zu einem dreistreifigen Abschnitt ohne Seitenstreifen, aber mit SBA und Nothaltebuchten. Sie stellen fest, dass sich die Zahl der Unfälle durch die Maßnahmen halbiert hat. De Pauw u. a.

[2018] führen Verkehrssicherheitsbetrachtungen anhand von Unfalldaten aus Belgien durch. Die Autor:innen identifizieren einen signifikanten Unfall-Rückgang von 18 %. Insbesondere Auffahrunfälle kommen nach Inbetriebnahme der Anlage um 20 % seltener vor. Die Unfälle mit nur einem beteiligten Fahrzeug verzeichnen einen Rückgang von 15 %. Pu u. a. [2021] bewerten die Auswirkungen der SBA auf dem Interstate Highway 5 in Seattle (USA) auf die Verkehrssicherheit. Eine Vorher-Nachher-Analyse auf Grundlage von etwa 10.000 Unfällen zeigt, dass die Anzahl der Unfälle nach der Einführung um etwa 32 % reduziert werden konnte. Die Autor:innen stellen ebenfalls eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten durch die variablen Geschwindigkeitsbeschränkungen fest.

3 Stand der Technik zur mikroskopischen Verkehrsflussmodellierung

3.1 Einführung

Verkehrsmodelle bilden die Fortbewegung von Verkehrsobjekten in einem Verkehrsnetz ab. Sie kommen zur Untersuchung der verkehrlichen Wirkung von Maßnahmen zum Einsatz. Die Modellierung des Verkehrsflusses kann dabei je nach Abbildungsgenauigkeit in die makroskopische, mikroskopische und mesoskopische Ebene unterteilt werden. Makroskopische Modelle bilden die Bewegung von Verkehrsströmen in ihrer Gesamtheit durch ein Netz ab. Die Beschreibung des Verkehrsablaufs erfolgt in Form von aggregierten verkehrlichen Kenngrößen. Die Zusammenhänge zwischen der aggregierten Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte werden üblicherweise im Fundamentaldiagramm betrachtet [FGSV, 2006]. Makroskopische Modelle kommen zur Abbildung großer Verkehrsnetze in der Verkehrsplanung zum Einsatz. In mikroskopischen Verkehrsflussmodellen setzt sich der Verkehrsstrom aus einzelnen Fahrzeugen zusammen. Die Modelle bilden die Bewegung und das Fahrverhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmenden und deren Interaktion untereinander ab und eignen sich aufgrund dessen für detaillierte Fragestellungen in der Verkehrstechnik. Mesoskopische Modelle sind zwischen den makroskopischen und mikroskopischen Modellen einzuordnen. Einzelne Fahrzeuge werden durch das Netz bewegt, jedoch ohne Berücksichtigung der Fahrzeuginteraktion [FGSV, 2006]. Die Fahrzeugdaten werden nicht in jedem Zeitschritt aktualisiert, sondern nur wenn Inhomogenitäten im

Fahrtverlauf erfolgen, bspw. an Knotenpunkten oder bei Fahrstreifenreduktionen. Die Rechenzeit ist für mesoskopische Simulationen geringer als für mikroskopische. Daher werden mesoskopische Simulationen für die Modellierung von großen Netzen eingesetzt, wenn der Detailgrad mikroskopischer Simulationen nicht notwendig ist.

Die mikroskopische Simulation des Verkehrsflusses ist ein bewährtes Werkzeug zur Ermittlung der Wirkungen von Maßnahmen auf den Verkehrsablauf. Der überwiegende Anwendungsfall ist die verkehrstechnische Analyse und Bewertung der Leistungsfähigkeit von Straßenverkehrsanlagen. Die verkehrstechnische Bemessung von Straßenverkehrsanlagen erfolgt i. d. R. nach den analytischen Bemessungsverfahren des HBS (siehe auch Kapitel 2.2). In Fällen, in denen die Einsatzgrenzen der analytischen Bemessungsverfahren nicht eingehalten sind, benennt das HBS die Verkehrsflusssimulation als alternatives Verfahren zur Bestimmung der Verkehrsqualität [HBS, 2015]. Dabei bilden die *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation* [FGSV, 2006] die Grundlage für die Durchführung von mikroskopischen Simulationsstudien. Neben Leistungsfähigkeitsuntersuchungen sind Untersuchungen von Verkehrsmanagementmaßnahmen, automatisiertem und autonomem Fahren und Verkehrssicherheitsaspekten weitere Beispiele für den Einsatz von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen.

Ziel dieser Dissertation ist der Aufbau eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells einer deutschen Autobahn inkl. der Steuerungsmaßnahmen durch eine SBA. Dabei ist sowohl die Modellierung und Kalibrierung des Autobahnverkehrs als auch die Abbildung der Befolgung der dynamischen Anzeigen durch die Verkehrsteilnehmenden für die Aussagekraft der Simulation von großer Bedeutung.

In Deutschland werden vorrangig die Simulationswerkzeuge *BABSIM*, *Paramics*, *SUMO*, *Aimsun Next* und *PTV Vissim* für mikroskopische Verkehrsflusssimulationen eingesetzt. Für diese fünf Simulationswerkzeuge haben bspw. Geistefeldt u. a. [2017] Autobahnabschnitte modelliert und kalibriert. Die Software *BABSIM* [Brilon u. a., 2005, 2007b] wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für die mikroskopische Abbildung von Autobahnverkehr entwickelt und wird seither Auftragnehmenden und Behörden zur Verfügung gestellt. *Paramics*

wurde in den frühen 1990er Jahre an der University of Edinburgh entwickelt und Mitte der 1990er Jahre durch die Ausgründung der Firma *Quadstone Ltd* kommerzialisiert. Das Simulationswerkzeug SUMO [Lopez u. a., 2018] ist eine Open-Source-Software, die unter der Federführung des Instituts für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt wird. Die Software Aimsun Next [Casas u. a., 2010] entstand an der Polytechnischen Katalanischen Universität in Barcelona und wurde Ende der 1990er Jahre durch Ausgründung der Firma TSS (Transport Simulation Systems) kommerzialisiert. Die Software PTV Vissim [Fellendorf und Vortisch, 2010] hat ihren Ursprung in den 1970er Jahren am Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe und ist seit 1993 als kommerzielles Simulationswerkzeug auf dem Markt. Aimsun Next und PTV Vissim sind weltweit die am häufigsten eingesetzten kommerziellen Werkzeuge im Bereich der Verkehrsflusssimulation.

In dieser Dissertation wird die Software PTV Vissim (im Folgenden *Vissim* genannt) in der Version 2023 als Simulationswerkzeug verwendet. Vissim simuliert den Verkehrsfluss auf Basis des psycho-physischen Fahrzeugfolgmodells von Wiedemann, das allen Verkehrsteilnehmenden bzw. allen Fahrzeugen individuelle Eigenschaften beim Folgevorgang aus vorgegebenen Verteilungen zuordnet [Wiedemann, 1974]. Das Querverhalten der Fahrzeuge wird von einem regelbasierten Fahrstreifenwechselmodell abgebildet, das an die Arbeit von Sparmann [Sparmann, 1978] anknüpft. Die Eignung von Vissim zur Abbildung von deutschem Autobahnverkehr wurde u. a. im Forschungsprojekt *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen* nachgewiesen [Geistefeldt u. a., 2017, 2014; Leyn und Vortisch, 2015].

Die folgenden Unterkapitel beschäftigen sich im Detail mit einzelnen Aspekten der Autobahnsimulation mit dem Schwerpunkt auf Vissim. Zusätzliche Quellen, die weiterführende Einblicke geben, sind:

- Fellendorf und Vortisch [2010] für die Historie, Systemarchitektur, Fahrverhaltensmodelle und Modellierung in Vissim

- Hoffmann [2013] für Verkehrssicherheitsanalysen und Wirkungsuntersuchungen von intelligenten Verkehrs- und Fahrerassistenzsystemen mithilfe von Verkehrsflusssimulationen in Vissim
- Geistefeldt u. a. [2017, 2014]; Leyn und Vortisch [2015] für die HBS-konforme Modellierung von deutschem Autobahnverkehr in Vissim

3.2 Anforderungen an die Modellierung von Autobahnverkehr

Die Anforderungen an ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell sind abhängig vom Anwendungsfall. Für das in der Einleitung (siehe Kapitel 1) verwendete Beispiel einer innerstädtischen Verkehrsanlage hat bspw. die realitätsnahe Abbildung der Zeitbedarfswerte an Knotenpunkten einen großen Einfluss auf den Verkehrsfluss. In diesem Anwendungsfall stellt die Abbildung der Verkehrsbeeinflussung durch Lichtsignalanlagen keine große Schwierigkeit dar, da sie nach eindeutigen Regeln erfolgt, die nahezu vollständig von den Verkehrsteilnehmenden befolgt werden. Auf Autobahnen ist der Aktionsspielraum bei verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen größer. Dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen dürfen unterschritten werden und gleichzeitig streut die Befolgung stark. Neben der Modellierung des Autobahnverkehrs spielt daher die Abbildung und Kalibrierung der Befolgung eine wichtige Rolle.

Zunächst gilt es die in Kapitel 2.2 beschriebenen Eigenschaften von deutschem Autobahnverkehr in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation abzubilden. Vorrangig ist das Fahrverhalten im Längs- und Querverkehr zu betrachten. Sowohl das Folgeverhalten als auch das Fahrstreifenwechselverhalten und die resultierende Interaktion zwischen den Verkehrsteilnehmenden sind essenziell für die Modellierung von Autobahnverkehr. Ein weiterer Aspekt ist das Geschwindigkeitsverhalten, das auf Autobahnen stark streuen kann und von der Verkehrssituation (vor allem von der Verkehrsdichte) abhängt. Des Weiteren ist die Unterscheidung

von verschiedenen Fahrzeugklassen mit unterschiedlichem Fahr- und Geschwindigkeitsverhalten und Fahrdynamiken wichtig. Es müssen mindestens Pkw und Lkw separat abgebildet werden. Bedingt durch das Rechtsfahrgebot ergibt sich ein Verkehrsfluss, der ein Geschwindigkeitsgefälle von links nach rechts aufweist. Weiterhin erfolgt mit steigendem Schwerverkehrsanteil eine zunehmende Sortierung von Lkw auf dem rechten Fahrstreifen und Pkw auf den linken Fahrstreifen. Es ist das Ziel, diese Dynamik im Verkehrsfluss in der Simulation abzubilden. Zusätzlich ist die Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften des Verkehrsflusses eine wichtige Anforderung an eine Verkehrsflusssimulation.

Die Kalibrierung des Verkehrsflusses erfolgt anhand von makroskopischen Eigenschaften. So sollen bspw. das Geschwindigkeitsniveau und die Kapazität im Fundamentaldiagramm getroffen werden. Auch die Abbildung von verschiedenen Verkehrszuständen in Abhängigkeit der Verkehrsdichte soll möglich sein. Auf Autobahnen spielen zudem Engpässe bspw. durch Steigungsstrecken, Ein- und Ausfahrten oder Fahrstreifenreduktionen eine wichtige Rolle. Es gilt solche Engpässe und ggfs. resultierende Stautenstehungen realitätsnah abzubilden. Des Weiteren sollen die Fahrstreifenaufteilung und die Geschwindigkeitsaufteilung auf den einzelnen Fahrstreifen mit der Realität übereinstimmen.

Zur Abbildung der verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen muss zunächst das Steuerungsmodell der SBA an die Simulation gekoppelt werden. Die Simulation muss an definierten Messquerschnitten die Eingangsdaten für das Steuerungsmodell bereitstellen und das Steuerungsmodell muss in Abhängigkeit der Verkehrssituation Schaltbilder ermitteln. Verkehrsbedingte Schaltbilder, die die Simulation umsetzen können muss, sind Geschwindigkeitsbeschränkungen, Lkw-Überholverbote und Freigabe bzw. Schließung des Seitenstreifens. Geschwindigkeitsbeschränkungen beeinflussen das Geschwindigkeitsverhalten. Die Verkehrsteilnehmenden haben je nach zulässiger Höchstgeschwindigkeit unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten (siehe Kapitel 2.2), sodass die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten in der Simulation je nach Anzeige angepasst werden muss. Ein Lkw-Überholverbot beeinflusst die Fahrstreifenwahl der Lkw-Fahrenden. Im

Modell müssen daher die Fahrstreifenwechsel und -wahl einer einzelnen Fahrzeugklasse angepasst werden können. Die TSF beeinflusst ebenfalls die Fahrstreifenwahl. Bei geöffnetem Seitenstreifen müssen die Verkehrsteilnehmenden den Seitenstreifen bei der Fahrstreifenwahl berücksichtigen, wohingegen der Seitenstreifen bei geschlossener TSF für alle Fahrzeuge gesperrt werden muss. Für alle drei Maßnahmen stellt sich die Frage der Befolgung. Eine Simulation, in der alle Fahrzeuge ausnahmslos ihre Geschwindigkeit an die angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen anpassen, in der alle Lkw sich an das Lkw-Überholverbot halten und in der der Seitenstreifen als vollwertiger Fahrstreifen akzeptiert wird, liefert voraussichtlich keine realitätsnahen Ergebnisse. Diese Aspekte müssen anhand von Verkehrsdaten untersucht werden und die entsprechende Befolgung muss in die Simulation implementiert werden.

Kapitel 3.3 thematisiert speziell die Modellierung von Autobahnverkehr in Vissim und durchleuchtet die relevanten Modelle, die in Vissim verwendet werden.

3.3 Modellierung von Autobahnverkehr in PTV Vissim

3.3.1 Stochastik

Der Verkehrsablauf resultiert aus einer Vielzahl an mikroskopischen Ereignissen, wovon einzelne deterministisch und andere zufällig sind. Dabei sind nicht alle Handlungen, Verhaltensmuster und Ereignisse bekannt, sodass eine detaillierte Abbildung mithilfe von deterministischen Modellen nicht möglich ist. Abhilfe schafft die Aggregation einiger Freiheitsgrade und die Abbildung dieser mittels stochastischer Verteilungen. [FGSV, 2006]

Beispiele für zufällige Prozesse im Verkehrsablauf sind Schwankungen in der Verkehrsstärke, den gefahrenen Zeitlücken oder der Reaktionszeit. Diese Schwankungen können empirisch beobachtet und mithilfe von stochastischen Verteilungen abgebildet werden. Diese Verteilungen werden in Vissim eingesetzt, um reale

Schwankungen im Verkehrsablauf nachzubilden. Dabei sind nicht alle Verteilungen durch die Anwendenden parametrisierbar. Ein Beispiel für parametrisierbare Verteilungen sind die Wunschgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden.

Die Zuteilung von Werten aus den Häufigkeitsverteilungen zu einer diskreten Anzahl an Fahrzeugen erfolgt über Zufallszahlen. Jedem Fahrzeug werden zufällig Perzentile zugewiesen und entsprechend diesen Perzentilen werden Werte aus den Verteilungen zugeordnet. Die Perzentile bleiben über die Lebensdauer der Fahrzeuge konstant, damit Verkehrsteilnehmende ihre Charakteristik nicht innerhalb der Simulation ändern. So bleibt bspw. die Wunschgeschwindigkeit eines Fahrzeugs immer im gleichen Perzentil.

Um die Zufallsprozesse in der Simulation anzustoßen, ist in Vissim ein Zufallszahlengenerator hinterlegt. Ausgehend von einer Startzufallszahl wird eine Sequenz an Zufallszahlen generiert, die an die Zufallsprozesse in der Simulation übermittelt werden. Es resultiert ein zufälliger Ablauf des Verkehrs in Abhängigkeit der Startzufallszahl. Die Zufallsprozesse sind dabei voneinander entkoppelt, sodass eine Änderung im Modell nur die betroffenen und nicht alle Prozesse beeinflusst.

Für dieselbe Startzufallszahl erzeugt der Zufallszahlengenerator immer dieselbe Sequenz an Zufallszahlen. Folglich ist der Verkehrsablauf in zwei Simulationsläufen mit identischer Netzdatei, Startzufallszahl und Softwareversion immer derselbe. Dadurch sind Simulationsläufe in Vissim reproduzierbar. Stochastische Schwankungen des Verkehrsflusses werden durch die Variation der Startzufallszahl abgebildet. [FGSV, 2006; PTV, 2022a]

Die Aussagekraft eines einzelnen Simulationslaufs ist bedingt durch die stochastischen Prozesse stark eingeschränkt. Unterschiedliche Startzufallszahlen führen zu unterschiedlichen Simulationsergebnissen. Um die statistische Sicherheit der Ergebnisse sicherzustellen, müssen mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen durchgeführt werden. Je größer die Abweichung einzelner Simulationsläufe, desto mehr Simulationsläufe sind erforderlich, um die Bandbreite an Ergebnissen ausreichend sicher abzudecken. Die notwendige Anzahl an Simulationsläufen ist mit üblichen statistischen Methoden abzusichern (siehe hierzu bspw. FGSV [2006]). Insgesamt bleibt zu bedenken, dass neben den simulierten

auch die empirischen Verkehrsdaten stochastischen Schwankungen und Ungenauigkeiten ausgesetzt sind. Gründe hierfür können u. a. Messfehler, ein begrenzter Beobachtungszeitraum oder andere äußere Einflüsse sein. [FGSV, 2006]

3.3.2 Fahrzeugfolgeverhalten

Vissim simuliert das Fahrzeugfolgeverhalten nach dem psycho-physischen Fahrzeugfolgmodell von Wiedemann. Dieses basiert auf der Einteilung in vier Fahrzustände (siehe Abbildung 3.1). Ein Fahrzeug fährt frei, wenn es einen ausreichend großen Abstand zum Vorderfahrzeug hat und keine Beeinflussung durch das vorausfahrende Fahrzeug besteht. Das Fahrzeug bewegt sich in diesem Zustand mit seiner spezifischen Wunschgeschwindigkeit fort. Eine Beeinflussung durch das Vorderfahrzeug entsteht, sobald das Fahrzeug eine Reaktionsschwelle unterschritten hat. Diese Schwelle ist durch die Differenzgeschwindigkeit und den Abstand zum Vorderfahrzeug definiert. Anschließend führt das Fahrzeug eine Annäherungsbremmung durch und passt die eigene Geschwindigkeit an die niedrigere Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs an. Nach dem die Annäherungsbremmung erfolgt ist, folgt das Fahrzeug dem Vorderfahrzeug ohne weiteres bewusstes Bremsen oder Beschleunigen. Unterschreitet der gefahrene Abstand einen gewissen Sicherheitsabstand, führt das folgende Fahrzeug eine Gefahrenbremsung durch. Die Fähigkeit, Geschwindigkeitsunterschiede wahrzunehmen und Entfernungen einzuschätzen, variiert zwischen den Menschen, sodass die Geschwindigkeit während des Folgevorgangs mehr oder weniger stark um die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs oszilliert. Zusätzlich hat jeder Mensch ein individuelles Sicherheitsbedürfnis und eine individuelle Wunschgeschwindigkeit. Die Bezeichnung *psycho-physisches Fahrzeugfolgmodell* resultiert aus der Kombination aus psychologischen Aspekten und physischen Einschränkungen während des Folgevorgangs. [Fellendorf und Vortisch, 2001]

In Vissim ist sowohl das ursprüngliche Modell *Wiedemann 74* [Wiedemann, 1974; Wiedemann und Reiter, 1992] als auch die nicht veröffentlichte Weiterentwicklung *Wiedemann 99* für die Modellierung des Folgeverhaltens hinterlegt. *Wiedemann 74* verfügt über drei Parameter zur Einstellung des Folgeverhaltens (siehe Tabelle 3.1). Aus diesen Parametern berechnet sich der Wunschsicherheitsabstand d nach Formel 3.2.

Tabelle 3.1: Modellparameter des Fahrzeugfolgmodells *Wiedemann 74* [Wiedemann, 1974]

Parameter	Einheit	Bedeutung
ax	[m]	mittlere Wunschkistanz zum Vorderfahrzeug im Stillstand
bx_{add}	[m]	additiver Einfluss Sicherheitsabstand
bx_{mult}	[m]	multiplikativer Einfluss Sicherheitsabstand

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} \cdot z) \cdot \sqrt{v} \quad (3.1)$$

$$d = ax + bx \quad (3.2)$$

mit z : Wert zwischen 0 und 1, normalverteilt ($\mu = 0,5$ und $\delta = 0,15$)
 v : Geschwindigkeit [m/s]

Bei der Weiterentwicklung des Wiedemann-Modells wurden zusätzliche Parameter offengelegt, mit denen das Folgeverhalten eingestellt werden kann. In *Wiedemann 99* stehen die in Tabelle 3.2 dargestellten Parameter $CC0$ bis $CC9$ zur Verfügung. *Wiedemann 99* geht von dem in Formel 3.3 dargestellten linearen Zusammenhang zwischen Folgeabstand und Geschwindigkeit aus, während in *Wiedemann 74* die Wurzel der Geschwindigkeit eingeht.

$$d = CC0 + CC1 \cdot v \tag{3.3}$$

Die Parameter $CC1$ bis $CC5$ (siehe Abbildung 3.1) haben den größten Einfluss auf die Simulation von Autobahnverkehr. $CC1$ ist einer der wichtigsten Parameter zur Kalibrierung der Kapazität. Mit zunehmendem $CC1$ -Wert vergrößert sich die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen und damit auch die mittlere gefahrene Zeitlücke. Da die Kapazität der Kehrwert der mittleren Zeitlücke ist, verringert sich die Kapazität bei steigendem $CC1$. $CC1$ wird für jedes Fahrzeug aus einer frei parametrisierbaren Zeitverteilung gezogen. $CC2$ beschreibt die maximale Entfernung, die ein Fahrzeug im Zustand *Folgen* zusätzlich zu dem Wunschsicherheitsabstand zu seinem Vorderfahrzeug zulässt, bevor es wieder aufrückt [PTV, 2022a]. Je größer $CC2$ ist, desto stärker oszillieren die Fahrzeuge beim Folgen,

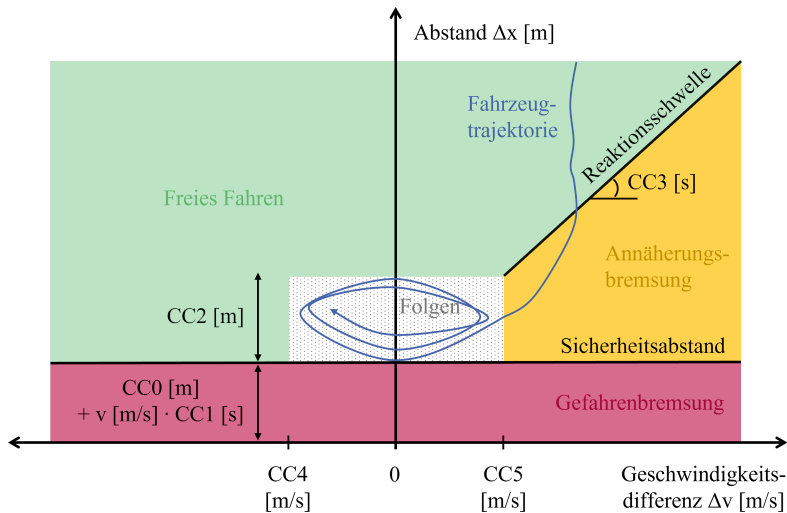


Abbildung 3.1: Modellskizze zum Fahrzeugfolgmodell *Wiedemann 99* (eigene Darstellung nach [Wiedemann, 1974])

Tabelle 3.2: Modellparameter des Fahrzeugfolgmodells *Wiedemann 99* [PTV, 2022a]

Parameter	Einheit	Bedeutung
<i>CC0</i>	[m]	Stillstandsabstand
<i>CC1</i>	[s]	Folgezeitlücken-Verteilung
<i>CC2</i>	[m]	Folgeabstand-Oszillation (Längs-Oszillation)
<i>CC3</i>	[s]	Wahrnehmungsschwelle für Folgen (Beginn des Verzögerungsvorgangs)
<i>CC4</i>	[m/s]	negative Geschwindigkeitsdifferenz während des Folgevorgangs
<i>CC5</i>	[m/s]	positive Geschwindigkeitsdifferenz während des Folgevorgangs
<i>CC6</i>	[1/(m·s)]	Einfluss der Entfernung auf die Oszillation
<i>CC7</i>	[m/s ²]	Oszillation der Beschleunigung während des Folgevorgangs
<i>CC8</i>	[m/s ²]	Beschleunigung aus dem Stillstand
<i>CC9</i>	[m/s ²]	Beschleunigung bei 80 km/h

was die Stabilität des Verkehrsflusses reduziert. *CC3* beschreibt die Wahrnehmungsschwelle für die Erkennung eines Vorderfahrzeugs und damit den Beginn der Annäherungsbremung. Dieser Schwellenwert ist definiert als der zeitliche Abstand des folgenden Fahrzeugs vor dessen Erreichen des maximalen Folgeabstands zum Vorderfahrzeug ohne Anpassung der Geschwindigkeit [PTV, 2022a]. Es handelt sich definitionsgemäß um einen negativen Wert. Je größer der Absolutwert von *CC3* ist, desto vorzeitiger erkennen Fahrzeuge ihre Vorderfahrzeuge und beginnen mit der Annäherungsbremung. Dadurch wird auch bereits früher der Wunsch eines freiwilligen Fahrstreifenwechsels ausgelöst und Überholvorgänge

werden begünstigt (siehe auch Kapitel 3.3.3). $CC4$ und $CC5$ beschreiben die untere und die obere Grenze für die Relativgeschwindigkeit des Folgefahrzeugs zum langsameren bzw. schnelleren Vorderfahrzeug während des Folgevorgangs [PTV, 2022a]. Je höher die Absolutwerte von $CC4$ und $CC5$ sind, desto stärker variieren die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge während des Folgevorgangs. Dies bewirkt stärkere Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgänge, was wiederum negative Auswirkungen auf die Stabilität des Verkehrsflusses hat. Niedrige Absolutwerte führen zu einer Harmonisierung des Verkehrsflusses.

Vissim bietet seit der Softwareversion 2020 die Möglichkeit, das Fahrverhalten für jeden Fahrstreifen separat zu parametrisieren. Dies gilt sowohl für das Fahrzeugfolge- als auch für das Fahrstreifenwechselverhalten (siehe Kapitel 3.3.3).

3.3.3 Fahrstreifenwahl- und Fahrstreifenwechselverhalten

Bei der Modellierung des Fahrverhaltens in Querrichtung ist zwischen der Fahrstreifenwahl und dem Fahrstreifenwechsel zu unterscheiden. In der Realität haben die Verkehrsteilnehmenden einen Überblick über alle verfügbaren Fahrstreifen und der Verkehrssituation darauf. Bei freiwilligen Fahrstreifenwechseln wählt die fahrende Person den Fahrstreifen aus, auf dem sie sich mit einer Geschwindigkeit fortbewegen kann, die möglichst nah an ihrer Wunschgeschwindigkeit liegt. Um diese Entscheidung für einen Zielfahrstreifen zu modellieren, werden sogenannte Fahrstreifenwahlmodelle eingesetzt. Fahrstreifenwechselmodelle hingegen bilden die tatsächliche Durchführung eines Fahrstreifenwechsels nach. Entscheidend für die Durchführung eines Fahrstreifenwechsels sind die Zeitlücken auf dem Nachbarfahrstreifen und die Zeitlückenakzeptanz der Person, die den Fahrstreifenwechsel durchführt. Die meisten Softwareprodukte zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation - auch Vissim - berücksichtigen die Gesamtverkehrssituation auf allen Fahrstreifen nicht bei der Entscheidung zum freiwilligen Fahrstreifenwechsel, d. h. sie verfügen nicht über separate Modelle zur Fahrstreifenwahl, sondern nur über Modelle zum Fahrstreifenwechsel.

In Vissim wird das Querverhalten der Fahrzeuge von einem regelbasierten Fahrstreifenwechselmodell abgebildet, das für freiwillige Fahrstreifenwechsel auf den Arbeiten von Sparmann [1978] und Leutzbach und Busch [1984] basiert. Sparmann [1978] befasst sich mit Fahrstreifenwechselforgängen auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen. Leutzbach und Busch [1984] führen die Untersuchungen fort und betrachten dabei dreistreifige Richtungsfahrbahnen (siehe auch Busch [1984]). Die Autoren befassen sich u. a. mit makroskopischen Kenngrößen wie der Fahrstreifenwechselhäufigkeit und der Fahrstreifenaufteilung.

Das Fahrstreifenwechselmodell nach Sparmann [1978] beruht auf der Idee von Interaktionszuständen, wie sie auch in Wiedemanns psycho-physischem Fahrzeugfolgmodell definiert sind. Es werden drei Interaktionszustände unterschieden: *keine Beeinflussung*, *potenzielle Beeinflussung* und *aktuelle Beeinflussung*. Wenn ein Fahrzeug potenziell oder aktuell von einem vorausfahrenden Fahrzeug beeinflusst wird und deshalb langsamer als mit seiner Wunschgeschwindigkeit fahren muss, entsteht der Wunsch nach einem Fahrstreifenwechsel. Ob ein gewünschter Fahrstreifenwechsel möglich ist, wird in Sparmanns ursprünglicher Arbeit durch die Bewertung der resultierenden Interaktionszustände nach dem Fahrstreifenwechsel entschieden. Ein Fahrzeug führt einen freiwilligen Fahrstreifenwechsel durch, wenn weder das vorausfahrende noch das nachfolgende Fahrzeug auf dem Überholfahrstreifen beeinflusst wird. Beide Bedingungen sind erfüllt, wenn der Abstand zwischen den Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen groß genug ist oder die Geschwindigkeitsunterschiede gering sind. [Sparmann, 1978]

Die Durchführung von freiwilligen Fahrstreifenwechseln hängt demnach von den Zeitlücken auf dem Nachbarfahrstreifen ab und diese sind wiederum von der Verkehrsstärke und dem Folgeverhalten der Fahrzeuge abhängig. Dementsprechend beeinflussen die Parameter des Fahrzeugfolgmodells auch das Fahrstreifenwechselverhalten in der Simulation.

Zusätzlich wird das Querverhalten in Vissim durch Elemente des taktischen Fahrverhaltens bei notwendigen Fahrstreifenwechseln ergänzt. Beispiele sind die Kooperation zwischen Fahrzeugen oder die vorausschauende Planung von Fahrmanövern. So entsteht auch dann der Fahrstreifenwechselwunsch, wenn dieser notwendig ist, um weiterhin auf der Route zu bleiben oder um einem anderen Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen (kooperativer Fahrstreifenwechsel).

Tabelle 3.3 zeigt die Parameter, die in Vissim das Fahrstreifenwechselverhalten beeinflussen. Die freiwilligen Fahrstreifenwechsel werden stark davon dominiert, welches *Grundverhalten* für Fahrstreifenwechsel (Rechtsfahrgebot oder freie Fahrstreifenwahl) hinterlegt ist. Im Falle eines Rechtsfahrgebots entscheidet die *Freifahrzeit* darüber, wie schnell die Fahrzeuge nach einem Überholvorgang wieder nach rechts fahren. Ein höherer Wert bedeutet, dass weniger Fahrzeuge zurück nach rechts wechseln. Für die Modellierung von deutschem Autobahnverkehr ist es sinnvoll, die Freifahrzeit von Lkw sehr gering einzustellen, während Pkw eher träge beim Fahrstreifenwechsel nach rechts sind. Der *Sicherheitsabstandsfaktor* beeinflusst die Risikofreudigkeit beim Fahrstreifenwechsel. Der Faktor, multipliziert mit dem ursprünglichen Sicherheitsabstand, beschreibt den Abstand auf dem Nachbarfahrstreifen, den ein Fahrzeug mindestens benötigt, um einen Fahrstreifenwechsel durchzuführen. Geringe Werte fördern Fahrstreifenwechsel, weil kleinere Lücken genutzt werden können. Häufigere Fahrstreifenwechsel können sich bei hohem Verkehrsaufkommen negativ auf die Stabilität des Verkehrsflusses und die Kapazität auswirken.

Für notwendige Fahrstreifenwechsel werden eigene Verzögerungen und Verzögerungen des Folgefahrzeugs auf dem Zielfahrstreifen in Kauf genommen. Die Schwellenwerte der Verzögerungen sind dabei abhängig von der Entfernung zur letztmöglichen Position für einen notwendigen Fahrstreifenwechsel und bewegen sich linear zwischen der *akzeptierten Verzögerung* und der *maximalen Verzögerung*. Der Fahrstreifenwechsel findet statt, wenn die notwendigen Verzögerungen unterhalb der Schwellenwerte liegen und die *Mindestweglänge* eingehalten werden kann. Zudem kann in Vissim hinterlegt werden, dass die Fahrzeuge *kooperative Fahrstreifenwechsel* durchführen, um Einfädelungs-, Ausfädelungs- und Verflechtungsvorgänge zu vereinfachen. Wenn einem Fahrzeug ein notwendiger

Fahrstreifenwechsel nicht gelingt, hält es an der *Nothalteposition* (Streckenattribut, siehe Tabelle 3.4) an und wartet auf eine ausreichend große Lücke auf dem Zielfahrstreifen. Nach einer *Wartezeit bis zur Diffusion* wird das Fahrzeug aus der Simulation entfernt. Nothalte und Diffusionen in einer Simulation deuten auf ein unrealistisches Fahrverhalten hin und sollten durch eine entsprechende Modellierung vermieden werden.

Tabelle 3.3: Modellparameter des Fahrstreifenwechselfhaltens in Vissim [PTV, 2022a]

Parameter	Einheit	Bedeutung
<i>FsWechsVerh</i>	[-]	Grundverhalten für Fahrstreifenwechsel: freie Fahrstreifenwahl, Rechtsfahrgebot
<i>MaxVerzEig</i>	[m/s ²]	maximale eigene Verzögerung für einen notwendigen Fahrstreifenwechsel
<i>MaxVerzFolg</i>	[m/s ²]	maximale Verzögerung des Folgefahrzeugs für einen notwendigen Fahrstreifenwechsel
<i>VerzRed-EntfEig</i>	[m pro -1 m/s ²]	Änderung der eigenen Verzögerung, Reduktion der maximalen Verzögerung bei zunehmender Entfernung zur Nothalteposition (linear bis zur akzeptierten Verzögerung)
<i>VerzRed-EntfFolg</i>	[m pro -1 m/s ²]	Änderung der Verzögerung des Folgefahrzeugs
<i>AkzVerzEig</i>	[m/s ²]	akzeptierte eigene Verzögerung für einen notwendigen Fahrstreifenwechsel

Parameter	Einheit	Bedeutung
<i>AkzVerzFolg</i>	[m/s ²]	akzeptierte Verzögerung des Folgefahrzeugs für einen notwendigen Fahrstreifenwechsel
<i>DiffZeit</i>	[s]	Wartezeit eines Fahrzeugs an der Nothalteposition bis zur Diffusion
<i>MinWegl</i>	[m]	Mindestweglücke vorne und hinten zwischen zwei Fahrzeugen nach einem Fahrstreifenwechsel
<i>FrFahrz</i>	[s]	Ein Fahrzeug wechselt zurück auf den langsameren (rechten) Fahrstreifen, wenn die Kollisionszeit dort höher ist als die Freifahrtzeit.
<i>SichAbst- FsWechs</i>	[-]	Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand, der beim Fahrstreifenwechsel auf Sicherheitsabstände angewendet wird
<i>KoopVerz</i>	[m/s ²]	Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen
<i>IntellEinfäd</i>	ja/nein	intelligentes Einfädeln
<i>VorausFz- RoutEnt</i>	ja/nein	Vorausschau Fahrzeugroutenentscheidung, Fahrzeuge erkennen neue Routen im Voraus und berücksichtigen diese bei der Fahrstreifenwahl
<i>KoopFsWechsel</i>	ja/nein	kooperativer Fahrstreifenwechsel

Parameter	Einheit	Bedeutung
<i>KoopFsWechs-</i> <i>KollZeit</i>	[s]	maximale Kollisionszeit bei kooperativem Fahrstreifenwechsel
<i>KoopFsWechs-</i> <i>GeschwDiff</i>	[km/h]	maximale Geschwindigkeitsdifferenz bei kooperativem Fahrstreifenwechsel

Tabelle 3.4 zeigt die Streckenattribute, die einen Einfluss auf das Fahrstreifenwechselverhalten haben. Die *Fahrstreifenwechselfdistanz* ist dabei von großer Bedeutung für die Kalibrierung von notwendigen Fahrstreifenwechseln. Die Fahrzeuge in Vissim folgen einer Route, die durch eine Abfolge von Strecken und Verbindungsstrecken definiert ist. Die Fahrstreifenwechselfdistanz wird für jede Verbindungsstrecke als Wert oder als Verteilung im Modell hinterlegt und gibt an, ab welcher Entfernung von der jeweiligen Verbindungsstrecke ein Fahrzeug, dessen Route über die Verbindungsstrecke führt, versucht, auf einen Fahrstreifen zu wechseln, der an diese Verbindungsstrecke angeschlossen ist. Auf Autobahnen sind hohe Werte für die Fahrstreifenwechselfdistanz sinnvoll, da die Verkehrsteilnehmenden i. d. R. frühzeitig von entsprechenden Beschilderungen oder Navigationssystemen über eine herannahende Ausfahrt auf ihrer Route informiert werden.

Tabelle 3.4: Streckenattribute mit Einfluss auf das Fahrstreifenwechselverhalten in Vissim [PTV, 2022a]

Parameter	Einheit	Bedeutung
<i>NothaltPos</i>	[m]	Nothaltposition, wenn ein notwendiger Fahrstreifenwechsel aufgrund fehlender Lücken nicht durchgeführt werden kann
<i>FsWechsDist</i>	[m]	Entfernung vor einer Verbindungsstrecke, ab der Fahrzeuge versuchen, notwendige Fahrstreifenwechsel durchzuführen

3.3.4 Geschwindigkeitsverhalten und Befolgung

Die gefahrenen Geschwindigkeiten resultieren in Vissim aus den Wunschgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden (siehe Kapitel 2.2) in Kombination mit verkehrsbedingten Einschränkungen bspw. bei hohen Verkehrsstärken. Hierfür werden Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeiten im Modell hinterlegt. Zunächst wird jedem Fahrzeug in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps beim Zufluss in das Modell eine Wunschgeschwindigkeit zugeteilt. Die Wunschgeschwindigkeiten können anschließend lokal im Netz und in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse verändert werden. Über Langsamfahrbereiche bspw. in Kurven, können die Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeuge auf einem kurzen Abschnitt angepasst (i. d. R. verringert) werden. Die Fahrzeuge passen ihre Geschwindigkeit bei der Annäherung an einen Langsamfahrbereich an und bekommen nach dem Verlassen wieder ihre ursprüngliche Wunschgeschwindigkeit. Zusätzlich können Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen angelegt werden, um die Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeuge beim Überqueren dauerhaft zu ändern. Dies ist bspw. bei einer Änderung der Geschwindigkeitsbeschränkung sinnvoll.

In der Simulation wird jedem Fahrzeug ein Perzentil für Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zugewiesen, das über die Lebensdauer des Fahrzeugs bestehen bleibt. Ein Fahrzeug, das eine Wunschgeschwindigkeitsentscheidung überfährt oder sich einem Langsamfahrbereich nähert, erhält entsprechend seinem Perzentil eine neue Wunschgeschwindigkeit aus der entsprechenden Verteilung. Das Fahrzeug versucht sich, sofern es nicht durch Streckenwiderstände und andere Fahrzeuge daran gehindert wird, mit seiner zugewiesenen Wunschgeschwindigkeit durch das Netz zu bewegen. Wenn es sich mit einer geringeren Geschwindigkeit als seiner Wunschgeschwindigkeit fortbewegen muss, entsteht ein Überholwunsch.

Je stärker die Wunschgeschwindigkeiten streuen, desto unharmonischer ist der Verkehrsfluss und umso eher bilden sich Fahrzeugpuls. Um zuverlässige Simulationsergebnisse zu erhalten, müssen die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen die beobachteten Geschwindigkeiten widerspiegeln. Die Modellierung der Befolgung der unterschiedlichen dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen von SBA erfolgt dabei durch eine geeignete Wahl der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen.

Die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen sind daher wichtige Eingangsgrößen in ein Modell.

Es ist nicht möglich, die Wunschgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden zu messen oder exakt zu bestimmen, allerdings können sie aus Einzelfahrzeugdaten mit Informationen zu Geschwindigkeiten und Zeitlücken geschätzt werden. Kapitel 3.4 beschäftigt sich mit der Schätzung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen. Es ist das Ziel, basierend auf geschätzten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für unterschiedliche dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen in der Simulation die gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen bei gleicher Verkehrsbelastung zu reproduzieren.

3.3.5 Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten

In Vissim sind geschwindigkeitsabhängige Verteilungsfunktionen für die Beschleunigung und Verzögerung für verschiedene Fahrzeugtypen hinterlegt, um unterschiedliches Fahrverhalten und Fahrdynamiken abzubilden. Es wird zwischen Maximal- und Wunschbeschleunigung bzw. -verzögerung differenziert. Dabei soll die Maximalbeschleunigung bzw. -verzögerung die technischen Fahrzeuggrenzen und die Wunschbeschleunigung bzw. -verzögerung das unterschiedliche Empfinden der Fahrenden abbilden. [PTV, 2022a]

Jedem Fahrzeug wird für jede Geschwindigkeit aus einer Verteilung jeweils eine Wunsch- und Maximalbeschleunigung zugewiesen. I. d. R. ist die Wunschbeschleunigung dabei niedriger als die Maximalbeschleunigung. Die Beschleunigung eines Fahrzeugs erfolgt i. d. R. mit der Wunschbeschleunigung, diese wird allerdings von der Maximalbeschleunigung begrenzt. Wenn eine Strecke nicht eben ist, wird die Maximalbeschleunigung für Fahrzeuge auf dieser Strecke um $0,1 \text{ m/s}^2$ je Prozent Steigung reduziert und im Gefälle entsprechend erhöht. Auf Steigungsstrecken mit großer Längsneigung kann es daher passieren, dass die Maximalbeschleunigung so weit reduziert wird, dass sie niedriger ist als die Wunschbeschleunigung. In diesem Fall kann ein Fahrzeug nur noch mit der reduzierten Maximalbeschleunigung beschleunigen.

Das Beschleunigungsvermögen eines Fahrzeugs ist abhängig von seiner aktuellen Geschwindigkeit. Die Beschleunigungsfunktionen werden geschwindigkeitsabhängig durch drei Parameter definiert. Bei den Parametern handelt es sich um den Minimalwert, Median und Maximalwert einer Beschleunigungsverteilung. Abbildung 3.2 zeigt die Standard-Verteilungsfunktionen der Lkw-Beschleunigungen in Vissim. Es ist zu berücksichtigen, dass die y-Achsen in den Abbildungen 3.2a und 3.2b unterschiedlich skaliert sind.

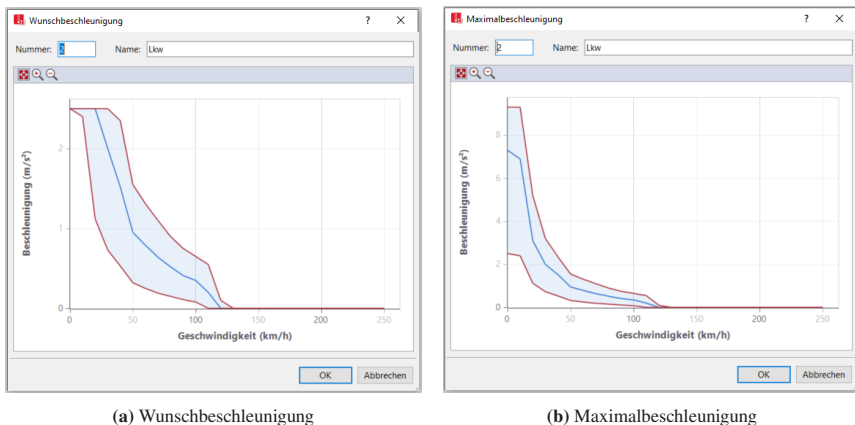


Abbildung 3.2: Geschwindigkeitsabhängige Verteilungsfunktionen für die Lkw-Beschleunigungen in Vissim (Ausschnitte aus der Vissim-Benutzeroberfläche)

Den Fahrzeugen des Fahrzeugtyps Lkw wird eine Maximalbeschleunigung in Abhängigkeit vom Verhältnis zwischen Leistung und Gewicht zugeordnet. Die Maximalbeschleunigungen der anderen Fahrzeugtypen sind von einem Zufalls-wert abhängig, der zwischen null und eins liegt und normalverteilt (mit $\mu = 0,5$ und $\delta = 0,15$) ist. Die Standard-Verteilungsfunktionen der Maximalbeschleunigung und -verzögerung beruhen für Lkw auf Daten des Projekts CHAUFFEUR II aus dem Jahr 1999 und für Pkw auf Daten aus dem Projekt RoTraNoMo aus dem Jahr 2004 [PTV, 2022a]. Auch wenn beide Projekte schon älter sind, ist ihre Datengrundlage gut. Da es insgesamt wenig Empirie zu Fahrzeugbeschleunigungen gibt und auch im Rahmen dieser Untersuchungen der A5 keine

Daten zu Beschleunigungen vorliegen, werden in dieser Dissertation die Standard-Verteilungsfunktionen aus Vissim angenommen.

In Vissim sind die Median- und Maximalwerte der Maximalbeschleunigungsverteilung der Lkw bei Geschwindigkeiten unter 40 km/h bedeutend höher als die der Wunschbeschleunigungsverteilung (siehe Abbildung 3.2). Da die Maximalbeschleunigung nur zur Anwendung kommt, wenn die Steigung diese so weit reduziert, dass sie unterhalb der Wunschbeschleunigung liegt, wird diese Beschleunigung von bis zu 9 m/s^2 nie umgesetzt. Mit diesen hohen Standardwerten wird sichergestellt, dass ein Lkw auch bei großen Steigungen noch eine Mindestgeschwindigkeit halten kann.

Das Beschleunigungsverhalten einzelner Fahrzeuge in der Simulation zeichnet sich meist durch weniger Streuung und höhere Extrema als reale Beschleunigungsverläufe aus. Im Kollektiv resultiert trotzdem ein realitätsnaher Verkehrsfluss. Bei Betrachtung einzelner Fahrzeuge sollte dies jedoch berücksichtigt werden.

3.3.6 Verkehrsbeeinflussung

Die Abbildung von dynamischen Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen in Vissim erfolgt über eine externe Ansteuerung der Simulation. Vissim stellt verschiedene Programmierschnittstellen zur Einbindung von eigenen Applikationen und für den Eingriff in die Simulation zur Verfügung. Zur Abbildung einer SBA stehen das Zusatzmodul VAP (*Verkehrsabhängige Programmierung*) und die COM-Schnittstelle (*Component Object Model*) zur Auswahl.

Über VAP können Steuerungslogiken in der Beschreibungssprache VAP nachgebildet werden. VAP kommt hauptsächlich zur Modellierung von Signalprogrammen von Lichtsignalanlagen im innerstädtischen Bereich zur Anwendung. Die COM-Schnittstelle erlaubt den Zugriff auf alle Objekte in Vissim und ist dadurch vielfältig einsetzbar. Es können verschiedene Programmierumgebungen und Programmiersprachen verwendet werden. Für den Einsatz von Skripten über die COM-Schnittstelle gibt es zwei Möglichkeiten. Vissim kann zum einen extern

gestartet und gesteuert werden. Alternativ können Skripte innerhalb von Vissim ausgewählt und ausgeführt werden. Die COM-Schnittstelle ermöglicht lesenden und schreibenden Zugriff auf eine Netzdatei, auch während einer laufenden Simulation. [PTV, 2022a]

In dieser Dissertation wird das SARAH-Steuerungsmodell in Python implementiert und extern über die COM-Schnittstelle an Vissim gekoppelt. Der Abruf der Verkehrsdaten, die als Input für das Steuerungsmodell dienen, erfolgt lesend mithilfe von Querschnittsmessungen an den Positionen der realen Messquerschnitte im Modell. Die Rückmeldung der resultierenden Schaltbilder erfolgt schreibend in Form von geänderten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zur Abbildung von Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrstreifensperrungen zur Modellierung von Lkw-Überholverbots und geänderten Fahrzeugteilerouten zur Abbildung der Öffnung bzw. Schließung des Seitenstreifens.

3.3.7 Modellkalibrierung und -validierung

Die *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation* definieren die Modellkalibrierung und -validierung wie folgt:

„Unter Kalibrierung wird das Einstellen der Modellparameter verstanden. Im Idealfall lässt sich ein Parameter direkt messen; in der Regel muss aber der gesamte Parametersatz des Simulationsmodells geschätzt werden. Dies bedeutet, dass die Modellparameter geändert werden, bis die Abweichung zwischen Modell und Realität minimal ist. Dieser Anpassungsprozess kann manuell (trial and error) oder algorithmisch-numerisch erfolgen. Als Validierung bezeichnet man den Nachweis, dass mit dem kalibrierten Modell ein empirischer Datensatz unter Einhaltung eines bestimmten Fehlers nachgebildet werden kann. Dabei muss mindestens ein Datensatz verwendet werden, der nicht für die Kalibrierung des Modells herangezogen wurde. [...] Nur bei einem ausreichend validierten Modell ist es zulässig, quantitative Aussagen aus der Simulation auf die Realität zu übertragen.“ [FGSV, 2006]

Des Weiteren beschreibt das Hinweisepapier die Vorgehensweise zur Kalibrierung eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells. Zunächst werden das Modell und der Verkehrsablauf in der Simulation einer generellen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Anschließend werden die Kalibrierungsgrößen je nach Anwendungsfall

festgelegt und mit einem Startwert belegt. In einem iterativen Prozess werden die Kalibrierungsgrößen angepasst und die Simulationsergebnisse mit der Realität verglichen. Die Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität soll dadurch verbessert werden. Abweichungen können zum einen mit Visualisierungen und zum anderen über die Berechnung von Fehlermaßen festgestellt werden. Das Hinweispapier schlägt zur Bewertung der Anpassungsgüte u. a. die Fehlermaße *Root Mean Square Error (RMSE)* und *Root Mean Square Percentage Error (RMSPE)* vor. Der RMSE beschreibt die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (siehe Formel 3.4). Der RMSPE beschreibt diesen Fehler zusätzlich relativ zum Mittelwert (siehe Formel 3.5). [FGSV, 2006]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n^{\text{sim}} - x_n^{\text{obs}})^2} \quad (3.4)$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{x_n^{\text{sim}} - x_n^{\text{obs}}}{x_n^{\text{obs}}} \right)^2} \quad (3.5)$$

mit x : ausgewertete Kenngröße
 x^{obs} : gemessener Wert
 x^{sim} : simulierter Wert
 N Stichprobenumfang

Nach Abschluss der Kalibrierung erfolgt die Validierung. Hierbei wird mit einem anderen, nicht für die Kalibrierung verwendeten Datensatz überprüft, ob das Verkehrsflussmodell auf andere Gegebenheiten übertragen werden kann. Es kann bspw. der Verkehrsfluss eines anderen Tages simuliert werden. Die Parameterwerte des kalibrierten Modells dürfen dabei nicht verändert werden. Die Validierung hat das Ziel, die Zuverlässigkeit des Modells zu überprüfen und eine Überanpassung der Parameterwerte (over-fitting) auszuschließen. [FGSV, 2006]

Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen von Autobahnen werden üblicherweise anhand von makroskopischen Kenngrößen wie bspw. gemessenen Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten oder Reisezeiten kalibriert. In der Literatur sind viele Beispiele solcher Modellkalibrierungen zu finden. Im Folgenden wird eine kleine Auswahl vorgestellt. Der mehrheitliche Anwendungsfall von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen ist dabei die verkehrstechnische Analyse der Leistungsfähigkeit und Kapazität einer Verkehrsanlage.

Toledo u. a. [2004] stellen eine Methode zur Kalibrierung und Validierung von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen vor (siehe auch Toledo u. a. [2003]). Die Autoren berücksichtigen dabei die Wechselwirkungen zwischen den Fahrverhaltensparametern und der Routenwahl und kalibrieren beide Größen zusammen in einem iterativen Prozess mithilfe eines optimierungsbasierten Ansatzes. Zur Bewertung werden die Reisezeiten und die Geschwindigkeiten in der Simulation betrachtet. Die Autoren wenden die Methode auf ein Autobahnmodell und ein Modell bestehend aus drei Autobahnen, umgeben von einem Netz aus innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen, an. Fellendorf und Vortisch [2001] beschreiben das in Vissim hinterlegte Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann und identifizieren zur Kalibrierung relevante Modellparameter. Die Autoren wenden die Erkenntnisse in einem Kalibrierungsprozess auf ein Autobahnmodell mit deutschem und eines mit amerikanischem Verkehr an. Sie vergleichen dabei die q-v-Verläufe und die Fahrstreifennutzung in der Simulation mit gemessenen Verkehrsdaten. Hoffmann [2013] führt zur Kalibrierung eines Autobahnmodells zunächst eine visuelle Überprüfung der Simulation durch und betrachtet in diesem Zuge die mittleren Geschwindigkeiten, die Nettozeitlücken und die Time-To-Collision. Die Autorin untersucht zusätzlich die Geschwindigkeitsverläufe und Verkehrsstärken mithilfe von verschiedenen Fehlermaßen und führt einen Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten mittels Regressionsanalyse durch. Lu u. a. [2014] kalibrieren ein Verkehrsflussmodell einer amerikanischen Autobahn anhand von Geschwindigkeitsverläufen, Verkehrsstärkeverläufen und q-v-Diagrammen an kritischen Messquerschnitten. Dong u. a. [2015] kalibrieren ein Modell einer amerikanischen stadtnahen Autobahn in Vissim. Sie vergleichen dafür die Simulationsergebnisse

mit gemessenen Verkehrsdaten mithilfe von Geschwindigkeitsverläufen und k-q-Diagrammen. Geistefeldt u. a. [2017] kalibrieren den Verkehrsfluss deutscher Autobahnen in Laborbeispielen anhand von Kapazitätswerten und q-v-Beziehungen aus dem HBS [2015]. Zur Validierung wenden die Autor:innen die resultierenden Parameterkombinationen auf reale Untersuchungsstrecken an und vergleichen gemessene und simulierte q-v-Diagramme. Schwietering u. a. [2021] kalibrieren und validieren drei Modelle von Autobahnen anhand von q-v-Diagrammen an maßgeblichen Messquerschnitten. Datengrundlage sind zu 5-Minuten-Intervallen aggregierte Verkehrsdaten. Die Autoren verweisen dabei auf die HBS-konformen Standardparameterwerte für Autobahnen nach Geistefeldt u. a. [2017].

Da Simulationswerkzeuge wie Vissim in der Vergangenheit überwiegend für Leistungsfähigkeits- und Kapazitätsuntersuchungen eingesetzt wurden, lag der Fokus bei der Entwicklung auf hohen Verkehrsbelastungen. Solche Verkehrssituationen werden in der Simulation gut abgebildet und die Kalibrierung anhand von makroskopischen Verkehrsgrößen ist in diesem Fall gut geeignet. Weiterführende Fragestellungen, für die auch niedrige oder mittlere Lastzeiten von Relevanz sind, erfordern ggfs. eine Kalibrierung auf mikroskopischer Ebene mit Betrachtung von Einzelfahrzeugdaten. Mögliche Datenquellen sind Floating Car Data (FCD) und Fahrzeugtrajektorien.

3.4 Ermittlung von Wunschgeschwindigkeiten

Während die gefahrenen Geschwindigkeiten gemessen werden können, sind die Wunschgeschwindigkeiten nicht für alle Fahrzeuge erfassbar. Nur für freifahrende Fahrzeuge kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die gefahrene Geschwindigkeit auch der Wunschgeschwindigkeit entspricht. Mit zunehmender Verkehrsdichte steigt jedoch der Einfluss der Verkehrsteilnehmenden aufeinander, sodass der Anteil freifahrender Fahrzeuge abnimmt und sich Wunsch- und gefahrene Geschwindigkeiten immer stärker unterscheiden. Zudem haben Verkehrsteilnehmende mit einer hohen Wunschgeschwindigkeit eine höhere Wahrscheinlichkeit beeinflusst zu werden als Verkehrsteilnehmende mit einer

niedrigen Wunschgeschwindigkeit [Botma, 1999]. Eine Ableitung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung aller Verkehrsteilnehmenden aus den Freifahrtgeschwindigkeiten einer Teilmenge der Fahrzeuge würde daher zu einer systematischen Unterrepräsentation schneller Wunschgeschwindigkeiten führen. Diese Vorgehensweise wird dennoch in einigen Untersuchungen gewählt, um Wunschgeschwindigkeiten auf Autobahnen zu bestimmen (siehe bspw. Wiedemann u. a. [1982] oder Dong u. a. [2015]).

In der Literatur beschriebene Ansätze zur Schätzung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen basieren auf mathematischen Methoden der Lebensdaueranalyse. Es kommt die Product-Limit-Methode nach Kaplan und Meier [1958] zum Einsatz, die ursprünglich aus der Medizin stammt. Das Verfahren befasst sich mit der Schätzung von Überlebenswahrscheinlichkeiten über einen Zeitraum bspw. nach einer Operation. Dabei stirbt ein Teil der Patient:innen zu einem Zeitpunkt t nach der Operation an den Folgen. Andere Patient:innen versterben aufgrund von anderen Ursachen oder treten aus der Studie aus (Werdegang unklar). Alle beobachteten Lebensdauern gehen daher als *Todesfall* oder als *Verlust* in die Schätzung ein, es handelt sich um eine unvollständige Beobachtung. Die Kaplan-Meier Methode ist ein nicht-parametrisches Verfahren, die resultierende Verteilung entspricht keinem bestimmten Funktionstypen. [Kaplan und Meier, 1958]

Eine Analogie zu Überlebenswahrscheinlichkeiten in der Medizin sind Wunschgeschwindigkeitsverteilungen im Verkehr. Anstelle einer Zeitspanne werden Geschwindigkeiten und anstelle der Ereignisse *Todesfall* und *Verlust* werden Folgezustände von Fahrzeugen betrachtet. Dabei wird zwischen *beeinflussten* und *unbeeinflussten* Fahrzeugen unterschieden. Die Anwendung der Kaplan-Meier Methode im Verkehrskontext wurde zunächst von Botma [1999] vorgestellt. Hoogendoorn [2005a,b] und Geistefeldt [2007, 2015] haben den Ansatz weiterentwickelt. Die Kaplan-Meier Methode sowie die Weiterentwicklungen werden im Folgenden vorgestellt. Herleitungen und weiterführende Informationen können in den Originalquellen nachgeschlagen werden.

Die klassische Kaplan-Meier Methode wird von Kaplan und Meier [1958], Hoogendoorn [2005a,b] und Geistefeldt [2007, 2015] beschrieben. Zur Schätzung von

Wunschgeschwindigkeitsverteilungen kommen Einzelfahrzeugdaten aus Querschnittsmessungen zum Einsatz. Dabei ist für jedes Fahrzeug j , das den Messquerschnitt überfährt, die Geschwindigkeit v_j und die Frontzeitlücke t_j bekannt. Die Fahrzeuge werden zunächst anhand ihrer Frontzeitlücke als beeinflusste oder unbeeinflusste (frei fahrende) Fahrzeuge gekennzeichnet. Für beeinflusste Fahrzeuge kann die Wunschgeschwindigkeit nicht ohne Weiteres ermittelt werden, sie ist aber größer oder gleich der gefahrenen Geschwindigkeit. Für unbeeinflusste Fahrzeuge kann hingegen die gefahrene Geschwindigkeit mit der Wunschgeschwindigkeit gleichgesetzt werden. Im nächsten Schritt werden die Daten nach der lokalen Geschwindigkeit der Fahrzeuge aufsteigend sortiert. Für jede betrachtete Geschwindigkeit werden zusätzlich die beeinflussten vor den unbeeinflussten Fahrzeugen angeordnet (relevant für Formel 3.6). Für die anschließende Schätzung der Überlebensfunktion $S(v^0)$ (Formeln 3.6 und 3.7) und die resultierende Wunschgeschwindigkeitsverteilung $F(v^0)$ (Formel 3.8) sind nach Kaplan und Meier [1958] zwei Ansätze möglich, wobei beide auf der Schätzung der Überlebensfunktion basieren. Bei gleicher Analogie zwischen *beeinflusstem* bzw. *unbeeinflusstem* Fahrzeug zu *Todesfall* bzw. *Verlust* liefern beide Ansätze die gleiche Wunschgeschwindigkeitsverteilung. Der zweite Ansatz (Formel 3.7) ist dabei weniger rechenintensiv. Eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung erreicht nur den Wert eins, wenn es sich bei der letzten Beobachtung (höchste Geschwindigkeit) um ein unbeeinflusstes Fahrzeug handelt.

$$S(v^0) = \prod_{j=1}^{n_{v^0}} \left(\frac{n-j}{n-j+1} \right)^{\delta_j} \quad (3.6)$$

$$S(v^0) = \prod_{v_k=1}^{v^0} \frac{n_k - m_k}{n_k} \quad (3.7)$$

$$F(v^0) = 1 - S(v^0) \quad (3.8)$$

mit v^0 :	Geschwindigkeit [m/s]
j :	Position des betrachteten Fahrzeugs j im Datensatz (bei v_j aufsteigend und beeinflussten vor unbeeinflussten Fahrzeugen)
v_j :	gefahrenere Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs j
v_{Wunsch_j} :	Wunschgeschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs j
n_{v^0} :	Anzahl Fahrzeuge j mit gefahrener Geschwindigkeit $v_j \leq v^0$
n :	Anzahl aller erfassten Fahrzeuge (alle Beobachtungen)
δ_j :	Folgezustand des betrachteten Fahrzeugs j $\delta_j = 0$: unbeeinflusstes Fahrzeug (mit $v_j = v_{Wunsch_j}$) $\delta_j = 1$: beeinflusstes Fahrzeug (mit $v_j \leq v_{Wunsch_j}$)
n_k :	Anzahl Fahrzeuge mit $v_j \geq v_k$
m_k :	Anzahl beeinflusster Fahrzeuge (mit $v_j \leq v_{Wunsch_j}$)

Hoogendoorn [2005a,b] wählt Formel 3.6 und Geistefeldt [2007, 2015] verwendet Formel 3.7. Interessant ist dabei, dass Hoogendoorn und Geistefeldt beeinflusste und unbeeinflusste Fahrzeuge gegensätzlich in die Formeln einfließen lassen. In dieser Arbeit entsprechen die Variablen in beiden Formeln 3.6 und 3.7 der von Hoogendoorn gewählten Analogie zur Überlebenswahrscheinlichkeit, damit die Formeln konsistent sind und die gleichen Verteilungen resultieren. Geistefeldt [2007, 2015] definiert die Variable m_k im Gegensatz zu Hoogendoorn als *Anzahl unbeeinflusster Fahrzeuge*. Beide Ansätze würden ebenso die gleichen Verteilungen liefern, wenn bei Hoogendoorn [2005a,b] die Werte von δ_j umgedreht werden würden, sodass unbeeinflusste anstatt beeinflusste Fahrzeuge in die Formel einfließen.

Ein wesentlicher Nachteil der klassischen Kaplan-Meier Methode ist, dass die resultierende Wunschgeschwindigkeitsverteilung stark von dem gewählten Grenzwert der Frontzeitlücke abhängig ist. Hoogendoorn [2005a] hat die Kaplan-Meier Methode daher basierend auf Formel 3.6 weiterentwickelt, indem er die Einteilung in *beeinflusste* und *unbeeinflusste* Beobachtungen um *teilweise beeinflusste*

Beobachtungen ergänzt hat. Für diese modifizierte Kaplan-Meier Methode wird die Wahrscheinlichkeit $\theta(t_j)$ bestimmt, dass ein Fahrzeug mit einer bestimmten Frontzeitlücke t_j beeinflusst oder unbeeinflusst fährt. Diese Modifikation basiert auf einem Grenzwertprozess (siehe Hoogendoorn [2005a]). Die modifizierte Schätzung der Überlebensfunktion $S(v^0)$ ist nur anwendbar, wenn eine große Datenmenge vorliegt. Die Formel lautet wie folgt:

$$S(v^0) = \prod_{j=1}^{n_{v^0}} \left(\frac{n-j-1}{n-j-\theta_j} \right) \quad (3.9)$$

mit v^0 :	Geschwindigkeit [m/s]
j :	Position des betrachteten Fahrzeugs j im Datensatz (bei v_j aufsteigend und beeinflussten vor unbeeinflussten Fahrzeugen)
v_j :	gefährere Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs j
n_{v^0} :	Anzahl Fahrzeuge j mit gefährerer Geschwindigkeit $v_j \leq v^0$
n :	Anzahl aller erfassten Fahrzeuge (alle Beobachtungen)
θ_j :	Wahrscheinlichkeit, dass Fahrzeug j beeinflusst fährt

Die Wahrscheinlichkeit $\theta(t_j)$ wird durch eine monoton fallende Funktion beschrieben. Mit zunehmender Frontzeitlücke t_j sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug beeinflusst ist. Die Vorgehensweise zur Schätzung von $\theta(t_j)$ kann in der Originalquelle nachgelesen werden. Diese erste Modifikation der Kaplan-Meier Methode nach Hoogendoorn [2005a] ist für die Schätzung von Wunschgeschwindigkeiten auf Landstraßen mit wenig Überholmöglichkeiten geeignet.

Eine zweite Modifikation nach Hoogendoorn [2005b] befasst sich mit der Schätzung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen auf mehrstreifigen Autobahnen. Hoogendoorn weist darauf hin, dass sein erster Ansatz nicht ohne Weiteres auf Autobahnen übertragbar ist. Zum einen sind kleine Frontzeitlücken auf Autobahnen oft durch Überholvorgänge bedingt, in diesen Fällen handelt es sich jedoch nicht um beeinflusste Fahrzeuge. Zum anderen ist in Stausituationen die Unterscheidung zwischen beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen basierend

auf Frontzeitlücken ungeeignet. Daher führt Hoogendoorn in seiner modifizierten Kaplan-Meier Methode für Autobahnen eine zweigeteilte Wahrscheinlichkeitsfunktion $\theta(d_j, \Delta v_j)$ ein, die sowohl den Abstand zum Vorderfahrzeug d_j als auch die relative Geschwindigkeit Δv_j berücksichtigt. Ein Fahrzeug fährt umso unbeeinflusster, je größer sein Abstand und seine Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug sind. Eine hohe Geschwindigkeitsdifferenz deutet dabei auf einen Überholvorgang hin. Die Wahrscheinlichkeit der Beeinflussung eines Fahrzeugs wird wie folgt ermittelt:

$$\theta_j = \theta_{gap_j} \cdot \theta_{speed_j} \quad (3.10)$$

$$\theta_{gap_j} = \begin{cases} 1, & \text{für } d_j \leq a_1 \\ 1 + \frac{a_1}{a_2} - \frac{d_j}{a_2}, & \text{für } a_1 < d_j < a_1 + a_2 \\ 0, & \text{für } d_j \geq a_1 + a_2 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\theta_{speed_j} = \begin{cases} 1, & \text{für } |\Delta v_j| \leq b_1 \\ 1 + \frac{b_1}{b_2} - \frac{|\Delta v_j|}{b_2}, & \text{für } b_1 < |\Delta v_j| < b_1 + b_2 \\ 0, & \text{für } |\Delta v_j| \geq b_1 + b_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

- mit d_j : Abstand zum Vorderfahrzeug [m]
 a_1 : Parameter [m],
 typischer Wert nach Hoogendoorn [2005b] = 20
 a_2 : Parameter [m],
 typischer Wert nach Hoogendoorn [2005b] = 150
 Δv_j : Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrzeug j und dessen Vorderfahrzeug [m/s]
 b_1 : Parameter [m/s],

b_2 : typischer Wert nach Hoogendoorn [2005b] = 2,5
 Parameter [m/s],
 typischer Wert nach Hoogendoorn [2005b] = 2,5

Geistefeldt [2007, 2015] befasst sich ebenfalls mit der Ermittlung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, wobei seine Überlegungen auf Formel 3.7 der Product-Limit-Methode nach Kaplan und Meier [1958] basieren. Im Gegensatz zu Hoogendoorn [2005b] geht Geistefeldt von einem konstanten Grenzwert der Frontzeitlücke für die Unterscheidung zwischen beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen aus. Zusätzlich definiert er Kriterien zur Berücksichtigung von Überholmöglichkeiten auf mehrstreifigen Autobahnen. Ein Fahrzeug gilt demnach als beeinflusst, wenn die folgenden Kriterien gleichzeitig erfüllt sind:

- Die Frontzeitlücke zum Vorderfahrzeug auf dem gleichen Fahrstreifen ist kleiner als der Grenzwert t_v .
- Die Frontzeitlücke zum Vorderfahrzeug auf dem Überholfahrstreifen ist kleiner als der Grenzwert t_v und die Zeitlücke zum folgenden Fahrzeug auf dem Überholfahrstreifen ist kleiner als der Grenzwert t_h .

Geistefeldt nimmt die Grenzwerte $t_v = 2$ s und $t_h = 4$ s für Pkw und $t_v = 3$ s für Lkw an. Das Überholkriterium wird nicht für Lkw angewendet.

Sowohl Hoogendoorn [2005a,b] als auch Geistefeldt [2007, 2015] untersuchen zusätzlich den Maximum-Likelihood-Ansatz zur Schätzung von Funktionsparametern der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen. Hoogendoorn [2005a,b] nimmt dabei eine Normalverteilung der Wunschgeschwindigkeiten an. Der Autor weist jedoch darauf, dass es keinen wirklichen Beleg für die Wahl eines bestimmten Funktionstyps gibt. Geistefeldt [2007, 2015] untersucht neben der Normalverteilung auch die Gamma- und Weibullverteilung als Funktionstypen und kommt zu dem Ergebnis, dass die Normalverteilung die beste Anpassung an die empirischen Daten liefert.

In dieser Arbeit kommt die modifizierte Kaplan-Meier Methode für Autobahnen nach Hoogendoorn [2005b] zum Einsatz. In Kapitel 5 werden nach dieser Methode

Wunschgeschwindigkeitsverteilungen geschätzt, die in Kapitel 6 als Eingangsgröße für das mikroskopische Verkehrsflussmodell dienen.

3.5 Simulative Untersuchungen von Autobahnverkehr mit SBA

Es existiert eine Vielzahl an Untersuchungen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation von Autobahnverkehr. Von besonderer Bedeutung für die Abbildung von deutschem Autobahnverkehr sind dabei die HBS-konformen Standardparametersätze für verschiedene Simulationswerkzeuge, u. a. Vissim, nach Geistefeldt u. a. [2017] (siehe auch Leyn und Vortisch [2015]). Weitere Beispiele sind Lu und Shladover [2014], Dong u. a. [2015] und Vizioli u. a. [2021], die ebenfalls Parameterwerte für die Abbildung von Autobahnverkehr in Vissim liefern, dabei handelt es sich allerdings um internationale Anwendungsbeispiele. Im Kontext von automatisiertem Fahren beschäftigen sich Hartmann u. a. [2017] (siehe auch Krause u. a. [2017a,b]) und Zeidler u. a. [2019] mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation von Autobahnverkehr in Vissim.

Die Abbildung von Autobahnverkehr mit SBA in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen ist hingegen geringer erforscht. Vor allem zur Nachbildung der Reaktion der Verkehrsteilnehmenden auf unterschiedliche dynamische Schaltbilder sind nur wenige Ansätze bekannt. SBA wirken sich vorrangig auf das Geschwindigkeitsverhalten der Verkehrsteilnehmenden aus. Ein verändertes Geschwindigkeitsverhalten wird als Modifikation der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen modelliert (siehe Kapitel 3.3.4 und 3.4). Einige Untersuchungen befassen sich mit der Ermittlung und Anwendung von unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, sie berücksichtigen jedoch nicht den Einfluss von Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen. Farzaneh und Rakha [2006] analysieren den Einfluss von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen auf den Verkehrsfluss. Die Ergebnisse zeigen erhebliche Auswirkungen der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen auf die Geschwindigkeiten im Bereich des stabilen Verkehrsflusses. Im Bereich des

instabilen Verkehrsflusses haben unterschiedliche Wunschgeschwindigkeitsverteilungen hingegen keinen Einfluss mehr. Weitere Beispiele sind Hoogendoorn [2005a,b] und Geistefeldt [2007, 2015], die neben der Ermittlung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen (siehe Kapitel 3.4) diese auch zur Validierung in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen anwenden.

Simulationsstudien mit einem Fokus auf Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen liefern bspw. Lee u. a. [2004] und darauf aufbauende Untersuchungen für das Simulationswerkzeug Paramics. Lee u. a. [2004] setzen mikroskopische Verkehrsflusssimulationen ein, um die Auswirkungen von dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf das Unfallrisiko auf Autobahnen zu untersuchen. Hierzu koppeln die Autoren ein Modell über eine Schnittstelle an eine selbst entwickelte Steuerungslogik. Geschwindigkeitsbeschränkungen werden in der Simulation umgesetzt, indem die maximal erreichbare Geschwindigkeit der Fahrzeuge entsprechend angepasst wird. Um das reale Fahrerverhalten widerzuspiegeln, variiert die Befolgung durch die Verkehrsteilnehmenden im Modell. Die maximal erreichbaren Geschwindigkeiten sind dabei normalverteilt und so ausgelegt, dass die Geschwindigkeitsbeschränkungen leicht überschritten werden. Die von Lee u. a. [2004] beschriebene Vorgehensweise zur Modellierung von Autobahnen mit SBA in Paramics wird zunächst von Lee u. a. [2006] für weitere Untersuchungen in Bezug auf Verkehrssicherheit verwendet. Die Vorgehensweise wird ebenfalls von Allaby u. a. [2007] zur Evaluierung eines beeinflussten Autobahnabschnitts in Toronto und von Hellinga und Mandelzys [2011] zur Untersuchung der Auswirkungen von SBA auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss unter Berücksichtigung der Akzeptanz eingesetzt.

Bhowmick u. a. [2011] führen eine simulative Untersuchung zu den Auswirkungen von verschiedenen Befolungsgraden der dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen durch. Hierfür modellieren sie einen kanadischen Autobahnabschnitt in Vissim. Sie untersuchen Befolungsgrade von 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 % in Kombination mit Geschwindigkeitsbeschränkungen von 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h und 80 km/h. Dabei definieren die Autoren für jeden untersuchten Befolungsgrad Anteile an Verkehrsteilnehmenden, die die

Geschwindigkeitsbeschränkung unter- und überschreiten und passen die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Vissim entsprechend an. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen Harmonisierungseffekte mit steigendem Befolungsgrad. Die Verringerung der Streuungen der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen bewirken einen stabileren Verkehrsfluss und dadurch eine Erhöhung der Reisegeschwindigkeiten. Die Verkehrsstärke und -dichte fließen nicht in die Überlegungen mit ein. Aufbauend auf dieser Arbeit untersuchen Hadiuzzaman u. a. [2015] (siehe auch Hadiuzzaman u. a. [2013]) simulativ die Auswirkungen von unterschiedlichen SBA-Steuerungsmodellen und Befolungsgraden auf den Verkehr und auf die Verkehrssicherheit. Auch diese Simulationen zeigen positive Auswirkungen von SBA mit steigendem Befolungsgrad.

Habtemichael und de Picado Santos [2013] analysieren die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss im Zusammenhang mit SBA bei unterschiedlichen verkehrlichen Bedingungen und Befolungsgraden mithilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen. Die Autoren modellieren und kalibrieren hierfür einen Abschnitt einer portugiesischen Autobahn in Vissim. Die SBA wird anhand von Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen abgebildet, an denen zunächst eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung aus einer empirischen Geschwindigkeitsmessung hinterlegt ist. In Abhängigkeit der Verkehrsstärke wird anschließend die Höchstgeschwindigkeit in der Simulation auf 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h oder 60 km/h reduziert. Hierzu werden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, die jeweils der Höchstgeschwindigkeit mit einer geringen stochastischen Abweichung (± 7 km/h) entsprechen, verwendet. Zur Abbildung der Befolgung werden zwei Fahrzeugklassen angelegt, die regelkonforme und nicht regelkonforme Verkehrsteilnehmende repräsentieren und deren Anteile je nach simuliertem Befolungsgrad angepasst werden. Nicht regelkonforme Fahrzeuge bekommen beim Überqueren einer Wunschgeschwindigkeitsentscheidung keine reduzierte Wunschgeschwindigkeit und ignorieren somit die dynamischen Anzeigen. Die Ergebnisse bestätigen, dass SBA sicherheitstechnische und verkehrliche Vorteile auf Autobahnen bieten. Dabei liegen die relevantesten Sicherheitsvorteile bei hohem Verkehrsaufkommen vor. Der verkehrliche Nutzen ist bei leicht überlastetem Verkehr am größten. Insgesamt sind die Ergebnisse stark abhängig vom Befolungsgrad,

weshalb die Autoren zu dem Schluss kommen, dass der Erfolg von SBA in hohem Maße von der Einhaltung der Vorschriften abhängt.

Sadat und Celikoglu [2017] modellieren und kalibrieren einen Autobahnabschnitt in Istanbul in Vissim und koppeln das Verkehrsflussmodell an ein Steuerungsmodell, das die Geschwindigkeitsbeschränkung basierend auf der Verkehrsstärke, dem Belegungsgrad und der Geschwindigkeit festlegt. Die Abbildung der SBA erfolgt über eine Anpassung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen. Dabei werden Befolungsgrade von 50 % (20 % der Verkehrsteilnehmenden unter- und 30 % überschreiten die Geschwindigkeitsbeschränkung) und 75 % (10 % Unter- und 15 % Überschreitung) untersucht. Diese Simulationsstudie zeigt einen positiven Einfluss des Befolungsgrads auf den Verkehrsfluss.

Hegewald [2021] beschäftigt sich mit der Abbildung von SBA mithilfe von agentenbasierter Simulation. Die Autorin untersucht die Auswirkungen des Abstands zwischen Anzeigequerschnitten auf die Harmonisierungswirkung von SBA. Dazu wird eine zweistreifige Autobahn mit SBA mit Abständen von 750 m und 1.500 m zwischen den Anzeigequerschnitten simuliert. Das Fahrverhalten der Agenten basiert auf dem *Intelligent Driver Modell*. Zur Abbildung der Harmonisierungsprogramme werden die Ein- und Ausschaltkriterien sowie der Längsabgleich nach MARZ [2018] verwendet. Für diese simulative Untersuchung entwickelt die Autorin ein Befolgungsmodell, das auf eine Befragung zum Verhalten in Bezug auf präventive SBA-Schaltungen nach Steinhoff u. a. [2002] aufbaut. Mithilfe dieser Befragung wurde ermittelt, ob die Befragten die Anzeigequerschnitte wahrgenommen haben, ob sie bereit waren, die Schaltbilder zu befolgen und wie sie auf die Schaltbilder reagiert haben. Die Umsetzung der Befragungsergebnisse im Befolgungsmodell erfolgt mittels einer Funktion, die die aktuelle Wunschgeschwindigkeit bestimmt. Die Parametrierung des Zeitpunkts und der Häufigkeit des Funktionsaufrufs ist für jeden Agenten individuell und bildet die Befolgung durch den jeweiligen Agenten ab. Des Weiteren wird in der Simulation ein Vergessen der Geschwindigkeitsbeschränkung sowie die Beeinflussbarkeit vorausfahrender Fahrzeuge berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass größere Abstände zwischen den Anzeigequerschnitten eine bessere Harmonisierungswirkung haben. Kleinere Abstände hingegen reduzieren in der Simulation den Effekt

des *Vergessens* der angezeigten Höchstgeschwindigkeit und die damit verbundene niedrigere Befolgung. Die Autorin weist darauf hin, dass die zunächst theoretischen Ergebnisse der Simulationen durch empirische Untersuchungen, insbesondere der Befolgung, abgesichert werden müssen.

Vizioli u. a. [2021] entwickeln eine Methode zur Kalibrierung eines Verkehrsflussmodells einer brasilianischen Autobahn mit SBA in Vissim. Dazu kalibrieren sie zunächst das Fahrverhalten und binden anschließend einen selbstentwickelten schwellenwertbasierten Steuerungsalgorithmus in die Simulation ein. Die Befolgung durch die Verkehrsteilnehmenden wird in dieser Studie nicht berücksichtigt. Die Verkehrsbeeinflussung reduziert lediglich die Höchstgeschwindigkeit in der Simulation. Die Autor:innen erzielen in den Simulationen mit SBA eine Erhöhung der durchschnittlichen Geschwindigkeit um bis zu 5,9 %.

Wang u. a. [2021] betrachten die Wirkung von Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen auf einer chinesischen Autobahn mithilfe des Simulationswerkzeugs SUMO. Die Studie befasst sich mit der simulativen Bewertung von TSF, Zuflussdosierung und dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die Autor:innen kalibrieren zunächst das Fahrverhalten anhand von empirischen Daten. Im nächsten Schritt untersuchen sie vereinfachte Szenarien der betrachteten Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen. Die dauerhafte Öffnung des Seitenstreifens zeigt eine deutliche Verbesserung des Verkehrsflusses durch die Erhöhung der Kapazität des Abschnitts. Zur Analyse der Zuflussdosierung wird der einfahrende Verkehrsstrom mithilfe einer LSA jede Minute für 30 Sekunden an der Einfahrt gehindert. Die Simulationsergebnisse zeigen eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Hauptfahrbahn und eine Verringerung der Anzahl an Überlastungssituationen. Zur Untersuchung von dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen wird die Geschwindigkeitsbeschränkung in der Simulation in verschiedenen Szenarien von 120 km/h auf 100 km/h, 80 km/h und 60 km/h reduziert. Die Szenarien zeigen eine Verringerung der Streuung der Geschwindigkeiten, eine Reduktion der Verlustzeiten und eine Erhöhung der Kapazität. Die Befolgung der Maßnahmen durch die Verkehrsteilnehmenden wird in dieser Studie nicht betrachtet.

Hilgers u. a. [2022] untersuchen die Auswirkungen von hochautomatisiertem Fahren auf Autobahnen mit SBA unter Verwendung von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen in Aimsun. Die Autor:innen erstellen zu diesem Zweck zwei Verkehrsflussmodelle von Autobahnstrecken aus Bayern und Nordrhein-Westfalen und koppeln die Modelle zur Abbildung der SBA an eine MARZ-konforme Standard-Unterzentrale [MARZ, 1999]. Um die Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden auf die Schaltbilder der SBA nachzubilden, wenden Hilgers u. a. [2022] ein Wirkmodell aus Realdaten an, das das Fahrverhalten mittels eines hybriden Bayesschen Netzes abbildet. Dieses Modell basiert auf einer parallel laufenden Dissertation [Grimm, 2022], deren Methode zum Teil bereits vorab veröffentlicht wurde [Grimm, 2019]. Das Wirkmodell passt die Wunschgeschwindigkeit für jedes Fahrzeug, das in der Simulation einen Anzeigequerschnitt überfährt, je nach Schaltbild der SBA, Verkehrssituation und Fahrzeugart (hochautomatisiertes oder konventionelles Fahrzeug) an. Die Kalibrierung und Validierung der Verkehrsflussmodelle erfolgt anhand von Vergleichen der Simulationsdaten mit empirischen Daten an definierten Messquerschnitten. Es werden Ganglinienverläufe der Geschwindigkeit und Verkehrsstärke, Fahrstreifenaufteilungen und q-v-Diagramme untersucht. Die Kalibrierung des Wirkmodells wird separat für beide Untersuchungsstrecken durchgeführt und betrachtet empirische Zusammenhänge zwischen der Fahrsituation und dem Fahrverhalten basierend auf Einzelfahrzeugdaten und Schaltdaten. Die Verkehrsflussmodelle beinhalten keine TSF und das Schaltprogramm *Lkw-Überholverbot* wird nicht abgebildet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass einige Untersuchungen sich mit der Simulation von beeinflusstem Autobahnverkehr beschäftigen. Die Abbildung einer SBA erfolgt dabei in Vissim i. d. R. über Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen und einer Anpassung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen (siehe Bhowmick u. a. [2011]; Habtemichael und de Picado Santos [2013]; Hadiuzzaman u. a. [2015] und Sadat und Celikoglu [2017]). Auch die Einteilung in Fahrzeugklassen zur Abbildung von regelkonformen und nicht regelkonformen Verkehrsteilnehmenden ist eine mögliche Vorgehensweise zur Modellierung von SBA (siehe Habtemichael und de Picado Santos [2013]). Vereinfachend wird der

Befolgungsgrad in manchen Studien vernachlässigt und es wird angenommen, dass bei restriktiveren Geschwindigkeitsbeschränkungen verringerte Wunschgeschwindigkeiten vorliegen (siehe Vizioli u. a. [2021] und Wang u. a. [2021]). In Untersuchungen, die den Befolgungsgrad berücksichtigen, erfolgt i. d. R. lediglich eine Variation mit anschließender Quantifizierung der Auswirkungen von unterschiedlichen Befolgungsgraden (siehe Allaby u. a. [2007]; Bhowmick u. a. [2011]; Habtemichael und de Picado Santos [2013]; Hadiuzzaman u. a. [2015]; Hellinga und Mandelzys [2011]; Lee u. a. [2004, 2006] und Sadat und Celikoglu [2017]). Dabei weisen alle Simulationsstudien einen positiven Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Befolgungsgrad auf. Eine realitätsnahe Modellierung des Befolgungsgrades stellt sich als herausfordernd heraus, da die für die Kalibrierung notwendige empirische Erfassung und Auswertung des Befolgungsgrades schwierig ist. Hilgers u. a. [2022] beschäftigen sich mit einer solchen realitätsnahen Abbildung der Reaktion der Verkehrsteilnehmenden auf SBA-Anzeigen. Die Autor:innen entwickeln hierfür ein Wirkmodell, das das Fahrverhalten mittels eines hybriden Bayesschen Netzes abbildet. Die beschriebene Herangehensweise kann aufgrund des Fortschritts dieser Dissertation bei Veröffentlichung von Hilgers u. a. [2022] nicht berücksichtigt werden.

4 Empirische Analysen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse der Verkehrsdaten des untersuchten Autobahnabschnitts. Die Rohdaten wurden mit Ausnahme der Floating Car Daten von der Autobahn GmbH bereitgestellt. Die Auswertungen dienen dazu, ein Grundverständnis für den Verkehrsfluss auf Autobahnen mit SBA aufzubauen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden als Grundlage für die Modellierung verwendet und zum Teil als Eingabe- und zum Teil als Kalibrierungsgrößen eingesetzt.

4.1 Untersucher Autobahnabschnitt

Für die Untersuchungen wird ein etwa 30 Kilometer langer Autobahnabschnitt der Bundesautobahn 5 (A5) im Bereich Frankfurt am Main betrachtet (siehe Abbildung 4.1). Der Abschnitt verläuft über die Anschlussstelle Friedberg (AS 16), das Bad Homburger Kreuz (AK 17), das Nordwestkreuz Frankfurt (AK 18) und das Westkreuz Frankfurt (AK 19) und wird durch diese Anschlussstellen in insgesamt fünf Segmente unterteilt. Es werden beide Fahrtrichtungen betrachtet. Der Abschnitt ist über die gesamte Länge mit einer SBA ausgestattet, die 35 Mess- und Anzeigequerschnitte in Fahrtrichtung Norden und 34 in Fahrtrichtung Süden beinhaltet. Des Weiteren verfügt er über eine temporäre Seitenstreifenfreigabe zwischen der Anschlussstelle Friedberg und dem Nordwestkreuz Frankfurt, wobei diese in beide Fahrtrichtungen nicht über das Bad Homburger Kreuz hinweg durchgeführt wird. Zusätzlich zu den drei Hauptfahrstreifen kann der Seitenstreifen bei Kapazitätsengpässen temporär über eine Länge von etwa 17 Kilometern je Fahrtrichtung für den Verkehr freigegeben werden.

Die A5 übernimmt im Ballungsraum Frankfurt am Main sowohl eine regionale als auch eine überregionale verkehrliche Funktion. Auf dem untersuchten Abschnitt überlagern sich u. a. Fern-, Fernpendel- und Pendelverkehre. Mit einer maximalen täglichen Verkehrsstärke zwischen etwa 160.000 und 200.000 Kfz/Tag je nach Segment im Jahr 2019 (siehe Tabelle 4.1) stellt die A5 bei Frankfurt einen der höchstbelasteten Autobahnabschnitte in Deutschland dar.

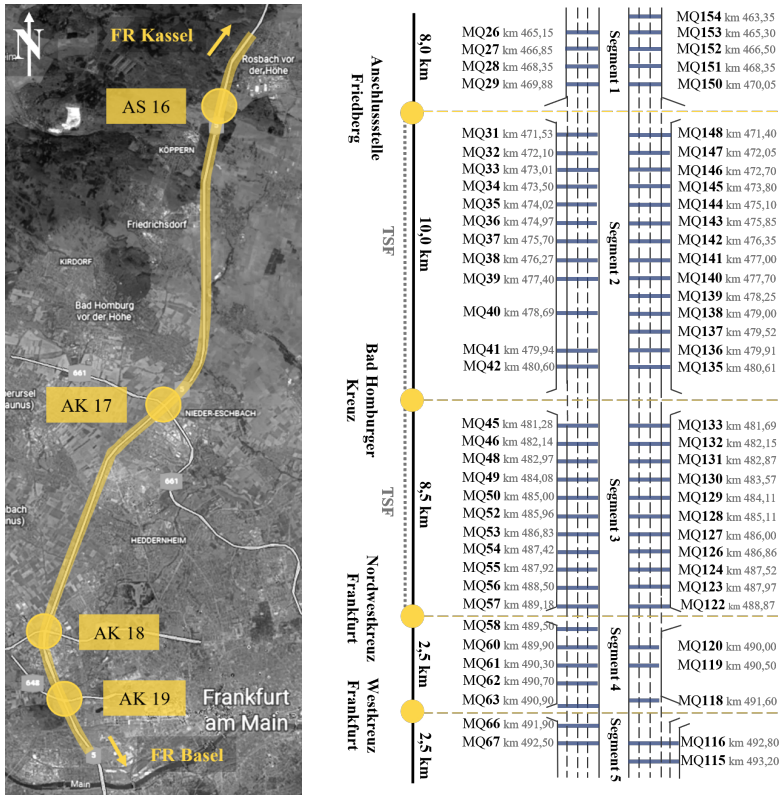


Abbildung 4.1: Untersuchter Autobahnabschnitt der A5

Eine erste Analyse ergibt, dass die beiden Wochen zwischen dem 16. und 29.09.2019 gute Rahmenbedingungen für die Abbildung in der Simulation bieten. In diesem Zeitraum waren keine Feiertage oder Schulferien in Hessen und die Wetterverhältnisse im Raum Frankfurt waren gut. Es gab kaum Regen und die Temperaturen lagen deutlich über dem Gefrierpunkt. Zudem zeigen die Verkehrsdaten in diesem Zeitraum keine Auffälligkeiten.

4.2 Datengrundlage und Datenaufbereitung

Für die Analyse des Verkehrsflusses auf der A5 stehen die folgenden Verkehrsdaten zur Verfügung:

- **Detektordaten der SBA**

Zeitraum: 01.01.2019 - 31.08.2020

Für die insgesamt 79 Messquerschnitte der beiden Fahrrichtungen liegen die von der SBA lokal erfassten Detektordaten für einen Zeitraum von 20 Monaten vor. Die Rohdaten beinhalten für jeden Messquerschnitt und Fahrstreifen minutenfein aggregierte Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten separat für Pkw und Lkw.

Bei der Auswertung der Detektordaten muss zum einen berücksichtigt werden, dass es bei der Detektion zu Messfehlern und Ausfällen kommen kann. Zum anderen unterliegen die Daten ab März 2020 pandemiebedingten Effekten wie bspw. einer Reduktion des Verkehrsaufkommens.

- **Schaltdaten der SBA**

Zeitraum: 15.04.2019 - 05.05.2019 und 16.09.2019 - 29.09.2019

Für die Anzeigequerschnitte der betrachteten SBA liegen die Schaltdaten aus fünf Wochen vor. Die SBA zeichnet die Zeitstempel und Schaltzustände der WZG A, B und C bei jedem Wechsel der Anzeige auf.

- **Einzelfahrzeugdaten (EFZD) inkl. Schaltdaten**

Zeitraum: 29.11.2017 - 07.12.2017

Für zwei Messquerschnitte (MQ 24 und MQ 156) nördlich des untersuchten Autobahnabschnitts liegen Einzelfahrzeugdaten für neun Tage vor. Diese Daten beinhalten sekundenfeine Zeitstempel für jedes am Messquerschnitt erfasste Fahrzeug mit zusätzlichen Informationen zu dem befahrenen Fahrstreifen, der Fahrzeugklasse, der Geschwindigkeit, der Nettozeitlücke und der Länge des Fahrzeugs. Für den Zeitraum liegen ebenfalls die zugehörigen Schaltdaten der SBA vor.

- **Typische Tagesganglinien**

Zeitraum: 2021

Für die Segmente 1 bis 4 (siehe Abbildung 4.1) liegen für beide Fahrrichtungen typische Tagesganglinien der Verkehrsstärke in 15-Minuten-Intervallen vor. Die Ganglinien sind separat für alle Wochentage einer Standardwoche angelegt und sind unterteilt in die dreistreifige Hauptfahrbahn und die TSF (wenn vorhanden).

- **FCD**

Zeitraum: 16.09.2019 – 29.09.2019

Es liegen mithilfe eines Map-Matching-Verfahrens bearbeitete FCD für den untersuchten Streckenabschnitt der A5 für einen Zeitraum von zwei Wochen vor. Die Durchdringungsrate der Fahrzeuge beträgt nach eigenen Angaben des Datenlieferanten etwa 3 %. Die Daten beinhalten zeitgestempelte Positionsdaten einzelner Fahrzeuge, u. a. ergänzt durch die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Fahrtrichtung.

Zur Aufbereitung der Detektordaten wird zunächst eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Fehlerhafte Daten werden ermittelt und die entsprechenden Einträge werden gekennzeichnet. Anschließend wird eine einheitliche Nummerierung für die Fahrstreifen eingeführt, da die Bezeichnungen aufgrund von unterschiedlichen Technikständen der A5-Anlage variieren. Des Weiteren werden die Daten um Informationen zur Jahreszeit, Schulferien, Wochentag und Tageszeit (vor oder nach Sonnenuntergang) ergänzt. Vergleichbar mit der Datenaufbereitung des SARAH-Steuerungsmodells (siehe Kapitel 2.4.2) werden weitere verkehrliche Kenngrößen wie bspw. die mittlere Kfz-Geschwindigkeit, die Bemessungsverkehrsstärke oder

die lokale Verkehrsdichte berechnet. Diese Kenngrößen werden sowohl fahrstreifenbezogen als auch richtungsbezogen ermittelt. Da die Daten der Prismenwender zur Öffnung und Schließung der TSF im Rahmen dieser Dissertation nicht vorliegen, werden im nächsten Schritt anhand der Detektordaten Zeiträume ermittelt, in denen eine Freigabe des Seitenstreifens vorliegt. Zur Vermeidung von falschen Freigabe-Erkennungen wird als Bedingung definiert, dass mindestens 30 Minuten lang Verkehr auf dem Seitenstreifen detektiert werden muss. Schließlich werden die minutenfeinen Daten zu 5- und 60-Minuten-Intervallen zusammengefasst, da verschiedene Aggregationsstufen je nach Auswertung sinnvoll sind.

Die Aufbereitung der Schaltdaten beginnt ebenfalls mit einer Plausibilitätsprüfung. Nicht einheitliche Bezeichnungen für Schaltbilder werden korrigiert, hiervon sind vor allem die Warnungen der B- und C-WZG betroffen. Die Schaltbilder, die in Form von Text in den Daten hinterlegt sind, werden anschließend für eine einfachere Weiterverarbeitung codiert. Des Weiteren enthalten die Schaltdaten zum Teil mehrere Einträge pro Anzeigequerschnitt und Minutenintervall. Eine Sichtung dieser Einträge führt zu dem Schluss, dass innerhalb einer Iteration mehrere Schritte des Steuerungsmodells ihre Ergebnisse in das Protokoll der Schaltdaten schreiben. So sind bspw. Einträge für die restriktivste Schaltforderung und für den anschließenden Längs- und Querabgleich vorhanden, wenn diese voneinander abweichen. Hier ist die Wahl des letzten Eintrags für ein Minutenintervall zielführend. Zur Validierung der Vorgehensweise wird überprüft, ob der Querabgleich für die ausgewählten Einträge Fehler ergibt. Lediglich 0,01 % der Daten weisen Unstimmigkeiten beim Querabgleich auf und bei allen dieser Fälle handelt es sich um Handschaltungen bedingt durch Sondersituationen wie bspw. eine Fahrstreifensperrung aufgrund einer Gefahrenwarnung.

Im nächsten Schritt werden die Schaltzeitpunkte der Anzeigenwechsel untersucht. Die Latenz zwischen Datenerfassung und Anzeige der Schaltbilder variiert innerhalb der Anlage und folglich entsprechen die Zeitstempel der Schaltdaten nicht zwangsläufig einer vollen Minute, wie es bei den Detektordaten der Fall ist. Abbildung 4.2 zeigt die Verteilung der Schaltzeitpunkte der Anzeigenwechsel innerhalb eines Minutenintervalls für beide Fahrrichtungen. Datengrundlage sind die Schaltdaten aller Anzeigequerschnitte des untersuchten Abschnitts von fünf

Wochen. Die Verteilungen zeigen, dass sich die Schaltzeitpunkte um die volle Minute herum häufen. Für die Zusammenführung der Detektor- und Schaltdaten ist es notwendig, die Schaltdaten jeweils einem Minutenintervall zuzuordnen. Daher werden Schaltungen, die im ersten Häufungsbereich liegen (Schaltsekunde unterhalb von 30 Sekunden), auf das aktuelle Minutenintervall abgerundet und Schaltungen, die dem zweiten Häufungsbereich angehören (Schaltsekunde oberhalb von 30 Sekunden), auf das nächste Minutenintervall aufgerundet.

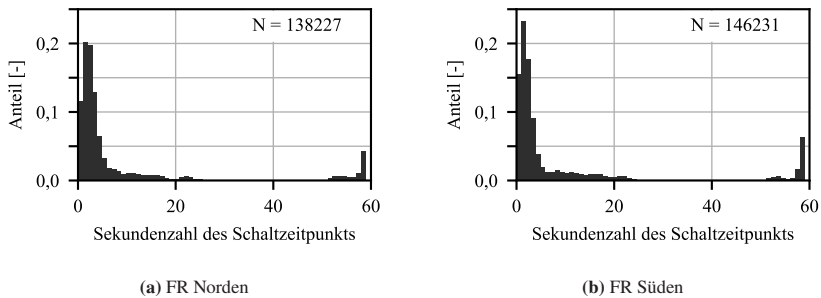


Abbildung 4.2: Schaltzeitpunkte der Anzeigenwechsel innerhalb einer Minute (eigene Darstellungen)

Die Zusammenführung der Detektor- und Schaltdaten erfolgt, indem jedem Eintrag aus den Detektordaten die entsprechenden Schaltdaten zugeordnet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Schaltdaten nicht jedes Zeitintervall, sondern nur die Anzeigenwechsel beinhalten. Zusätzlich beinhalten die Detektordaten fahrestreifenfeine Einträge, während die Schaltdaten jeweils die Anzeigen des gesamten Anzeigequerschnitts umfassen. Daher werden jedem Fahrstreifen die Anzeigen des kompletten Anzeigequerschnitts zugeordnet und die zum jeweiligen Fahrstreifen zugehörige Anzeige separat hinterlegt.

Die Aufbereitung der FCD beginnt mit einer räumlichen Filterung. Die gelieferten Daten beinhalten Fahrzeuge innerhalb eines großzügigen Raumpolygons um den untersuchten Autobahnabschnitt herum im Zeitraum vom 16.09. bis 29.09.2019. Die FCD enthalten daher einen Beifang an Fahrzeugen, die die A5 nicht befahren und somit nicht benötigt werden. Aus diesem Grund werden die FCD mithilfe

eines engräumigeren Raumpolygons gefiltert. Der gefilterte Datensatz enthält etwa 13,5 Millionen Einträge mit insgesamt etwa 118.000 Fahrzeug-IDs.

Im nächsten Schritt folgt die Zuordnung der Fahrzeugtrajektorien zu einer Fahrzeugklasse. Es wird die Annahme getroffen, dass es sich bei Trajektorien, die während ihrer gesamten Fahrt auf der A5 nie schneller als 95 km/h fahren, um Lkw handelt. Alle anderen Trajektorien werden der Klasse Pkw zugeordnet. Fehlerhafte Zuordnungen können auftreten, wenn sich Pkw über ihre gesamte gefahrene Strecke in dichten oder gestauten Verkehrssituationen befinden.

Um eine Abschätzung über die Informationsdichte der FCD zu bekommen, wird das Sendeintervall der Fahrzeuge betrachtet, das den zeitlichen Abstand zwischen zwei Sendepunkten eines Fahrzeugs beschreibt. Abbildung 4.3 zeigt das Sendeintervall der zur Verfügung stehenden FCD. Die Verteilung zeigt zwei Extrema bei 5 und 15 Sekunden Abstand zwischen zwei Sendepunkten. Vereinzelt Fahrzeuge mit sehr hohen Sendeintervallen werden aus dem Datensatz entfernt. Ein Fahrzeug legt je nach Geschwindigkeit und Sendeintervall zwischen 100 m und 600 m zwischen zwei Sendepunkten zurück. Langsamere Fahrzeuge senden somit beim Durchfahren des gleichen Abschnitts mehr Datenpunkte als schnellere Fahrzeuge. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

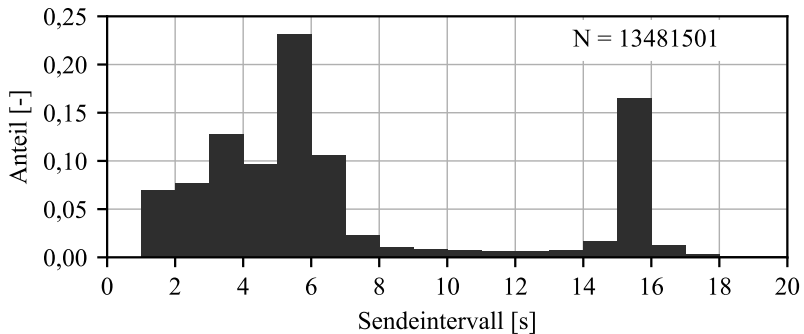


Abbildung 4.3: FCD-Sendeintervalle auf der A5 (eigene Darstellung)

4.3 Verkehrsanalysen

4.3.1 Tagesganglinien und tägliche Verkehrsstärken

Abbildung 4.4 zeigt typische Tagesganglinien basierend auf 15-Minuten-Intervallen für die Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag am Beispiel des Segments 2 für das Jahr 2021. Die typischen Tagesganglinien der Segmente 1 bis 4 sind in Anhang A.2 für alle Wochentage dargestellt. Des Weiteren zeigt Anhang A.2 Wochenganglinien der Verkehrsstärke basierend auf den Detektordaten aus 5-Minuten-Intervallen der Segmente 1 bis 5 für eine Woche. Die Segmente 1 und 2 charakterisieren sich durch jeweils eine Hauptverkehrszeit, die in Fahrtrichtung Süden am Morgen und in Fahrtrichtung Norden am Abend stattfindet. Südlich des Bad Homburger Kreuzes (Segmente 3 bis 5) sind in beide Fahrrichtungen eine morgendliche und abendliche Hauptverkehrszeit vorhanden. Insgesamt ist auf allen Segmenten in Fahrtrichtung Süden die Belastung in der morgendlichen Hauptverkehrszeit ausgeprägter als in der abendlichen. Fahrtrichtung Norden zeigt ein umgekehrtes Verkehrsaufkommen auf, da sie am Nachmittag am stärksten belastet ist. Die Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag weichen insgesamt nur wenig voneinander ab.

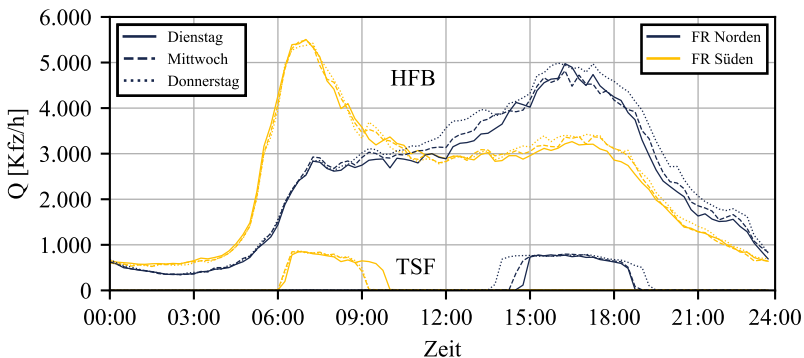


Abbildung 4.4: Typische Tagesganglinien (Di-Mi-Do) 2021 - Segment 2 (eigene Darstellung)

Tabelle 4.1 zeigt den Median und das Maximum der täglichen Verkehrsstärken auf allen Segmenten für die Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag im Jahr 2019.

Tabelle 4.1: Tägliche Verkehrsstärken (Di-Mi-Do) 2019 [Kfz/Tag]

		Segment				
		1	2	3	4	5
FR Norden	Median	42.515	59.001	72.042	70.998	96.608
	Max.	70.374	95.284	88.366	89.661	108.753
FR Süden	Median	49.170	59.870	72.572	64.836	74.868
	Max.	93.853	72.195	83.121	74.878	96.220
beide FR	Median	91.685	118.871	144.614	135.834	171.476
	Max.	164.227	167.479	171.487	164.539	204.973

4.3.2 Verkehrszusammensetzung

Die Verkehrszusammensetzung kann sowohl aus den minutenfeinen Detektordaten der SBA als auch aus den Einzelfahrzeugdaten ermittelt werden. In den Detektordaten wird gemäß den TLS [2012] zwischen den zwei Fahrzeugklassen *Pkw-Ähnliche* und *Lkw-Ähnliche* unterschieden. Die Einzelfahrzeugdaten sind hingegen in 8 + 1 Fahrzeugklassen klassifiziert. Tabelle 4.2 zeigt die Fahrzeugklassifizierung nach TLS [2012].

Abbildung 4.5 beinhaltet die Auswertung des Schwerverkehrsanteils aus den Detektordaten für die Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag für das Jahr 2019. Es ist jeweils der Median der Stundenintervalle abgebildet. Eine Betrachtung des gesamten Autobahnabschnitts zeigt einen ähnlichen Anteil Lkw-ähnlicher Fahrzeuge für beide Fahrrichtungen. Dieser ist in der Nacht am höchsten und

Tabelle 4.2: Fahrzeugklassifizierung nach TLS 2012

2 Fahrzeugklassen	8+1 Fahrzeugklassen
Pkw-Ähnliche	Pkw
	Lieferwagen bis 3,5 t
	Motorräder
	nicht klassifizierbare Fahrzeuge
Lkw-Ähnliche	Sattelkraftfahrzeuge
	Lkw mit Anhänger
	Lkw
	Pkw mit Anhänger
	Busse

hat einen Spitzenwert von etwa 58 %. In der morgendlichen Hauptverkehrszeit liegt der Schwerverkehrsanteil zwischen 15 % und 20 % und in der abendlichen Hauptverkehrszeit zwischen 10 % und 15 %. Die einzelnen Segmente unterscheiden sich jedoch in ihrem Schwerverkehrsaufkommen. In beiden Fahrtrichtungen nimmt der Anteil von Norden (Anschlussstelle Friedberg, Segment 1) nach Süden (Westkreuz Frankfurt, Segment 5) um etwa 10 % ab.

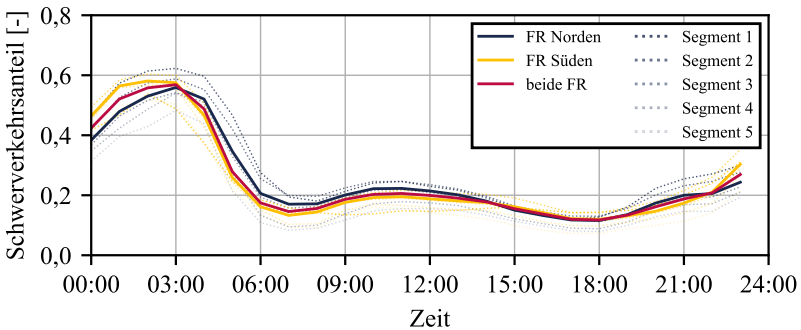
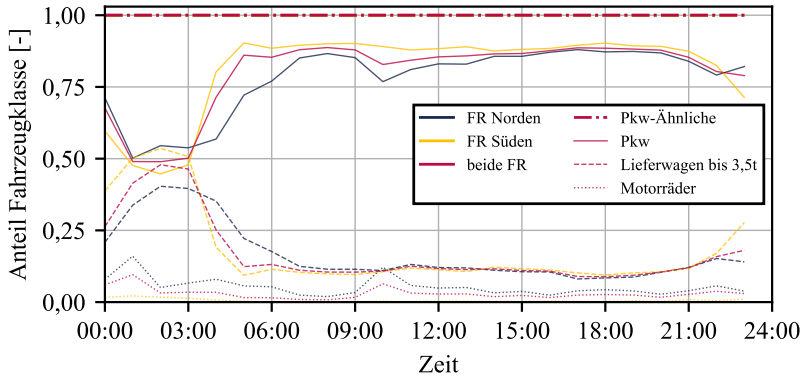
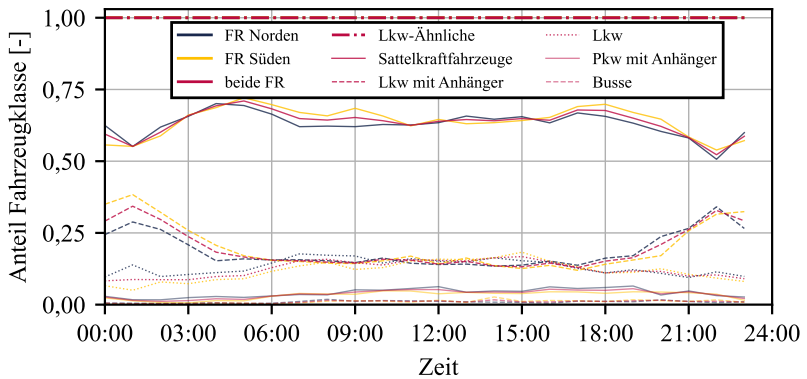


Abbildung 4.5: Schwerverkehrsanteil aus Detektordaten (Di-Mi-Do) 2019 (eigene Darstellung)



(a) Pkw-ähnliche Fahrzeuge



(b) Lkw-ähnliche Fahrzeuge

Abbildung 4.6: Zusammensetzung Pkw- und Lkw-ähnlicher Fahrzeuge aus EFZD (Di-Mi-Do) 2017 (eigene Darstellungen)

Die Auswertung der Einzelfahrzeugdaten ergibt die in Abbildung 4.6 dargestellten Zusammensetzungen der Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeuge nach TLS [2012] für die Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag im Zeitraum vom 29.11. bis 07.12.2017 (insgesamt fünf Tage). Es ist jeweils der Median der Stundenintervalle abgebildet. Tagsüber weichen die Verkehrszusammensetzungen beider

Fahrtrichtungen nur geringfügig voneinander ab. Die Pkw-ähnlichen Fahrzeuge bestehen zu etwa 85 % aus Pkw, 10 % Lieferwagen und 5 % Motorrädern. Die Lkw-ähnlichen Fahrzeuge sind zu etwa 65 % aus Sattelkraftfahrzeugen, jeweils 15 % Lkw und Lkw mit Anhänger und weiteren 5 % Pkw mit Anhängern und Bussen zusammengesetzt.

Eine Gegenüberstellung der Schwerverkehrsanteile aus den Detektordaten und den Einzelfahrzeugdaten erfolgt in Abbildung 4.7 aggregiert für beide Fahrtrichtungen. Tagsüber sind die erfassten Schwerverkehrsanteile nahezu gleich. Nachts beinhalten die Einzelfahrzeugdaten einen höheren Anteil an Schwerverkehr als die Detektordaten der SBA. Mögliche Gründe sind der unterschiedliche Erfassungszeitraum, der Ort der Erfassung oder eine höhere Stochastik aufgrund der kleineren Datenmenge in der Nacht. Nichtsdestotrotz kann aufgrund der guten Übereinstimmung tagsüber davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung der Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeuge aus den Einzelfahrzeugdaten auf die Detektordaten der SBA übertragbar ist.

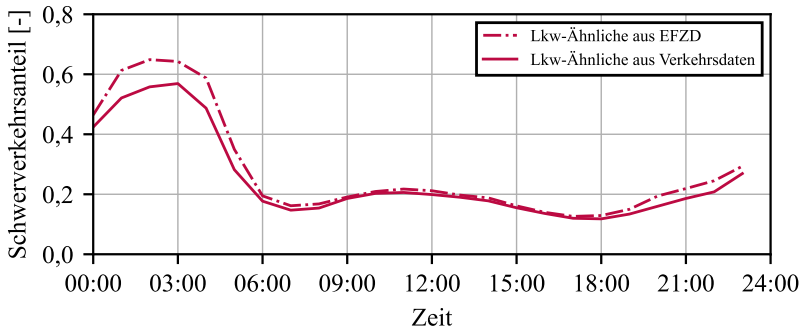


Abbildung 4.7: Schwerverkehrsanteil - Vergleich Detektordaten und EFZD (eigene Darstellung)

Die Problematik von Messfehlern kann gut am Beispiel des Schwerverkehrsanteils verbildlicht werden. Abbildung 4.8 zeigt den Schwerverkehrsanteil auf Segment 2 aus den Detektordaten an einem Tag. In Fahrtrichtung Süden erfassen alle Messquerschnitte auf dem Segment annähernd den gleichen Schwerverkehrsanteil,

während es in Fahrtrichtung Norden an diesem Tag zu großen Abweichungen kommt. Da es zwischen den betrachteten Messquerschnitten keine Ein- oder Ausfahrten gibt und der Verkehr am betrachteten Tag größtenteils frei geflossen ist, können die Abweichungen nur durch Detektionsfehler begründet werden. Auf Messunterschiede zwischen Detektoren wird im Rahmen der Verkehrsbeeinflussung mit einer Anpassung der Parameter des Steuerungsmodells reagiert. Erfasst bspw. ein Messquerschnitt tendenziell zu wenig Lkw, so werden die Schwellenwerte in Bezug auf den Lkw-Anteil reduziert. Dies muss bei der Nachbildung der SBA berücksichtigt werden.

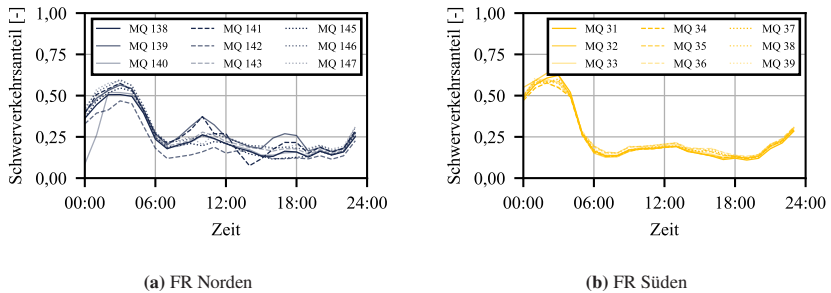
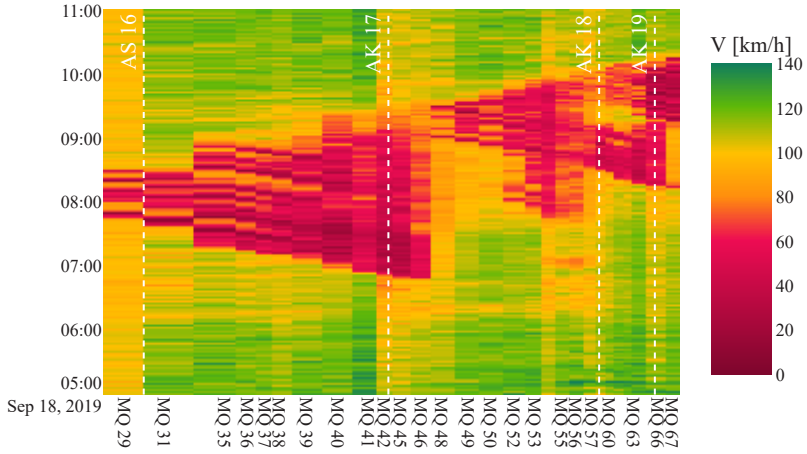


Abbildung 4.8: Messfehler am Beispiel des Schwerverkehrsanteils am 19.09.2019 auf Segment 2 (eigene Darstellungen)

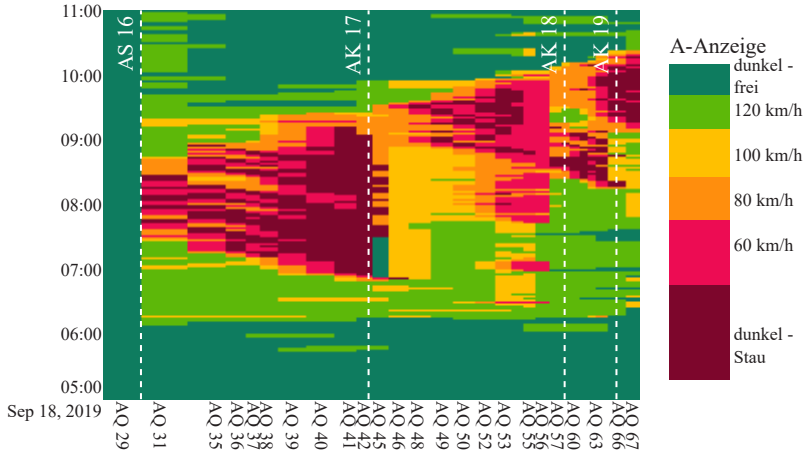
4.3.3 Verkehrszustände

Die Abbildungen 4.9 und 4.10 zeigen die raumzeitlichen Verkehrssituationen in einer charakteristischen Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Süden und Norden. Die Datengrundlage sind minutenfeine Detektor- und Schaltdaten vom 18.09.2019 (Mittwoch). Es sind jeweils die richtungsbezogene mittlere Pkw-Geschwindigkeit und die geschalteten A-Anzeigen dargestellt. Die dazugehörigen B-Anzeigen und die jeweilige Gegenrichtung mit wenig verkehrlichen Beeinträchtigungen sind in Anhang A.3 abgebildet.



Messquerschnitt

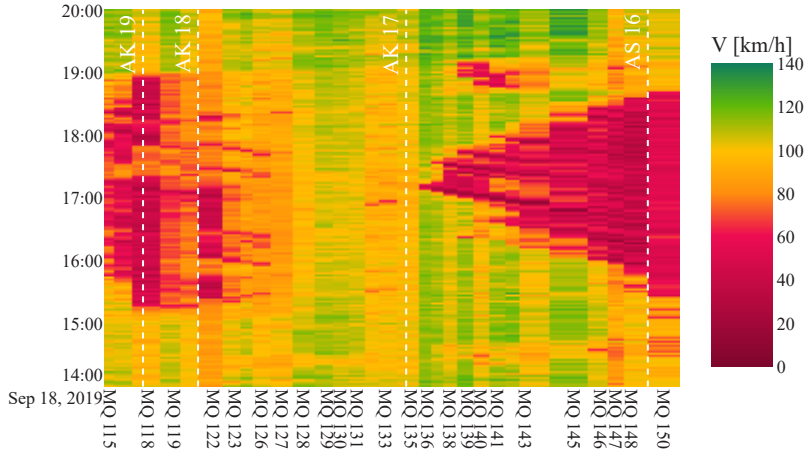
(a) querschnittsbezogene mittlere Pkw-Geschwindigkeit



Anzeigequerschnitt

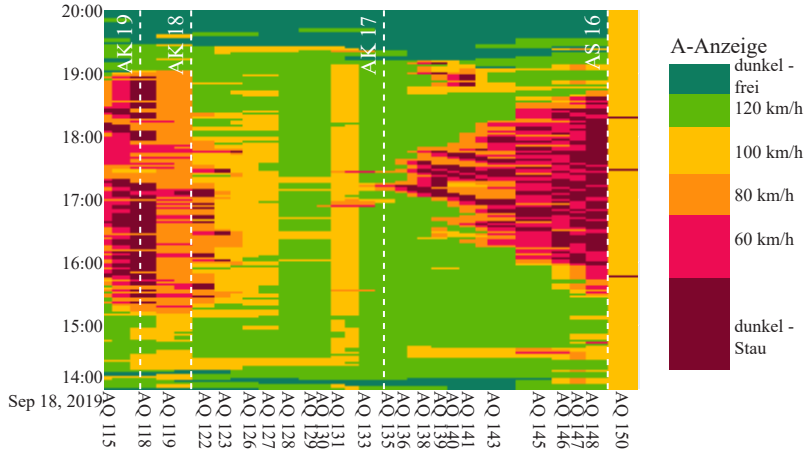
(b) A-Anzeige

Abbildung 4.9: Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Süden - 18.09.2019 vormittags (eigene Darstellungen)



Messquerschnitt

(a) querschnittsbezogene mittlere Pkw-Geschwindigkeit



Anzeigequerschnitt

(b) A-Anzeige

Abbildung 4.10: Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Norden - 18.09.2019 nachmittags (eigene Darstellungen)

Bei der Interpretation der Abbildungen ist zu beachten, dass es sich bei den zugrundeliegenden Daten um lokale Detektordaten handelt, die nicht interpoliert sind. Die raumkontinuierliche Darstellung dieser lokalen Informationen führt dazu, dass die in Realität fließenden Übergänge zwischen verschiedenen Verkehrszuständen nicht richtig abgebildet werden. Je größer der Abstand zwischen zwei Messquerschnitten ist, desto deutlicher wird die Diskrepanz (siehe bspw. Messquerschnitt 31 in Fahrtrichtung Süden). Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass nicht alle Schaltzustände der SBA allein auf die Verkehrssituation zurückzuführen sind. In den zur Verfügung stehenden Schaltdaten sind Handschaltungen identifizierbar, deren Auslösegrund nicht ohne Weiteres nachvollzogen werden kann. Beispiele dafür sind die Dunkelschaltung an Anzeigequerschnitt 29 (siehe Abbildung 4.9b) und die Drosselung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf maximal 100 km/h an Anzeigequerschnitt 150 (siehe Abbildung 4.10b).

Die Verkehrszustände und die Stautentstehungen auf dem untersuchten Abschnitt sind nicht an jedem Tag gleich. Selbst an normalen Werktagen mit ähnlichem Verkehrsaufkommen kann der raumzeitliche Verlauf der Verkehrssituationen aufgrund der stochastischen Eigenschaften des Verkehrsflusses auf Autobahnen variieren. Der untersuchte Autobahnabschnitt charakterisiert sich durch verschiedene Engpässe entlang der Strecke, die, kombiniert mit hohen Verkehrsstärken zu Hauptverkehrszeiten, in hohen lokalen Zusammenbruchwahrscheinlichkeiten resultieren können. So ist die Stautentstehung, -ausbreitung und -auflösung zum Teil zufallsbehaftet. Nicht an jedem normalen Werktag entsteht am gleichen Engpass ein Verkehrszusammenbruch. Die gezeigten Abbildungen stellen Beispiele dar.

Durch die ausgeprägte morgendliche Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Süden (siehe Tagesganglinien in Abbildung 4.4) zeigt sich eine Stautentstehung kurz vor 7:00 Uhr an der südlichen Einfahrt des Bad Homburger Kreuzes (AK 17). Die Verkehrsnachfrage übersteigt die Kapazität der Anschlussstelle, sodass der Verkehr zusammenbricht und sich ein Stau entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet. Gegen 8:30 Uhr beginnt die Stauauflösung aus nördlicher Richtung durch ein sogenanntes *Back Clearing* bedingt durch eine sinkende Verkehrsnachfrage. Ein um etwa 8:30 Uhr am Westkreuz Frankfurt (AK 19) entstandener, auch kapazitätsbedingter Stau löst sich ebenfalls im Zuge dieses *Back Clearing* auf.

Fahrtrichtung Norden hat hingegen eine ausgeprägte nachmittägliche Hauptverkehrszeit, die zu Verkehrsstörungen führen kann. Das Westkreuz und das Nordwestkreuz Frankfurt sind bei hohen Verkehrsstärken überlastet. Staubildungen in diesem Zusammenhang entwickeln sich stromaufwärts über die südliche Grenze des untersuchten Abschnitts hinaus. Es stehen keine Daten der benachbarten Segmente zur Verfügung. Diese Verkehrsstörung charakterisiert sich durch einen Wechsel zwischen Stau mit niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und Phasen mit synchronisiertem Verkehr und Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 80 km/h. Abbildung 4.10 zeigt zusätzlich einen Stau ausgehend von der Anschlussstelle Friedberg. Dieser Stau steht in Zusammenhang mit der Handschaltung auf 100 km/h an dem Anzeigequerschnitt 150. Diese Handschaltung ist in allen vorliegenden Schaltdaten aktiv und es treten regelmäßig Staubildungen im Vorlauf auf. In den B- und C-Anzeigen sind keine Gründe für diese Schaltung dokumentiert. Der Stau löst sich bedingt durch eine Reduktion der Verkehrsnachfrage am Abend auf.

Des Weiteren lassen sich die Verkehrszustände in Abhängigkeit der Schaltbilder mithilfe von Fundamentaldiagrammen veranschaulichen. Die folgenden Auswertungen basieren ebenfalls auf minutenfeinen Daten der SBA, allerdings aus insgesamt fünf Wochen im Jahr 2019, für die ebenfalls die Schaltdaten zur Verfügung stehen. Da das Verkehrsaufkommen und die Verkehrszustände auf den verschiedenen Segmenten sehr unterschiedlich sind, werden diese separat betrachtet.

Abbildung 4.11 zeigt die Verkehrszustände in Abhängigkeit der A-Anzeige am Beispiel von Segment 3 zwischen dem Nordwestkreuz Frankfurt und dem Bad Homburger Kreuz in Fahrtrichtung Norden. Die Detektordaten aller Messquerschnitte auf dem betrachteten Segment werden zusammengefasst und entsprechend der zugehörigen dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkung der A-Anzeige eingefärbt. Es sind richtungsbezogene Verkehrsgrößen dargestellt. Die Werte streuen stark und erreichen hohe Maxima, weil es sich um Daten aus Minutenintervallen handelt. Da die Schaltzustände der SBA minütlich wechseln können, ist eine zeitliche Aggregation der Daten jedoch nicht zielführend.

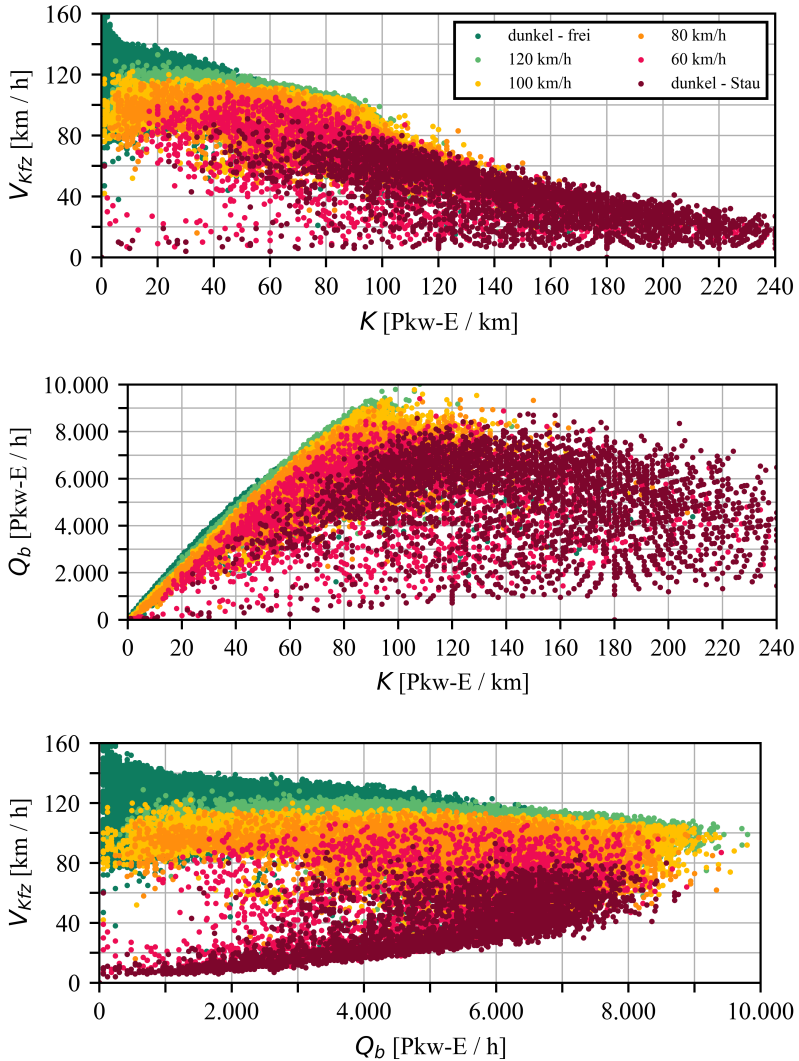


Abbildung 4.11: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Segment 3 in FR Norden (eigene Darstellungen)

Es kommt zu Überlappungen der Verkehrszustände verschiedener Geschwindigkeitsbeschränkungen, weil zum einen die einzelnen Schaltprogramme Ein- und Ausschaltverzögerungen beinhalten und zum anderen SARAH auf fahrstreifenfeinen Schwellenwerten basiert, hier allerdings Querschnittsdaten abgebildet werden. Zusätzlich kann es zu Überschreibungen der angeforderten Schaltbilder aufgrund eines Längsabgleichs (bspw. durch einen Geschwindigkeitstrichter) kommen.

Abbildung 4.11 verdeutlicht die Funktionsweise des SARAH-Steuerungsmodells und den resultierenden Zusammenhang zwischen der Verkehrssituation und der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkung. Mit zunehmender Verkehrsdichte und -stärke und mit sinkender mittlerer Geschwindigkeit werden die dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen restriktiver.

Die Abbildungen 4.12 und 4.13 geben einen detaillierten Einblick in die einzelnen Geschwindigkeitsbeschränkungen. In allen Abbildungen ist dabei die höchstzulässige Geschwindigkeit bzw. die Richtgeschwindigkeit als Linie dargestellt. Bei der Interpretation der Abbildungen sind vor allem zwei Aspekte interessant. Ein Datenpunkt mit bestimmten verkehrlichen Eigenschaften kann die Ursache für eine Änderung der Schaltbilder sein und gleichzeitig kann eine Anpassung des Geschwindigkeitsverhaltens aufgrund der Schaltung stattfinden. Um die Auswirkungen der Verkehrsbeeinflussung von den verkehrlichen Einflüssen zu unterscheiden, müssten Vergleichsdaten bei ausgeschalteter SBA vorliegen. Zum anderen sind hier mittlere Kfz-Geschwindigkeiten dargestellt. Da die Lkw-Geschwindigkeiten bei hohen Pkw-Geschwindigkeiten einen senkenden Effekt haben, könnte es zu einer Fehleinschätzung der Verkehrszustände bei Geschwindigkeitsbeschränkungen von 120 km/h und 100 km/h kommen. In Anhang A.3 sind deshalb zusätzlich die mittleren Pkw- und Lkw-Geschwindigkeiten separat abgebildet.

Die Dunkelschaltung bei freier Fahrt kommt in einem vergleichsweise schmalen Dichtebereich zum Einsatz. Mittlere Pkw-Geschwindigkeiten oberhalb von 140 km/h in einem Minutenintervall treten dabei bis zu einer Verkehrsstärke von etwa 2.000 Pkw-E/h auf. Sehr hohe Geschwindigkeiten einzelner Fahrzeuge sind durch die Aggregation der Daten nicht unmittelbar sichtbar.

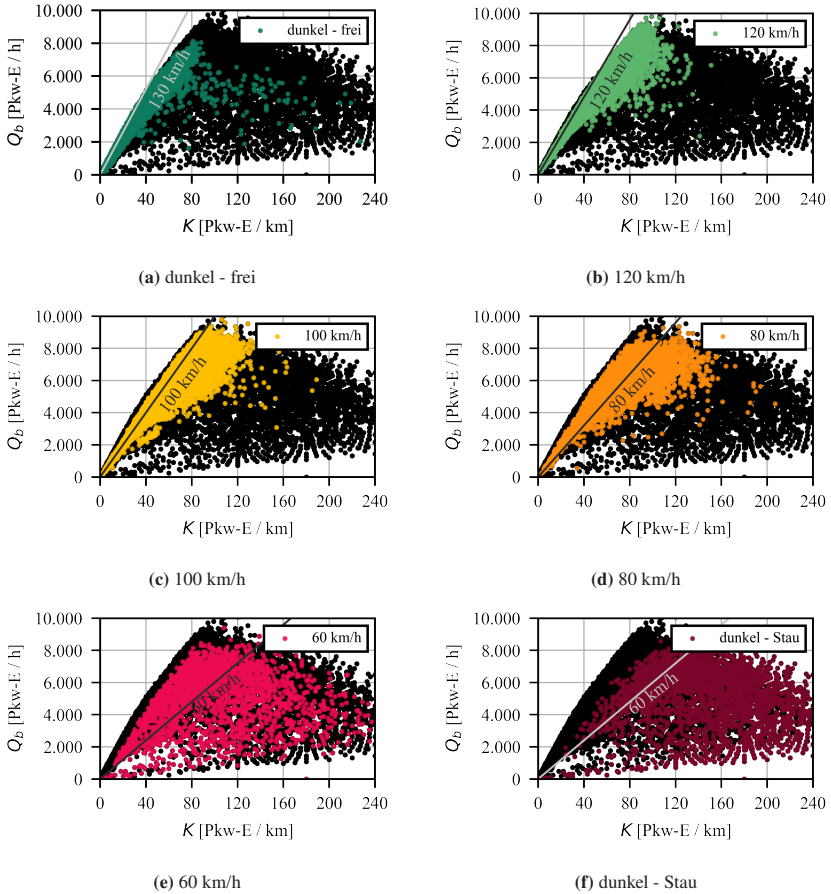


Abbildung 4.12: k-q-Diagramme in Abhängigkeit der A-Anzeige auf Segment 3 in FR Norden (eigene Darstellungen)

Die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h kommt für die Harmonisierung 120 und in Geschwindigkeitstrichtern zum Einsatz. Die Abbildungen zeigen, dass das Geschwindigkeitsniveau bei einer Beschränkung auf 120 km/h größtenteils unterhalb von 120 km/h liegt. Das Geschwindigkeitsniveau im Zuge der

Harmonisierung 120 unterstreicht, dass das Schaltprogramm auch Verkehrsteilnehmende zu einer schnelleren Geschwindigkeit animieren soll, um den Verkehrsfluss zu verbessern.

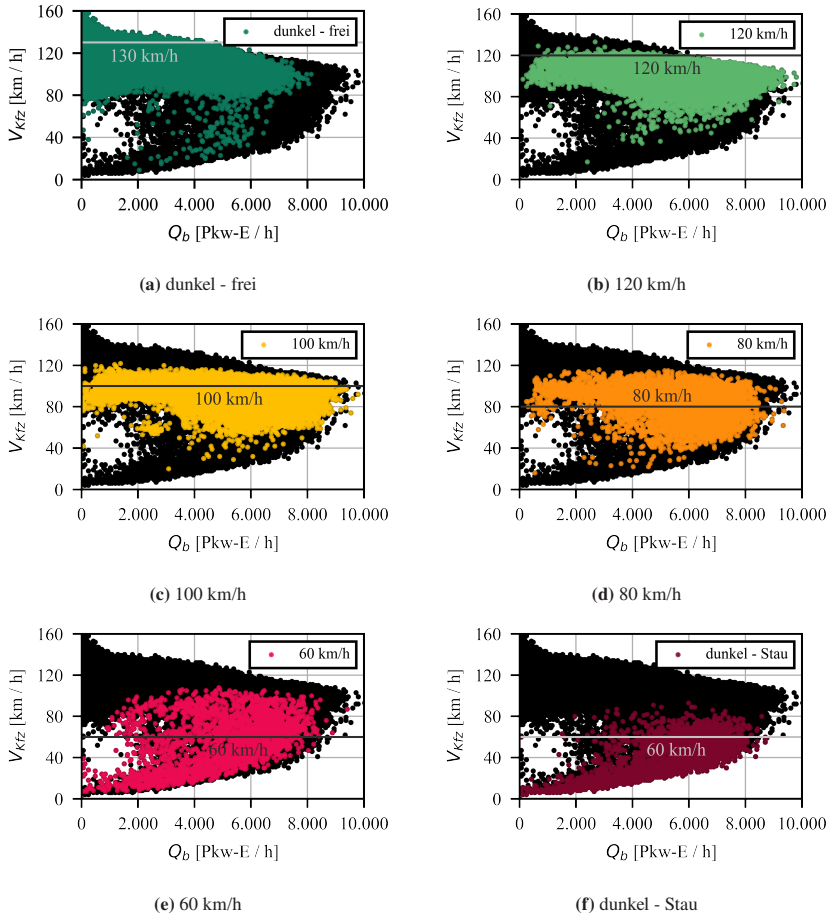


Abbildung 4.13: q-v-Diagramme in Abhängigkeit der A-Anzeige auf Segment 3 in FR Norden (eigene Darstellungen)

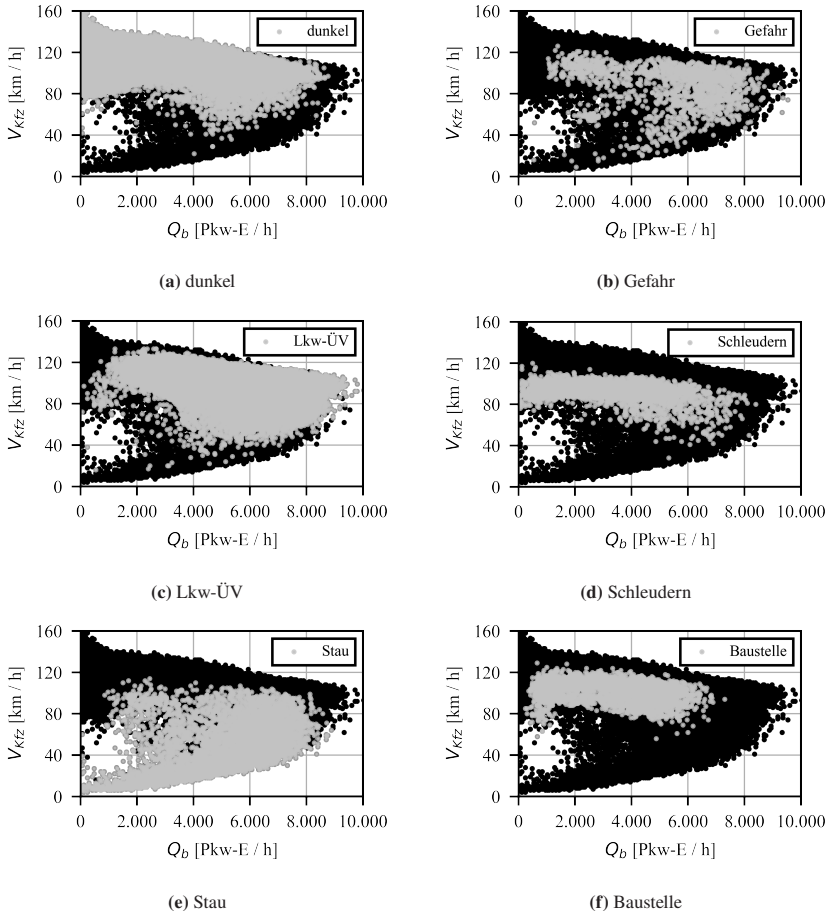


Abbildung 4.14: q-v-Diagramme in Abhängigkeit der B-Anzeige auf Segment 3 in FR Norden (eigene Darstellungen)

Die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h kommt für die Harmonisierung 100 und in der Stauauflösung zum Einsatz. Auf 80 km/h wird im Rahmen

der Harmonisierung 80 und im Geschwindigkeitstrichter im Zufluss eines Staubeereichs beschränkt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Geschwindigkeitsüberschreitungen mit der Verschärfung der Geschwindigkeitsbeschränkungen zunehmen.

Die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h wird im Geschwindigkeitstrichter von Staus geschaltet. Die mittleren Geschwindigkeiten streuen bei dieser Anzeige stark, was auf unterschiedliche verkehrliche Bedingungen im Vorlauf von Staus zurückzuführen ist. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmenden abnimmt, wenn kein sichtbarer Zusammenhang zwischen der Verkehrssituation und der Anzeige vorliegt. Denkbar ist daher, dass Stauwarnungen ohne sichtbaren Stau nicht gut befolgt werden.

Abbildung 4.14 zeigt die Verkehrszustände bei verschiedenen B-Anzeigen. Die Anzeigen *dunkel*, *Lkw-Überholverbot* und *Stauwarnung* stehen im Zusammenhang zur Verkehrssituation und sind in einem bestimmten Bereich des q-v-Diagramms vorzufinden. Die Anzeigen *Gefahr*, *Schleudern* und *Baustelle* werden von äußeren Einflüssen ausgelöst und sind daher nicht eindeutig zuzuordnen. Sie gehen mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung einher und eine entsprechende Reduktion des Geschwindigkeitsniveaus ist gut in den Abbildungen erkennbar.

4.3.4 Fahrstreifenaufteilung

Abbildung 4.15 zeigt die Fahrstreifenaufteilung des untersuchten Abschnitts aggregiert für die Messquerschnitte beider Fahrrichtungen. Messquerschnitte in der Nähe von Ein- und Ausfahrten werden nicht betrachtet, da die Fahrstreifenwahl zum Teil von der Route beeinflusst wird. Alle Auswertungen in diesem Unterkapitel basieren auf minutenfeinen Daten der SBA aus fünf Wochen im Jahr 2019, für die ebenfalls Schaltdaten zur Verfügung stehen. Die Abbildungen zeigen für jeden Fahrstreifen den Median des relativen Verkehrsstärkeanteils des jeweiligen Fahrstreifens aus allen betrachteten Zeitintervallen. Die Aufteilung der Verkehrsstärke zwischen den Fahrstreifen wird in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke am Messquerschnitt durchgeführt. Dabei werden alle Messwerte innerhalb einer

Klassenbreite von jeweils 200 Pkw-E/h zusammengefasst. Eine Klasse muss mindestens 80 Einträge haben, um betrachtet zu werden. Es gehen ausschließlich Zeitintervalle mit einer mittleren querschnittsbezogenen Kfz-Geschwindigkeit über 70 km/h in die Auswertungen ein. Die Daten von allen dreistreifigen Querschnitten (ohne TSF oder mit geschlossenem Seitenstreifen) und allen vierstreifigen Querschnitten (dreistreifige Hauptfahrbahn mit zusätzlich geöffnetem Seitenstreifen) werden jeweils zusammengefasst. Fahrstreifen 1 (FS1) entspricht jeweils dem rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn.

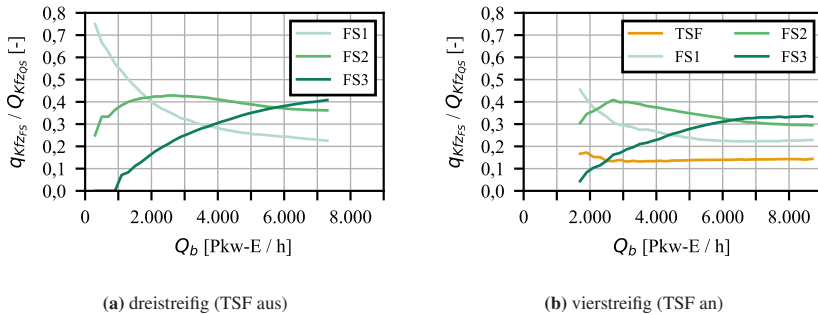
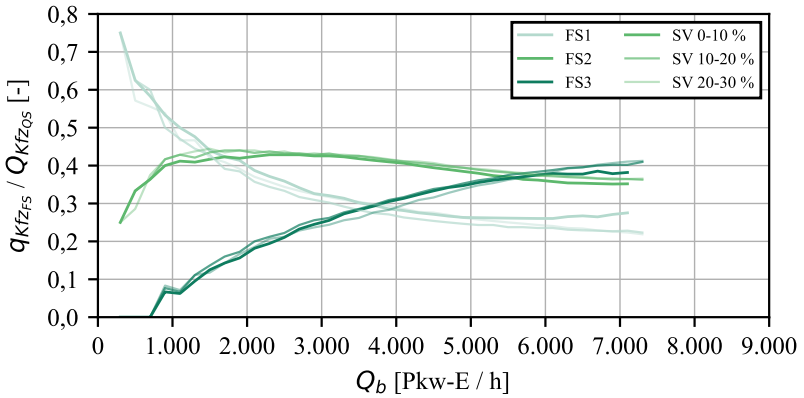


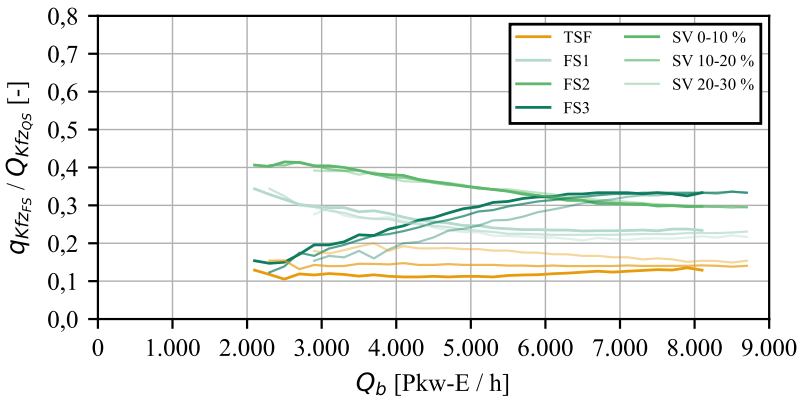
Abbildung 4.15: Fahrstreifenaufteilung auf der A5 (eigene Darstellungen)

Die Fahrstreifenaufteilung auf der A5 entspricht einer typischen in der Literatur beschriebenen Aufteilung für beeinflussten Autobahnverkehr mit Rechtsfahrgebot. Die Mehrheit der Verkehrsteilnehmenden bewegt sich bei geringen Verkehrsstärken auf dem rechten Fahrstreifen fort, während bei hohen Verkehrsstärken der größte Anteil auf dem linken Fahrstreifen fährt. Die Fahrstreifenaufteilung bleibt ab einer gewissen Verkehrsstärke konstant. Auf der A5 tritt diese konstante Aufteilung ab etwa 6.500 Pkw-E/h ein und liegt für dreistreifige Querschnitte bei etwa 25 % auf dem rechten Fahrstreifen, 36 % auf dem mittleren Fahrstreifen und 39 % auf dem linken Fahrstreifen. Die geringere Auslastung des rechten Fahrstreifens ist darauf zurückzuführen, dass dieser größtenteils von langsameren Lkw benutzt wird und wegen der i. d. R. großen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Pkw und

Lkw unattraktiv für Pkw ist. Zudem nehmen Lkw aufgrund ihrer Länge eine größere Bruttozeitlücke ein. Die in etwa gleichmäßige Auslastung von Fahrstreifen 2 und 3 ist auf Harmonisierungseffekte der SBA zurückzuführen.

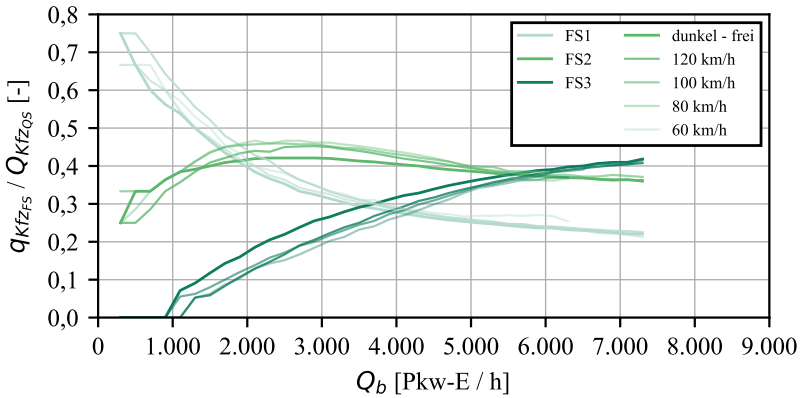


(a) dreistreifig (TSF aus)

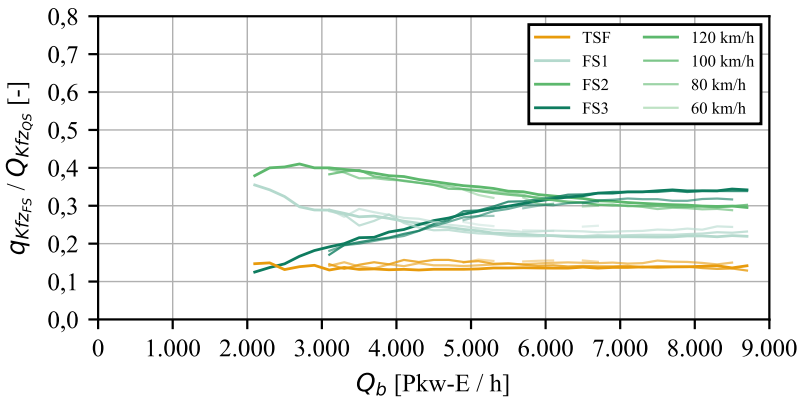


(b) vierstreifig (TSF an)

Abbildung 4.16: Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit des Schwerverkehrsanteils (eigene Darstellungen)



(a) dreistreifig (TSF aus)

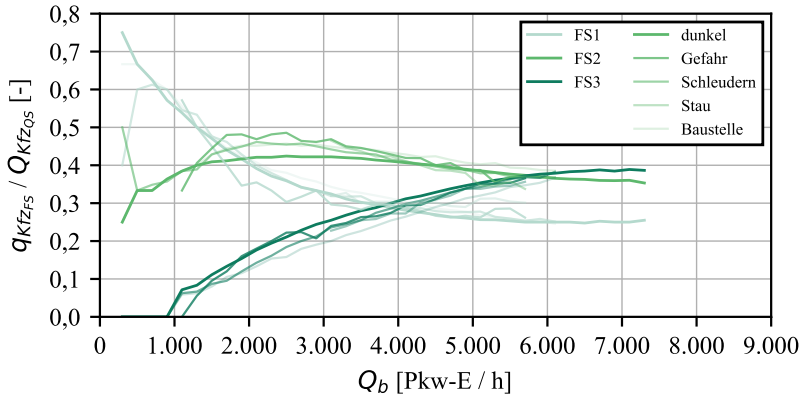


(b) vierstreifig (TSF an)

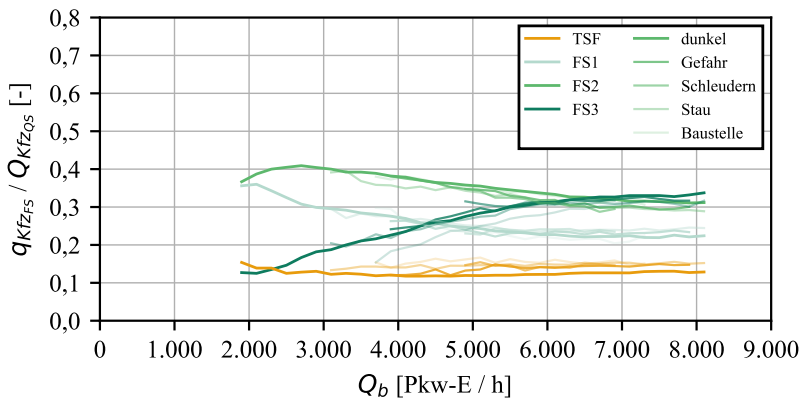
Abbildung 4.17: Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit der A-Anzeige (eigene Darstellungen)

Abbildung 4.16 zeigt die Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit des Schwerverkehrsanteils. Mit zunehmendem Anteil (heller werdende Kurven) nimmt der Anteil des Verkehrs auf dem rechten Fahrstreifen etwas ab, da immer mehr Lkw auf dem rechten Fahrstreifen fahren und damit die Attraktivität für Pkw weiter

sinkt. Pkw weichen nach links aus, um möglichst nah an ihrer Wunschgeschwindigkeit zu bleiben. Bei geöffnetem Seitenstreifen nimmt dessen Auslastung mit steigendem Schwerververkehrsanteil deutlich zu. Abbildung 4.16b bestätigt somit die aus der Literatur bekannte hohe Akzeptanz der TSF durch die Lkw-Fahrenden.



(a) dreistreifig (TSF aus)



(b) vierstreifig (TSF an)

Abbildung 4.18: Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit der B-Anzeige (eigene Darstellungen)

Abbildung 4.17 zeigt die Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkung. Je restriktiver die Geschwindigkeitsbeschränkung (heller werdende Kurven), desto weiter verlagert sich der Verkehr vom linken auf den mittleren und rechten Fahrstreifen. Diese Verlagerung ist bei geringen und mittleren Verkehrsstärken am deutlichsten und zeugt von einer Reduktion der schnellen Linksfahrenden und damit von einer Abnahme der Geschwindigkeitsstreuungen.

Dieser Effekt ist auch in den vierstreifigen Bereichen sichtbar. Aufgrund der allgemein hohen Verkehrsstärke bei geöffnetem Seitenstreifen sind weniger Möglichkeiten zur Fahrstreifenwahl vorhanden, wodurch ein geringeres Verlagerungspotenzial besteht. Da bei geöffnetem Seitenstreifen die zulässige Höchstgeschwindigkeit immer beschränkt wird, enthält Abbildung 4.17b keine Daten für eine Dunkelschaltung. Zusätzlich gibt es nur wenige Daten für eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h, da bei dieser Schaltung i. d. R. der Verkehr nicht mehr frei fließt und die Daten somit für die Auswertungen herausgefiltert werden.

Abbildung 4.18 zeigt die Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit der angezeigten Gefahrenwarnung. Aufgrund der zum Teil geringen Datenmenge ist der Kurvenverlauf nicht für alle Gefahrenwarnungen sinnvoll interpretierbar. Im Allgemeinen verlagert sich der Verkehr bei Anzeige einer Gefahrenwarnung vom linken auf den mittleren Fahrstreifen. In vierstreifigen Bereichen nimmt die Verkehrsstärke auf dem Seitenstreifen und dem rechten Fahrstreifen zu. Es muss berücksichtigt werden, dass die Schaltung einer Gefahrenwarnung immer mit der Anzeige einer Geschwindigkeitsbeschränkung einhergeht.

4.3.5 Abstandsverhalten

Das Abstandsverhalten der Verkehrsteilnehmenden auf der A5 wird mithilfe der vorliegenden Einzelfahrzeugdaten untersucht. Für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation sind Informationen zum Folgeverhalten wichtig. Folgevorgänge sind jedoch sehr individuell und können nur schwer aus lokal erfassten Einzelfahrzeugdaten ermittelt werden. Auch die Unterscheidung zwischen Folge- und

Annäherungsvorgängen ist schwierig. Diese Thematik wird in Kapitel 3.4 im Rahmen der Wunschgeschwindigkeitsermittlung behandelt.

Da Folgevorgänge nicht ohne Weiteres untersucht werden können, werden stattdessen Nettozeitlücken betrachtet, die ausreichend klein sind, um von einem bewussten Fahrverhalten ausgehen zu können. Eine Grenze von fünf Sekunden wird gewählt, da bei Autobahnverkehr sichergestellt ist, dass Verkehrsteilnehmende mit einer Zeitlücke kleiner als fünf Sekunden ihr jeweiliges Vorderfahrzeug wahrgenommen haben und sich entweder annähern oder sich bereits im Folgevorgang befinden. Zusätzlich wird lediglich fließender Verkehr mit einer mittleren querschnittsbezogenen Kfz-Geschwindigkeit über 70 km/h im Minutenintervall betrachtet. Der zunächst etwa 770.000 Einträge beinhaltende Datensatz wird durch die Filterung der maximalen Nettozeitlücke und der minimalen Kfz-Geschwindigkeit auf etwa 550.000 Einträge reduziert. Abbildung 4.19 zeigt die Verteilung der Nettozeitlücken der verbleibenden Daten.

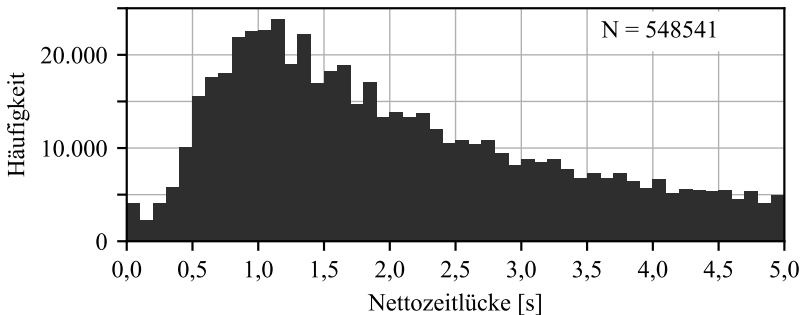


Abbildung 4.19: Verteilung der Nettozeitlücken kleiner fünf Sekunden (eigene Darstellung)

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Einzelfahrzeugdaten in verschiedenen Verkehrssituationen erfasst wurden und nicht ohne Weiteres vergleichbar sind. Um sicherzustellen, dass die Zeitlücken in einer ähnlichen Verkehrssituation entstanden sind, werden die Daten in Abhängigkeit der querschnittsbezogenen Verkehrsstärke in Klassen mit einer Klassengröße von 1.000 Pkw-E/h unterteilt. Abbildung 4.20 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Nettozeitlücken

kleiner fünf Sekunden für verschiedene Verkehrsstärkeklassen. Mit zunehmender Verkehrsstärke bilden sich Fahrzeugpuls und der Anteil an Folgevorgängen nimmt zu. Folglich kommen kleine Zeitlücken unter zwei Sekunden öfter vor, während größere Zeitlücken seltener werden.

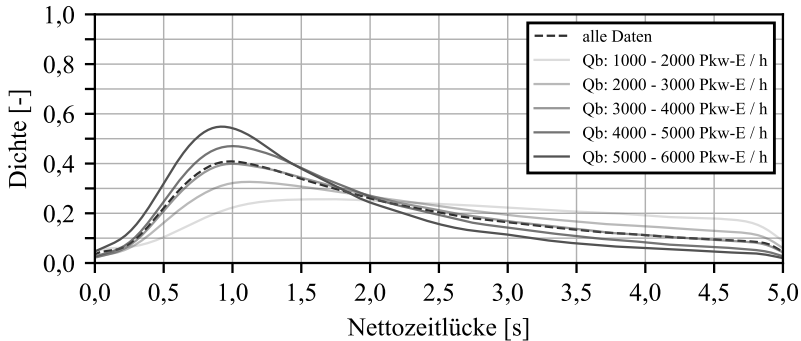


Abbildung 4.20: Nettozeitlücken in Abhängigkeit der Verkehrsstärke (eigene Darstellung)

Eine erste Betrachtung der Zeitlücken aus den Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigt, dass Fahrzeuge mit einer Nettozeitlücke von null Sekunden im Datensatz vorhanden sind. Eine Analyse dieser Daten ergibt, dass es sich bei dem Großteil dieser Fahrzeuge um Motorräder handelt, für die insgesamt sehr kleine Zeitlücken erfasst wurden. Entsprechende Abbildungen sind in Anhang A.4 dargestellt. Denkbar ist, dass die Abstände von Motorrädern in Gruppen bspw. bedingt durch versetztes Fahren innerhalb eines Fahrstreifens nicht richtig erkannt werden. Da die Abbildung von Motorrädern in dieser Dissertation keine Rolle spielt, wird diese Fahrzeugklasse für die weiteren Untersuchungen aus dem Datensatz entfernt.

Abbildung 4.21 (links) zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Nettozeitlücken für die Fahrzeugklassen Pkw und Lkw. Lkw halten größere Zeitlücken als Pkw und deren Verteilung ist sehr ähnlich für alle Verkehrsstärken. Bei den Pkw nehmen die Nettozeitlücken mit zunehmender Verkehrsstärke ab. Das Maximum liegt für alle Klassen bei etwa einer Sekunde. Die Unterteilung in 8 + 1 Fahrzeugklassen nach TLS [2012] ist in Anhang A.4 dargestellt.

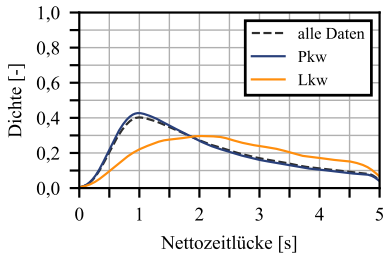
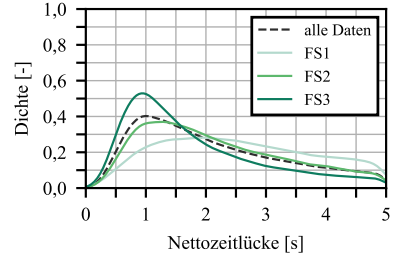
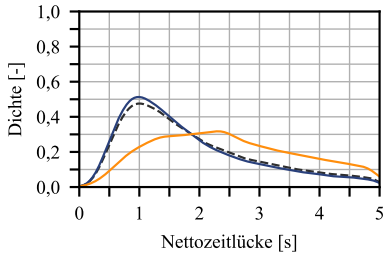
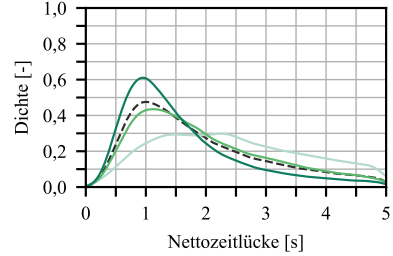
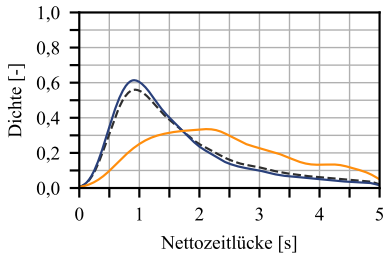
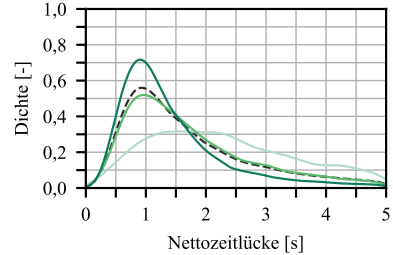
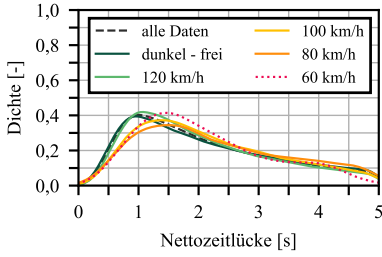
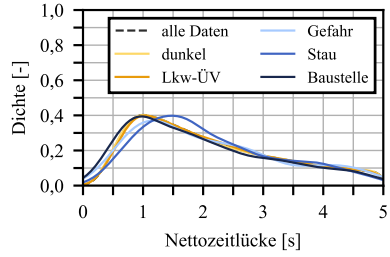
(a) $Q_b = 3000 - 4000$ Pkw-E/h(b) $Q_b = 3000 - 4000$ Pkw-E/h(c) $Q_b = 4000 - 5000$ Pkw-E/h(d) $Q_b = 4000 - 5000$ Pkw-E/h(e) $Q_b = 5000 - 6000$ Pkw-E/h(f) $Q_b = 5000 - 6000$ Pkw-E/h

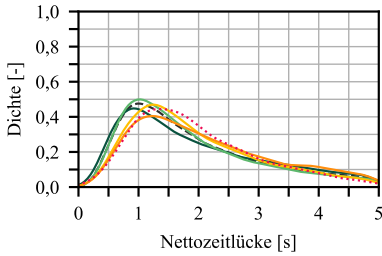
Abbildung 4.21: Nettozeitlücken in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse (links) und des Fahrstreifens (rechts) für verschiedene Verkehrsstärkeklassen (eigene Darstellungen)



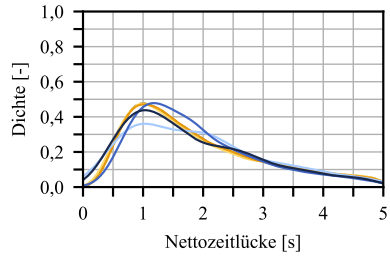
(a) $Q_b = 3000 - 4000$ Pkw-E/h



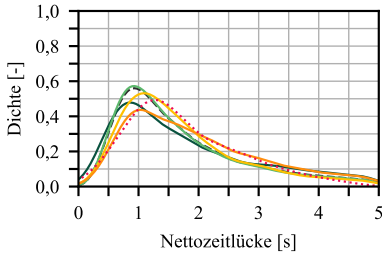
(b) $Q_b = 3000 - 4000$ Pkw-E/h



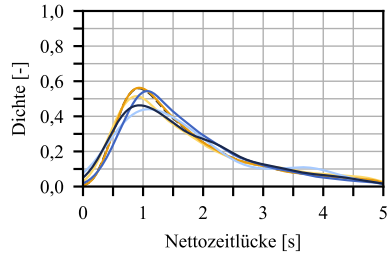
(c) $Q_b = 4000 - 5000$ Pkw-E/h



(d) $Q_b = 4000 - 5000$ Pkw-E/h



(e) $Q_b = 5000 - 6000$ Pkw-E/h



(f) $Q_b = 5000 - 6000$ Pkw-E/h

Abbildung 4.22: Nettozeitlücken in Abhängigkeit der A-Anzeige (links) und B-Anzeige (rechts) für verschiedene Verkehrsstärkeklassen (eigene Darstellungen)

Abbildung 4.21 (rechts) zeigt die Zeitlücken in Abhängigkeit des Fahrstreifens. Die Abbildungen spiegeln die Erkenntnisse aus der vorherigen Untersuchung zur Fahrstreifenaufteilung wider. Da die Verkehrsstärke von rechts nach links zunimmt, nehmen die Zeitlücken ab. Zusätzlich entspricht der Kurvenverlauf auf dem rechten Fahrstreifen (Fahrstreifen 1) annähernd der Dichteverteilung der Lkw-Zeitlücken, da Lkw i. d. R. rechts fahren.

Abbildung 4.22 (links) beinhaltet die Zeitlücken in Abhängigkeit der dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkung. Dabei ist die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h gepunktet dargestellt, weil die zugrunde liegenden Daten nur fließenden Verkehr umfassen, die Beschränkung auf 60 km/h jedoch i. d. R. in Grenzbereichen zu gestauten Verkehrssituationen erfolgt. Die Abbildungen zeigen eine Erhöhung der Zeitlücken bei einer Verschärfung der Geschwindigkeitsbeschränkungen. Dieser Effekt ist für alle Verkehrsstärken sichtbar und lässt auf einen Harmonisierungseffekt der SBA schließen. Die Verkehrsteilnehmenden passen demnach nicht nur ihr Geschwindigkeits- sondern auch ihr Abstandsverhalten aufgrund der dynamischen Anzeigen an. Zusätzlich reduzieren sich bei hohen Verkehrsstärken die gefährlich kleinen Zeitlücken durch die Schaltung von Geschwindigkeitsbeschränkungen. Neben dem Sicherheitsgewinn sind auch hier die Harmonisierungseffekte von Bedeutung.

Abbildung 4.22 (rechts) zeigt die Zeitlücken in Abhängigkeit der B-Anzeigen. Die Auswertungen ergeben eine Erhöhung der Zeitlücken bei der Schaltung einer Gefahren- oder Stauwarnung. Ein Lkw-Überholverbot hat kaum einen Einfluss auf die Zeitlücken. Die Warnung vor einer Baustelle hat hingegen einen negativen Einfluss auf die Zeitlücken, es vermehren sich die gefährlich kleinen Zeitlücken. Auch bei der Schaltung der Gefahrenwarnung erhöht sich der Anteil gefährlich kleiner Zeitlücken. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden auf Baustellen- und Gefahrenwarnungen sehr unterschiedlich sind und die Befolgung der mit den Warnungen einhergehenden Geschwindigkeitsbeschränkungen stark streut, was sich negativ auf die Harmonisierung und die Verkehrssicherheit auswirkt.

Abschließend bleibt anzumerken, dass A- und B-Anzeigen immer in Kombination geschaltet werden und eine Trennung der Effekte dadurch schwierig ist. Des Weiteren sind für eine abschließende Bewertung der Effekte auf die Zeitlücken Vergleichsdaten bei ausgeschalteter SBA notwendig.

4.3.6 Reisezeiten

Die Reisezeiten in den einzelnen Segmenten werden mithilfe der vorliegenden FCD untersucht. Es werden zunächst Anfangs- und Endkoordinaten der Segmente festgelegt. Um diese wird ein Fangradius gelegt und es werden alle Fahrzeuge ermittelt, die ein Segment durchfahren haben. Liegen zwei Datenpunkte desselben Fahrzeugs im Fangradius, wird der Datenpunkt zur Auswertung herangezogen, der am nächsten zum Mittelpunkt liegt. Je kleiner dieser Fangradius, desto genauer ist die Reisezeitmessung für ein Segment. Je größer der Fangradius, desto mehr Fahrzeuge sind jedoch im Datensatz enthalten. Eine Untersuchung und Abwägung beider Aspekte resultiert in der Wahl eines 150 m großen Fangradius. Anschließend werden die Fahrzeug-IDs innerhalb der Anfangs- und Endbereiche verglichen und Übereinstimmungen werden zusammengeführt. Über beide Zeitstempel kann für jedes Fahrzeug die Reisezeit in dem Segment bestimmt werden. Mithilfe der Segmentlänge wird zusätzlich die mittlere Fahrtgeschwindigkeit berechnet.

Es werden die typischen Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag aus den FCD betrachtet, sodass insgesamt eine Datengrundlage von sechs Tagen für die Auswertung zur Verfügung steht. Es resultieren zwischen 5.000 und 6.000 Reisezeiten pro Segment und Fahrtrichtung. Ein Vergleich mit den von der SBA erfassten Fahrzeugen im gleichen Zeitraum in den gleichen Segmenten ergibt eine Durchdringungsrate der FCD zwischen 1 % und 2 % je nach Segment und Fahrtrichtung. Somit handelt es sich um eine sehr kleine Stichprobe, für die zusätzlich aufgrund der unbekanntenen Datenquellen nicht sichergestellt ist, dass sie das Fahrzeugkollektiv auf der A5 repräsentiert. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Da die Fahrtgeschwindigkeit eine anschaulichere Größe als die Reisezeit ist, ist diese in den Abbildungen 4.23 und 4.24 für alle Segmente der beiden Fahrrichtungen dargestellt. Die entsprechenden Reisezeiten sind in Anhang A.5 aufgeführt.

Abgebildet ist die durchschnittliche Fahrtgeschwindigkeit jedes Fahrzeugs zum Zeitpunkt des Verlassens eines Segments. Pkw und Lkw sind separat dargestellt, wobei nur wenige Lkw im Datensatz identifiziert werden konnten. Die Unterteilung in Pkw und Lkw entspricht der in Kapitel 4.2 vorgestellten Methode. Bei dem dargestellten Median handelt es sich um einen gleitenden Median, basierend auf den Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten einer Stunde (30 Minuten vorher und nachher). Die ungleichmäßigen Median-Verläufe, vor allem zu Nachtzeiten, deuten auf die bereits beschriebene Problematik einer geringen Datengrundlage hin.

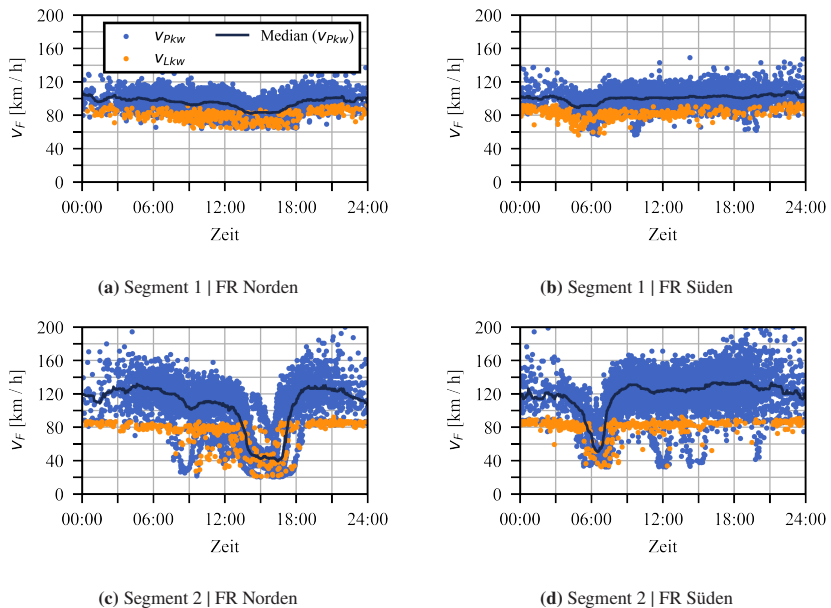


Abbildung 4.23: Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (Di-Mi-Do) - Segmente 1 bis 2 (eigene Darstellungen)

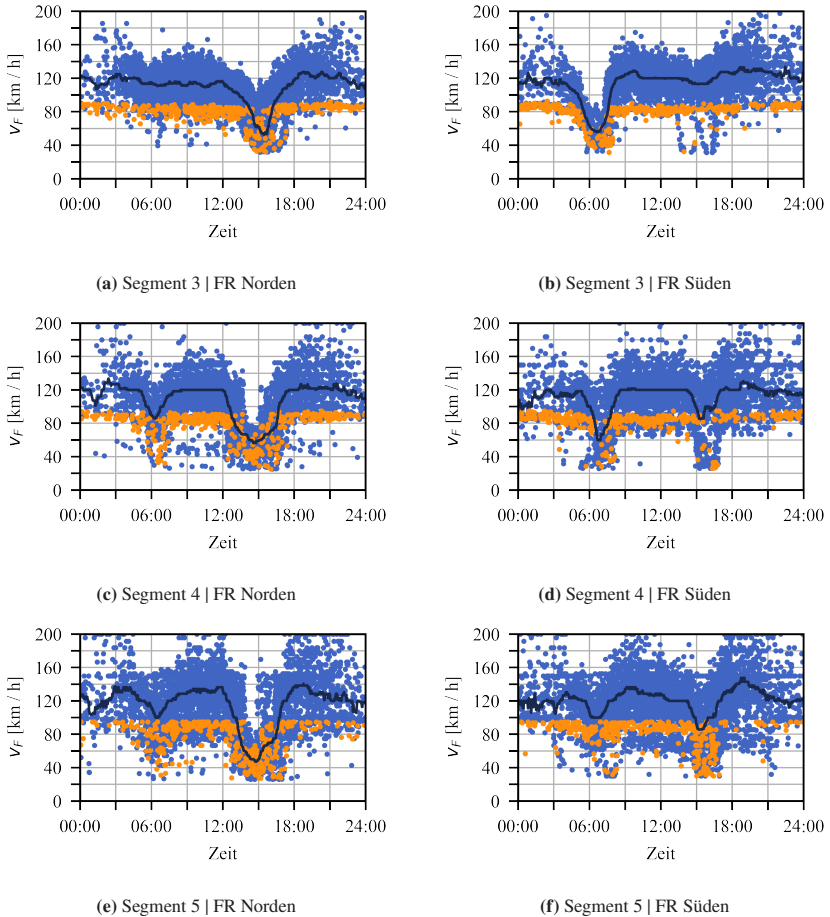


Abbildung 4.24: Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (Di-Mi-Do) - Segmente 3 bis 5 (eigene Darstellungen)

Insgesamt streuen die Fahrtgeschwindigkeiten aus den FCD stark, vor allem in frei fließenden Verkehrssituationen. Die Schwerpunkte der Fahrtgeschwindigkeitseinbrüche liegen auf der morgendlichen Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Süden und auf der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Norden. Dabei

weisen die einzelnen Segmente unterschiedliche Einbruchstärken auf. Nördlich der Anschlussstelle Friedberg (Segment 1) kommt es nur zu wenig verkehrlichen Einschränkungen. Zwischen der Anschlussstelle Friedberg und dem Nordwestkreuz Frankfurt (Segmente 2 und 3) bricht der Verkehr an einem typischen Werktag i. d. R. einmal zusammen. Dabei ist der Stau in Fahrtrichtung Norden ausgeprägter als in Fahrtrichtung Süden. Südlich des Nordwestkreuzes Frankfurt (Segmente 4 und 5) nimmt die Anzahl an Fahrtgeschwindigkeitseinbrüchen zu. In diesen Segmenten sind verkehrliche Auswirkungen in beide Fahrtrichtungen in beiden Hauptverkehrszeiten erkennbar. Fahrtrichtung Norden ist davon stärker betroffen. Hierbei ist zu beachten, dass im Gegensatz zu den Segmenten 2 und 3 die Segmente 4 und 5 sehr kurz und nicht mit einer TSF ausgestattet sind.

Eine separate Betrachtung der zugrundeliegenden typischen Werktage zeigt die bereits in Kapitel 4.3.3 thematisierten Effekte bedingt durch die stochastischen Eigenschaften von Autobahnverkehr. Die entsprechenden Abbildungen sind in Anhang A.5 dargestellt. Die Dauer und Stärke der Verkehrszusammenbrüche variieren zum Teil in den einzelnen Segmenten. Zusätzlich kommt es vereinzelt zu atypischen Verkehrszusammenbrüchen, so bspw. an einem Nachmittag in Segment 3 in Fahrtrichtung Süden (siehe Abbildung 4.24b).

4.4 Temporäre Seitenstreifenfreigabe

Die Öffnung und Schließung des Seitenstreifens wird mithilfe der vorliegenden minutenfeinen Detektordaten der SBA von 20 Monaten analysiert. Da die Bedienung der TSF manuell durch eine:n Operator:in erfolgt, unterliegen die Rahmenbedingungen beim Öffnen und Schließen des Seitenstreifens Schwankungen. Ziel dieser Datenanalyse ist die Beschreibung der menschlichen Entscheidungen in Bezug auf die TSF in Form einer schwellenwertbasierten Schaltlogik. Diese Logik wird anschließend in das Steuerungsmodell integriert und in der Simulation die Rolle der Operator:innen übernehmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Verkehrsbeeinflussung auf der A5 von einer Vielzahl an Operator:innen mit unterschiedlichem Erfahrungsgrad und individuellen Beurteilungsmaßstäben betreut

wird. Die im Rahmen dieser Dissertation eingesetzte TSF-Schaltlogik bildet eine durchschnittliche Entscheidung ab. Es ist nicht der Anspruch, eine Schaltlogik zu entwickeln, die die TSF besser steuert als ein:e Operator:in.

Der betrachtete Autobahnabschnitt verfügt über vier TSF-Segmente (siehe Abbildung 4.1). Tabelle 4.3 führt die Eigenschaften dieser vier Segmente auf. Die Auswertung der Freigabeintervalle zeigt, dass der Seitenstreifen in Fahrtrichtung Norden in Segment 2 etwa 30 % und in Segment 3 etwa 10 % öfter freigegeben wird als in Fahrtrichtung Süden. Aufgrund der typischen Ganglinien der Verkehrsstärke auf dem untersuchten Abschnitt erfolgt die Freigabe in Fahrtrichtung Süden i. d. R. vormittags, während der Seitenstreifen in Fahrtrichtung Norden i. d. R. nachmittags geöffnet wird. In Fahrtrichtung Süden beträgt die mittlere Freigabezeit etwa drei Stunden und beginnt gegen 6:30 Uhr. In Fahrtrichtung Norden beträgt die mittlere Freigabezeit etwa vier Stunden und beginnt gegen 14:30 Uhr.

Tabelle 4.3: Eigenschaften der untersuchten TSF

Segment	Fahrt- richtung	Anzahl MQ	MQ Nummern
2	Norden	13	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148
2	Süden	9	31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39
3	Norden	8	123, 124, 126, 127, 128, 129, 130, 131
3	Süden	6	46, 48, 49, 50, 52, 53

Zunächst werden die fundamentalen Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor der Freigabe bzw. Schließung des Seitenstreifens untersucht, um die Größenordnung der Schwellenwerte zu ermitteln. Eine Aggregation der Messquerschnitte ist für

diese Auswertungen nicht sinnvoll. Zum einen wird der Seitenstreifen immer für ein gesamtes Segment geöffnet, während die Auslösung aufgrund einer lokalen Verkehrssituation bspw. an einer Anschlussstelle erfolgen kann. Zum anderen zeigen die einzelnen Messquerschnitte untereinander große Unterschiede auf, die bei einer Aggregation verloren gehen würden. Die Auswertungen erfolgen mithilfe von Häufigkeitsverteilungen und deren Medianen. Im Folgenden werden die relevantesten Verkehrsgrößen für die TSF-Öffnung und -Schließung am Beispiel von Segment 3 in Fahrrichtung Norden dargestellt.

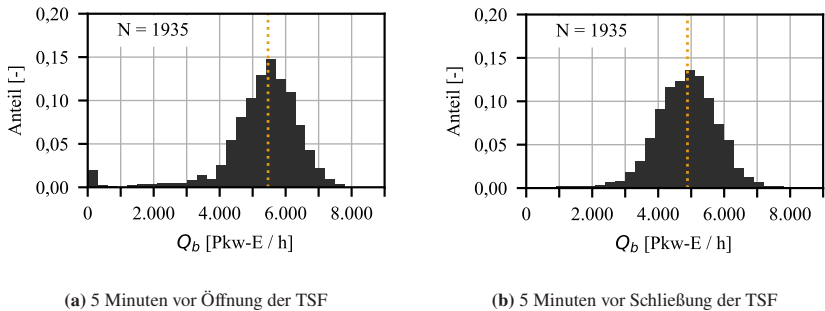


Abbildung 4.25: Häufigkeitsverteilung der Verkehrsstärke an MQ 126 (eigene Darstellungen)

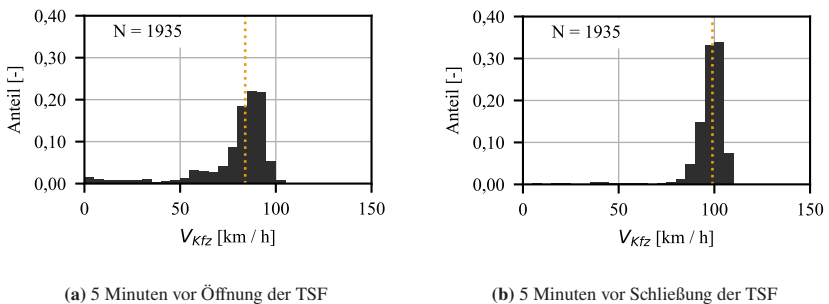
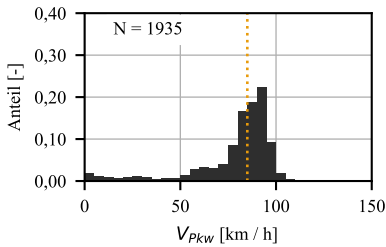
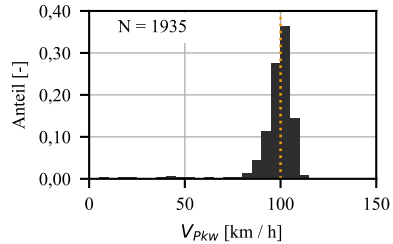


Abbildung 4.26: Häufigkeitsverteilung der mittleren Kfz-Geschwindigkeit an MQ 126 (eigene Darstellungen)

Abbildung 4.25 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der richtungsbezogenen Bemessungsverkehrsstärke für jeweils fünf Minuten vor der TSF-Freigabe (Abbildung 4.25a) bzw. vor der TSF-Schließung (Abbildung 4.25b). Abbildung 4.26 zeigt die mittleren Kfz-Geschwindigkeiten und Abbildung 4.27 stellt die mittleren Pkw-Geschwindigkeiten dar. Abbildung 4.28 präsentiert die Häufigkeitsverteilungen der lokalen Verkehrsdichte. Eine Zusammenstellung der Mediane für alle Messquerschnitte mit TSF befindet sich in Anhang A.6.

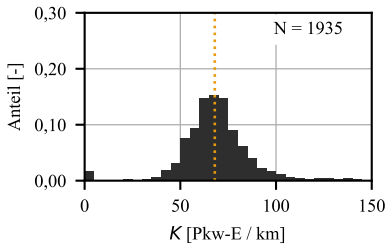


(a) 5 Minuten vor Öffnung der TSF

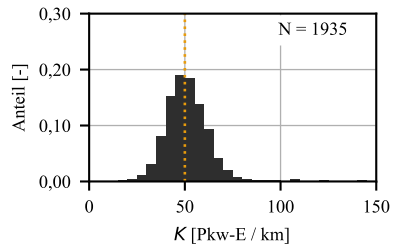


(b) 5 Minuten vor Schließung der TSF

Abbildung 4.27: Häufigkeitsverteilung der mittleren Pkw-Geschwindigkeit an MQ 126 (eigene Darstellungen)



(a) 5 Minuten vor Öffnung der TSF



(b) 5 Minuten vor Schließung der TSF

Abbildung 4.28: Häufigkeitsverteilung der lokalen Verkehrsdichte an MQ 126 (eigene Darstellungen)

Sowohl das MARZ 2018 als auch das SARAH-Steuerungsmodell enthalten schwellenwertbasierte Empfehlungen zur Unterstützung der Operator:innen. Die

aus den Detektordaten ermittelten Mediane werden zunächst mit den SARAH- und MARZ-Schwellenwerten verglichen, wobei sich eine gute Übereinstimmung verdeutlicht. Daher werden die TSF-Programme nach SARAH und MARZ nachgebildet und auf die Detektordaten angewendet. Zusätzlich werden individuelle Logiken untersucht. Diese beinhalten zum einen Schwellenwertanpassungen basierend auf der vorherigen Datenanalyse und zum anderen weitere Kenngrößen zur Steuerung. Die durch die jeweiligen Logiken ermittelten TSF-Öffnungsintervalle werden mit den tatsächlichen Intervallen verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die im folgenden dargestellte Logik, die sich stark an den Schwellenwerten des MARZ orientiert, die beste Übereinstimmung liefert. Individuelle Logiken für einzelne Segmente können die Übereinstimmung leicht verbessern. Aufgrund des geringen Potenzials bei hohem Mehraufwand wird der Ansatz in der weiteren Umsetzung verworfen. Fahrstreifenfeine Schaltlogiken stellen sich als nicht zielführend heraus. Zusätzlich ergeben die Untersuchungen, dass für eine gute Übereinstimmung eine Ein- und Ausschaltverzögerung sowie eine Mindestanzahl an Messquerschnitten, die eine Schaltanforderung stellen, benötigt werden. Die Ein- und Ausschaltverzögerung kann dabei als Reaktions- bzw. Bearbeitungszeit der Operator:innen, bspw. zur Überprüfung der Hindernisfreiheit des Seitenstreifens mittels Videotechnik, interpretiert werden.

Die resultierende TSF-Schaltlogik hat die folgenden Ein- und Ausschaltkriterien:

<i>SKE_{TSF}</i> :	$Q_b \geq 5.500$ Pkw-E/h	
	oder $V_{Pkw} \leq 95$ km/h	und $K \geq 70$ Pkw-E/km
	oder $V_{Kfz} \leq 70$ km/h	
	oder $B > 15$ %	und $V_{Kfz} \leq 90$ km/h
<i>SKA_{TSF}</i> :	$Q_b \leq 4.000$ Pkw-E/h	
	oder $V_{Pkw} \geq 115$ km/h	und $K \leq 40$ Pkw-E/km
	oder $V_{Kfz} \geq 110$ km/h	
	oder $B \leq 10$ %	und $V_{Kfz} \geq 70$ km/h

Zusätzlich ist eine Einschaltverzögerung von acht Minuten hinterlegt und mindestens sechs Messquerschnitte müssen in einem Segment die Freigabe anfordern. Die Ausschaltverzögerung beträgt fünf Minuten und es müssen mindestens vier Messquerschnitte in einem Segment die Schließung anfordern.

4.5 Quelle-Ziel-Beziehungen

Die Quelle-Ziel-Matrix auf dem betrachteten Autobahnabschnitt stellt eine wichtige Größe für eine realitätsnahe Abbildung des Verkehrsflusses dar. Da aus den Detektordaten keine Informationen über die gefahrenen Routen vorliegen, werden zur Analyse der Verflechtungen zum einen das Verkehrsnachfragemodell *PTV Validate* [PTV, 2022c] und zum anderen die FCD herangezogen.

Validate ist ein deutschlandweites Verkehrsnachfragemodell auf Basis von PTV Visum. Im Rahmen dieser Dissertation wird Validate für den Analysezeitraum 2015 verwendet. In Validate ist die Verkehrsnachfrage (separat für Pkw und Lkw) für das gesamte deutsche Hauptstraßennetz für einen typischen Werktag hinterlegt. Eine statische Umlegung dieser Verkehrsnachfrage ergibt die Verflechtungsmatrix für Deutschland für einen solchen typischen Werktag.

Im ersten Schritt werden durch Überlagerung mit typischen Tagesganglinien stündliche Nachfragen berechnet und separat in Validate umgelegt. Aus dem Validate-Modell können anschließend beliebige Teilmodelle ausgeschnitten und untersucht werden. Der betrachtete Autobahnabschnitt wird mitsamt den Ein- und Ausfahrten mittels des in Visum integrierten Teilnetzgenerators aus Validate ausgeschnitten. In Visum werden dabei an allen Schnittpunkten des Teilmodells Quell- und Zielbezirke angelegt und die Verkehrsnachfrage zwischen diesen Bezirken überführt. Das Ergebnis sind stundenfeine, für Pkw und Lkw separate Nachfragematrizen für den untersuchten Abschnitt der A5. Somit stehen als erster Ansatz Quelle-Ziel-Matrizen mit den Verflechtungen aus Validate zur Verfügung.

Darüber hinaus werden die von der SBA erfassten Detektordaten im Nachfragemodell hinterlegt und ein Matrixkorrekturverfahren wird angewendet. Ziel ist es,

von den Verkehrsnachfragematrizen aus *Validate* und den vorliegenden Detektordaten auf die Verkehrsnachfragematrizen des untersuchten Streckenabschnitts aus 2019 zu schließen. Dafür wird das Modul *VStromFuzzy* der PTV angewendet. *VStromFuzzy* schätzt in einem iterativen Verfahren eine neue Nachfragematrix, die die Detektordaten bestmöglich trifft [PTV, 2022b]. Aus diesem zweiten Ansatz stehen nun Quelle-Ziel-Matrizen zur Verfügung, die an die Detektordaten der A5 angepasst sind.

Der dritte Ansatz umfasst eine Auswertung der Fahrtrelationen aus den FCD. Die Herangehensweise entspricht den Beschreibungen aus Kapitel 4.3.6 zur Bestimmung von Reisezeiten aus FCD. Für alle Ein- und Ausfahrten werden die Koordinaten bestimmt und es werden alle Fahrzeuge ermittelt, die innerhalb eines gewissen Fangradius um diese Koordinaten detektiert wurden. Anschließend werden innerhalb der Ein- und Ausfahrbereiche die Fahrzeug-IDs verglichen und Übereinstimmungen zusammengeführt. So kann die Anzahl an Fahrzeugen für jede Relation bestimmt und der relative Anteil ermittelt werden. Aus diesem Ansatz resultieren stundenfeine relative Quelle-Ziel-Matrizen separat für Pkw und Lkw. Es bleibt zu bedenken, dass der Stichprobenumfang der FCD sehr gering ist und dass zusätzlich eine Repräsentation des Fahrzeugkollektivs auf der A5 durch die Daten nicht gewährleistet ist. Dieser letzte Ansatz ist daher von allen drei Ansätzen am kritischsten zu betrachten.

4.6 Datengrundlage für das Verkehrsflussmodell

Die Auswertungen der vorliegenden Daten liefern wertvolle Erkenntnisse zum Verkehrsablauf und zur Wirkung der dynamischen SBA-Anzeigen auf dem untersuchten Autobahnabschnitt, die für die in Kapitel 6 beschriebene Modellierung zum Einsatz kommen.

Die Datenanalysen zeigen, dass die A5 im Bereich Frankfurt hochbelastet ist und dass der Verkehrsfluss sich trotz typischer Tagesganglinien durch stochastische

Effekte charakterisiert. Zusätzlich kommt es immer wieder zu außerordentlichen Ereignissen und Einflüssen (bspw. Unfälle, Witterungsereignisse oder Baustellen), die zu großen Schwankungen im Verkehrsablauf führen können.

Es gilt zunächst einen Werktag in den Detektordaten zu ermitteln, der einen typischen Verkehr auf der A5 darstellt. Die Wochen vom 16. bis 29.09.2019 werden als repräsentative Wochen identifiziert und als Grundlage für die Kalibrierung wird Mittwoch der 18.09.2019 eingesetzt. Die erfassten Verkehrsstärken dieses Tages gehen als Eingangsgrößen in die Kalibrierung ein. Weitere typische Werktage dieses Zeitraums fließen in die Validierung des Modells ein.

Weitere Eingangsgrößen in das Modell sind die ermittelte Verkehrszusammensetzung (siehe Kapitel 4.3.2), die untersuchte TSF-Schaltlogik (siehe Kapitel 4.4) und die erstellten Verflechtungsmatrizen (siehe Kapitel 4.5). Im Verkehrsflussmodell werden die Pkw-ähnlichen Fahrzeugklassen Pkw und Lieferwagen und die Lkw-ähnlichen Fahrzeugklassen Sattelkraftfahrzeuge, Lkw mit Anhänger, Lkw und Busse entsprechend ihren Anteilen aus der Empirie abgebildet. Die untersuchte Schaltlogik zur Abbildung der Öffnung und Schließung der TSF wird im SARA-Steuerungsmodell ergänzt und in der Simulation eingesetzt. Die ermittelten Verflechtungsmatrizen dienen als Eingangsgrößen für die Fahrzeugrouten im Verkehrsflussmodell. Dabei wird untersucht, welche der drei vorliegenden Ansätze den Verkehrsfluss auf der A5 am besten widerspiegelt.

Verkehrliche Größen, die zur Kalibrierung des Modells eingesetzt werden, sind die Verkehrszustände (siehe Kapitel 4.3.3), die Fahrstreifenaufteilung (siehe Kapitel 4.3.4), das Abstandsverhalten (siehe Kapitel 4.3.5) und die Reisezeiten (siehe Kapitel 4.3.6). Die Verkehrszustände dienen zum einen dem besseren Verständnis des Steuerungsmodells und der Befolgung durch die Verkehrsteilnehmenden. Die Untersuchungen tragen somit zu der Plausibilisierung der nachgebildeten Steuerungslogik und der Erstellung eines Akzeptanzmodells (siehe Kapitel 5) bei. Zum anderen werden Fundamentaldiagramme eingesetzt, um den Verkehrsfluss und das Geschwindigkeitsniveau an den einzelnen Messquerschnitten der SBA zu kalibrieren. Die Fahrstreifenaufteilung ist ebenfalls eine Kalibrierungsgröße zur Überprüfung einer realitätsnahen Sortierung der Fahrzeuge auf die Fahrstreifen.

Die empirischen Zeitlücken, die kleiner als fünf Sekunden sind, werden in einem weiteren Kalibrierungsschritt mit den Zeitlücken aus der Simulation verglichen. Das Folgeverhalten in der Simulation kann iterativ angepasst werden, bis die Zeitlückenverteilung kleiner Zeitlücken übereinstimmt. Mithilfe der Reisezeiten wird überprüft, ob die Verkehrsstörungen in den einzelnen Segmenten richtig abgebildet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Reisezeiterhöhungen in Stausituationen zur Orientierung verwendet werden können, die Freifahrtgeschwindigkeiten aber stark streuen und ggfs. nicht repräsentativ sind.

5 Akzeptanzanalysen

Dieses Kapitel befasst sich mit verschiedenen Aspekten der Akzeptanz einer SBA durch die Verkehrsteilnehmenden. Die Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkungen, der TSF und des Lkw-Überholverbots werden mit den von der Autobahn GmbH zur Verfügung gestellten Rohdaten untersucht. Aus den empirischen Erkenntnissen wird ein Akzeptanzmodell hergeleitet, das in Kapitel 6 an das Verkehrsflussmodell gekoppelt wird.

5.1 Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkungen

Das Geschwindigkeitsverhalten auf Autobahnen sowie das Konzept von Wunschgeschwindigkeiten werden in Kapitel 2.2.2 ausführlich thematisiert. Die Akzeptanz der dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen spiegelt sich in den Wunschgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden wider. Eine hohe Akzeptanz bedeutet eine Verhaltensänderung (i. d. R. eine Reduktion der Geschwindigkeit) im Vergleich zu Verkehrssituationen ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilung aller Verkehrsteilnehmenden überschreitet die geltende Höchstgeschwindigkeit bei hoher Akzeptanz nicht oder nur geringfügig. Die resultierende Befolgung zeigt sich in den tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten. Aus den individuellen Wunschgeschwindigkeiten ergeben sich in Kombination mit verkehrsbedingten Einschränkungen Geschwindigkeitsverteilungen. Zunächst werden diese Geschwindigkeitsverteilungen für verschiedene Verkehrssituationen und Schaltbilder untersucht. Anschließend werden die zugrunde liegenden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen geschätzt.

5.1.1 Geschwindigkeitsverteilungen

Zur Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilungen werden die vorliegenden Einzelfahrzeugdaten verwendet. In den Abbildungen in diesem Unterkapitel werden die Daten nach verschiedenen Kriterien gefiltert und die relative Summenhäufigkeit der gefahrenen Geschwindigkeiten dargestellt. Dabei werden zum einen alle Einzelfahrzeugdaten und zum anderen die Daten mit einer Nettozeitlücke größer fünf Sekunden abgebildet. Bei Letzteren kann davon ausgegangen werden, dass sich die Fahrzeuge nicht im Folgevorgang befunden haben und ihre Geschwindigkeit annähernd unbeeinflusst durch Vorfahrende gewählt haben.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass es sich um Verkehrsdaten von neun Tagen und zwei Messquerschnitten handelt und die Datenmenge für manche angewendete Filter klein ist. Die Datengrundlagen für die Geschwindigkeitsverteilungen sind in Anhang A.7.1 aufgeführt. Zudem ist zu bedenken, dass die Lage der Anzeige- und Messquerschnitte übereinstimmen und nicht sichergestellt ist, dass die Verkehrsteilnehmenden bereits beim Erreichen eines Anzeigequerschnitts ihr Geschwindigkeitsverhalten an die ggfs. neue Anzeige angepasst haben. Die Kurven der Summenhäufigkeit zeigen außerdem bei hohen Geschwindigkeiten einen stufigen Verlauf auf. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass oberhalb von 100 km/h nicht mehr alle Geschwindigkeiten im Datensatz vertreten sind und die Verteilung somit für diese fehlenden Geschwindigkeiten horizontal verläuft. Dies ist vermutlich auf technische Ursachen bei der Verkehrserfassung zurückzuführen.

Abbildung 5.1 zeigt die Geschwindigkeitsverteilungen aller Kfz in Abhängigkeit des befahrenen Fahrstreifens. Die Auswertung ergibt ein für deutsche Autobahnen typisches Geschwindigkeitsgefälle vom linken zum rechten Fahrstreifen, das sich bedingt durch das geltende Rechtsfahrgebot einstellt. Zudem nimmt die Abweichung zwischen der Geschwindigkeitsverteilung aller und der freifahrenden Fahrzeuge von rechts nach links zu. Rechts fahrende Verkehrsteilnehmende (größtenteils Lkw) wollen bzw. müssen vergleichsweise langsam fahren, ansonsten würden sie nach links wechseln. Ob sie beeinflusst oder unbeeinflusst fahren, hat nur einen geringen Einfluss auf ihre Geschwindigkeit. Links hingegen fahren

Verkehrsteilnehmende mit einer hohen Wunschgeschwindigkeit. Unbeeinflusste Fahrzeuge können dabei mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren und sind im Median etwa 15 km/h schneller als das gesamte Kollektiv.

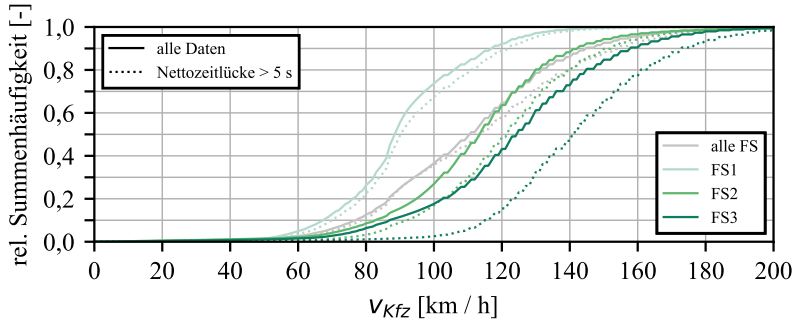
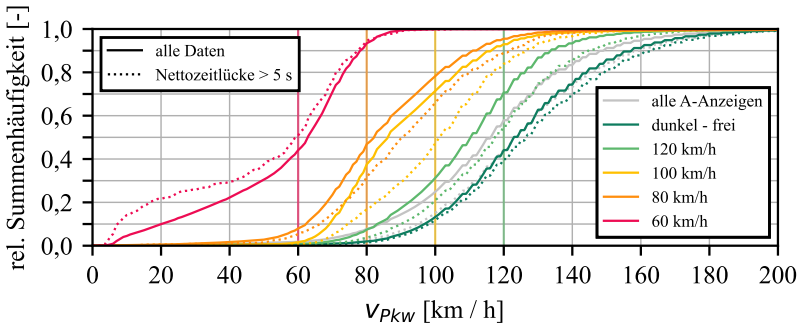
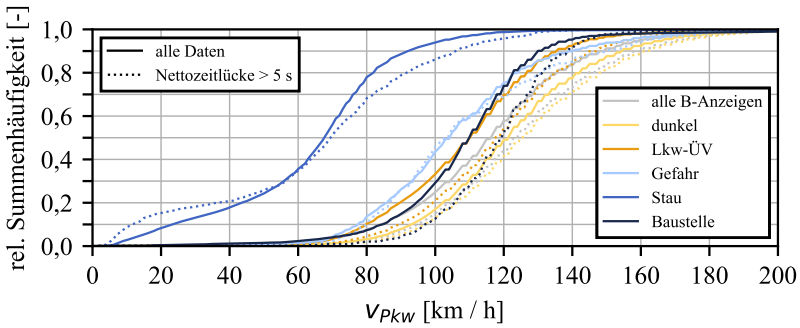


Abbildung 5.1: Kfz-Geschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit des Fahrstreifens aus EFZD (eigene Darstellungen)

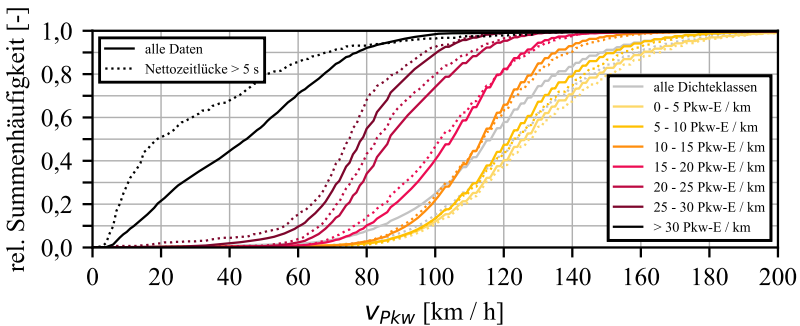
Die Abbildungen 5.2a und 5.3a zeigen die Geschwindigkeitsverteilungen aller Pkw bzw. Lkw in Abhängigkeit der A-Anzeige. Dunkelschaltungen im Stau sind dabei nicht abgebildet. Im Allgemeinen reduzieren sich die gefahrenen Geschwindigkeiten, je restriktiver die angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung ist. Dies ist neben der Beschränkung der Geschwindigkeit auch auf die verkehrliche Situation zurückzuführen. Es fällt auf, dass die Pkw-Geschwindigkeitsverteilungen für die Beschränkungen auf 80 km/h und 100 km/h nur wenig abweichen (83 km/h bzw. 87 km/h im Median), während die Pkw-Geschwindigkeiten für 120 km/h deutlich höher sind (111 km/h im Median). Die Geschwindigkeiten unbeeinflusster Pkw entsprechen für die Beschränkungen auf 100 km/h und 120 km/h im Median etwa der Beschränkung selbst, für 80 km/h liegen die Freifahrtgeschwindigkeiten im Median etwa 10 km/h höher als die Beschränkung. Die Höchstwerte der Verteilungen liegen jeweils deutlich über der Beschränkung, was eine teilweise niedrige Befolgung impliziert. Vor allem für die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h kommt es zu großen Überschreitungen, was auf eine geringere Akzeptanz schließen lässt.



(a) Verteilung in Abhängigkeit der A-Anzeige

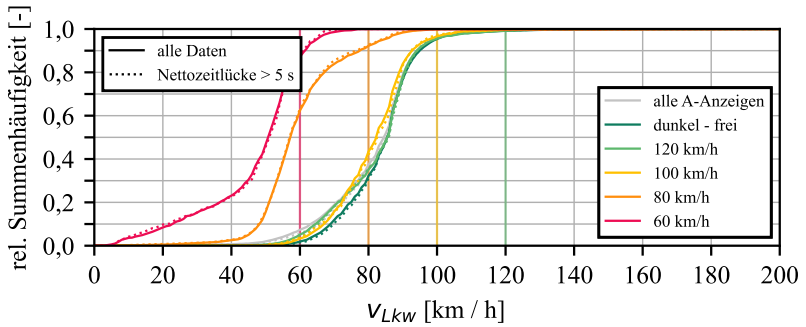


(b) Verteilung in Abhängigkeit der B-Anzeige

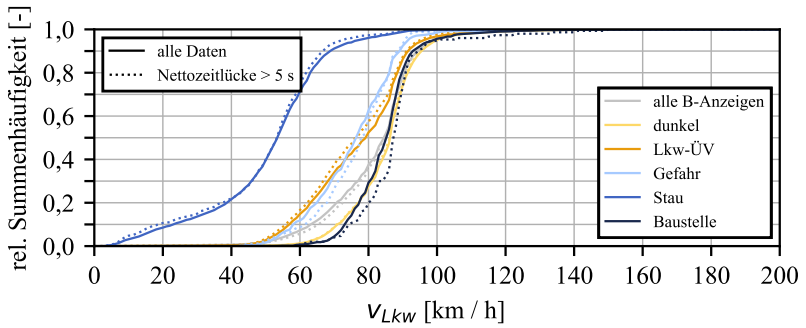


(c) Verteilung in Abhängigkeit der lokalen Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen

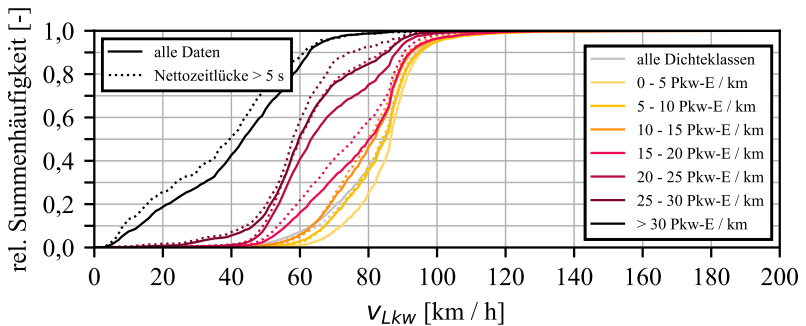
Abbildung 5.2: Pkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD (eigene Darstellungen)



(a) Verteilung in Abhängigkeit der A-Anzeige



(b) Verteilung in Abhängigkeit der B-Anzeige



(c) Verteilung in Abhängigkeit der lokalen Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen

Abbildung 5.3: Lkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD (eigene Darstellungen)

Die Geschwindigkeitsverteilungen der Lkw (siehe Abbildung 5.3a) zeigen wie zu erwarten sehr ähnliche Kurvenverläufe für die Beschränkungen oberhalb von 80 km/h. Aufgrund der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h für Lkw macht es für diese keinen Unterschied, welche Beschränkung angezeigt wird. Die Verteilung für 80 km/h liegt dabei deutlich unterhalb der Beschränkung (58 km/h im Median), was auf große verkehrliche Einschränkungen auf dem rechten Fahrstreifen hinweist. Die Lkw-Geschwindigkeiten des gesamten Kollektivs und der unbeeinflussten Lkw unterscheiden sich insgesamt kaum. Bei hohen Verkehrsdichten und damit einhergehenden niedrigeren Geschwindigkeiten können Lkw rechts nicht mehr frei fahren und bei niedrigen Verkehrsdichten fahren Lkw im Pulk annähernd gleich schnell wie bei freier Fahrt.

Die Abbildungen 5.2b und 5.3b zeigen die Geschwindigkeitsverteilungen aller Pkw bzw. Lkw in Abhängigkeit der B-Anzeige. Dabei ist zu berücksichtigen, dass A- und B-Anzeigen in Kombination geschaltet werden und eine Trennung der Effekte schwierig ist. So sind bspw. die niedrigen Geschwindigkeiten bei der Schaltung der Stauwarnung zusätzlich auf die Geschwindigkeitsbeschränkung von 60 km/h und die verkehrliche Situation im Vorlauf eines Staus zurückzuführen. Allgemein geht die Schaltung einer B-Anzeige mit einer Reduktion der Pkw-Geschwindigkeiten einher. Es fällt auf, dass die Gefahrenwarnung eine größere Streuung der Pkw-Geschwindigkeiten mit sich bringt als bspw. die Warnung vor einer Baustelle oder das Lkw-Überholverbot. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Gefahrenwarnungen zum einen je nach Art der Gefahr in Kombination mit verschiedenen Geschwindigkeitsbeschränkungen geschaltet und zum anderen durch äußere Einflüsse ausgelöst und damit in unterschiedlichen verkehrlichen Situationen angezeigt werden. Die Geschwindigkeitsverteilungen der Lkw zeigen nur eine geringfügige Reaktion auf die Warnung vor einer Baustelle. Bei Schaltung einer Gefahrenwarnung oder eines Lkw-Überholverbots erfolgt hingegen eine Reduktion der Lkw-Geschwindigkeiten.

Abbildung 5.2c präsentiert die Verläufe der Pkw-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der lokalen Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen, die Auskunft darüber gibt, inwiefern Überholmöglichkeiten für Pkw bestehen. Die Daten werden hierfür in Klassen von 5 Pkw-E/km unterteilt. Die Pkw-Geschwindigkeiten nehmen

erwartungsgemäß mit zunehmender Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen ab. Dies ist allerdings vorrangig auf die verkehrliche Situation und weniger auf die Verkehrsbeeinflussung durch die SBA zurückzuführen. Des Weiteren handelt es sich bei freifahrenden Fahrzeugen mit zunehmender Verkehrsdichte vermehrt um langsamere Fahrzeuge, die aufgrund ihrer geringen Wunschgeschwindigkeit frei fahren können. Fahrzeuge mit höheren Wunschgeschwindigkeiten müssen aufgrund der dichten Verkehrssituation im Pulk fahren, wodurch die Geschwindigkeitsverteilungen aller Fahrzeuge höher sind als die Geschwindigkeitsverteilungen freifahrender Fahrzeuge. Der Auswertung liegt der Gedanke zugrunde, dass die Akzeptanz der dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen u. a. von der verkehrlichen Situation abhängt. Für die folgende Ermittlung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen wird daher zwischen Dichteklassen unterschieden. In Abbildung 5.3c sind entsprechend die Verläufe der Lkw-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der lokalen Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen dargestellt.

Diese Auswertungen der Geschwindigkeitsverläufe können ebenfalls mit den minutenfeinen Detektordaten der SBA durchgeführt werden. Da es sich jedoch um aggregierte Daten handelt, ist die Interpretation der Ergebnisse nur begrenzt möglich. Die entsprechenden Abbildungen sind in Anhang A.7.2 dargestellt.

Es bleibt anzumerken, dass, wie auch bei den vorherigen Untersuchungen, Referenzdaten ohne Verkehrsbeeinflussung durch die SBA notwendig sind, um die Wirkung der SBA eindeutig extrahieren zu können.

5.1.2 Wunschgeschwindigkeitsverteilungen

Unter Verwendung der in Kapitel 3.4 vorgestellten modifizierten Kaplan-Meier Methode für Autobahnen nach Hoogendoorn [2005b] werden im nächsten Schritt Wunschgeschwindigkeitsverteilungen geschätzt, die als Eingangsgröße für das mikroskopische Verkehrsflussmodell dienen. Das Konzept von Wunschgeschwindigkeiten wird in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Ziel ist es, Wunschgeschwindigkeitsverteilungen im Modell zu hinterlegen, die die beobachteten Geschwindigkeiten widerspiegeln und somit zuverlässige Ergebnisse liefern. Im Kontext von SBA

sind die Wunschgeschwindigkeiten ein direktes Resultat der Akzeptanz der angezeigten Geschwindigkeitsbeschränkungen.

Datengrundlage sind die vorliegenden Einzelfahrzeugdaten mit den entsprechenden Schaltdaten. Im vorherigen Unterkapitel wurden diese Daten mit Fokus auf gefahrene Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse, A-Anzeige, B-Anzeige und Verkehrsdichte untersucht. Diese Filter werden zunächst kombiniert. Erste Anwendungen der modifizierten Kaplan-Meier Methode ergeben jedoch, dass die große Anzahl an Kombinationen zu einer starken Reduktion der Datenmenge für die einzelnen Datenfilter führt. Eine Analyse der Effekte der einzelnen Filter auf die resultierenden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen führt zu dem Ergebnis, dass eine separate Betrachtung der Fahrzeugklassen, A-Anzeigen und Verkehrsdichte zielführend ist. Die lokale Verkehrsdichte, die sich auf den linken Fahrstreifen bezieht, wird dabei nach den folgenden Schwellenwerten unterteilt:

- Dichteklasse 1: $0 < k_{FS3} \leq 10$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 2: $10 < k_{FS3} \leq 15$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 3: $15 < k_{FS3} \leq 25$ Pkw-E/km

Für Werte über 25 Pkw-E/km sind nur noch wenige unbeeinflusste Fahrzeuge in den Daten enthalten, sodass eine Anwendung der Methode nicht zielführend ist.

Da es sich bei der modifizierten Kaplan-Meier Methode um ein nicht-parametrisches Verfahren handelt, entspricht die resultierende Verteilung keinem bestimmten Funktionstyp. Abbildung 5.4 zeigt ein Beispiel für die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen von Pkw bei einer Dunkelschaltung ohne Geschwindigkeitsbeschränkung. Wie auch die Summenhäufigkeiten der Geschwindigkeiten weisen die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen einen stufigen Verlauf auf, der darauf zurückzuführen ist, dass nicht jede Geschwindigkeit im Datensatz vertreten ist. Da eine Wunschgeschwindigkeit immer höher oder gleich der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit ist, nehmen die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen höhere Werte an als die Geschwindigkeitsverteilungen. Entsprechend unterscheiden sich die Skalierungen der x-Achsen zwischen den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2.

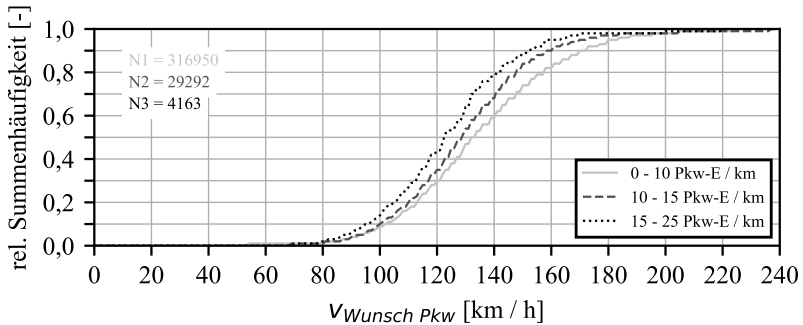
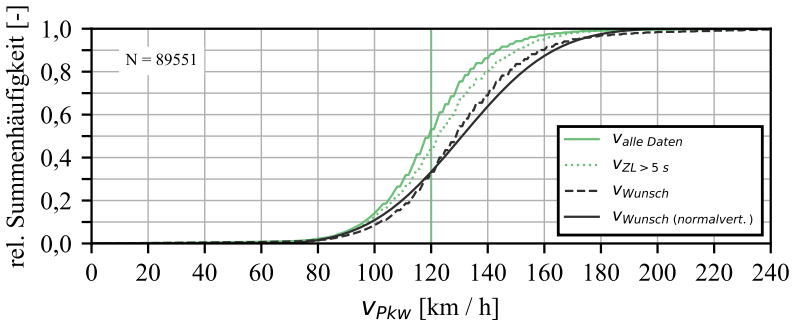
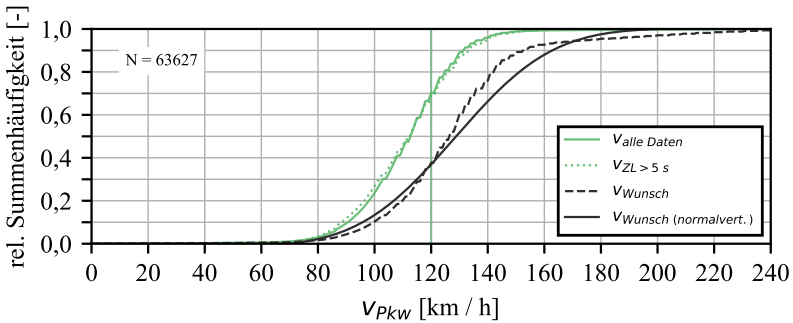


Abbildung 5.4: Unverarbeitete Wunschgeschwindigkeitsverteilungen von Pkw bei einer Dunkelschaltung ohne Geschwindigkeitsbeschränkung (eigene Darstellung)

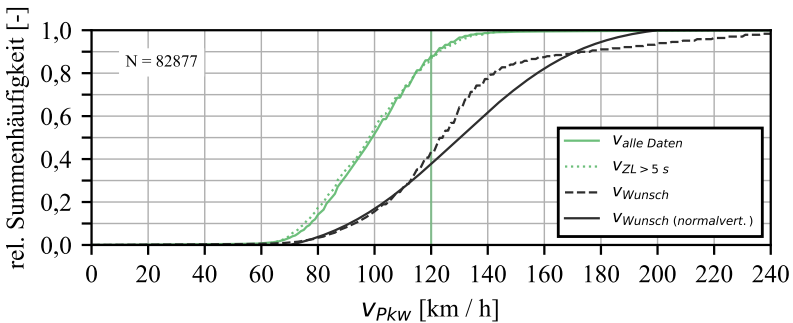
Ein erster Ansatz zur weiteren Verwendung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ist die von Hoogendoorn [2005a,b] und Geistefeldt [2007, 2015] durchgeführte Schätzung der Funktionsparameter einer Normalverteilung (siehe Kapitel 3.4). Die Auswertungen zeigen jedoch, dass die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nach der modifizierten Kaplan-Meier Methode lediglich dann annähernd normalverteilt sind, wenn für alle Geschwindigkeitsbereiche unbeeinflusste Fahrzeuge im Datensatz enthalten sind. Je höher die lokale Verkehrsdichte und damit einhergehend je restriktiver die Geschwindigkeitsbeschränkung, desto weniger ist diese Rahmenbedingung gegeben. Wohingegen die Schätzung von Normalverteilungen im Beispiel aus Abbildung 5.4 gute Übereinstimmungen liefert, verdeutlicht Abbildung 5.5 die Problematik anhand der Verteilungen für die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h. Abgebildet sind jeweils für die drei Dichteklassen die Geschwindigkeitsverteilung aller Fahrzeuge, die Geschwindigkeitsverteilung der unbeeinflussten Fahrzeuge mit einer Nettozeitlücke größer fünf Sekunden, die geschätzte Wunschgeschwindigkeitsverteilung nach der modifizierten Kaplan-Meier Methode und die an die Wunschgeschwindigkeitsverteilung angepasste Normalverteilung. Die Normalverteilung wird dabei durch ein Minimum und Maximum beschränkt und entsprechend abgeschnitten, weil die sehr langsamen und sehr schnellen Fahrzeuge an den Rändern der Verteilungen in der Simulation Probleme bereiten.



(a) Dichteklasse 1



(b) Dichteklasse 2



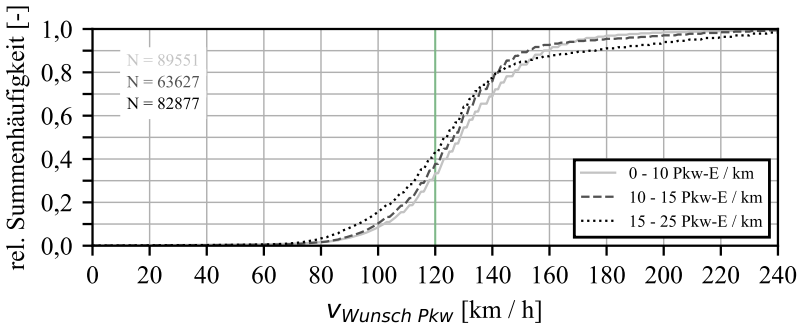
(c) Dichteklasse 3

Abbildung 5.5: Geschwindigkeits- und Wunschgeschwindigkeitsverteilungen von Pkw bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h (eigene Darstellungen)

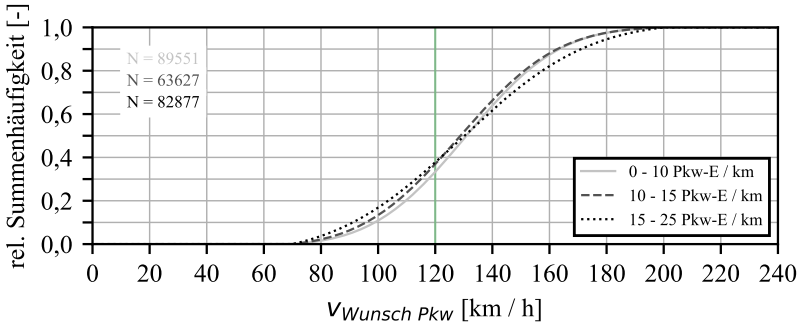
Mit zunehmender Verkehrsdichte fahren verkehrsbedingt weniger Fahrzeuge mit hohen Geschwindigkeiten und zusätzlich nimmt der Anteil unbeeinflusster Fahrzeuge ab. Die modifizierte Kaplan-Meier Methode baut darauf auf, dass die Wunschgeschwindigkeit nur für unbeeinflusste Fahrzeuge bekannt ist und beeinflusste Fahrzeuge entweder mit ihrer Wunschgeschwindigkeit oder langsamer als ihre Wunschgeschwindigkeit fahren. Dadurch wird der Abstand zwischen den geschätzten Wunschgeschwindigkeiten und den tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten mit zunehmender Verkehrsdichte größer (siehe Abbildung 5.5). Für hohe Geschwindigkeitsbereiche überschätzt die Methode die Wunschgeschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmenden, weil nur noch wenig Daten vorhanden sind und zusätzlich nahezu ausschließlich beeinflusste Fahrzeuge vorliegen. Dadurch wird die Steigung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für den oberen Teil der Verteilung flacher. Die Verteilungen suggerieren, dass der Anteil an Verkehrsteilnehmenden mit sehr hohen Wunschgeschwindigkeiten in dichten Verkehrssituationen im Vergleich zu Situationen mit wenig Verkehr deutlich zunimmt. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass eine Person im beeinflussten Zustand schneller fahren will, als sie es im unbeeinflussten Zustand wünscht. Die Schätzung von Normalverteilungen auf diese asymmetrischen Verteilungen verstärkt die Überschätzung der schnellen Wunschgeschwindigkeiten bei hohen Verkehrsdichten.

Abbildung 5.6 fasst die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen und geschätzten Normalverteilungen am Beispiel aus Abbildung 5.5 zusammen. Die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen aus Abbildung 5.6a weisen mit Ausnahme von hohen Geschwindigkeitsbereichen eine Verschiebung der Verteilungen in Abhängigkeit der Verkehrsdichte auf. Im Gegensatz dazu ergeben die Normalverteilungen aus Abbildung 5.6b eine Änderung der Standardabweichung je nach Verkehrsdichte. Eine Erhöhung der Standardabweichung führt zu einem unharmonischeren Verkehrsfluss in der Simulation und sollte daher nur eingesetzt werden, wenn dies auch der Realität entspricht.

Der Ansatz der Normalverteilungen wird wegen den genannten Schwächen verworfen. Ein zweiter Ansatz belässt die ursprünglichen Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nach der modifizierten Kaplan-Meier Methode. Um die unrealistisch hohen Wunschgeschwindigkeiten für hohe Verkehrsdichten zu vermeiden, wird



(a) unverarbeitete Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nach der modifizierten Kaplan-Meier Methode

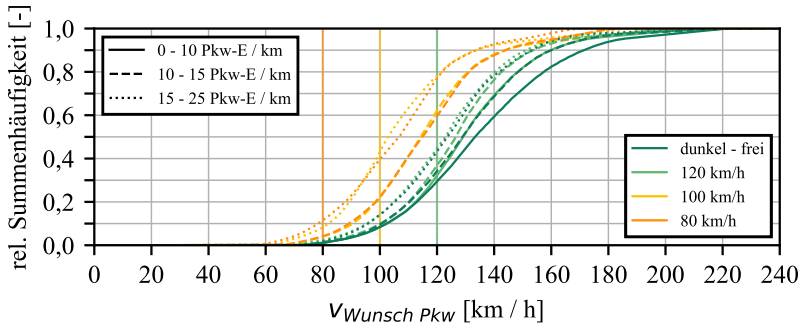


(b) geschätzte Normalverteilungen

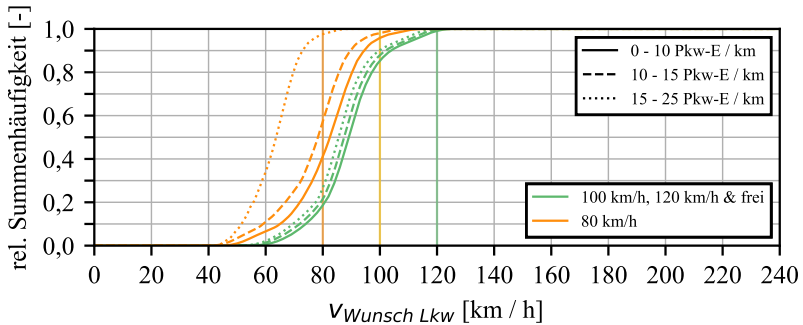
Abbildung 5.6: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen von Pkw bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h (eigene Darstellungen)

jeweils die Verteilung der Dichteklasse 1 verwendet und relativ verschoben. Für diese Verschiebung wird der relative Abstand der ursprünglichen Verteilungen an mehreren Stützpunkten ermittelt. Dabei werden nur Stützpunkte herangezogen, für die die Verteilungskurve der höheren Dichteklasse die Kurve der Dichteklasse 1 noch nicht geschnitten hat. Die Stützpunkte liegen damit für Pkw i. d. R. unterhalb der Summenhäufigkeit von 80 %. Zwischen den Stützpunkten wird der Wert der relativen Verschiebung interpoliert. Bei diesem Ansatz ergeben sich keine Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, die höher sind als die Verteilungen bei wenig Verkehr (Dichteklasse 1) und es kommen annähernd normalverteilte

Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zum Einsatz. Zusätzlich erfolgen eine Glättung der Kurven und eine Festlegung eines Minimums und Maximums je nach Geschwindigkeitsbeschränkung. Abbildung 5.7 zeigt die resultierenden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkung und der Dichteklasse für Pkw und Lkw.



(a) Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Pkw



(b) Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Lkw

Abbildung 5.7: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkung und der Dichteklasse (eigene Darstellungen)

Allgemein sinkt die Wunschgeschwindigkeit mit einer Verschärfung der Geschwindigkeitsbeschränkung und zunehmender Verkehrsdichte. Abbildung 5.7a

stellt die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Pkw dar. Für die Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 80 km/h und 100 km/h ist aufgrund der vorliegenden Verkehrssituationen keine ausreichende Datenlage in Dichteklasse 1 vorhanden. Für eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h ist die Anwendung der modifizierten Kaplan-Meier Methode insgesamt aufgrund der entsprechenden Verkehrssituationen nicht sinnvoll. Es fällt auf, dass die Wunschgeschwindigkeiten für die Beschränkung auf 80 km/h und 100 km/h sehr ähnlich verteilt sind. Die Akzeptanz der Beschränkung auf 80 km/h ist gering, lediglich etwa 5 % (Dichteklasse 2) bzw. etwa 10 % (Dichteklasse 3) der Verkehrsteilnehmenden haben eine Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h oder weniger. Ein weiterer interessanter Aspekt ist, dass bei hohen Verkehrsdichten die Wunschgeschwindigkeiten der Pkw bei einer Dunkelschaltung und bei einer Beschränkung auf 120 km/h nahezu gleich verteilt sind.

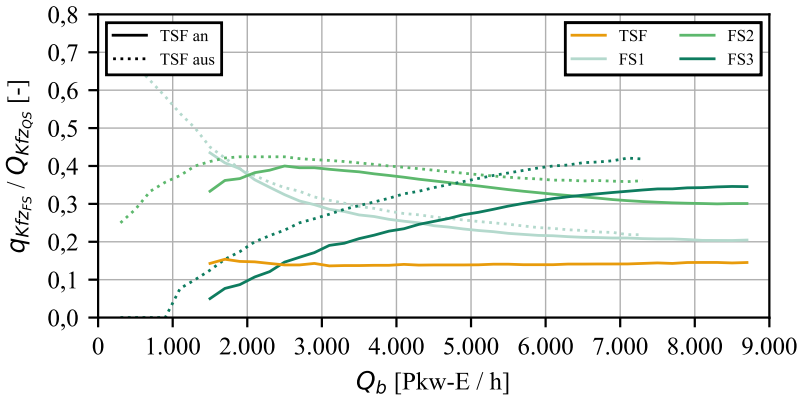
Abbildung 5.7b zeigt die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Lkw. Wie auch die Geschwindigkeitsverteilungen in Abbildung 5.3a weisen die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der Lkw für Geschwindigkeitsbeschränkungen oberhalb von 100 km/h einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Daher werden die Daten zusammengefasst und es werden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ermittelt, die das Kollektiv von Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 100 km/h, 120 km/h und Dunkelschaltung abbilden. Die Wunschgeschwindigkeiten streuen allgemein weniger stark für Lkw als für Pkw.

Die vorgestellte Methode liefert Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für verschiedene Fahrzeugklassen, Geschwindigkeitsbeschränkungen und Verkehrsdichten. Für größere Datensätze von Einzelfahrzeugdaten sind weitere Differenzierungen denkbar, bspw. die separate Betrachtung von Gefahrenwarnungen auf der B-Anzeige. Es bleibt anzumerken, dass die modifizierte Kaplan-Meier Methode auf fließenden Verkehr, bestehend aus beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen, ausgelegt ist. Mit steigender Verkehrsdichte sind solche Verkehrssituationen zunehmend nicht mehr gewährleistet. In diesen Fällen ergibt die Schätzung unrealistische Verteilungen und es ist wenig über die tatsächliche Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten bekannt.

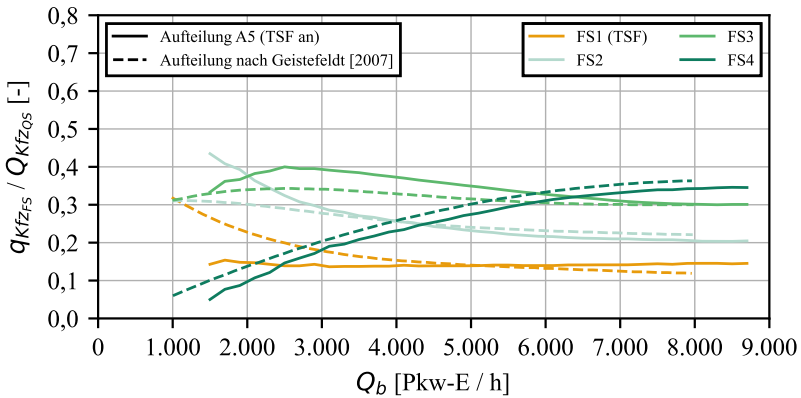
5.2 Befolgung der temporären Seitenstreifenfreigabe

Die Befolgung der TSF spiegelt sich in der Nutzung des Seitenstreifens in geöffnetem Zustand und damit in der Fahrstreifenaufteilung wider. Es liegt eine hohe Befolgung vor, wenn die Auslastung des Seitenstreifens der eines Hauptfahrstreifens entspricht. Für die Bewertung wird die Auslastung des Seitenstreifens auf dem untersuchten dreistreifigen Autobahnabschnitt mit der Nutzung des rechten Fahrstreifens auf einer vierstreifigen Autobahn verglichen. Hierzu werden die Untersuchungen von Geistefeldt [2007] zu Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen herangezogen. Diese Vorgehensweise zur Untersuchung der Akzeptanz einer TSF wurde bereits von Geistefeldt und Glatz [2010] und Recker u. a. [2015] gewählt. Datenquelle für diese Akzeptanzuntersuchung sind die vorliegenden minutenfeinen Detektordaten der SBA von 20 Monaten. Die Datenaufbereitung entspricht der Beschreibung für die Auswertung der Fahrstreifenaufteilung in Kapitel 4.3.4.

Abbildung 5.8 bildet die Befolgung der TSF am Beispiel von Segment 2 in Fahrtrichtung Norden ab. Weitere Segmente sind in Anhang A.8 dargestellt. In Abbildung 5.8a ist die Fahrstreifenaufteilung bei geöffnetem und geschlossenem Seitenstreifen gegenübergestellt. Der Seitenstreifen wickelt bei Freigabe im Median etwa 14 % der Kfz ab. Der Anteil auf dem rechten Hauptfahrstreifen (Fahrstreifen 1) reduziert sich dabei leicht, während sich etwa 8 % der Kfz vom linken und etwa 5 % der Kfz vom mittleren Fahrstreifen nach rechts bewegen. Abbildung 5.8b zeigt den Vergleich der Fahrstreifenaufteilung des untersuchten dreistreifigen Autobahnabschnitts bei geöffnetem Seitenstreifen mit der standardisierten Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen nach Geistefeldt [2007]. Die Gegenüberstellung weist keine signifikanten Unterschiede der Aufteilung der Fahrzeuge auf die einzelnen Fahrstreifen auf. Der Seitenstreifen auf der A5 ist bei hohen Verkehrsstärken sogar etwa 2 % besser ausgelastet als der rechte Hauptfahrstreifen des vierstreifigen Autobahnabschnitts. Die Befolgung der TSF auf dem untersuchten Autobahnabschnitt wird daher als sehr gut bewertet.

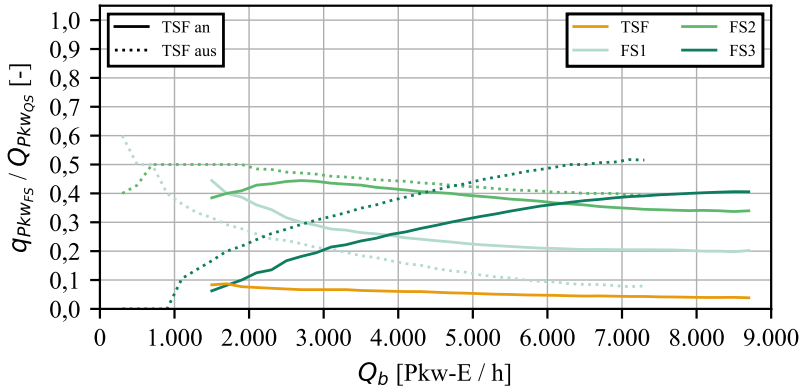


(a) Vergleich dreistreifiges Segment bei geöffneter und geschlossener TSF

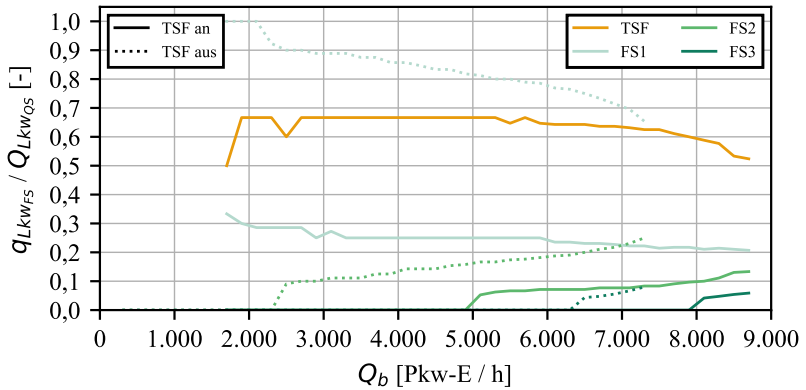


(b) Vergleich dreistreifiges Segment bei geöffneter TSF und vierstreifiges Segment

Abbildung 5.8: Fahrstreifenaufteilung der Kfz mit und ohne TSF (eigene Darstellungen)



(a) Fahrstreifenaufteilung Pkw



(b) Fahrstreifenaufteilung Lkw

Abbildung 5.9: Fahrstreifenaufteilung der Pkw und Lkw mit und ohne TSF (eigene Darstellungen)

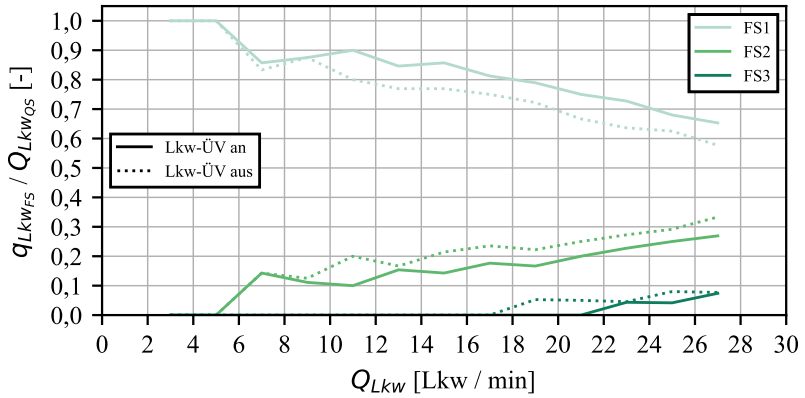
Abbildung 5.9 stellt die Fahrstreifenaufteilung bei geöffnetem und geschlossenem Seitenstreifen separat für Pkw und Lkw auf Segment 2 in Fahrtrichtung Norden dar. Die zum Teil nicht glatten Kurvenverläufe bei geringen Verkehrsstärken sind auf eine kleine Datengrundlage zurückzuführen. Der Seitenstreifen wird von den

Lkw-Fahrenden gut angenommen. Er wickelt bei Freigabe zwischen 60 % und 70 % des Lkw-Verkehrs bei mittleren Verkehrsstärken ab. Es erfolgt keine vollständige Verlagerung der Lkw auf den Seitenstreifen. Sie nutzen vorrangig den Seitenstreifen und rechten Hauptfahrstreifen, wodurch Lkw-Überholvorgänge auf dem mittleren Hauptfahrstreifen reduziert werden. In hohen Verkehrsstärkebereichen entspricht die Seitenstreifennutzung bei TSF-Freigabe der des rechten Hauptfahrstreifens ohne TSF-Freigabe. Pkw-Fahrende bewegen sich bei freigegebenem Seitenstreifen ebenfalls nach rechts. Der Pkw-Anteil auf dem rechten Hauptfahrstreifen nimmt bei TSF-Freigabe deutlich zu. Insgesamt wickeln der Seitenstreifen und der rechte Hauptfahrstreifen ab einer Verkehrsstärke von 5.000 Pkw-E/h etwa 25 % des Pkw-Verkehrs ab. Ohne TSF-Freigabe liegt der Pkw-Anteil auf dem rechten Hauptfahrstreifen lediglich bei etwa 10 %.

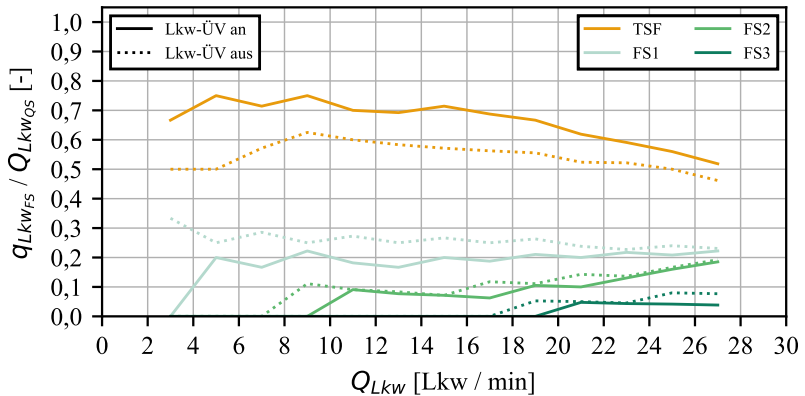
5.3 Befolgung des Lkw-Überholverbots

Die Befolgung des Überholverbots für Lkw wird mithilfe der Lkw-Fahrstreifen-aufteilung bei aktivem und inaktivem Überholverbot untersucht. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist eine mögliche Fehlerquote zu berücksichtigen, die aus einer fehlerhaften Fahrzeugklassenzuordnung resultieren kann. Zudem machen Busse und Pkw mit Anhänger etwa 10 % der Lkw-ähnlichen Fahrzeuge aus (siehe Kapitel 4.3.2), diese sind jedoch nicht vom Lkw-Überholverbot betroffen. Datenquelle für diese Untersuchung sind die minutenfeinen Detektordaten aus fünf Wochen im Jahr 2019, für die ebenfalls Schaltdaten vorliegen. Die Datenaufbereitung entspricht der Beschreibung aus Kapitel 4.3.4. Es sind alle Messquerschnitte auf der freien Strecke für beide Fahrtrichtungen zusammengefasst.

Abbildung 5.10 zeigt die Fahrstreifenaufteilung der Lkw mit und ohne Lkw-Überholverbot in Abhängigkeit der Lkw-Verkehrsstärke in einem Minutenintervall an einem Messquerschnitt. Insgesamt fährt der Großteil der Lkw auf dem rechten Fahrstreifen, während nahezu keine Lkw den linken Fahrstreifen nutzen. Mit einer steigenden Anzahl an Lkw nimmt der Überholdruck zu und die Lkw weichen zunehmend nach links aus. Durch das Lkw-Überholverbot verschiebt sich



(a) dreistreifig (TSF aus)



(b) vierstreifig (TSF an)

Abbildung 5.10: Fahrstreifenaufteilung der Lkw mit und ohne Lkw-Überholverbot (eigene Darstellungen)

die Fahrstreifen aufteilung der Lkw leicht nach rechts. An dreistreifigen Messquerschnitten (Abbildung 5.10a) nimmt der Lkw-Anteil auf dem rechten Fahrstreifen bei Lkw-Überholverbot um etwa 8 % zu. Bei freigegebenem Seitenstreifen und

Lkw-Überholverbot (Abbildung 5.10b) nimmt der Lkw-Anteil auf dem Seitenstreifen je nach Lkw-Verkehrsstärke zwischen 10 % und 30 % zu.

Das Lkw-Überholverbot bewirkt demnach eine Verhaltensänderung der Lkw-Fahrenden. Dennoch fahren auch bei Anzeige eines Lkw-Überholverbotes Lkw-ähnliche Fahrzeuge auf dem mittleren und linken Fahrstreifen. Dies ist möglicherweise zum Teil auf Detektionsfehler und Busse bzw. Pkw mit Anhänger, die nicht vom Überholverbot betroffen sind, zurückzuführen. Die Größenordnung der Lkw-Anteile auf dem mittleren und linken Fahrstreifen deuten jedoch darauf hin, dass zusätzlich die Akzeptanz des dynamischen Lkw-Überholverbots nicht vollständig gegeben ist.

5.4 Akzeptanzmodell

Um mit einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation verlässliche Aussagen über die Wirkungen von SBA treffen zu können, muss die Befolgung realitätsnah abgebildet werden. Die in diesem Kapitel gewonnenen empirischen Erkenntnisse zur Akzeptanz von SBA werden zu einem Akzeptanzmodell zusammengefasst, das zur simulativen Abbildung von SBA eingesetzt werden kann.

Die Akzeptanz und resultierende Befolgung der dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen werden in Kapitel 5.1 untersucht. Die ermittelten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse, Geschwindigkeitsbeschränkung und Verkehrsdichte kommen in der Simulation je nach Schaltzustand der SBA und Verkehrssituation zum Einsatz. Für Verkehrsdichten größer 25 Pkw-E/km werden die Verteilungen der Dichteklasse 3 verwendet. Für Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 80 km/h und 100 km/h existieren keine Pkw-Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Dichteklasse 1. In diesen Fällen wird die Verteilung für die Beschränkung auf 120 km/h für Dichteklasse 3 herangezogen.

Durch die Berücksichtigung der Verkehrsdichte wird in der Simulation abgebildet, dass die Akzeptanz u. a. von der Verkehrssituation abhängt. Geschwindigkeitsbeschränkungen werden besser akzeptiert, wenn sie im Zusammenhang mit der

Verkehrssituation stehen und nachvollziehbar sind. Für das Steuerungsmodell SARAH ist gewährleistet, dass die Schaltbilder mit der Verkehrssituation zusammenhängen. Für die simulative Weiterentwicklung von Steuerungsmodellen ist dies jedoch ein wesentlicher Faktor für die Beurteilung der Wirkung. Für die in Kapitel 7 beschriebene Untersuchung einer Umweltsteuerung für SBA, die neben verkehrlichen auch umweltbedingte Schaltkriterien beinhaltet und somit angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkungen nicht zwingend in direktem Zusammenhang mit der Verkehrssituation stehen, ist dieser Aspekt von großer Relevanz.

Die Befolgung der TSF wird in Kapitel 5.2 als sehr gut bewertet. Daher werden keine weiteren Maßnahmen im Modell vorgenommen, um die Nutzung des Seitenstreifens zu steuern. In der Simulation entspricht der Seitenstreifen im geöffneten Zustand einem Hauptfahrstreifen. Die realitätsnahe Abbildung der Fahrstreifenaufteilung wird in der Kalibrierung berücksichtigt.

Die Befolgung der dynamischen Lkw-Überholverbote durch die Lkw-Fahrenden wird in Kapitel 5.3 untersucht. Die Analysen ergeben, dass eine Verhaltensveränderung stattfindet, jedoch keine vollständige Akzeptanz gegeben ist. Daher werden zwei Fahrzeugklassen für Lkw im Verkehrsflussmodell hinterlegt: *Akzeptierende* und *Nicht-Akzeptierende*. Im Gegensatz zu den Akzeptierenden ignorieren die Nicht-Akzeptierenden ein Lkw-Überholverbot und ändern ihr Verhalten nicht. In den meisten Fällen nutzen Lkw trotzdem den rechten Fahrstreifen. Bei einem Überholwunsch wechseln Nicht-Akzeptierende nach Möglichkeit den Fahrstreifen nach links. Die Anteile Akzeptierender und Nicht-Akzeptierender sind anhand der vorliegenden Verkehrsdaten nicht empirisch bestimmbar. Daher gehen sie als Kalibrierungsgröße in die Kalibrierung ein.

6 Mikroskopisches Verkehrsflussmodell

6.1 Vorgehensweise

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells des untersuchten Autobahnabschnitts der A5 mit allen notwendigen Komponenten zur Abbildung der SBA. Sowohl die Komponenten der Modellierung als auch der Datenfluss zwischen den Komponenten sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Zunächst wird das Steuerungsmodell SARAH, das in Form eines Lastenhefts zur Verfügung steht, als Python-Code nachgebildet und anhand von realen Verkehrs- und Schaltdaten validiert (siehe Kapitel 6.2). Im nächsten Schritt erfolgt der Modellaufbau in Vissim, wobei neben dem Fahrverhalten die Modellierung der SBA mit TSF im Fokus steht (siehe Kapitel 6.3). Die letzte Komponente bildet das in Kapitel 5 entwickelte Akzeptanzmodell, das für die realitätsnahe Abbildung der Befolgung der dynamischen Anzeigen der SBA unerlässlich ist.

Das Steuerungsmodell, das Akzeptanzmodell und das Verkehrsflussmodell werden anschließend gekoppelt (siehe Kapitel 6.4). Der in der Simulation erfasste Verkehr wird an das Steuerungsmodell übergeben. Das Steuerungsmodell ermittelt anhand der aktuellen Verkehrssituation Schaltbilder für die Streckenbeeinflussung. Diese werden sowohl an das Akzeptanzmodell als auch in Form von Maßnahmen (bspw. Öffnung der TSF) an die Simulation übergeben. Basierend auf den dynamischen Schaltbildern und der aktuellen Verkehrssituation ermittelt

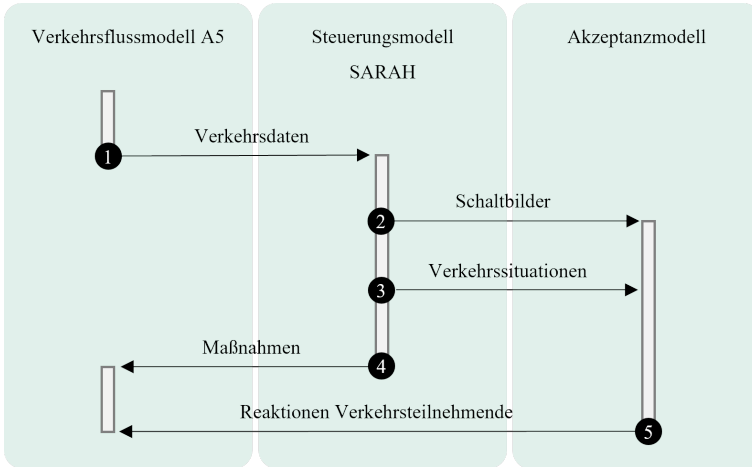


Abbildung 6.1: Komponenten der Modellierung und Datenfluss (eigene Darstellung)

das Akzeptanzmodell die Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden. Diese Reaktionen werden wiederum an die Simulation zurückgespielt und dort zusammen mit den Maßnahmen der SBA umgesetzt.

Im letzten Schritt wird die Kopplung zwischen Verkehrsflussmodell, Steuerungsmodell und Akzeptanzmodell anhand empirischer Daten kalibriert und validiert (siehe Kapitel 6.5 und 6.6). Hierzu kommen u. a. die in Kapitel 4 durchgeführten empirischen Auswertungen zum Einsatz. Die Simulationen und Analysen erfolgen in einer eigens entwickelten Simulations- und Auswertumgebung in Python, die im Kalibrierungsprozess eine systematische und effiziente Variation der Eingabe- und Parameter ermöglicht.

Am Ende dieses Kapitels steht ein Verkehrsflussmodell zur Verfügung, das die Verkehrssituation mit allen Steuerungsmaßnahmen realitätsnah abbildet.

6.2 Nachbildung des Steuerungsmodells SARAH

6.2.1 Aufbau

Das in Kapitel 2.4.2 vorgestellte Steuerungsmodell SARAH wird in Python implementiert. Diese Nachbildung des Steuerungsmodells wird im Folgenden als *SARAH-Implementierung* bezeichnet. Eingabegrößen sind die minutenfeinen Rohdaten der Kfz-Verkehrsstärke, Lkw-Verkehrsstärke und mittleren Pkw- und Lkw-Geschwindigkeit. Auf Plausibilitätsprüfungen und Ersatzwertverfahren wird verzichtet, weil keine Datenfehler bei der Erfassung des Verkehrs in der Simulation auftreten. Zunächst werden die Rohdaten aufbereitet und weitere verkehrlichen Kenngrößen berechnet. Die Schaltprogramme Harmonisierung 120, Harmonisierung 100, Harmonisierung 80, Stauwarnung, Lkw-Überholverbot und TSF werden mit ihren querschnitts- oder fahrstreifenbezogenen Schwellenwerten, ihren Ein- und Ausschaltverzögerungen und ggfs. der Mindestanzahl an anfordernden Messquerschnitten implementiert. Dabei werden die Abminderungsfaktoren der Harmonisierungsprogramme für Nässe und Nacht berücksichtigt. Zur Bestimmung der Nachtzeiten fließen die Informationen zu Sonnenauf- und -untergang je nach Datum der Detektordaten in die SARAH-Implementierung ein. Zur Ermittlung von Nässeperioden werden Daten zu Niederschlags- und Schneezeiten in Bad Homburg herangezogen. Schaltprogramme zur Niederschlags- und Nebelwarnung werden nicht implementiert, weil die simulative Abbildung von Witterungseffekten nicht im Fokus dieser Dissertation steht.

Sind die Schaltkriterien eines Schaltprogramms erfüllt, wird eine entsprechende Schaltanforderung für den jeweiligen Anzeigequerschnitt gestellt. Alle Schaltanforderungen eines Anzeigequerschnitts werden anschließend priorisiert und einem Quer- und Längsabgleich unterzogen. Die so ermittelten Schaltbilder erzeugen im letzten Schritt Schaltbefehle und werden an den Anzeigequerschnitten geschaltet. Die in Realität unvermeidbaren Zeitverzögerungen durch Messung, Datenübertragung und Datenverarbeitung werden in der SARAH-Implementierung durch

eine parametrisierbare Latenz zwischen Schaltbildermittlung und Anzeige der Schaltbilder nachgebildet.

6.2.2 Validierung

In der Entwicklungsphase dienen die Detektordaten der SBA als Eingabegrößen für das Steuerungsmodell. Die SARAH-Implementierung wird auf diese Daten angewendet und die resultierenden Geschwindigkeitsbeschränkungen und Warnungen werden mit den realen Schaltbildern der SBA verglichen. Bei Abweichungen können Fehler in der Nachbildung erkannt und korrigiert werden. Es trägt somit kein simulierter Verkehr zur Validierung bei. Die Kopplung der SARAH-Implementierung an die Simulation erfolgt im Anschluss an die Validierung.

Zur Validierung wird zum einen das Schaltverhalten optisch kontrolliert und zum anderen die Abweichungen zwischen den realen Schaltbildern und dem Ergebnis der SARAH-Implementierung quantifiziert. Die Auswertungen erfolgen separat für jeden Anzeigequerschnitt und Fahrstreifen. Die Wechselverkehrszeichen der Fahrstreifen weichen voneinander ab, wenn es sich bspw. um Ausfahrten mit einer Ausfahrhilfe, um Segmente mit TSF oder um Sonderereignisse auf einzelnen Fahrstreifen handelt. Abbildung 6.2 zeigt einen solchen Vergleich am Beispiel des linken Fahrstreifens von Anzeigequerschnitt 36 in Fahrtrichtung Süden am 18.09.2019. Der obere Bereich der Abbildung zeigt die A-Anzeige und der untere die B-Anzeige. Zusätzlich ist die mittlere Kfz-Geschwindigkeit auf dem linken Fahrstreifen dargestellt. Tabelle 6.1 quantifiziert die Übereinstimmung der Schaltbilder für alle Anzeigequerschnitte in Fahrtrichtung Süden am 18.09.2019 (04:00 bis 22:00 Uhr). Dabei werden für jeden Messquerschnitt, jeden Fahrstreifen und jede Minute die A-Anzeigen aus den Schaltdaten und der SARAH-Implementierung miteinander verknüpft. Für jede Kombination wird die Häufigkeit des Auftretens ermittelt und das Ergebnis in Form einer Matrix abgebildet. Die Diagonale stellt dabei den Zielzustand dar, dass die SARAH-Implementierung die gleichen Schaltbilder ermittelt wie die reale SBA auf der A5.

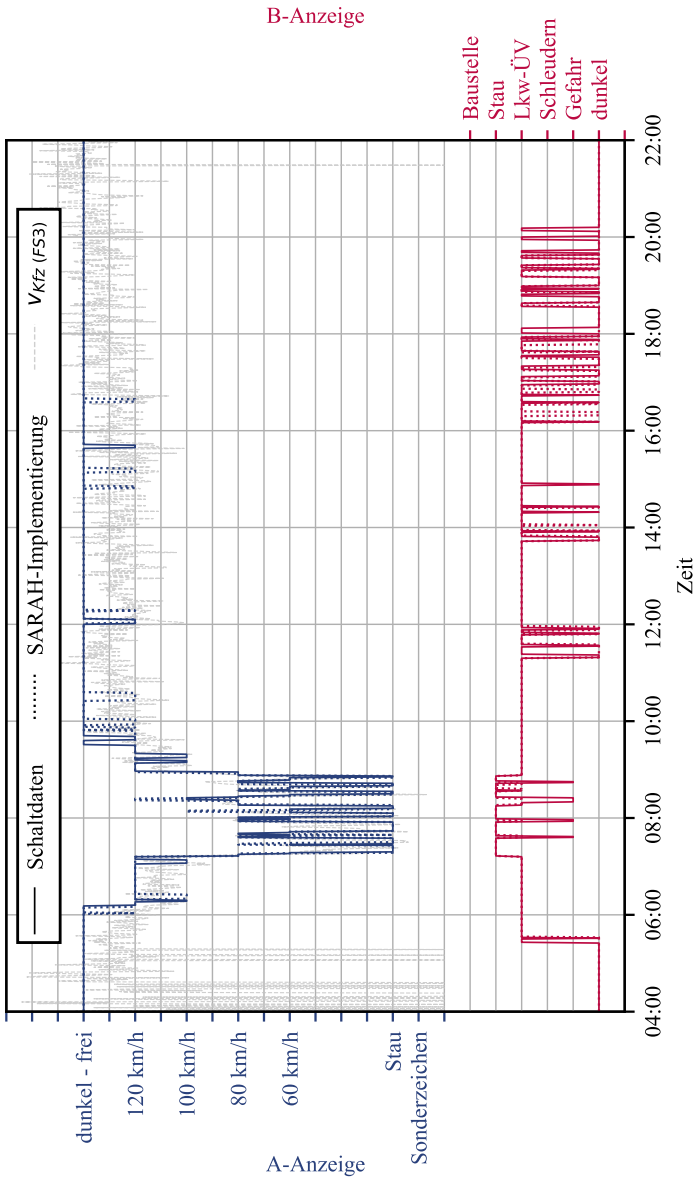


Abbildung 6.2: Vergleich zwischen den Schaltbildern der realen SBA und der SARAH-Implementierung am Beispiel von AQ 36 (FS 3) in FR Süden am 18.09.2019 (eigene Darstellung)

Tabelle 6.1: Übereinstimmungen zwischen den A-Anzeigen der realen SBA und der SARA-Implementierung am Beispiel von FR Süden (alle AQ und FS) am 18.09.2019

		Schaltdaten						
		TSF aus	dunkel - Stau	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h	dunkel - frei
SARAH-Implement.	TSF aus	10.343	88	0	24	55	253	0
	dunkel - Stau	0	3.560	424	359	68	0	0
	60 km/h	0	377	1.896	585	204	53	4
	80 km/h	0	242	313	3.334	453	226	35
	100 km/h	6	87	18	256	1.804	1.092	297
	120 km/h	6	11	43	182	871	12.962	3.802
	dunkel - frei	0	133	5	28	118	8.016	58.560

Die vorgestellten Auswertungen werden in einem iterativen Prozess auf beide Fahrtrichtungen und die repräsentativen Werktage zwischen dem 16. und 29.09.2019 angewandt. Es werden sowohl die A- als auch die B-Anzeigen untersucht. Dabei können einige Fehler in der SARA-Implementierung ermittelt und behoben werden. Nennenswert ist ein zu häufiges Ein- und Ausschalten der Harmonisierungsprogramme und des Lkw-Überholverbots, das durch eine Anpassung der Ein- und Ausschaltverzögerungen reduziert werden kann. Des Weiteren werden große Abweichungen in den Nachtstunden festgestellt, hier werden vermehrt Stau- oder Harmonisierungsprogramme bei sehr geringen Verkehrsstärken geschaltet. Eine Fehlersuche ergibt, dass die SARA-Implementierung für Fahrstreifen und Minutenintervalle ohne Verkehr fälschlicherweise eine mittlere Kfz-Geschwindigkeit von 0 km/h annimmt und damit von stehendem Verkehr ausgeht. Dies wird mit der zusätzlichen Berücksichtigung der Verkehrsdichte behoben.

Die validierte SARA-Implementierung hat eine gute Übereinstimmung mit den realen Schaltbildern. Die A-Anzeige ist je nach Fahrtrichtung und Tag zwischen 75 % und 85 % der Minutenintervalle identisch, bei der B-Anzeige sind es zwischen 80 % und 90 %. Abweichungen sind vorrangig auf manuelle Schaltungen zurückzuführen. Es kommt auf der A5 zum einen oft zu Gefahrensituationen wie

bspw. Baustellen kürzerer Dauer oder Unfällen, die einen manuellen Eingriff in die Steuerung erfordern, jedoch nicht auf die verkehrliche Situation zurückzuführen sind und daher nicht von der SARAH-Implementierung detektiert werden. Zum anderen weichen die realen TSF-Freigabezeiten zum Teil aus den in Kapitel 4.4 genannten Gründen von der implementierten TSF-Logik ab. Diese Abweichungen können nicht durch weitere Anpassungen reduziert werden. Abgesehen von den Handschaltungen springt die SARAH-Implementierung vereinzelt ein bis zwei Minuten zu früh oder zu spät an und schaltet gelegentlich für wenige Minuten abweichende Geschwindigkeitsbeschränkungen. Tabelle 6.1 gibt einen Einblick in die auftretenden Abweichungen, dabei sind die Abweichungen durch manuelle Schaltungen enthalten. Falsche Ermittlungen liegen vorrangig für Dunkelschaltung anstatt einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h und andersherum und für eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h anstatt von 120 km/h vor. Gründe für die Abweichungen könnten lokale Anpassungen der Schwellenwerte oder die statische Abbildung der Latenz der SBA sein.

6.3 Aufbau des Verkehrsflussmodells

6.3.1 Netzaufbau

Als Simulationswerkzeug wird die Software *PTV Vissim* in der Version 2023 verwendet. Das für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation von Autobahnverkehr notwendige Hintergrundwissen ist in Kapitel 3 aufbereitet.

Zunächst werden die Geometrie der Hauptfahrbahn und der Anschlussstellenrampen in beide Fahrrichtungen basierend auf Luftbildern des untersuchten Autobahnabschnitts aufgebaut. Eine Vorstellung des Abschnitts ist in Kapitel 4.1 zu finden. Um der Simulation räumlichen Vorlauf vor dem tatsächlich relevanten Bereich zu geben, werden etwa zwei Kilometer Strecke vor den ersten Messquerschnitten eingefügt. Auf diesen Vorlaufstrecken kann sich der Verkehr ordnen und eine reale Interaktion zwischen den Fahrzeugen wird hergestellt. Zum Längsprofil der A5 liegen Unterlagen der Autobahn GmbH vor; die Steigungen und

Gefälle werden entsprechend als Streckeneigenschaften im Modell hinterlegt. Im Allgemeinen hat Fahrtrichtung Süden ein leichtes Gefälle, während Fahrtrichtung Norden eine leichte Steigung aufweist. In diesem Kontext hat vorrangig die Anschlussstelle Friedberg Auswirkungen auf den Verkehrsfluss, da sie auf einer Kuppe liegt. In Fahrtrichtung Süden fahrend müssen die Verkehrsteilnehmenden vor der Anschlussstelle Friedberg eine Steigung von bis zu 4 % überwinden, das anschließende Segment 2 hat ein Gefälle von bis zu 3 %. In Fahrtrichtung Norden ist es entsprechend umgekehrt. Zusätzlich werden Langsamfahrbereiche auf den Ausfahrten platziert, damit ausfahrende Fahrzeuge realitätsnah abbremsen, bevor sie das Netz verlassen.

Die Fahrzeugzuflüsse im Modell werden aus den Detektordaten der Einfahrten des untersuchten Autobahnabschnitts generiert. Die erfassten Verkehrsstärken werden separat für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge zu 5-Minuten-Intervallen aggregiert. Diese Aufbereitung erfolgt für die repräsentativen Werktage des untersuchten Zeitraums (16. bis 29.09.2019). Ein Simulationslauf umfasst i. d. R. sechs Stunden, was einer Hauptverkehrszeit mit Vor- und Nachlauf entspricht. Zusätzlich hat jeder Simulationslauf einen zeitlichen Vorlauf von 30 Minuten. In dieser Vorlaufzeit werden die Verkehrsstärken des ersten Intervalls in das Modell eingesetzt. Im Anschluss beginnt die Auswertung des Verkehrsablaufs.

Die Verkehrszusammensetzung aus Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen ergibt sich aus den Detektordaten und den separaten Zuflüssen für Pkw und Lkw. Die Fahrzeugzusammensetzungen innerhalb der Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeugklassen werden entsprechend ihren Anteilen aus der Empirie abgebildet (siehe Kapitel 4.3.2) und wie folgt zusammengefasst:

- Pkw-Ähnliche:
90 % Pkw und 10 % Lieferwagen
- Lkw-Ähnliche:
65 % Sattelkraftfahrzeuge, 15 % Lkw, 15 % Lkw mit Anhänger und 5 % Busse

Busse fungieren dabei in der Simulation stellvertretend für Busse und Pkw mit Anhänger. Sie werden separat im Modell abgebildet, weil sie in Bezug auf die gefahrenen Geschwindigkeiten annähernd die Eigenschaften von Lkw besitzen, jedoch nicht vom Lkw-Überholverbot betroffen sind.

Die in Kapitel 4.5 ermittelten Quelle-Ziel-Matrizen werden für die Belastungen der Fahrzeugrouten im Verkehrsflussmodell herangezogen. Zunächst werden für alle Quelle-Ziel-Beziehungen statische Fahrzeugroutenentscheidungen mit entsprechenden statischen Fahrzeugrouten für Pkw und Lkw angelegt. Den statischen Fahrzeugrouten werden anschließend stündlich wechselnd relative Verkehrsbelastungen aus den stundenfeinen Verflechtungsmatrizen zugeteilt.

6.3.2 Fahrverhalten

Als Startwerte für die Fahrverhaltensparameter werden die in Kapitel 3.5 erwähnten HBS-konformen Standardparameter für Autobahnverkehr in Vissim nach Geistefeldt u. a. [2017] eingesetzt. Diese gehen von einem unterschiedlichen Folge- und Fahrstreifenwechselerhalten für Pkw und Lkw und unterschiedlichen Parameterwerten für Strecken, Ausfahrten, Einfahrten und Verflechtungsstrecken aus. Es wird das Fahrzeugfolgemodell *Wiedemann 99* verwendet.

Eine Herausforderung bei der Modellierung von Autobahnverkehr in Vissim ist die Abbildung von Verflechtungsvorgängen an Anschlussstellen. Das Verflechtungsverhalten in der Simulation ist oft zu vorsichtig, sodass es Fahrzeuge zum Teil nicht schaffen, einen notwendigen Fahrstreifenwechsel durchzuführen und deswegen nothalten. Solche Nothalte sind unrealistisch (die Fahrzeuge würden in Realität kleinere Lücken verwenden) und haben negative Auswirkungen auf den Verkehrsfluss in der Simulation. Um Probleme bei den Verflechtungsvorgängen zu verhindern, sind in den Standardparametersätzen höhere Folgezeitlücken (*CCI*) in den Anschlussstellenbereichen als auf den Strecken hinterlegt. Dies bewirkt, dass sich größere Lücken im Verkehr bilden, die die Fahrzeuge beim Verflechten nutzen können, wodurch weniger Probleme im Verkehrsablauf entstehen. Auf dem untersuchten Abschnitt führt die Erhöhung der *CCI*-Werte jedoch zu einer erheblichen

Reduktion der Kapazität und der Verkehr kann zu den Hauptverkehrszeiten nicht abgewickelt werden. Die Fahrzeuge bremsen im Anschlussstellenbereich ab, um eine größere Folgezeitlücke aufzubauen. Bei mittleren und hohen Verkehrsstärken entsteht dadurch eine Stauwelle stromaufwärts der Anschlussstelle.

Die Fahrverhaltensparameter werden daher an die Gegebenheiten der A5 angepasst. Es wird das gleiche *CCI* auf der Strecke und in den Anschlussstellen verwendet. Das Problem der Verflechtungsvorgänge wird mit einem aggressiveren Fahrstreifenwechselverhalten in den Anschlussstellen und geeigneten Fahrstreifenwechselferständen minimiert. Zusätzlich wird für *CCI* eine Verteilung anstatt eines Wertes hinterlegt, da so eine bessere Abbildung der realen Zeitlückenverteilungen in der Simulation gelingt. Es resultieren separate Fahrverhalten für Pkw und Lkw und jeweils für Strecken und Anschlussstellenbereiche.

Eine Betrachtung der Fahrstreifenaufteilung zeigt, dass die Auslastung der Fahrstreifen in der Simulation von der Empirie abweicht. Etwa 5 % bis 10 % des simulierten Verkehrs auf dem linken Fahrstreifen müsste vom mittleren Fahrstreifen abgewickelt werden, um einer realitätsnahen Fahrstreifenaufteilung der A5 zu entsprechen. Eine Möglichkeit der Beeinflussung der Fahrstreifenaufteilung in Vissim sind fahrstreifenspezifische Streckenverhaltenstypen. Auf Autobahnen sortieren sich die Fahrzeuge so auf die Fahrstreifen, dass die Geschwindigkeit und die Aggressivität des Fahrverhaltens i. d. R. von rechts nach links zunehmen. Inwieweit Verkehrsteilnehmende den Fahrstreifen entsprechend ihrem Fahrverhalten und ihrer Wunschgeschwindigkeit auswählen oder sie ihr Fahrverhalten an den jeweiligen Fahrstreifen anpassen, bleibt zu untersuchen. Da mithilfe von fahrstreifenspezifischen Streckenverhaltenstypen unterschiedliches Fahrverhalten auf unterschiedlichen Fahrstreifen besser in der Simulation abgebildet werden kann, wird diese Modellierungsart im Weiteren eingesetzt. Zur Frage der Realitätsnähe besteht weiterer Forschungsbedarf.

Für eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Fahrverhaltensparameter ist die in Kapitel 6.4 durchgeführte Kopplung des Steuerungsmodells und des Akzeptanzmodells an die Simulation erforderlich. Anschließend erfolgt die Kalibrierung des Fahrverhaltens in Kapitel 6.5.

6.3.3 Modellierung der SBA mit TSF

Für die Modellierung der SBA werden zunächst im Verkehrsflussmodell Messquerschnitte an den Positionen angelegt, an denen auch in Realität Detektoren auf dem untersuchten Abschnitt vorhanden sind. Anschließend werden Querschnittsmessungen definiert, welche die für die Steuerung (SARAH-Implementierung) notwendigen Verkehrsdaten in der Simulation minutenfein erfassen.

An den Positionen der Anzeigequerschnitte werden im Modell Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen eingefügt. Wenn die SARAH-Implementierung neue Geschwindigkeitsbeschränkungen für einen oder mehrere Anzeigequerschnitte ermittelt, werden den jeweiligen Wunschgeschwindigkeitsentscheidungen die entsprechenden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen aus dem Akzeptanzmodell (siehe Kapitel 5.4) zugeordnet. Beim Überfahren einer Wunschgeschwindigkeitsentscheidung wird den Fahrzeugen entsprechend ihrer Fahrzeugklasse und ihrem Perzentil eine neue, der Geschwindigkeitsbeschränkung entsprechenden Wunschgeschwindigkeit zugeordnet.

Die Modellierung des Lkw-Überholverbots erfolgt mithilfe von Fahrstreifensperren für Lkw. Das Akzeptanzmodell unterscheidet dabei zwischen akzeptierenden und nicht-akzeptierenden Lkw (siehe Kapitel 5.4). Diese werden als zwei Fahrzeugklassen abgebildet. Wenn die SBA ein Lkw-Überholverbot schaltet, werden die Überholfahrstreifen im betroffenen Bereich für die Fahrzeugklasse der Akzeptierenden gesperrt. Lkw, die sich bei der Aktivierung des Lkw-Überholverbots auf einem Überholfahrstreifen befinden, versuchen schnellstmöglich auf den rechten Fahrstreifen zu wechseln. Bei Freigabe des Seitenstreifens und gleichzeitiger Schaltung eines Lkw-Überholverbots sind sowohl der Seitenstreifen als auch der rechte Hauptfahrstreifen für akzeptierende Lkw befahrbar.

Die Untersuchung der Fahrstreifenaufteilung der Lkw hat ergeben, dass der Lkw-Anteil auf dem linken Fahrstreifen sehr gering ist (siehe Kapitel 5.3). Daher wird im Modell zusätzlich der linke Fahrstreifen auf dem gesamten Abschnitt für alle Lkw gesperrt. Die Fahrzeugklasse der Busse ist weder vom Lkw-Überholverbot noch von der grundsätzlichen Sperrung des linken Fahrstreifens betroffen.

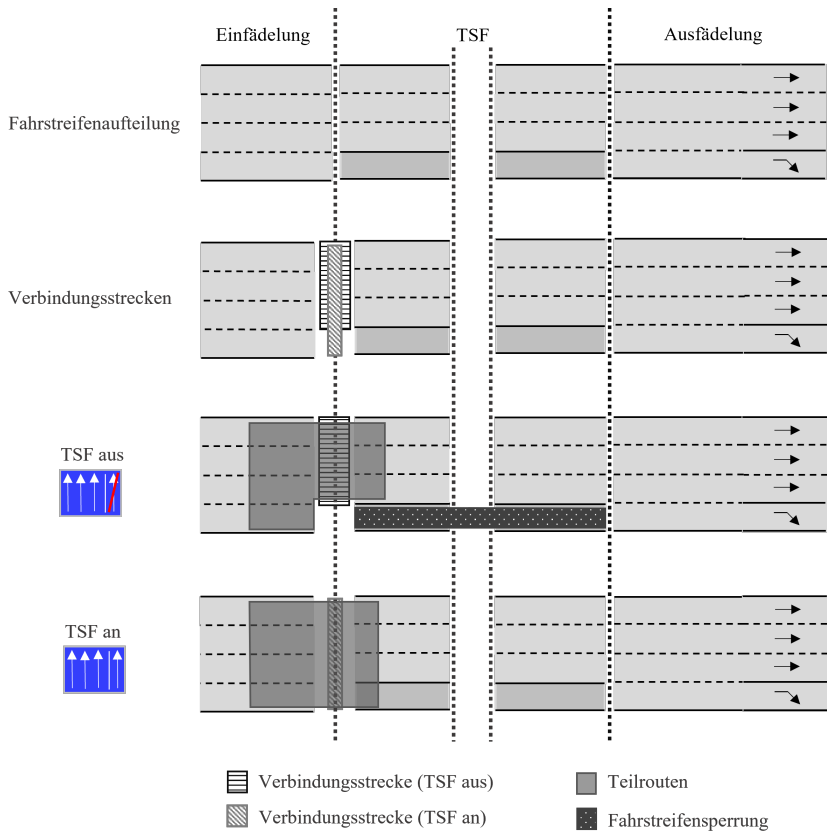


Abbildung 6.3: Modellierung einer TSF in Vissim (eigene Darstellung)

Für die Modellierung einer TSF in Vissim reicht die Sperrung des Seitenstreifens für alle Fahrzeugklassen nicht aus. Das Sperren eines Fahrstreifens hat wie bereits erwähnt zur Folge, dass die Fahrzeuge den Fahrstreifen so schnell wie möglich verlassen möchten. Wenn aber ein Fahrzeug auf diesem Fahrstreifen fährt und ein Fahrstreifenwechsel aufgrund der Verkehrssituation nicht möglich ist, nutzt das Fahrzeug weiter den gesperrten Fahrstreifen. Bei wachsender Verkehrsstärke verbleiben in der Simulation immer mehr Fahrzeuge auf dem Seitenstreifen, da sie es nicht schaffen, den Fahrstreifen zu wechseln. Daher erfolgt die Modellierung

der Freigabe und Sperrung des Seitenstreifens mithilfe von Fahrzeugteilrouten in Kombination mit Fahrstreifensperrungen.

Abbildung 6.3 zeigt eine Skizze der Vorgehensweise bei der Modellierung einer TSF in Vissim. Es werden am Anfang und Ende des Segments mit der Seitenstreifenfreigabe jeweils zwei Verbindungsstrecken angelegt. Eine Verbindungsstrecke führt über die drei Hauptfahrstreifen, die zweite führt über alle vier Fahrstreifen (drei Hauptfahrstreifen und der Seitenstreifen). Im nächsten Schritt wird eine Fahrzeugteilrouten-Entscheidung angelegt, die jeweils eine Teilroute über die dreistreifige Verbindungsstrecke und eine über die vierstreifige Verbindungsstrecke umfasst. Die relativen Belastungen der beiden Teilrouten werden, je nachdem, ob die TSF ein- oder ausgeschaltet ist, verändert. Wenn der Seitenstreifen nicht freigegeben ist, wählen alle Fahrzeuge die Teilroute über die Verbindungsstrecke, die an die drei Hauptfahrstreifen angebunden ist. Zusätzlich wird der Seitenstreifen für alle Fahrzeugklassen gesperrt, damit die Fahrzeuge nicht nach dem Verlassen der Teilroute auf den Seitenstreifen wechseln.

Im Modell erfolgen die Freigabe und die Sperrung des Seitenstreifens entsprechend dem in Kapitel 4.4 vorgestellten Algorithmus zur Abbildung der in Realität vom Bedienpersonal durchgeführten Öffnungs- und Schließungsvorgänge.

6.4 Kopplung der Komponenten

Die SARAH-Implementierung und das Akzeptanzmodell werden über die COM-Schnittstelle an die Simulation gekoppelt. Die Kommunikation erfolgt in einer eigens entwickelten Simulations- und Auswertumgebung in Python. Zunächst öffnet das Skript eine Vissim-Instanz, lädt das Netzmodell und legt die Eingangsgrößen wie Fahrzeugzuflüsse, Fahrzeugrouten, Fahrzeugzusammensetzung und Wunschgeschwindigkeitsverteilungen entsprechend den Informationen aus einer Konfigurationsdatei im Verkehrsflussmodell an. Anschließend startet das Skript die Simulation. Da das Messintervall auf dem untersuchten Abschnitt der A5 eine Minute beträgt, erfolgt der Datenfluss in der Simulation ebenfalls minutenfein.

Abbildung 6.4 zeigt die Konkretisierung des Datenflusses aus Abbildung 6.1 für ein Minutenintervall in der Simulation.

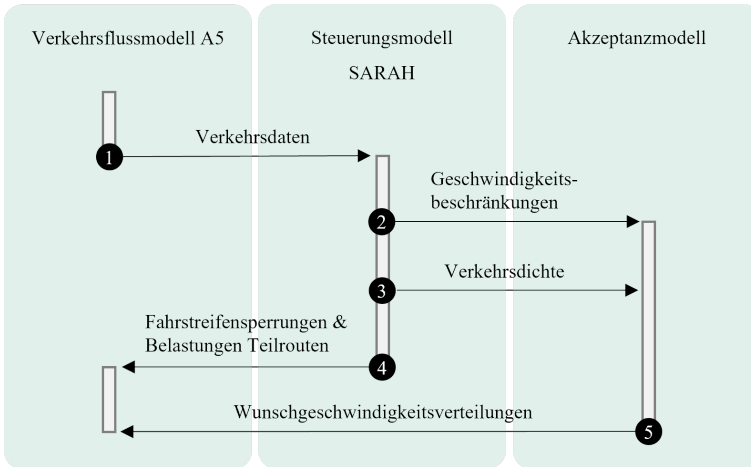


Abbildung 6.4: Ablauf der Simulation für ein Minutenintervall (eigene Darstellung)

Das Skript pausiert nach jeder simulierten Minute den Verkehrsfluss in der Simulation. Der Verkehr, der kontinuierlich an den Messquerschnitten erfasst und auf Minutenintervalle aggregiert wird, wird anschließend an die SARAH-Implementierung übergeben. Diese ermittelt anhand der aktuellen Verkehrssituation Schaltbilder für die Streckenbeeinflussung an allen Anzeigequerschnitten. Es wird zwischen Geschwindigkeitsbeschränkungen und anderen Schaltbildern unterschieden. Die dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen werden zusammen mit der aktuellen Verkehrssituation an den Messquerschnitten an das Akzeptanzmodell übergeben, das die Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden ermittelt. Diese Reaktionen werden separat für alle Anzeigequerschnitte in Form von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen an die Simulation zurückgespielt. Andere Schaltbilder umfassen die Öffnung und Schließung der TSF und das Lkw-Überholverbot. Diese werden an Vissim übergeben und in Form von Fahrstreifensperrungen oder -öffnungen und Belastungen von verschiedenen Teilrouten in Vissim umgesetzt (siehe Kapitel 6.3.3). Anschließend wird die Simulation mit

den durchgeführten Änderungen für eine weitere Minute fortgeführt. Der Ablauf wiederholt sich, bis die festgelegte Simulationsdauer erreicht ist.

6.5 Kalibrierung

6.5.1 Vorgehensweise

Die Modellkalibrierung erfolgt wie in Kapitel 3.3.7 beschrieben in einem iterativen Prozess. Die Kalibrierungsgrößen sind dabei vorrangig die Parameter des Fahrverhaltens. Zusätzlich werden der Anteil der Lkw-Überholverbot-Akzeptierenden, die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, die Verflechtungsmatrizen und die Fahrzeugzuflüsse untersucht. Mithilfe von Visualisierungen und dem Fehlermaß RMSPE (siehe Kapitel 3.3.7) wird der Erfolg einer Parameteranpassung festgestellt. Dabei werden die folgenden makroskopischen und mikroskopischen Verkehrsgrößen in der Simulation bei der Kalibrierung berücksichtigt:

- Verkehrsstärkeverläufe
Daten aus Querschnittsmessungen, separate zeitliche und räumliche Auswertung
- Geschwindigkeitsverläufe
Daten aus Querschnittsmessungen, separate zeitliche und räumliche Auswertung
- raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation
Daten aus Querschnittsmessungen
- q-v-Diagramme
Daten aus Querschnittsmessungen, räumliche Auswertung
- Zeitlückenverteilungen
Einzelfahrzeuginformationen aus Querschnittsmessungen, fahstreifenfeine Auswertung

- Fahrstreifenaufteilung
Daten aus Querschnittsmessungen
- Reisezeiten
Daten aus Fahrzeugreisezeitmessungen

Alle Auswertungen werden einerseits separat für Pkw und Lkw und andererseits zusammenfassend für alle Kfz durchgeführt. Alle Abbildungen in diesem Unterkapitel zeigen den kalibrierten Zustand des Verkehrsflussmodells.

Die Modellkalibrierung erfolgt anhand der Verkehrsdaten von Mittwoch, dem 18.09.2018 (siehe Kapitel 4.6). Es wird der Zeitraum um die morgendliche Hauptverkehrszeit zwischen 5:00 und 11:00 Uhr gewählt. Die beiden Fahrrichtungen des untersuchten Abschnitts ergänzen sich dabei verkehrlich gut, da die Ausprägungen der Hauptverkehrszeiten invertiert sind. Somit sind verschiedene Belastungsfälle in einer Simulation abgebildet.

Erste Auswertungen zeigen, dass die Kapazität im Modell insgesamt zu gering ist. Die Fahrzeugzufüsse können nicht vollständig abfließen, zusätzlich breiten sich Staus zu weit aus und können nicht mehr abgebaut werden. Des Weiteren weisen erste Simulationsläufe keine realitätsnahe Fahrstreifenaufteilung auf. Dabei fällt hauptsächlich der hohe Lkw-Anteil bei insgesamt zu wenigen Fahrzeugen auf dem mittleren Fahrstreifen auf. Vorrangiges Ziel der Kalibrierung ist es, diese Aspekte in der Simulation zu beheben.

Bei dem untersuchten Autobahnabschnitt handelt es sich um einen großräumigen und viel befahrenen Bereich der A5 mit komplexen verkehrlichen Abläufen. Stochastische Effekte und Wechselwirkungen zwischen verkehrlichen Ereignissen haben große Einflüsse, die in täglich variierenden Verkehrszuständen sichtbar werden. Diese unterschiedlichen raumzeitlichen Verläufe der Verkehrssituationen treten ebenfalls in der Simulation auf. Verschiedene Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen desselben Kalibrierungsschritts ergeben zum Teil unterschiedliche Stautenstehungen und -auflösungen. Zusätzlich beeinflusst die

SBA-Steuerung die Simulationsergebnisse. In Grenzbereichen der Steuerungskriterien können in verschiedenen Simulationsläufen unterschiedliche Schaltprogramme aktiviert werden, die wiederum einen Einfluss auf den Verkehrsfluss haben. Dies erhöht die Komplexität die Kalibrierung, da zum Teil einzelne Simulationsläufe eines Kalibrierungsschritts den Verkehrsfluss des Kalibrierungszeitraums besser nachbilden, während andere weiter von den Zielgrößen entfernt sind. Die Ergebnisse der Kalibrierung basieren auf 20 Simulationsläufen.

6.5.2 Plausibilisierung

In einer Plausibilisierung wird das Verkehrsflussmodell zunächst auf Modellierungsfehler hin untersucht. Viele Unstimmigkeiten im Verkehrsfluss können durch eine augenscheinliche Überprüfung ermittelt und durch Anpassung des Modells korrigiert werden. Ein Beispiel ist der Netzaufbau an den Anschlussstellen. Eine Betrachtung der Simulation und des zugrundeliegenden Streckennetzes ergibt, dass einzelne Ein- und Ausfahrten besonders gestaltet sind und es in der Simulation zunächst zu einer reduzierten bzw. erhöhten Kapazität an den betroffenen Anschlussstellen kommt, sodass eine Nachjustierung im Modell erforderlich ist.



Abbildung 6.5: Ausfahrt am Nordwestkreuz Frankfurt mit besonderer Markierung [Google, 2023]

Abbildung 6.5 zeigt ein Beispiel einer Ausfahrt am Nordwestkreuz Frankfurt in Fahrtrichtung Süden mit einer besonderen Markierung. Im vierstreifigen Bereich sind sowohl der Ausfahrtstreifen (mit Verzögerungsbereich) als auch der rechte Hauptfahrstreifen (ohne Verzögerungsbereich) an die Ausfahrt angeschlossen. Etwa 100 m vor sowie innerhalb der zweistreifigen Ausfahrt unterbindet eine entsprechende Markierung Fahrstreifenwechsel, sodass bei einer Route über

den gelb markierten Bereich (siehe Abbildung 6.5) eine frühzeitige Einfädelung auf den Ausfahrtstreifen notwendig ist. Vielen Fahrzeugen gelingt es nicht, frühzeitig einzufädeln, sodass sie auf der Ausfahrt nothalten, wo sie aufgrund des Fahrstreifenwechselverbots keine Möglichkeit mehr haben, ihre Route zu erreichen. Die Modellierung dieser Ausfahrt umfasst ein Fahrstreifenwechselverbot und eine Nothalteposition von etwa 200 m für die Verbindungsstrecke im gelb markierten Bereich. Letztere Maßnahme verhindert, dass Fahrzeuge auf der Ausfahrt nothalten, wo sie aufgrund des Fahrstreifenwechselverbots keine Möglichkeit mehr haben, ihre Route zu erreichen. Unstimmigkeiten dieser Art können durch Modellanpassungen behoben werden.

6.5.3 Fahrverhalten

Erste Plausibilisierungen des Fahrverhaltens sind in Kapitel 6.3.2 beschrieben und ergeben, dass ein fahrstreifenspezifisches Fahrverhalten, separat für Pkw und Lkw, am zielführendsten ist. Zusätzlich wird zwischen dem Fahrverhalten auf Strecken und in Anschlussstellenbereichen unterschieden. Die Grundlagen zum Fahrverhalten und den entsprechenden Parametern in Vissim sind in Kapitel 3.3 erläutert. Die wichtigsten Erkenntnisse der Kalibrierung des Fahrverhaltens werden im Folgenden thematisiert. Die finalen Parameterwerte sind in den Tabellen 6.2 und 6.3 dargestellt.

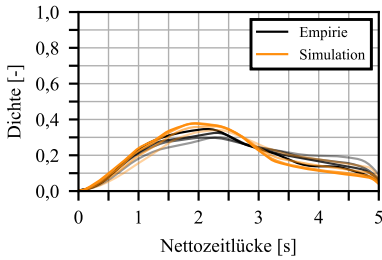
Fahrzeugfolgeverhalten

Der wichtigste Aspekt bei der Kalibrierung der Kapazität ist der Abstand beim Folgen, der vorrangig durch den Parameter CCI bestimmt wird. Auch $CC2$, $CC4$ und $CC5$ haben einen Einfluss. In diesem Schritt werden zum einen die Stauentstehung und -auflösung für verschiedene Parameterwerte betrachtet. Zum anderen werden die Zeitlückenverteilungen auf den einzelnen Fahrstreifen untersucht, die u. a. aus dem Folgeverhalten resultieren. Zusätzlich liefern die Fehlermeldungen

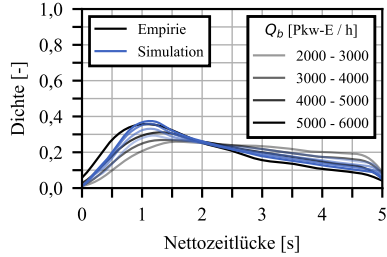
der Simulationsläufe Hinweise auf Kapazitätsprobleme und sollten zur Auswertung herangezogen werden. Diese dokumentieren, wenn nicht alle Fahrzeuge eines Fahrzeugzuflusses in der simulierten Zeit in das Modell einfahren können.

Abbildung 6.6 stellt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Nettozeitlücken kleiner fünf Sekunden aus der Simulation den Einzelfahrzeugdaten der A5 gegenüber. Die Kalibrierung zeigt, dass sich die in den Einzelfahrzeugdaten erkennbare Vergrößerung der Zeitlücken mit sinkender Verkehrsstärke in der Simulation weniger stark einstellt als in Realität. Die Wahrscheinlichkeitsdichtekurven für die verschiedenen Verkehrsstärkeklassen unterscheiden sich in der Simulation weniger stark als in den untersuchten Einzelfahrzeugdaten. Die empirischen Nettozeitlücken lassen sich somit nicht mit einer einzelnen *CCI*-Verteilung für alle Verkehrssituationen replizieren. Es besteht weiterer Forschungsbedarf zu der Frage, wie sich das Folgeverhalten in Abhängigkeit der Verkehrssituation ändert. Die Auswertungen weisen darauf hin, dass *CCI* mit steigender Verkehrsstärke abnimmt; die Verkehrsteilnehmenden halten weniger Abstand, wenn die Verkehrsdichte zunimmt. Zur Abbildung eines solchen Verhaltens wäre eine Modellierung von *CCI* in Abhängigkeit der Verkehrsstärke bzw. -dichte notwendig. In diesem Kontext ist auch das Folgeverhalten der Verkehrsteilnehmenden in Abhängigkeit der Schaltbilder der SBA weiter zu untersuchen. Kapitel 4.3.5 gibt erste Hinweise auf ein verändertes Folgeverhalten je nach SBA-Anzeige. Neben den A-Anzeigen, die i. d. R. in direktem Zusammenhang zur Verkehrssituation stehen, ist auch die Untersuchung eines möglichen veränderten Folgeverhaltens in Abhängigkeit der B-Anzeige von Relevanz.

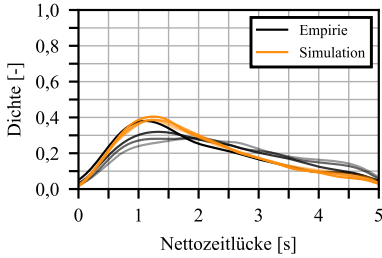
Da das Folgeverhalten im Bereich der Kapazität die größten Auswirkungen auf den Verkehrsfluss hat, konzentriert sich die Kalibrierung auf die Abbildung der Nettozeitlücken bei hohen Verkehrsstärken. Eine separate Betrachtung der einzelnen Fahrstreifen und Fahrzeugklassen ist erforderlich, weil erste Kalibrierungsschritte zeigen, dass die Verteilung der Nettozeitlücken für alle Kfz und Fahrstreifen zusammengefasst auch nachgebildet werden kann, ohne dass die Verteilungen der einzelnen Fahrstreifen und Fahrzeugklassen der Empirie entsprechen. Eine sehr gute Übereinstimmung liegt für die in Abbildung 6.7 dargestellten *CCI*-Verteilungen für Pkw und Lkw in Abhängigkeit des Fahrstreifens vor. Auch die



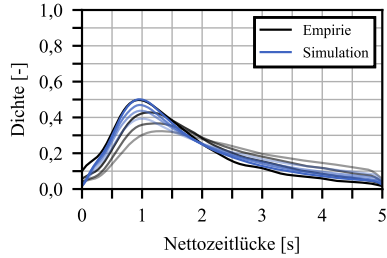
(a) Lkw | FS 1



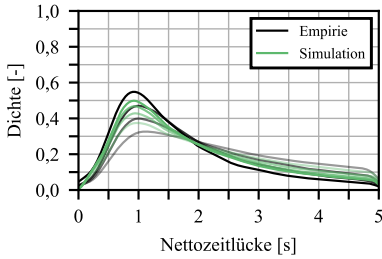
(b) Pkw | FS 1



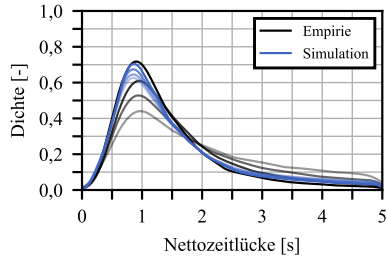
(c) Lkw | FS 2



(d) Pkw | FS 2



(e) Kfz | alle FS



(f) Pkw | FS 3

Abbildung 6.6: Nettozeitlücken in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse und des Fahrstreifens für simulierte und empirische Verkehrsdaten (eigene Darstellungen)

Stauentstehung und -auflösung in der Simulation nähert sich durch die Anpassung der *CCI*-Verteilungen deutlich an die Empirie an. Dies ist auf eine Vergrößerung der Kapazität im Modell aufgrund einer Verringerung der Folgeabstände

zurückzuführen. Abbildung 6.6e führt die Zusammenfassung der Nettozeitlücken für alle Fahrstreifen und Fahrzeugklassen auf. Die Simulationen replizieren die Zeitlücken aus den Einzelfahrzeugdaten der A5 gut.

Für Lkw resultieren *CCI*-Verteilungen für den rechten und mittleren Fahrstreifen (siehe Abbildung 6.7a). Der linke Fahrstreifen ist grundsätzlich für Lkw gesperrt. Lediglich Busse können den linken Fahrstreifen nutzen und bekommen in diesen Fällen das Fahrverhalten des mittleren Fahrstreifens zugeteilt. Die Folgezeitlücken der Lkw sind für den rechten Fahrstreifen deutlich größer als für den mittleren. Lkw-Fahrende sind oft weite Strecken unterwegs, sie fahren i. d. R. rechts und passen ihre Geschwindigkeit häufig über einen Geschwindigkeitsregler an ihr Vorderfahrzeug an. Zusätzlich erfordern die Fahrzeugeigenschaften aufgrund des längeren Bremsweges eines Lkw größere Folgeabstände als für Pkw. Es resultieren vergleichsweise hohe *CCI*-Werte auf dem rechten Fahrstreifen. Die geringeren Abstände auf dem mittleren Fahrstreifen lassen sich durch die Anpassung des Fahrverhaltens der Lkw-Fahrenden an den Pkw-Verkehr erklären. Wenn Lkw überholen, stellen sie häufig ein Verkehrshindernis dar und versuchen sich schnellstmöglich wieder rechts einzuordnen. Für Pkw stellen sich realitätsnahe Nettozeitlücken ein, wenn die *CCI*-Verteilungen auf dem mittleren Fahrstreifen die geringsten und auf dem linken die größten Werte beinhalten (siehe Abbildung 6.7b). Die resultierenden Nettozeitlücken haben im Vergleich zu den anderen Fahrstreifen dennoch für den linken Fahrstreifen das kleinste Maximum. Für *CC2* erzielt eine Erhöhung der Oszillation für Pkw in Anschlussstellen und eine Reduktion für Lkw auf der Strecke gute Ergebnisse. Anpassungen von *CC4* und *CC5* zeigen keine Verbesserung der Ergebnisse.

Die Zeitlückenverteilungen auf den einzelnen Fahrstreifen haben ebenfalls einen großen Einfluss auf die Fahrstreifenaufteilung. Größere Zeitlücken reduzieren die Kapazität eines Fahrstreifens, erhöhen jedoch die Fahrstreifenwechsellmöglichkeiten auf diesen Fahrstreifen. Die Wechselwirkungen dieser beiden Phänomene zeigen große Auswirkungen auf den Verkehrsfluss in der Simulation. Die kalibrierten *CCI*-Verteilungen aus Abbildung 6.7 erhöhen die Auslastung des mittleren Fahrstreifens und tragen somit zu einer realitätsnäheren Fahrstreifenaufteilung in der Simulation bei. Andersherum beeinflusst auch die Fahrstreifenaufteilung die

Zeitlücken auf den Fahrstreifen. Eine zu starke Nutzung des mittleren Fahrstreifens durch Lkw bewirkt bspw. eine Erhöhung der Zeitlücken auf diesem Fahrstreifen. Insgesamt bleibt zu berücksichtigen, dass kritisch kleine Zeitlücken aus reduzierten Sicherheitsabständen beim Fahrstreifenwechsel resultieren können und somit auch das Fahrstreifenwechselverhalten einen Einfluss auf die Zeitlücken hat.

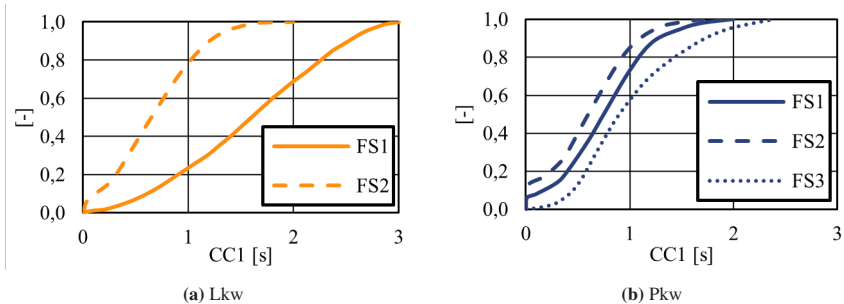


Abbildung 6.7: CCI-Verteilungen für Lkw (links) und Pkw (rechts) in Abhängigkeit des Fahrstreifens (eigene Darstellungen)

Des Weiteren resultieren aus der Kalibrierung Anpassungen der Fahrzeugfolgeparameter $CC3$, $CC8$ und $CC9$ für Lkw. Die Simulationen zeigen im Allgemeinen eine zu hohe Anzahl an Lkw-Überholvorgängen, denen mit einer Reduktion von $CC3$ entgegengewirkt werden kann. Eine Verringerung von $CC3$ für Lkw bewirkt, dass Lkw ihre Vorderfahrzeuge später wahrnehmen, wodurch Überholvorgänge von Lkw gehemmt werden. Zusätzlich wird durch eine Reduktion von $CC8$ und $CC9$ das Beschleunigungsvormögen der Lkw im Vergleich zu den Pkw eingeschränkt. Beide Parameter werden zusätzlich durch die hinterlegten Wunsch- und Maximalbeschleunigungsfunktionen begrenzt. Da keine Daten der Fahrzeugbeschleunigungen vorliegen, werden die Standard-Funktionen aus Vissim für die Wunsch- und Maximalbeschleunigungen angenommen.

Tabelle 6.2 fasst die kalibrierten Parameterwerte des Fahrzeugfolgeverhaltens zusammen.

Tabelle 6.2: Kalibrierte Parameterwerte des Fahrzeugfolgeverhaltens in Vissim

Streckentyp	Fahrzeugklasse	Fahrstreifen	CC0 [m]	CC1 ¹ [s]	CC2 [m]	CC3 [s]	CC4 [m/s]	CC5 [m/s]	CC6 [1/(m·s)]	CC7 [m/s ²]	CC8 [m/s ²]	CC9 [m/s ²]
Strecke	Pkw	1	1,5	$\mu=0,75$	4	-8	-0,35	0,35	11,44	0,25	3,5	1,5
Strecke	Pkw	2	1,5	$\mu=0,60$	4	-8	-0,35	0,35	11,44	0,25	3,5	1,5
Strecke	Pkw	3	1,5	$\mu=0,90$	4	-8	-0,35	0,35	11,44	0,25	3,5	1,5
AS	Pkw	1	2,5	$\mu=0,75$	5	-8	-0,35	0,35	11,44	0,25	3,5	1,5
AS	Pkw	2	2,5	$\mu=0,60$	5	-8	-0,35	0,35	11,44	0,25	3,5	1,5
AS	Pkw	3	2,5	$\mu=0,90$	5	-8	-0,35	0,35	11,44	0,25	3,5	1,5
Strecke	Lkw	1	2,5	$\mu=1,60$	3	-5	-0,35	0,35	11,44	0,25	2,5	1,0
Strecke	Lkw	2	2,5	$\mu=0,65$	3	-5	-0,35	0,35	11,44	0,25	2,5	1,0
Strecke	Lkw	3	2,5	$\mu=0,65$	3	-5	-0,35	0,35	11,44	0,25	2,5	1,0
AS	Lkw	1	3,5	$\mu=1,60$	4	-5	-0,35	0,35	11,44	0,25	2,5	1,0
AS	Lkw	2	3,5	$\mu=0,65$	4	-5	-0,35	0,35	11,44	0,25	2,5	1,0
AS	Lkw	3	3,5	$\mu=0,65$	4	-5	-0,35	0,35	11,44	0,25	2,5	1,0

¹ siehe Abbildung 6.7 für CC1-Verteilungen

Fahrstreifenwechselverhalten

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der die Kapazität beeinflusst, ist das Fahrstreifenwechselverhalten. Sowohl notwendige als auch freiwillige Fahrstreifenwechsel (siehe Kapitel 2.2.2 und 3.3.3) bereiten zunächst Probleme in der Simulation. Zum einen zeigen erste Plausibilisierungen des Verkehrsflusses in den Anschlussstellen, dass die Fahrzeuge in der Simulation zu vorsichtig ein- und ausfädeln (siehe Kapitel 6.3.2); ein Verhalten, das auf notwendige Fahrstreifenwechsel zurückzuführen

ist. Zum anderen weist die Fahrstreifenaufteilung außerhalb der Anschlussstellen zu wenige Fahrzeuge auf dem mittleren Fahrstreifen auf. Eine Betrachtung der einzelnen Fahrzeugklassen zeigt, dass der Lkw-Anteil auf dem mittleren Fahrstreifen höher ist als in Realität und bedingt durch die größeren Bruttozeitlücken von Lkw insgesamt zu wenige Fahrzeuge auf dem mittleren Fahrstreifen Platz finden. Dieses Problem ist vorrangig auf freiwillige Fahrstreifenwechsel im Zuge von Überholvorgängen zurückzuführen.

Um den Verflechtungsproblemen in Anschlussstellen entgegenzuwirken, wird das Fahrverhalten in Bezug auf notwendige Fahrstreifenwechsel aggressiver gestaltet. Diese Anpassungen betreffen vorrangig die Anschlussstellenbereiche. Die Fahrzeuge versuchen notwendige Fahrstreifenwechsel zunächst auf der freien Strecke mit einem moderaten Fahrstreifenwechselverhalten durchzuführen. Im Anschlussstellenbereich wird den Fahrzeugen ein aggressiveres Verhalten zugeteilt. Wenn ein notwendiger Fahrstreifenwechsel bis zum Erreichen der Anschlussstelle nicht erfolgen konnte, legt das Fahrzeug für die Durchführung des Fahrstreifenwechsels ein rücksichtsloseres Fahrverhalten an den Tag. Die Simulationen erbringen gute Ergebnisse für eine Erhöhung der Parameterwerte in Bezug auf die Verzögerung. Dabei wird die maximale Verzögerung des eigenen und des Folgefahrzeugs für Pkw in Anschlussstellen angehoben und die akzeptierte Verzögerung für Pkw und Lkw in Anschlussstellen erhöht. Zusätzlich wird für Pkw die akzeptierte Verzögerung des Folgefahrzeugs auf Strecken und die eigene Verzögerungsreduktion-Entfernung auf Strecken und in Anschlussstellen angehoben.

In diesem Zusammenhang spielt die Fahrstreifenwechselfristanz der Verbindungsstrecken zwischen der Hauptfahrbahn und den Ausfahrten eine wesentliche Rolle, auch wenn es sich hierbei um ein Streckenattribut und nicht um einen Fahrverhaltensparameter handelt. Wenn die Fahrzeuge erst kurz vor der Ausfahrt mit dem Einordnen beginnen, besteht die Gefahr, dass sie den Fahrstreifenwechsel nicht rechtzeitig durchführen können und den Verkehr mit unrealistischen Nothalten behindern. Wenn sie sich hingegen früh entsprechend ihrer Route einordnen, kann es bei hohen Verkehrsstärken zu Stau in der Simulation kommen, weil die Kapazität auf der freien Strecke nicht ausreichend genutzt wird. Diese beiden Aspekte werden bei der Kalibrierung berücksichtigt und abgewogen. Des Weiteren ergibt die

Kalibrierung, dass die Annahme einer Verteilung für die jeweiligen Fahrstreifenwechselfolgen zielführend ist. Wird lediglich ein Wert hinterlegt, bekommen alle Fahrzeuge auf einer Route an der gleichen Position die Information, dass sie einen Fahrstreifenwechsel durchführen müssen. Dies verstärkt die ohnehin vorhandenen Störungen des Verkehrs durch Fahrstreifenwechsel an Anschlussstellen. Eine Verteilung bewirkt hingegen eine Entzerrung der Fahrstreifenwechselfolgen und damit eine Reduktion dieser Verkehrsstörungen.

Anhand der empirischen Analysen werden zwei Typen von Ausfahrten definiert. Ausfahrten mit einem hohen Störpotenzial durch Engpässe bekommen dabei längere Fahrstreifenwechselfolgen zugeordnet als Ausfahrten, die i. d. R. einen reibungslosen Ablauf aufweisen. Den Lkw wird eine bedeutend längere Fahrstreifenwechselfolgen zugewiesen als den Pkw. Neben der Tatsache, dass Einfädungsvorgänge für Lkw schwieriger sein können als für Pkw, wirkt diese Maßnahme Überholvorgängen von Lkw entgegen. Abbildung 6.8 zeigt die kalibrierten Verteilungen der Fahrstreifenwechselfolgen für Pkw und Lkw.

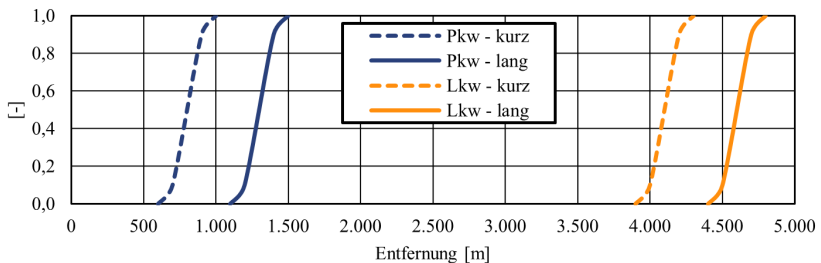


Abbildung 6.8: Fahrstreifenwechselfolgen für Lkw und Pkw (eigene Darstellung)

Ein guter Indikator für Probleme bei notwendigen Fahrstreifenwechsel ist die Anzahl an Fahrzeugen, die aus der Simulation entfernt werden, weil sie nothalten mussten und einen notwendigen Fahrstreifenwechsel bis zum Ablauf der Wartezeit bis zur Diffusion nicht durchführen konnten. Diese Vorfälle werden in den Fehlermeldungen der Simulationsläufe aufgeführt und sollten durch eine entsprechende Kalibrierung verhindert werden. Der Standardwert der Diffusionszeit beträgt 60 Sekunden. Dies bedeutet, dass Fahrzeuge für bis zu 59 Sekunden auf

der Autobahn nothalten können, ohne dass dies in den Fehlermeldungen sichtbar wird. Ein solches Verhalten kann große Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben und ist zudem sehr unplausibel. Eine Reduktion der Diffusionszeit ist in diesem Kontext sinnvoll, um zu überprüfen, wie oft es zu Nothalten in einer Simulation kommt. Bei geringen Diffusionszeiten werden die Fahrzeuge entsprechend schnell entfernt und die Nothalte können quantifiziert werden. Es ist das Ziel, dass trotz geringer Diffusionszeiten nahezu keine Fahrzeuge nothalten und aus der Simulation entfernt werden müssen. Eine Reduktion der Diffusionszeit mit dem Ziel, Fahrzeuge zu entfernen, die Schwierigkeiten beim Verflechten haben, ist nicht sinnvoll.

Freiwillige Fahrstreifenwechsel zur Durchführung von Überholvorgängen werden vorrangig durch die Wunschgeschwindigkeit eines Fahrzeugs ausgelöst (siehe Kapitel 6.5.4). Fahrverhaltensparameter, die freiwillige Fahrstreifenwechsel beeinflussen, sind vor allem der Sicherheitsabstandsfaktor und die Freifahrtzeit, wobei ersterer ebenfalls bei notwendigen Fahrstreifenwechseln berücksichtigt wird. Die Pkw weisen ein plausibles Fahrstreifenwechselverhalten auf der Strecke für den Standardwert des Sicherheitsabstandsfaktors auf. In den Anschlussstellen erzielt die Kalibrierung gute Ergebnisse für kleinere Werte, da diese zu einem aggressiveren Fahrverhalten der Pkw u. a. bei notwendigen Fahrstreifenwechsel beiträgt. Die Fahrstreifenaufteilung der Lkw kann günstig beeinflusst werden, indem der Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand auf dem mittleren und linken Fahrstreifen erhöht und auf dem rechten Fahrstreifen reduziert wird. So werden Fahrstreifenwechsel nach rechts gefördert, während Fahrstreifenwechsel nach links gehemmt werden.

Die Freifahrtzeit wirkt sich ebenfalls auf die Fahrstreifenaufteilung aus. Für Lkw ist eine sehr geringe Freifahrtzeit zielführend, damit sie sich nach einem Überholvorgang möglichst schnell wieder rechts einordnen. Für Pkw resultiert eine realitätsnahe Fahrstreifenaufteilung für hohe Werte der Freifahrtzeit auf dem rechten Fahrstreifen und geringe Werte auf dem mittleren Fahrstreifen. Das Fahrverhalten in Vissim zeichnet sich im Allgemeinen durch eine sehr gute Befolgung des Rechtsfahrgebots aus. In Realität fahren hingegen vor allem Pkw-Fahrende

vermehrt auf dem mittleren oder linken Fahrstreifen, obwohl die Verkehrssituation und Wunschgeschwindigkeit eine Einordnung rechts ermöglichen würden. Eine Erhöhung der Freifahrtzeit auf dem rechten Fahrstreifen bewirkt, dass die Trägheit der Pkw in der Simulation zunimmt und die Auslastung des mittleren und linken Fahrstreifens steigt. Eine zusätzliche Erhöhung der Pkw-Freifahrtzeit auf dem rechten Fahrstreifen in Anschlussstellen reduziert freiwillige Fahrstreifenwechsel und mindert durch die Entzerrung von notwendigen und freiwilligen Fahrstreifenwechseln Verflechtungsprobleme. Zusätzlich bewirkt die Reduktion der Freifahrtzeit auf dem mittleren Fahrstreifen, dass Pkw nach einem Überholvorgang auf dem linken Fahrstreifen schneller wieder in die Mitte wechseln. Durch die vermehrte Nutzung des mittleren Fahrstreifens durch Pkw reduzieren sich die Überholmöglichkeiten und folglich auch die Überholvorgänge der Lkw. Die Kalibrierung der Freifahrtzeit bewirkt eine deutliche Verbesserung der Fahrstreifenaufteilung der Pkw und Lkw.

Des Weiteren fördern hohe Werte für die Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen in Anschlussstellen Fahrstreifenwechsel und verbessern damit die Verflechtungen. Dieser Kalibrierungsschritt reduziert die Nothalte in der Simulation und hat einen positiven Einfluss auf den Verkehrsfluss. Trotz der Begrenzung von Fahrstreifenwechseln durch die maximale Verzögerung des Folgefahrzeugs, haben größere Werte für die Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen eine positive Wirkung in der Simulation. Zudem trägt intelligentes Einfädeln zu realitätsnahen Fahrstreifenwechseln bei und wird für Pkw und Lkw aktiviert. Ebenfalls aktiviert wird die Vorausschau der Fahrzeugroutenentscheidung. Kooperative Fahrstreifenwechsel werden für Pkw aktiviert, für Lkw jedoch nicht, weil diese Einstellung Fahrstreifenwechsel nach links begünstigt.

Das Fahrstreifenwechselverhalten der Lkw wird neben dem Fahrverhalten auch durch den Befolgungsgrad der dynamischen Lkw-Überholverbote beeinflusst. Die Anteile Akzeptierender und Nicht-Akzeptierender werden in der Kalibrierung angepasst und die resultierende Fahrstreifenaufteilung in der Simulation wird mit der empirischen Aufteilung verglichen. Die Simulationen zeigen eine realitätsnahe Fahrstreifenaufteilung der Lkw und Kfz für einen Anteil Akzeptierender von 80 %.

Tabelle 6.3 fasst die kalibrierten Parameterwerte des Fahrstreifenwechselverhaltens zusammen.

Tabelle 6.3: Kalibrierte Parameterwerte des Fahrstreifenwechselverhaltens in Vissim

Streckentyp	Fahrzeugklasse	Fahrstreifen	MaxVerzEig [m/s ²]	MaxVerzFolg [m/s ²]	VerzRedEntfEig [m pro -1 m/s ²]	VerzRedEntFolg [m pro -1 m/s ²]	AkzVerzEig [m/s ²]	AkzVerzFolg [m/s ²]	MinWegl [m]	FrFahrz [s]	SichAbstFsWechs [-]	KoopVerz [m/s ²]	IntellEinfäd [ja/nein]	VorausFzRoutEnt [ja/nein]	KoopFsWechsel [ja/nein]	KoopFsWechsGeschwDiff [km/h]	KoopFsWechsKollZeit [s]
Strecke	Pkw	1	-4	-3	300	200	-1,0	-0,75	0,5	15	0,6	-3	ja	ja	ja	10,8	10
Strecke	Pkw	2	-4	-3	300	200	-1,0	-0,75	0,5	5	0,6	-3	ja	ja	ja	10,8	10
Strecke	Pkw	3	-4	-3	300	200	-1,0	-0,75	0,5	5	0,6	-3	ja	ja	ja	10,8	10
AS	Pkw	1	-5	-4	300	200	-2,0	-1,50	0,5	30	0,4	-6	ja	ja	ja	10,8	10
AS	Pkw	2	-5	-4	300	200	-2,0	-1,50	0,5	5	0,4	-6	ja	ja	ja	10,8	10
AS	Pkw	3	-5	-4	300	200	-2,0	-1,50	0,5	5	0,4	-6	ja	ja	ja	10,8	10
Strecke	Lkw	1	-4	-3	200	200	-1,0	-0,50	0,5	0,5	0,5	-3	ja	ja	nein	\	\
Strecke	Lkw	2	-4	-3	200	200	-1,0	-0,50	0,5	0,5	1,0	-3	ja	ja	nein	\	\
Strecke	Lkw	3	-4	-3	200	200	-1,0	-0,50	0,5	0,5	1,0	-3	ja	ja	nein	\	\
AS	Lkw	1	-4	-3	200	200	-1,5	-1,50	0,5	0,5	0,5	-6	ja	ja	nein	\	\
AS	Lkw	2	-4	-3	200	200	-1,5	-1,50	0,5	0,5	1,0	-6	ja	ja	nein	\	\
AS	Lkw	3	-4	-3	200	200	-1,5	-1,50	0,5	0,5	1,0	-6	ja	ja	nein	\	\

6.5.4 Wunschgeschwindigkeiten

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Kalibrierung ist das Geschwindigkeitsverhalten. Neben den bereits ausführlich diskutierten Aspekten der Akzeptanz, kann auch unrealistisches Geschwindigkeitsverhalten falsche SBA-Schaltungen in der Simulation auslösen. Wenn der Verkehr bspw. nicht aufgrund der verkehrlichen Situation, sondern aufgrund der Wunschgeschwindigkeiten langsam fließt, kann es passieren, dass Ein- oder Ausschaltkriterien von Schaltprogrammen nicht erfüllt werden und andere Schaltprogramme aktiviert werden als in Realität. Das schwerwiegendste Beispiel ist die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h im Zuge einer Stauwarnung. Eine solche Schaltung löst in ersten Simulationsläufen eine deutliche Reduktion der Wunschgeschwindigkeiten aus. Bei der Aktivierung der Stauwarnung ist das Geschwindigkeitsniveau i. d. R. bereits aufgrund der verkehrlichen Situation gering. Die Reduktion der Wunschgeschwindigkeiten bewirkt jedoch zum Teil, dass sich die Geschwindigkeiten nicht wieder erholen. Dadurch werden die Ausschaltswellenwerte der Stauwarnung nicht erfüllt und die SARAH-Implementierung hebt die Stauwarnung nicht wieder auf. In Realität würden Verkehrsteilnehmende, die sich dem Ende eines Engpasses nähern und eine frei fließende Verkehrssituation vor sich sehen, beschleunigen und nicht abwarten, bis sich die SBA-Anzeige ändert. U. a. durch diese Missachtung erkennt die SBA, dass sich ein Stau auflöst und eine Anpassung der Schaltbilder notwendig ist. Zur Förderung einer realitätsnahen Stauauflösung werden den Fahrzeugen im Stau daher höhere Wunschgeschwindigkeiten zugeordnet. In diesem Kontext zeigt die Verwendung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h gute Ergebnisse.

Im Allgemeinen bilden die im Akzeptanzmodell hinterlegten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen (siehe Kapitel 5.1.2) die realen Geschwindigkeitsverläufe der Pkw in der Simulation sehr gut ab. Lediglich bei freiem Verkehr ohne Geschwindigkeitsbeschränkung sind die Geschwindigkeiten zu hoch. Grund für die Überschätzung der Wunschgeschwindigkeiten der Pkw bei geringen Dichten ohne Geschwindigkeitsbeschränkung ist, dass für diesen Datenfilter der Anteil frei

fahrender Pkw am höchsten ist und zusätzlich der überwiegende Anteil hoher Geschwindigkeiten in diesen Verkehrssituationen auftritt. Um dem entgegenzuwirken, wird vom Akzeptanzmodell für die Dichteklasse 1 ohne Geschwindigkeitsbeschränkung die Pkw-Wunschgeschwindigkeitsverteilung für eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h und Dichteklasse 1 zugeteilt. Infolgedessen nähern sich die Pkw-Geschwindigkeiten in der Simulation an die Realität an.

Für Verkehrsdichten größer 25 Pkw-E/km werden die Verteilungen der Dichteklasse 3 verwendet. Des Weiteren existieren für Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 80 km/h und 100 km/h keine Pkw-Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Dichteklasse 1. In diesen Fällen wird daher die Verteilung für die Beschränkung auf 120 km/h für Dichteklasse 3 herangezogen. Der Fahrzeugklasse der leichten Nutzfahrzeuge (Lnf) werden die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der Pkw zugeordnet. Um abzubilden, dass leichte Nutzfahrzeuge bei geringen Verkehrsdichten tendenziell langsamer fahren als Pkw, wird ihnen in Dichteklasse 1 jeweils die Verteilung von Dichteklasse 2 zugeteilt.

Im Gegensatz zu den Pkw bilden die geschätzten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Lkw deren Geschwindigkeitsverhalten nicht realitätsnah ab. Die Verteilungen weisen eine große Spannweite an Lkw-Wunschgeschwindigkeiten auf. Dadurch halten vereinzelt langsame Lkw den Verkehr auf, was zum einen in dichten Verkehrssituationen große Auswirkungen auf den gesamten Verkehrsfluss haben kann und zum anderen die mittleren Lkw-Geschwindigkeiten reduziert. Zusätzlich werden durch die unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeiten zu viele Überholwünsche bei den Lkw ausgelöst. Wenn die Einschaltkriterien des Lkw-Überholverbots nicht erfüllt sind, resultiert eine hohe Anzahl an Überholvorgängen durch Lkw, die zu einer unrealistischen Fahrstreifenaufteilung und zu einer Behinderung der Pkw auf dem mittleren Fahrstreifen führen. Daher ist für Lkw eine Abweichung von den geschätzten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nach der modifizierten Kaplan-Meier Methode (siehe Kapitel 5.1.2) notwendig. Es ist denkbar, dass die Grundidee von beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen der Kaplan-Meier Methode aufgrund von geringeren Lkw-Geschwindigkeiten, größeren Zeitlücken, Pulkbildungen und Lkw-Überholverböten nicht ohne Weiteres auf Lkw übertragbar ist.

Die Kalibrierung der Lkw-Wunschgeschwindigkeiten ergibt, dass Gleichverteilungen zielführend sind. Dazu werden die ursprünglichen annähernd normalverteilten Wunschgeschwindigkeiten mit Gleichverteilungen approximiert, sodass die sehr langsamen und sehr schnellen Lkw in den Randbereichen entfallen (siehe Abbildung 6.9). Zusätzlich erweist sich die Wunschgeschwindigkeitsverteilung für die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h für die Dichteklasse 3 (siehe Abbildung 5.7) als zu gering, daher wird in diesen Fällen stattdessen die Verteilung für Dichteklasse 2 zugeteilt. Bussen werden die gleichen Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zugeordnet wie Lkw. Insgesamt führen diese Anpassungen zu einer Harmonisierung und Erhöhung der Lkw-Geschwindigkeiten und damit zu einer besseren Abbildung des realen Verkehrsablaufs.

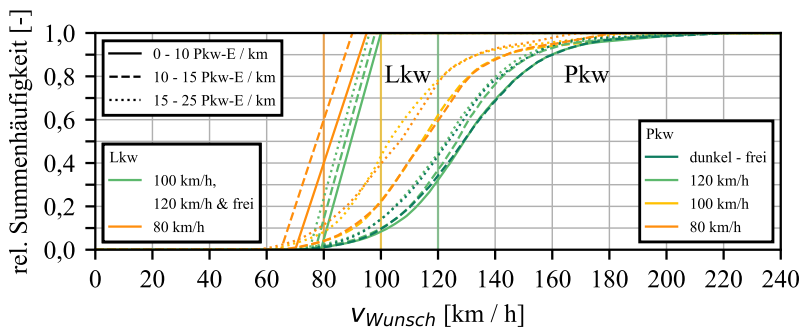


Abbildung 6.9: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsbeschränkung, Fahrzeugklasse und Dichteklasse (eigene Darstellungen)

Die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen haben einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Eine realitätsnahe Abbildung ist daher essentiell für die mikroskopische Modellierung von Autobahnverkehr. Abbildung 6.9 zeigt die kalibrierten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Pkw und Lkw, die sehr gute Ergebnisse für den untersuchten Abschnitt liefern. Es bleibt zu untersuchen, welche Auswirkungen die Tatsache, dass alle Fahrzeuge ihre Wunschgeschwindigkeit an der gleichen Position ändern, auf den Verkehrsfluss hat. Im Gegensatz zur Simulation entzerren sich in Realität die Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden auf

die SBA-Anzeigen im Bereich eines Anzeigequerschnitts. Tabelle A.8 in Anhang A.9 fasst die finale Zuordnung der Wunschgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der A-Anzeige, Fahrzeugklasse und Dichteklasse im Akzeptanzmodell zusammen.

6.5.5 Verflechtungsmatrizen und Fahrzeugzuflüsse

In Kapitel 4.5 werden drei Ansätze für die Ermittlung von Verflechtungsmatrizen vorgestellt. Die resultierenden Verflechtungen aus allen drei Ansätzen werden als Eingangsgrößen für die Fahrzeugrouten im Verkehrsflussmodell untersucht. Die Simulationsergebnisse weisen dabei sehr große Unterschiede im Verkehrsfluss für die drei Ansätze auf. Die Bewertung der Ansätze basiert auf einem raumzeitlichen Vergleich der Verkehrsstärken, sowie einer Gegenüberstellung der Staubildung und -auflösung zwischen Empirie und Simulation. Realitätsferne Quelle-Ziel-Matrizen führen zu falschen Belastungen auf den Segmenten und einer unrealistischen Anzahl an Verflechtungsvorgängen an den Anschlussstellen. Letzteres kann sowohl bewirken, dass vorhandene Engpässe nicht aktiviert werden, als auch dass Anschlussstellen in der Simulation überlastet sind, die in Realität den Verkehr abwickeln können.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Fahrtrelationen aus den FCD den Pkw-Verkehr auf der A5 am besten widerspiegeln. Trotz des geringen Stichprobenumfangs dieses Ansatzes, bilden die FCD im Gegensatz zu Validate tatsächliche Quelle-Ziel-Beziehungen auf dem untersuchten Abschnitt im betrachteten Zeitraum ab. Für Lkw ist die Datengrundlage aus den FCD zu klein, um sinnvolle Routenbelastungen ableiten zu können. Daher werden für Lkw die Verflechtungsmatrizen aus Validate in Kombination mit dem Matrixkorrekturverfahren VStrom-Fuzzy (siehe Kapitel 4.5) verwendet. Der Ansatz liefert für diesen Fall die besten Ergebnisse. Sowohl für Pkw als auch für Lkw verbessern punktuelle Anpassungen der Verflechtungsmatrizen die Kalibrierung des Verkehrsflussmodells.

Die Fahrzeugzuflüsse stammen aus Detektordaten der Einfahrten des modellierten Autobahnabschnitts. Bei frei fließendem Verkehr ergibt die Kombination aus den Zuflüssen und Routen die Verkehrsstärken auf den einzelnen Segmenten. Diese

Verkehrsstärken auf der Hauptfahrbahn können wiederum mit den Detektordaten der Messquerschnitte der SBA abgeglichen werden. Dabei zeigen die Simulationsergebnisse an ein paar wenigen Stellen Abweichungen in der Verkehrsstärke, die nicht auf die Routen oder die Verkehrssituation zurückzuführen sind. Hier liegen vereinzelt Messfehler der Detektoren vor, die manuell korrigiert werden, bis die Verkehrsstärke auf den entsprechenden Segmenten in der Simulation mit den Detektordaten übereinstimmen. Dabei handelt es sich i. d. R. um Untererfassungen, die bspw. auftreten können, wenn ein Detektor in der Kurve einer Einfahrt positioniert ist und die Kurve von einzelnen Fahrzeugen geschnitten wird.

6.5.6 Ergebnisse

Das Ergebnis der durchgeführten Kalibrierung ist ein Verkehrsflussmodell des untersuchten Abschnitts der A5, das sowohl den Verkehrsfluss als auch das Schaltverhalten der SBA inkl. der Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden in der morgendlichen Hauptverkehrszeit eines typischen Werktags abbildet. Aufgrund der in Kapitel 6.5.1 beschriebenen stochastischen Effekte und Wechselwirkungen, bedingt durch komplexe verkehrliche Abläufe, variieren die Simulationsläufe zum Teil stark. Dennoch stellen alle Simulationsläufe plausible und realitätsnahe Verkehrsabläufe auf dem Autobahnabschnitt dar, wie sie auch in Realität hätten ablaufen können. Das Modell bildet somit eine große Spannweite an möglichen Verkehrsabläufen ab und ist gut für die Durchführung simulativer Untersuchungen im Zusammenhang mit beeinflusstem Autobahnverkehr geeignet.

Die Engpässe auf dem Autobahnabschnitt sind aus den Analysen der Verkehrsdaten und aus Gesprächen mit den für die SBA auf der A5 zuständigen Personen der Autobahn GmbH bekannt. Diese Engpässe werden überwiegend zu Hauptverkehrszeiten durch hohe Verkehrsstärken aktiviert. In der simulierten Zeitspanne findet die Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Süden statt. Die Anschlussstelle Friedberg zeigt in diese Fahrtrichtung Überlastungen bedingt durch eine hohe Anzahl an einfahrenden Fahrzeugen (MQ 31). Das Bad Homburger Kreuz verzeichnet verkehrliche Probleme, die sowohl durch Ausfahrende (MQ 40 und 41)

als auch durch Einfahrende (MQ 45) ausgelöst werden. Des Weiteren weist das Nordwestkreuz Frankfurt eine Anfälligkeit für Ausfahrstaus (MQ 54 bis 56) auf.

Abbildung 6.10 zeigt die raumzeitliche Verkehrssituation in der morgendlichen Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Süden für einen beispielhaften Simulationslauf. Abbildung 4.9 stellt zum Vergleich die raumzeitliche Verkehrssituation am 18.09.2019 auf der A5 dar, die als Grundlage für die durchgeführte Kalibrierung dient. Die vorhandenen Engpässe werden in der Simulation gut abgebildet. Die Auswirkungen der einzelnen Engpässe variieren je nach Simulationslauf. Anhang A.10 zeigt eine Auswahl an Verkehrssituationen aus anderen Simulationsläufen.

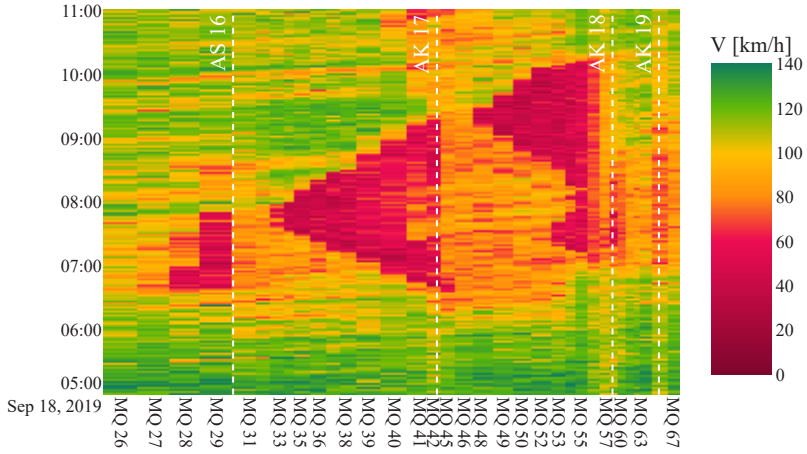
Allgemein weisen die Verkehrssituationen im Stau in der Simulation andere Charakteristika auf als in Realität. Die Stausituationen aus den Detektor- und Schalt-daten der A5 kennzeichnen sich durch Stauwellen, die sowohl in den mittleren Geschwindigkeiten (Abbildung 4.9a) als auch in den A-Anzeigen (Abbildung 4.9b) sichtbar sind. Im Gegensatz dazu charakterisieren sich die Stausituationen in der Simulation überwiegend durch weite Bereiche mit einer sehr hohen Verkehrsdichte, die nicht wie in Realität durch kurze Verkehrsentspannungen unterbrochen werden. In der Simulation sind demnach Stauwellen bei sehr geringen Geschwindigkeiten weniger ausgeprägt (siehe Abbildung 6.10a) und folglich schaltet die SBA durchgängig eine Dunkelschaltung im Stau (siehe Abbildung 6.10b). Dies bedingt, dass sich der Stau in der Simulation tendenziell nicht so weit ausbreitet. Die Stauauflösung und -dauer wird gut abgebildet.

In Fahrtrichtung Norden weist das Nordwestkreuz Frankfurt einen Engpass aufgrund einer zu hohen Anzahl an Einfahrenden (MQ 122) auf. Bei einer Kapazitäts-überschreitung breitet sich der Stau stromaufwärts über das nahe gelegene Westkreuz Frankfurt und die südliche Grenze des untersuchten Autobahnabschnitts hinaus aus. Ein weiterer Engpass besteht an der Anschlussstelle Friedberg. Bei hohen Verkehrsstärken bricht der Verkehr auf der Hauptfahrbahn bedingt durch die Einfädelungsvorgänge an der Einfahrt zusammen (MQ 150) und es bildet sich stromaufwärts der Anschlussstelle Stau. Die Verkehrsstärke des einfahrenden Stroms ist jedoch gering genug, dass alle Fahrzeuge einfädeln können und

kein Stau auf der Einfahrt entsteht. In den vorliegenden Detektordaten besteht zusätzlich eine Beeinflussung durch eine statische Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h stromabwärts der Anschlussstelle Friedberg (MQ 150 bis 154) (siehe Kapitel 4.3.3). Die Gründe für die Geschwindigkeitsbeschränkung gehen nicht aus den Daten hervor, es besteht allerdings ein Zusammenhang zu einer vermehrten Staubildung im Vorlauf zur Anschlussstelle Friedberg.

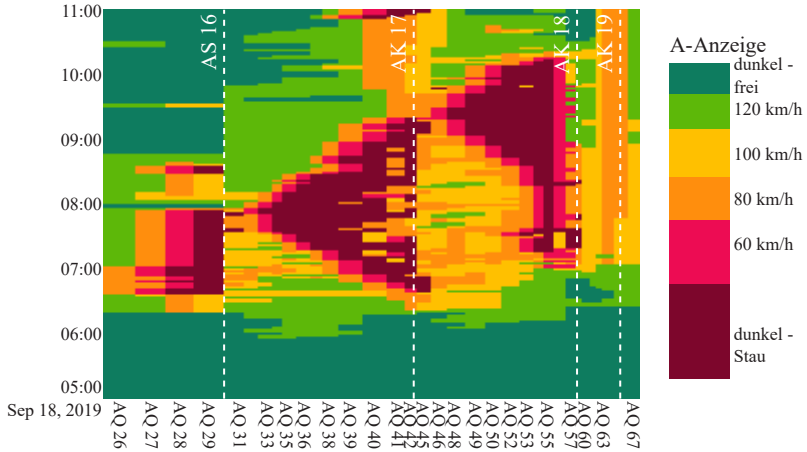
Abbildung 6.11 bildet die raumzeitliche Verkehrssituation in Fahrtrichtung Norden in einem Simulationslauf ab. Abbildung A.19 in Anhang A.3 stellt zum Vergleich die Verkehrssituation am 18.09.2019 dar. Fahrtrichtung Norden weist am Vormittag i. d. R. nur wenige Beeinträchtigungen auf. Der Verkehr fließt in Realität und in der Simulation größtenteils frei und es gibt wenig steuernde Eingriffe durch die SBA. Das Westkreuz und das Nordwestkreuz weisen eine Überlastung der Einfahrten auf, die sich je nach Simulationslauf unterschiedlich schnell wieder abbaut. Des Weiteren wird die Handschaltung an der Anschlussstelle Friedberg nicht abgebildet, wodurch das Geschwindigkeitsniveau in diesem Bereich zu hoch ist. Der Verkehrsfluss in der nachmittäglichen Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Norden wird im Rahmen der Validierung in Kapitel 6.6 betrachtet.

Die Abbildungen 6.12 und 6.13 zeigen eine Auswahl an q-v-Diagrammen für jedes Segment in beide Fahrtrichtungen. Es sind zu 5-Minuten-Intervallen aggregierte Querschnittsdaten abgebildet und jeweils die für die Kalibrierung verwendeten Detektordaten der SBA den Querschnittsmessungen aus 20 Simulationsläufen gegenübergestellt. Im Allgemeinen weisen die q-v-Diagramme eine gute Übereinstimmung auf. Sowohl die Verkehrsstärken als auch die Geschwindigkeitsniveaus werden gut abgebildet. Einzelne Unstimmigkeiten wurden größtenteils im Vorherigen adressiert und werden im Folgenden kurz zusammengefasst. In Fahrtrichtung Süden bricht der Verkehr an der Anschlussstelle Friedberg in einigen Simulationsläufen stärker zusammen als in Realität (siehe Abbildung 6.12a). Des Weiteren zeigen die Detektordaten einen Stau im Vorlauf des Westkreuzes und des Nordwestkreuzes Frankfurt (Segmente 4 und 5), der seinen Ursprung stromabwärts außerhalb des untersuchten Abschnitts hat. Die Simulation bildet diesen Stau nicht ab und weist an den betroffenen Messquerschnitten höhere Verkehrsstärken auf als in Realität (siehe Abbildungen 6.13c und 6.13e).



Messquerschnitt

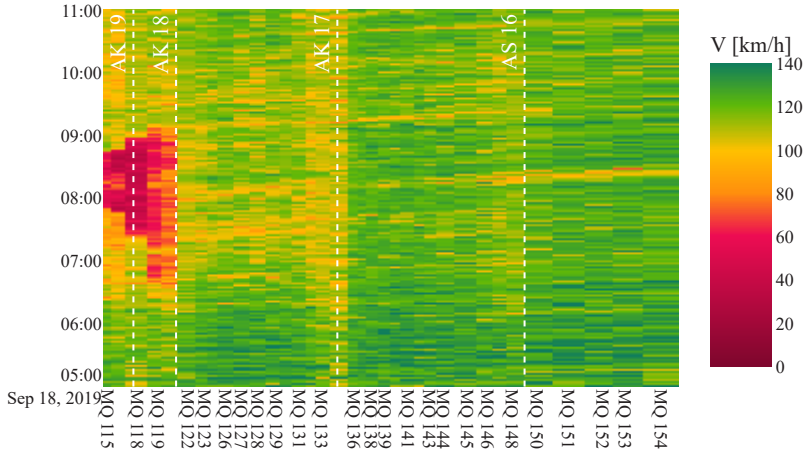
(a) querschnittsbezogene mittlere Pkw-Geschwindigkeit



Anzeigequerschnitt

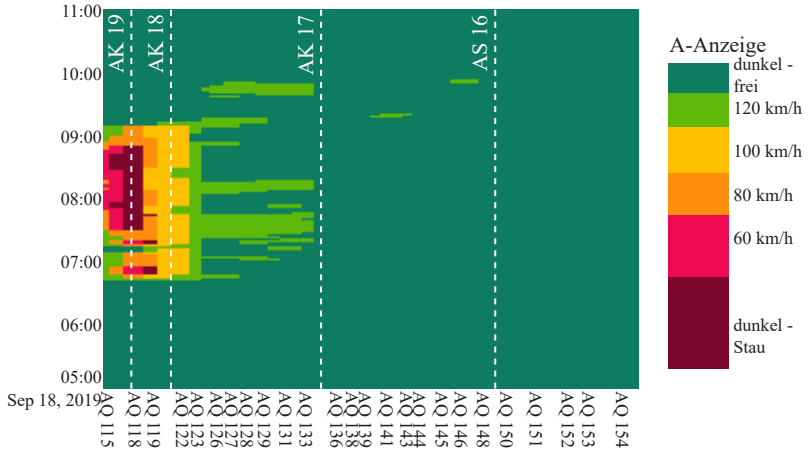
(b) A-Anzeige

Abbildung 6.10: Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Süden in einem beispielhaften Simulationslauf (eigene Darstellungen)



Messquerschnitt

(a) querschnittsbezogene mittlere Pkw-Geschwindigkeit



Anzeigequerschnitt

(b) A-Anzeige

Abbildung 6.11: Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Norden in einem beispielhaften Simulationslauf (eigene Darstellungen)

In Fahrtrichtung Norden zeigen die Simulationen zum einen geringere maximale Verkehrsstärken in den 5-Minuten-Intervallen auf Segment 2 und 3 (siehe Abbildungen 6.12d und 6.13b). Interessant ist dabei, dass die Summe der Verkehrsstärken aus den 5-Minuten-Intervallen mit der stündlichen Verkehrsstärke auf den Segmenten übereinstimmt. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass sich der Verkehr in der Simulation gleichmäßiger verteilt und sich weniger Pulks bilden als in Realität. Zum anderen wird auf Segment 1 die statische Handschaltung auf 100 km/h nicht abgebildet, entsprechend ist das Geschwindigkeitsniveau in der Simulation zu hoch (siehe Abbildung 6.12b).

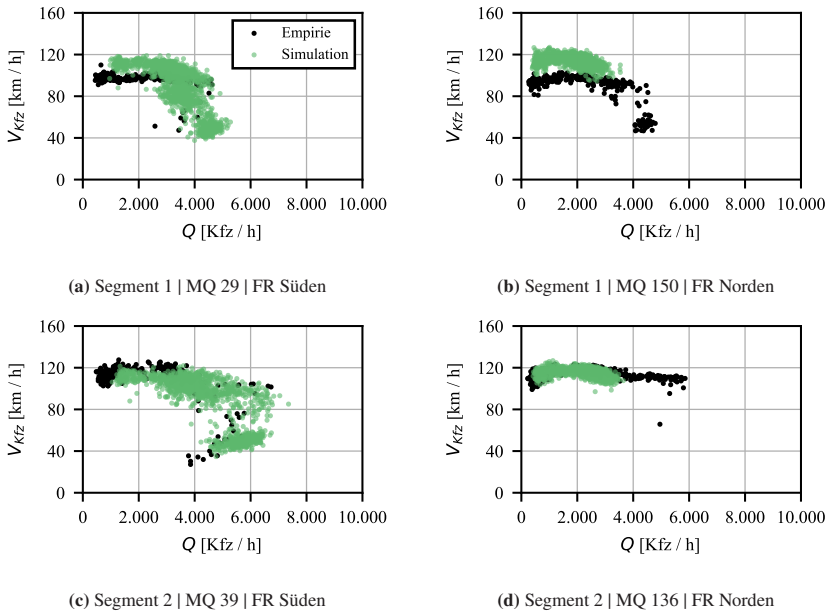


Abbildung 6.12: q-v-Diagramme aus der Simulation (20 Simulationsläufe) - Segmente 1 bis 2 (eigene Darstellungen)

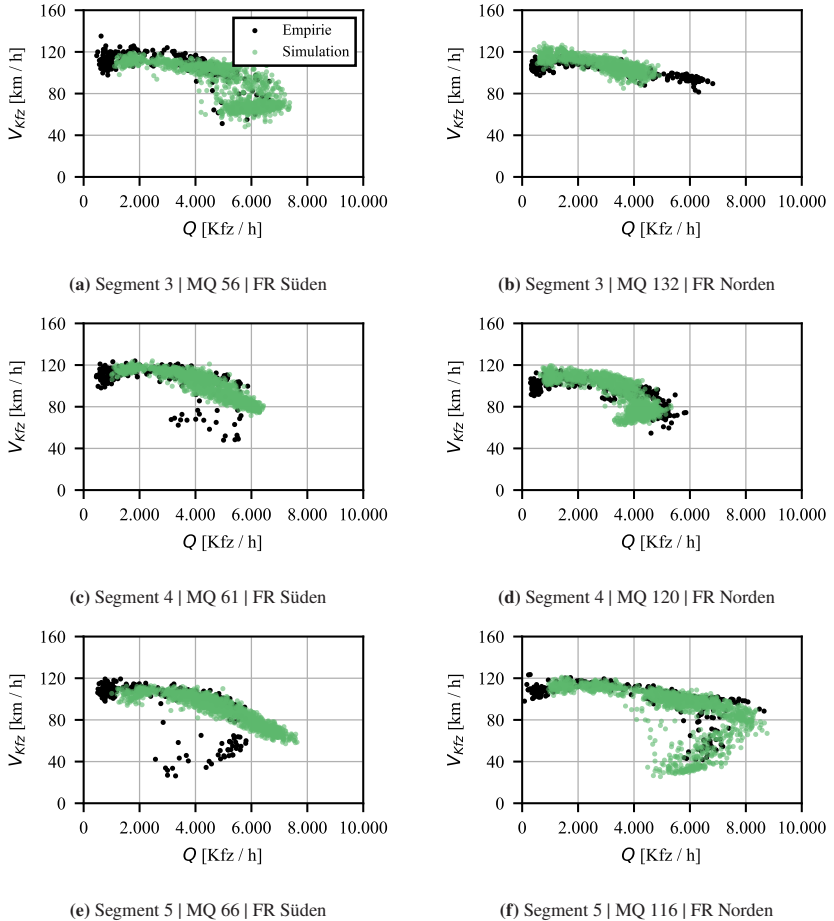


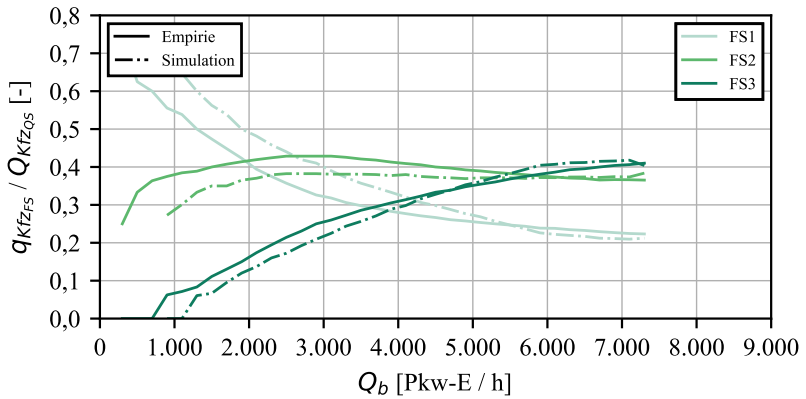
Abbildung 6.13: q-v-Diagramme aus der Simulation (20 Simulationsläufe) - Segmente 3 bis 5 (eigene Darstellungen)

Zur Bewertung der Kalibrierungsschritte wird für alle Messquerschnitte stundenfein der RMSPE für die Verkehrsstärke und die mittlere Kfz-Geschwindigkeit bestimmt. Die Werte werden anschließend über alle simulierten Stundenintervalle, Messquerschnitte einer Fahrtrichtung und Simulationsläufe gemittelt. Es

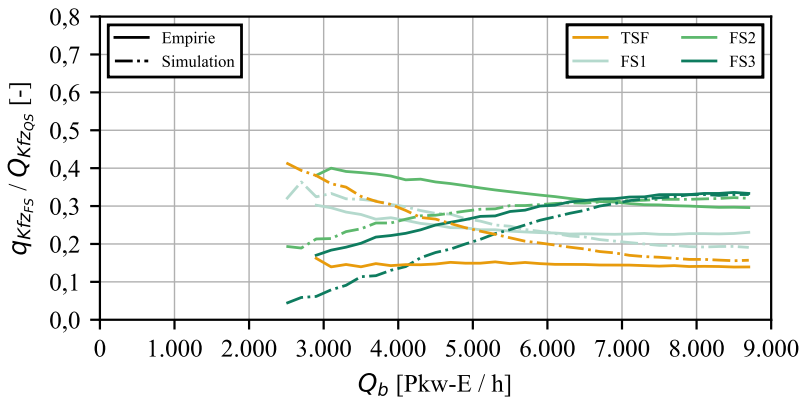
resultieren insgesamt vier RMSPE-Werte, für beide Fahrtrichtungen jeweils ein Wert für die Verkehrsstärke und ein Wert für die mittlere Kfz-Geschwindigkeit. Das kalibrierte Modell erzielt für Fahrtrichtung Süden einen RMSPE für die Verkehrsstärke von etwa 11 % und für die Geschwindigkeit von etwa 22 %. In Fahrtrichtung Norden beträgt der RMSPE für die Verkehrsstärke etwa 10 % und für die Geschwindigkeit etwa 13 %. Diese hohen RMSPE-Werte können durch die zum Teil nicht abgebildeten Einflüsse, wie bspw. die Handschaltung in Fahrtrichtung Norden oder der Stau in Fahrtrichtung Süden an der südlichen Grenze des untersuchten Abschnitts, erklärt werden. Das Modell bildet daher dennoch einen realistischen Verkehrsfluss einer viel befahrenen und beeinflussten Autobahn ab.

Eine realistische Abbildung der Fahrstreifenaufteilung hat sich als größte Herausforderung bei der Kalibrierung herausgestellt. Vor allem das Fahrstreifenwechselverhalten der Lkw ist zunächst nicht plausibel. Die beschriebenen Anpassungen der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen und der Fahrverhaltensparameter *CC1*, *Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand* und *Freifahrtzeit* führen letztendlich zu einem guten Ergebnis. Abbildung 6.14 zeigt die resultierende Fahrstreifenaufteilung für drei- und vierstreifige Querschnitte am Beispiel der Fahrtrichtung Süden. Alle Simulationsläufe dienen als Datengrundlage für die Abbildungen.

Für dreistreifige Querschnitte verzeichnen die Simulationen eine sehr gute Fahrstreifenaufteilung bei hohen Verkehrsstärken. Für niedrige Verkehrsstärken wird in der Simulation das Rechtsfahrgebot besser akzeptiert als in Realität. Der Anteil an Fahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen ist deutlich zu hoch, während in der Mitte und links zu wenige Fahrzeuge fahren. Für vierstreifige Querschnitte wird die Fahrstreifenaufteilung weniger gut abgebildet. Bei mittleren Verkehrsstärken ist der Einfluss des Rechtsfahrgebots in der Simulation ebenfalls zu groß. Bei hohen Verkehrsstärken sind sowohl der Seitenstreifen und der rechte Hauptfahrstreifen als auch der mittlere und linke Fahrstreifen gleichmäßiger ausgelastet als in Realität. Dennoch erzielt die Kalibrierung auch für vierstreifige Querschnitte deutliche Verbesserungen der Fahrstreifenaufteilung.



(a) dreistreifig (TSF aus)



(b) vierstreifig (TSF an)

Abbildung 6.14: Fahrstreifenaufteilung in der Simulation (eigene Darstellungen)

Im Zuge der Kalibrierung der Fahrstreifenaufteilung haben sich einige Ansätze aufgezeigt, die weiter erforscht werden sollten. Insgesamt nutzen die Lkw in den Simulationen zu häufig den mittleren Fahrstreifen. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass Lkw in dichten Verkehrssituationen vermehrt nach einem Überholvorgang nicht mehr zurück auf den rechten Fahrstreifen wechseln können, weil

dort keine ausreichend große Lücke vorhanden ist. Im Gegensatz zu notwendigen Fahrstreifenwechseln ist für freiwillige Fahrstreifenwechsel in Vissim keine aktive Behinderung der anderen Verkehrsteilnehmenden vorgesehen. In Realität ist es aber durchaus denkbar, dass Lkw ein aggressives Fahrstreifenwechselverhalten für freiwillige Fahrstreifenwechsel in Kauf nehmen.

Des Weiteren generieren Fahrzeuge in Vissim bereits bei geringen Unterschieden zwischen der eigenen und der Wunschgeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs einen Fahrstreifenwechselwunsch. Es ist denkbar, dass kleine Differenzen in der Wunschgeschwindigkeit von den Verkehrsteilnehmenden akzeptiert, eventuell sogar nicht wahrgenommen werden. Hier würde die Implementierung eines Parameters zur Abbildung der Akzeptanz von Wunschgeschwindigkeitsdifferenzen Abhilfe schaffen. So könnte in einem Modell hinterlegt werden, welche Verringerung der eigenen Geschwindigkeit im Verhältnis zur Wunschgeschwindigkeit ein Fahrzeug akzeptiert, bevor ein Überholwunsch generiert wird. Ein solcher Parameter könnte vor allem die realitätsnahe Abbildung der Fahrstreifenaufteilung und der Pulkbildung von Lkw auf dem rechten Fahrstreifen verbessern.

Ein weiterer Ansatz zur verbesserten Abbildung der Fahrstreifenaufteilung ist die Implementierung der Freifahrtzeit als Verteilung anstatt als fester Wert für alle Fahrzeuge einer Fahrzeugklasse. Die Freifahrtzeit kann dazu genutzt werden, die Akzeptanz des Rechtsfahrgebots durch Pkw abzubilden. Eine Verteilung der Werte dieses Parameters würde es ermöglichen, eine Spannweite für die Befolgung des Rechtsfahrgebots zu hinterlegen und entsprechend die Fahrstreifenaufteilung bei geringen Verkehrsstärken zu beeinflussen.

Für die Kalibrierung des im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Verkehrsflussmodells haben sich ebenfalls Ansätze zur Weiterentwicklung und weiteren Forschung aufgezeigt. Eine Möglichkeit ist die Kalibrierung des Fahrverhaltens separat für jede Anschlussstelle. Der Verkehr auf der A5 besteht größtenteils aus ortskundigen Verkehrsteilnehmenden, die die Engpässe und Eigenarten der Strecke kennen und ihr Verhalten ggfs. entsprechend anpassen. Hier besteht allerdings die Gefahr einer Überanpassung des Modells. Ein weiterer Ansatz ist ein separates Fahrverhalten für den Seitenstreifen. In der aktuellen Fassung des Modells ist ein

separates Fahrverhalten für die drei Fahrstreifen der Hauptfahrbahn hinterlegt. Dem Seitenstreifen wird das Fahrverhalten des rechten Hauptfahrstreifens zugeteilt. In diesem Zusammenhang besteht weiterer Forschungsbedarf zum fahrstreifenfeinen Fahrverhalten auf vierstreifigen Autobahnstrecken. Es werden vorrangig Zeitlückenverteilungen aus Einzelfahrzeugdaten von vierstreifigen Querschnitten zur Untersuchung des Abstandsverhaltens benötigt. Zudem besteht Forschungsbedarf zum Fahrverhalten in Abhängigkeit der dynamischen SBA-Anzeigen. Diese Fragestellung wird in Kapitel 6.5.3 thematisiert.

6.6 Validierung

Zur Validierung des entwickelten Verkehrsflussmodells werden die Fahrzeugzuflüsse aus zwei von der Kalibrierung unabhängigen Zeiträumen als Eingabe in das Modell verwendet. Es wird eine morgendliche und eine nachmittägliche Hauptverkehrszeit betrachtet. Der in der Simulation resultierende Verkehrsfluss wird wie bei der Kalibrierung mit dem realen Verkehrsfluss verglichen. Die Ergebnisse der Validierung basieren ebenfalls auf 20 Simulationsläufen.

Die Wahl geeigneter Validierungszeiträume gestaltet sich als schwierig, weil nahezu alle morgendlichen und nachmittäglichen Hauptverkehrszeiten an den typischen Werktagen aus den vorliegenden Detektordaten inkl. Schaltdaten der SBA (Di-Mi-Do aus fünf Wochen) Besonderheiten aufweisen. Es liegen zum einen Staus vor, die auf Handschaltungen zurückzuführen sind und daher in der Simulation nicht auftreten. Zum anderen kommt es zu Staubildungen, deren Ursprung außerhalb des simulierten Abschnitts liegen und daher ebenfalls nicht abgebildet werden. Es wird der Nachmittag des 18.09.2019 und der Vormittag des 26.09.2019 für die Validierung gewählt, da die Auswirkungen hier verhältnismäßig gering sind. Wie auch bei der Kalibrierung können nur die verkehrlich bedingten Störungen in der Simulation abgebildet werden.

Es wird zunächst der Zeitraum zwischen 14:00 und 20:00 Uhr des 18.09.2019 simuliert. Fahrtrichtung Norden ist nachmittags stärker belastet als vormittags.

Die Betrachtung der realen Verkehrszustände zeigt eine Staubildung im südlichen Bereich des Abschnitts am Westkreuz und am Nordwestkreuz Frankfurt, sowie einen Stau ausgehend von der Anschlussstelle Friedberg (siehe Abbildung 4.10). Die Simulationen bilden die Verkehrsstärken insgesamt gut ab und der südliche Stau tritt in den Simulationen auf. Der nördliche Stau tritt in der Simulation nicht auf und es stellt sich heraus, dass dieser nicht verkehrsstärkebedingt ist. Die Vermutung liegt nahe, dass ein Zusammenhang zu der Handschaltung an der Anschlussstelle Friedberg besteht (siehe Kapitel 4.3.3) und die Ursache des Staus auf eine Kapazitätsreduktion außerhalb des untersuchten Bereichs zurückzuführen ist. Diese erste Validierung erzielt für Fahrtrichtung Norden einen RMSPE für die Verkehrsstärke von etwa 11 % und für die Geschwindigkeit von etwa 37 %. Letzterer Wert ist auf den nicht abgebildeten Stau zurückzuführen. Fahrtrichtung Süden ist nachmittags weniger stark belastet. Die realen Verkehrszustände weisen lediglich einen kurzen Stau am Westkreuz Frankfurt auf (siehe Abbildung A.18), der in den Simulationen gut abgebildet wird. In Fahrtrichtung Süden beträgt der RMSPE für die Verkehrsstärke etwa 9 % und für die Geschwindigkeit etwa 13 %.

Anschließend wird der Zeitraum zwischen 5:00 und 11:00 Uhr des 26.09.2019 simuliert. Da es sich um eine morgendliche Hauptverkehrszeit handelt, sind die Verkehrsbelastungen vergleichbar mit dem Zeitraum der Kalibrierung. Fahrtrichtung Norden ist vormittags weniger stark belastet und zeigt lediglich eine leichte Verkehrsstörung am Nordwestkreuz Frankfurt auf, die in der Simulation gut wiedergegeben wird. Die Handschaltung an der Anschlussstelle Friedberg sorgt für eine Reduktion der mittleren Geschwindigkeiten, die in den Simulationen nicht auftritt. Diese zweite Validierung erzielt für Fahrtrichtung Norden RMSPE-Werte für die Verkehrsstärke und für die Geschwindigkeit von etwa 14 %. Fahrtrichtung Süden ist in der morgendlichen Hauptverkehrszeit hochbelastet und zeigt am betrachteten Tag einen Stau, der sich vom Westkreuz Frankfurt bis zum Bad Homburger Kreuz ausbreitet. Auch die Anschlussstelle Friedberg verzeichnet eine Verkehrsstörung. Diese Staus treten ebenfalls in den Simulationen auf. Die Simulationen zeigen, wie auch schon bei der Kalibrierung, dass bei geringen Geschwindigkeiten Stauwellen weniger stark ausgeprägt sind als in Realität. Dadurch breiten sich die Staus in den Simulationen tendenziell nicht so weit aus. In

Fahrtrichtung Süden beträgt der RMSPE für die Verkehrsstärke etwa 13 % und für die Geschwindigkeit etwa 20 %.

Allgemein weisen die im Rahmen der Validierung durchgeführten Simulationsläufe wie auch die Kalibrierung zum Teil große Abweichungen bedingt durch stochastische Einflüsse auf. Des Weiteren ist eine manuelle Korrektur von vereinzelt Verkehrszuflüssen erforderlich. Dies ist auf Messfehler von Detektoren auf den Einfahrten zurückzuführen. Auch die Quelle-Ziel-Matrizen müssen punktuell an den simulierten Zeitraum angepasst werden. Beide Schritte waren auch schon bei der Kalibrierung erforderlich.

Die durchgeführten Validierungen weisen vergleichbare, zum Teil sogar bessere Ergebnisse als die Kalibrierung auf. Das kalibrierte Verkehrsflussmodell bildet demnach den untersuchten Autobahnabschnitt gut ab und kann für weitere Untersuchungen und Anwendungsbeispiele genutzt werden.

7 Simulative Untersuchung einer Umweltsteuerung

7.1 Motivation und Methode

Luft- und Lärmbelastungen werden zu einem nennenswerten Anteil durch den Straßenverkehr verursacht. Im Bereich des Verkehrsmanagements führt dies oft zu der Forderung, Verkehrsemissionen mithilfe von Geschwindigkeitsbeschränkungen zu reduzieren. Aufbauend auf dieser Fragestellung wird eine dynamische Umweltsteuerung simulativ untersucht. Unter Anwendung des entwickelten Verkehrsflussmodells der A5 wird analysiert, inwiefern die Integration von Verkehrsemissionen in die Schaltkriterien eines Steuerungsmodells zu einer Reduktion der Emissionen auf dem Streckenabschnitt führen kann.

Im Gegensatz zu statischen Geschwindigkeitsbeschränkungen zur Emissionssenkung werden dynamische umweltbezogene Geschwindigkeitsbeschränkungen nur dann angezeigt, wenn es erforderlich ist, um den Autobahnverkehr nicht unnötig auszubremsen. Es ist zu erwarten, dass die Akzeptanz von dynamischen, an die Emissionslage (und damit auch an die Verkehrslage) angepassten Umweltschaltungen höher ist als von dauerhaften Geschwindigkeitsbeschränkungen. Da das entwickelte Akzeptanzmodell die Abhängigkeit zwischen der Wunschgeschwindigkeit und der Verkehrssituation abbildet, ist gewährleistet, dass umweltbedingte Schaltungen, die für die Verkehrsteilnehmenden nicht ersichtlich sind, in der Simulation schlechter akzeptiert werden und somit auch weniger Wirkung zeigen.

Der Vorteil einer Emissions- gegenüber einer Immissionssteuerung sind die Kosten. Die für die Berechnung der Emissionen notwendigen Verkehrsdaten werden

bereits von der SBA erfasst, sodass lediglich der Rechenweg in das Steuerungsmodell integriert werden muss. Eine solche Weiterentwicklung konventioneller Steuerungsmodelle könnte in bereits existierende SBA implementiert werden. Für eine Immissionssteuerung müsste zusätzlich zur Anpassung des Steuerungsmodells Hardware zur Messung beschafft, installiert und gewartet werden, was kostenintensiv ist.

Dem Ansatz der Emissionssteuerung liegt der Gedanke zugrunde, dass vermiedene Emissionen auch vermiedene Immissionen sind. Dies gilt vor allem für Treibhausgase, insbesondere Kohlendioxid (CO_2). CO_2 ist ein natürlicher Bestandteil der Luft und in normalen Konzentrationen ungefährlich für den Menschen. Aus Klimaschutzgründen muss jedoch die Gesamtkonzentration und damit der Gesamtausstoß an CO_2 stark reduziert werden. Im Kontext von SBA ist der Aspekt der Ausbreitung daher unwichtig für CO_2 -Emissionen, vielmehr spielen die absoluten Emissionswerte eine große Rolle. Im Gegensatz zu bodennahem CO_2 sind bodennahe Stickstoffoxide (NO_x) und Feinstaub gesundheitsschädlich für Menschen, die erhöhten Schadstoffkonzentrationen ausgesetzt sind. Die Aspekte der Immissionen und der lokalen Konzentrationen sind daher relevant für NO_x und Feinstaub. Es existieren weitere Verkehrsemissionen, auf die im Rahmen dieser Dissertation nicht eingegangen wird.

Die Berechnung der Luftemissionen erfolgt anhand des *Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)* [Matzer u. a., 2019]. Das HBEFA ist ein anerkannter makroskopischer Ansatz zur Berechnung der Umweltwirkung von Straßenverkehr. Es wird ein makroskopischer Ansatz gewählt, um die Übertragbarkeit auf reale SBA zu gewährleisten. Während in der Simulation alle Fahrzeugtrajektorien bekannt sind und somit eine mikroskopische Emissionsberechnung möglich wäre, liegen in Realität lediglich die aggregierten Detektordaten an den Messquerschnitten vor. Diese von SBA erfassten Verkehrsdaten können zu einer makroskopischen Berechnung der Verkehrsemissionen verwendet und somit in Echtzeit im Realbetrieb eingesetzt werden.

Für die Umsetzung einer solchen Umweltsteuerung werden die konventionellen Schaltkriterien (Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit) um

die Emissionen NO_x und Feinstaub ergänzt. Es sind primär zwei Ansätze für die Berücksichtigung von Verkehrsemissionen im Steuerungsmodell einer SBA denkbar. Zum einen kann ein Umweltprogramm konzipiert werden, das im Fall von hohen Emissionen aktiviert wird. Überschreiten die berechneten Emissionen einen gewissen Schwellenwert, so stellt das Umweltprogramm eine Schaltanforderung, die in die Priorisierung eingeht. Das Umweltprogramm setzt sich dann in der Priorisierung durch, wenn kein anderes Schaltprogramm eine restriktivere Geschwindigkeitsbeschränkung anfordert. Einem solchen Umweltprogramm wird eine Schaltbildfolge mit einer gewissen räumlichen Ausdehnung zugeordnet. Diese enthält Geschwindigkeitsbeschränkungen und ggfs. Informationen zu den Schaltgründen auf den B- oder C-WZG. Ein zweiter Ansatz ist die Verschärfung bereits existierender Schaltprogramme. Wird ein bestimmter Schwellenwert der Emissionen überschritten, so werden die Schwellenwerte der konventionellen Harmonisierungsprogramme verschärft. Geschwindigkeitsbeschränkungen werden somit schon bei geringerem Verkehrsaufkommen angezeigt. Die Beschränkungen beginnen früher und dauern länger als ohne Schwellenwertüberschreitung.

Der zweite Ansatz der Verschärfung der Schwellenwerte der Harmonisierungsprogramme wird im Weiteren untersucht. Grund für die Wahl ist, dass die Akzeptanz der Harmonisierungsprogramme bekannt und im Akzeptanzmodell hinterlegt ist. Es ist unwahrscheinlich, dass die Verkehrsteilnehmenden eine Schwellenwertänderung wahrnehmen, weswegen das entwickelte Akzeptanzmodell für die Untersuchung übernommen werden kann. Das Potenzial eines separaten Umweltprogramms ist bei guter Befolgung tendenziell höher. Zur Untersuchung der Akzeptanz eines solchen Umweltprogramms müsste jedoch ein Praxistest durchgeführt werden. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf.

Das Ergebnis der Untersuchung ist ein Vergleich zwischen einem konventionellen Steuerungsmodell und einem Steuerungsmodell, das zusätzlich aufgrund von Verkehrsemissionen schaltet.

7.2 Berechnung der Verkehrsemissionen

Im Rahmen dieser Dissertation werden CO₂-, NO_x- und Feinstaub-Emissionen berechnet und ausgewertet. Die NO_x- und Feinstaub-Emissionen gehen dabei als Schaltkriterien in das emissionsbasierte Steuerungsmodell ein. Die finale Auswertung umfasst zusätzlich CO₂-Emissionen.

Zur Berechnung der verkehrsbedingten Luftemissionen werden die Emissionsfaktoren des HBEFA in der aktuellen Version 4.2 eingesetzt [Notter u. a., 2022]. Diese weisen in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse, des Verkehrszustands, der Geschwindigkeitsbeschränkung und der Streckensteigung den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen je Fahrzeugkilometer aus. Die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte wird hinsichtlich der Abgasnormen (Euroklassen) und Antriebskonzepte (Benzin, Diesel, Elektrisch, Hybrid-Elektrisch) berücksichtigt, sodass sich die Auswertungen auf ein bestimmtes Jahr und Land beziehen. In dieser Untersuchung wird die im HBEFA hinterlegte Flottenzusammensetzung für das Jahr 2022 verwendet.

Das HBEFA unterscheidet zwischen den Verkehrszuständen *flüssig*, *dicht*, *gesättigt*, *stop+go* und *stop+go2*. Die Zuordnung zu einem Verkehrszustand erfolgt über die mittlere Geschwindigkeit. Damit gehen für jedes Minutenintervall und jeden Messquerschnitt folgende Eingangsgrößen aus der Simulation in die Implementierung der HBEFA-Berechnung ein:

- Fahrzeugklasse: Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, Lkw, Busse
- mittlere Geschwindigkeit separat für Fahrzeugklassen
- angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung: 130 km/h (in diesem Fall dunkel - frei), 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h (in diesem Fall ≤ 80 km/h)
- Streckensteigung
- Verkehrsstärke separat für Fahrzeugklassen

Es resultieren Emissionsfaktoren pro Fahrzeugkilometer, die zunächst mit den jeweiligen Verkehrsstärken multipliziert werden. Anschließend werden die Werte jeweils mit der Streckenlänge zwischen dem betrachteten und dem folgenden Messquerschnitt multipliziert. Das Ergebnis ist ein Emissionsmodell, das minutenfeine absolute Emissionen für alle Messquerschnitte liefert. Es ist somit möglich, die Verkehrsemissionen in das Steuerungsmodell zu integrieren und die Steuerung um eine Umweltsteuerung zu erweitern.

7.3 Modellierung

Die Implementierung der Berechnungsmethode nach HBEFA wird im nächsten Schritt an das Steuerungsmodell gekoppelt. Abbildung 7.1 zeigt den Ablauf der Simulation für ein Minutenintervall inkl. Emissionsmodell. Neben den benötigten verkehrlichen Kenngrößen werden nun ebenfalls die in der Simulation entstandenen Verkehrsemissionen in jedem Minutenintervall lokal an allen Messquerschnitten berechnet.

Vergleichbar mit den Abminderungsfaktoren bei Nässe und Nacht (siehe Kapitel 2.4.2) werden die Harmonisierungsprogramme bei schlechter Emissionslage um einen Abminderungsfaktor (Emissionsfaktor) ergänzt. Überschreiten die berechneten Emissionen einen Emissionsschwellenwert, so werden die Ein- und Ausschaltkriterien der Harmonisierungsprogramme um den Emissionsfaktor verschärft. Es folgt die konventionelle Überprüfung der Schaltkriterien ggfs. mit verschärften verkehrlichen Schwellenwerten. Anschließend stellen die Harmonisierungsprogramme unter Einhaltung der konventionellen Ein- und Ausschaltverzögerungen Schaltanforderungen, die in die Priorisierung eingehen.

Die Festlegung des Emissionsfaktors und der Emissionsschwellenwerte für die NO_x - und Feinstaub-Emissionen erfolgen in einem iterativen Prozess. Es resultieren Emissionseinschaltsschwellenwerte pro Messquerschnitt von 32 g/min für NO_x und 0,32 g/min für Feinstaub und Ausschaltsschwellenwerte von 28 g/min für NO_x und 0,28 g/min für Feinstaub. Für den Emissionsfaktor zur Verschärfung der

konventionellen verkehrlichen Schwellenwerten wird 0,85 als zielführender Wert festgelegt. Bei der Ermittlung der Emissionsschwellenwerte und des Emissionsfaktors werden in Absprache mit den zuständigen Personen der Autobahn GmbH Überlegungen zur Umweltwirkung und zu Akzeptanzaspekten gegenübergestellt und abgewogen.

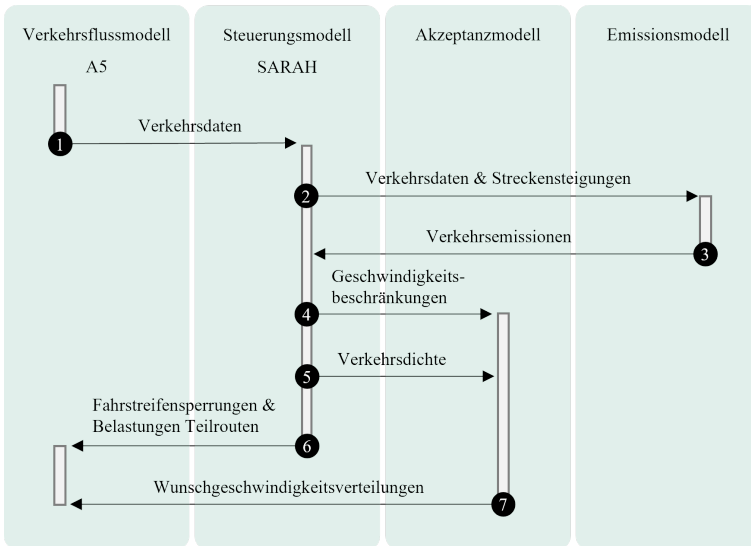


Abbildung 7.1: Ablauf der Simulation mit einem Emissionsmodell für ein Minutenintervall (eigene Darstellung)

Die simulativ untersuchte Umweltsteuerung, die eine Verschärfung der Schwellenwerte der Harmonisierungsprogramme bei hohen Emissionen umfasst, wird als *Umwelt-SARAH*- bzw. *U-SARAH*-Steuerung bezeichnet. Die Ergebnisse der *U-SARAH*-Steuerung werden zuletzt mit den Ergebnissen der konventionellen *SARAH*-Steuerung verglichen. Es erfolgen jeweils 20 Simulationsläufe.

7.4 Ergebnisse

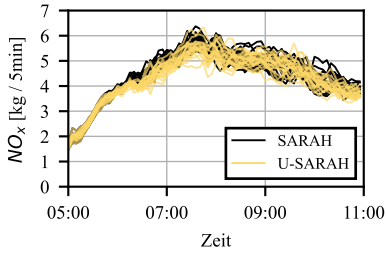
Die Simulationen zeigen eine positive Wirkung der U-SARAH-Steuerung. Alle betrachteten verkehrlichen Emissionen können leicht gesenkt werden, während sich die Reisezeiten nur unwesentlich verändern. Dies ist auf eine Reduktion der Geschwindigkeiten durch eine restriktivere Harmonisierung des Verkehrs und eine damit einhergehende Verbesserung des Verkehrsflusses zurückzuführen.

Abbildung 7.2 stellt die Verkehrsemissionen separat für beide Fahrrichtungen für jeweils 20 Simulationsläufe mit und ohne Umweltsteuerung dar. Hierfür werden alle in 5-Minuten-Intervallen auf dem gesamten Abschnitt entstandenen Emissionen zusammengefasst. Abbildung 7.3 zeigt die dazugehörigen Reisezeiten. Die Kurven bilden die Summe der mittleren Reisezeiten auf allen Segmenten in 5-Minuten-Intervallen ab.

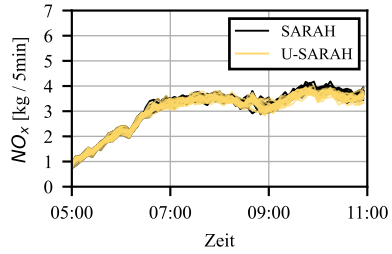
Abbildung 7.2 zeigt, dass die Schwankungen zwischen den Simulationsläufen in Fahrtrichtung Norden gering sind. Aufgrund der im Allgemeinen geringen verkehrlichen Einschränkungen in der morgendlichen Hauptverkehrszeit ist der Verkehrsfluss stabil und es werden selten Harmonisierungsprogramme geschaltet. Unter diesen Umständen erzielt die untersuchte Verschärfung nur geringe Änderungen. Die Reisezeiten schwanken dabei ebenfalls wenig und die durchschnittliche Reisezeit bleibt unverändert. In Fahrtrichtung Süden schwanken die Ergebnisse der verschiedenen Simulationsläufe hingegen stärker. Die Harmonisierungsprogramme werden aufgrund der verkehrlichen Situationen sehr oft aktiviert. Zusätzlich treten aufgrund der hohen Verkehrsstärken vermehrt raumzeitliche Intervalle mit einem instabilen Verkehrsfluss auf, deren Ausbreitungen je nach Simulationslauf variieren. Die verkehrsbedingten Emissionen können für die U-SARAH-Steuerung leicht verringert werden. Die Reisezeiten schwanken dabei stark und die durchschnittliche Reisezeit erhöht sich um eine halbe Minute.

Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse ist die Durchführung von 20 Simulationsläufen erforderlich. Grund hierfür sind die nur leichten Reduktionen der Verkehrsemissionen und leichten Erhöhungen der Reisezeiten (im unteren einstelligen Prozentbereich, siehe Tabelle 7.1) bei gleichzeitig hohen Schwankungen zwischen den verschiedenen Simulationsläufen (vor allem in Fahrtrichtung

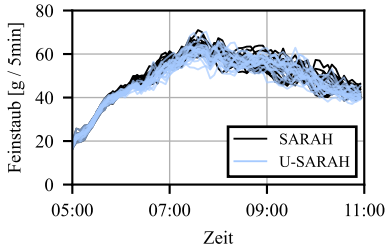
Süden). Für die Bestimmung der Anzahl an Simulationsläufen wird ein Konfidenzintervall von 1 % bei einem Signifikanzniveau von 95 % gewählt.



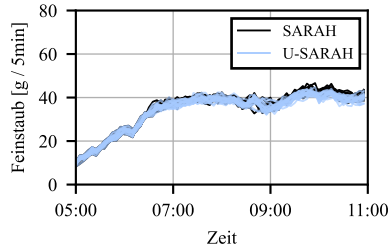
(a) NO_x | FR Süden



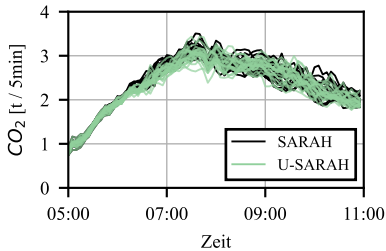
(b) NO_x | FR Norden



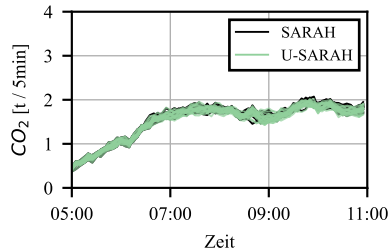
(c) Feinstaub | FR Süden



(d) Feinstaub | FR Norden



(e) CO₂ | FR Süden



(f) CO₂ | FR Norden

Abbildung 7.2: Verkehrsemissionen mit und ohne Umweltsteuerung (jeweils 20 Simulationsläufe) (eigene Darstellungen)

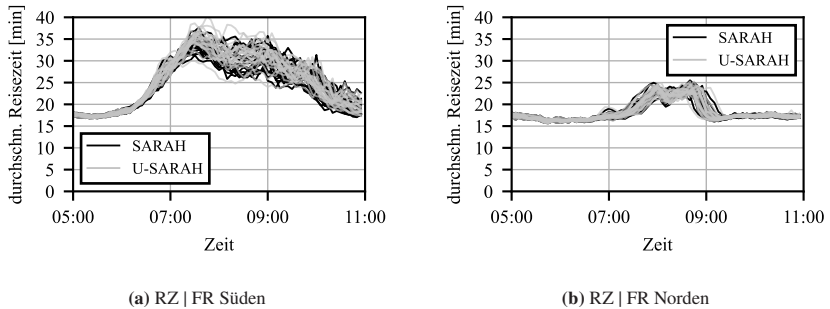
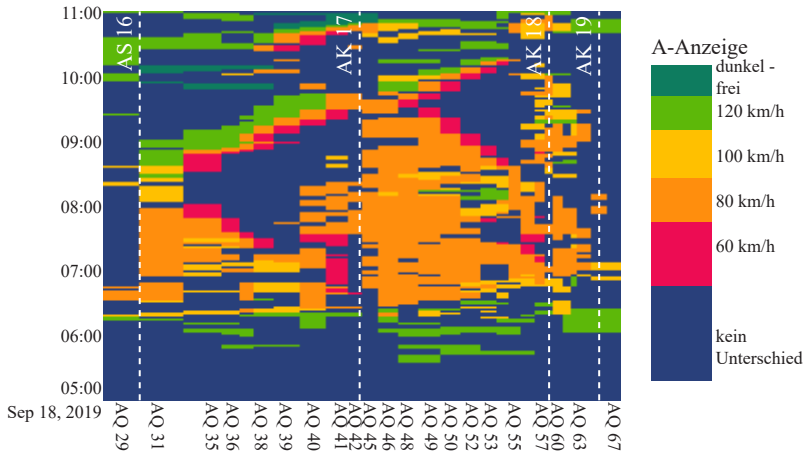


Abbildung 7.3: Reisezeiten mit und ohne Umweltsteuerung (für jeweils 20 Simulationsläufe) (eigene Darstellungen)

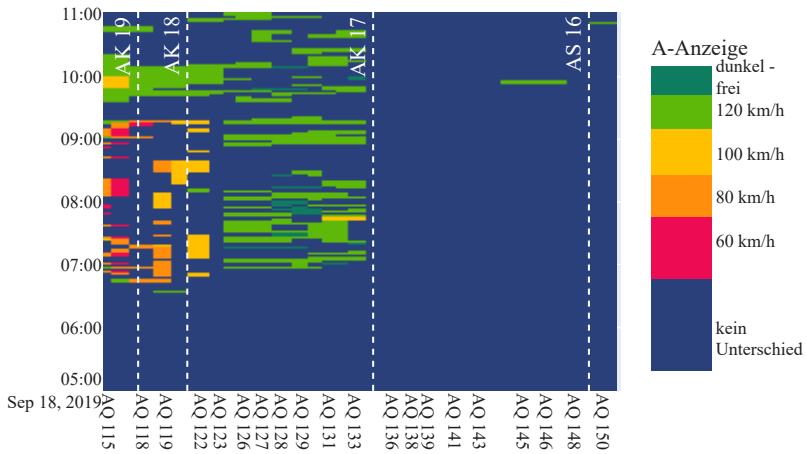
Abbildung 7.4 zeigt die Schaltunterschiede im raumzeitlichen Verlauf in einem Simulationslauf. Wenn kein Unterschied zwischen der A-Anzeige der SARAH- und der U-SARAH-Steuerung vorliegt, sind die entsprechenden Minutenintervalle blau dargestellt. Bei Unterschieden ist die U-SARAH-Schaltung abgebildet.

Während in Fahrtrichtung Norden nur wenige Schaltunterschiede auftreten, weicht in der Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Süden das Schaltverhalten der U-SARAH-Steuerung deutlich von der SARAH-Steuerung ab. Dies ist zum einen auf das verschärfte Schaltverhalten und zum anderen auf den veränderten Verkehrsfluss und das dadurch wiederum veränderten Schaltverhalten zurückzuführen. So können sich bspw. Schaltunterschiede für die Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 80 km/h, 100 km/h und 120 km/h aus beiden Gründen ergeben. Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 60 km/h sind hingegen nicht Teil der Harmonisierungsprogramme, sodass diese Schaltungen eine Reaktion auf einen veränderten Verkehrsfluss darstellen. Die Dunkelschaltungen kurz vor 11:00 Uhr am Bad Homburger Kreuz zeugen von einer früheren Auflösung verkehrlicher Probleme und sind ebenfalls durch einen veränderten Verkehrsfluss zu erklären.



Anzeigequerschnitt

(a) FR Süden



Anzeigequerschnitt

(b) FR Norden

Abbildung 7.4: Schaltunterschiede im raumzeitlichen Verlauf in einem beispielhaften Simulationslauf (eigene Darstellungen)

Tabelle 7.1 fasst die Ergebnisse der U-SARAH-Steuerung im Vergleich zur konventionellen SARAH-Steuerung zusammen. Für jeden Simulationslauf werden separat für beide Fahrrichtungen die Emissionen aller Kfz aufsummiert. Die durchschnittliche Reisezeit entspricht dem Durchschnitt aller Summen der mittleren Reisezeiten auf allen Segmenten in 5-Minuten-Intervallen. Zusätzlich wird für beide Steuerungsmodelle der Zeitanteil, in dem eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h, 100 km/h bzw. 120 km/h geschaltet ist, ausgewertet. Dieser Zeitanteil bezieht sich auf alle Minutenintervalle an allen Anzeigequerschnitten, gewichtet mit der Distanz zum nächsten Anzeigequerschnitt. Diese Ergebnisse werden über alle Simulationsläufe gemittelt und gegenübergestellt.

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Simulationen mit Umweltsteuerung

	SARAH	U-SARAH	absoluter Unterschied	relativer Unterschied	
FR Süden	durchschn. Reisezeit [min]	25,1	25,6	0,5	2,0 %
	$\sum \text{NO}_x$ [kg]	318,9	310,8	-8,1	-2,5 %
	\sum Feinstaub [kg]	3,6	3,5	-0,1	-2,0 %
	$\sum \text{CO}_2$ [t]	170,6	168,2	-2,4	-1,4 %
	A-Anzeige 120 km/h [%]	25,4	24,1	-1,3	-5,4 %
	A-Anzeige 100 km/h [%]	12,3	6,9	-5,4	-78,3 %
	A-Anzeige 80 km/h [%]	16,4	30,9	14,5	46,9 %
FR Norden	durchschn. Reisezeit [min]	18,3	18,3	0,0	0,0 %
	$\sum \text{NO}_x$ [kg]	221,9	218,4	-3,5	-1,6 %
	\sum Feinstaub [kg]	2,5	2,4	-0,1	-1,6 %
	$\sum \text{CO}_2$ [t]	109,9	109,0	-0,9	-0,8 %
	A-Anzeige 120 km/h [%]	5,2	9,3	4,1	44,1 %
	A-Anzeige 100 km/h [%]	2,7	2,9	0,2	7,4 %
	A-Anzeige 80 km/h [%]	1,3	3,5	2,2	64,0 %

In Fahrtrichtung Süden zeigen die Simulationen Emissionsreduktionen von 1,4 % bis 2,5 % für die morgendliche Hauptverkehrszeit. Gleichzeitig erhöht sich die durchschnittliche Reisezeit beim Durchfahren des gesamten Abschnitts um 2,0 %,

was etwa 30 Sekunden entspricht und bei einer Gesamtreisezeit von etwa 25 Minuten vernachlässigbar ist. Dabei weist der Zeitanteil der Schaltung einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h eine leichte Reduktion auf, während die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h deutlich abnimmt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wird jedoch öfter auf 80 km/h reduziert. Die Wirkung der untersuchten Umweltsteuerung ist demnach hauptsächlich auf die Harmonisierung 80 zurückzuführen.

Für Fahrtrichtung Norden weichen die Simulationsergebnisse für die SARAH- und die U-SARAH-Steuerung aus den genannten Gründen weniger voneinander ab. Die Simulationsergebnisse zeigen Emissionsreduktionen von 0,8 % bis 1,6 % für die morgendliche Hauptverkehrszeit. Die durchschnittliche Reisezeit bleibt dabei unverändert. Der Zeitanteil der Schaltung nimmt für alle drei Geschwindigkeitsbeschränkungen (120 km/h, 100 km/h und 80 km/h) zu. In Fahrtrichtung Norden ist die Wirkung der untersuchten Umweltsteuerung hauptsächlich auf die Harmonisierung 120 und 80 zurückzuführen.

Die simulativen Untersuchungen einer Umweltsteuerung ergeben eine positive Wirkung für die Ergänzung des konventionellen Steuerungsmodells um die berechneten Verkehrsemissionen und die Verschärfung der Harmonisierungsprogramme bei hohen Verkehrsemissionen. Die untersuchten Luftemissionen können durch die Anpassung des Steuerungsmodells leicht gesenkt werden, ohne dass sich die Reisezeiten auf dem Autobahnabschnitt wesentlich ändern. Diese Wirkung ist auf eine Verbesserung des Verkehrsflusses und entsprechende Reduktion von Staus zurückzuführen. Demnach besteht Potenzial für eine Verbesserung des Verkehrsflusses und für eine daraus resultierende Reduktion der verkehrlichen Emissionen durch eine restriktivere SBA-Steuerung. Es bleibt zu untersuchen, ob ein verändertes Steuerungsmodell Auswirkungen auf die Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmenden hat.

8 Fazit und Ausblick

8.1 Fazit

Diese Dissertation befasst sich mit der Abbildung der Wirkung einer SBA in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell. Dazu wird zunächst der Stand der Technik zu SBA und zur mikroskopischen Verkehrsflussmodellierung von Autobahnverkehr aufbereitet. Anschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse um empirische Analysen eines Autobahnabschnitts der A5 im Raum Frankfurt am Main ergänzt und somit eine Grundlage für die Modellierung und Kalibrierung eines Verkehrsflussmodells inkl. der Steuerungsmaßnahmen geschaffen. Mithilfe von Akzeptanzanalysen wird die Befolgung der dynamischen Anzeigen der SBA untersucht. Auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauend wird ein Akzeptanzmodell hergeleitet, das eine realitätsnahe Befolgung wiedergibt und zur simulativen Abbildung von SBA eingesetzt werden kann. In einem weiteren Schritt wird das hessische Steuerungsmodell SARAH als Python-Code implementiert und um eine Schaltlogik zur Öffnung und Schließung der TSF ergänzt. Diese SARAH-Implementierung wird anhand von realen Detektor- und Schaltdaten validiert. Das Verkehrsflussmodell, das Akzeptanzmodell und das Steuerungsmodell werden anschließend gekoppelt und anhand empirischer Daten kalibriert und validiert.

Der untersuchte Autobahnabschnitt weist aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und der drei auf der Strecke vorhandenen Autobahnkreuze komplexe verkehrliche Abläufe auf. Der Abschnitt charakterisiert sich durch stochastische Effekte und Wechselwirkungen zwischen verkehrlichen Ereignissen, die einen großen Einfluss auf die Verkehrszustände haben. Die Auswertungen der Verkehrs-

und Schaltdaten ergeben trotz ähnlicher Rahmenbedingungen und Verkehrsaufkommen für gleiche Werkzeuge zum Teil stark abweichende Verkehrsabläufe. Auch der Verkehrsfluss in der Simulation birgt diese Effekte, wodurch unterschiedliche Simulationsläufe zum Teil stark variieren. Das Modell bildet somit eine große Spannweite an möglichen Verkehrsabläufen ab, wobei alle Simulationsläufe einen plausiblen und realitätsnahen Verkehrsablauf auf dem Abschnitt darstellen.

Eine wichtige Komponente ist neben dem Verkehrsflussmodell die Nachbildung des Steuerungsmodells. Die Abbildung der Wirkzusammenhänge und der lokalen Besonderheiten ist essenziell für ein realitätsnahes Schaltverhalten der SBA in der Simulation. Dabei ist zu beachten, dass die Parameterwerte der Ein- und Ausschaltkriterien in Realität an lokale Messfehler der Detektoren angepasst werden. Erfasst bspw. ein Messquerschnitt tendenziell zu wenige Lkw, so werden die Schwellenwerte in Bezug auf den Lkw-Anteil an diesem Messquerschnitt reduziert. In der Simulation liegt jedoch eine vollständige und fehlerfreie Erfassung der Verkehrsgrößen vor, sodass ggfs. eine Anpassung der Schwellenwerte erforderlich ist. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Sonderereignisse, die eine Handschaltung erfordern, in der Simulation nicht ohne Weiteres auftreten und auch nicht von den Automatikprogrammen der SBA erkannt werden. Entsprechende Engpässe können daher nicht abgebildet werden. Auch Einflüsse durch Engpässe außerhalb des untersuchten Abschnitts, die sich jedoch auf den Verkehrsfluss auf dem simulierten Abschnitt auswirken, können nicht abgebildet werden. Zuletzt spielt in diesem Zusammenhang die Kopplung des Verkehrsflussmodells und des Steuerungsmodells mit einer realitätsnahen Abbildung der Latenz und Kommunikation zwischen den Komponenten eine wichtige Rolle.

Bei den Eingabegrößen in das Modell sind die Quelle-Ziel-Matrizen und die Verkehrszuflüsse von Bedeutung. Die Fahrtrelationen haben einen großen Einfluss auf die Belastungen auf den einzelnen Segmenten und auf die Verflechtungen an den Anschlussstellen. Die Kalibrierung zeigt, dass für den untersuchten Abschnitt die aus den FCD abgeleiteten Verflechtungen den Pkw-Verkehr am besten widerspiegeln. Für Lkw ist die Datengrundlage aus den FCD zu klein und daher werden die Quelle-Ziel-Matrizen aus Validate in Kombination mit einem Matrixkorrekturverfahren abgeleitet. Sowohl für Pkw als auch für Lkw verbessern punktuelle

Anpassungen der Quelle-Ziel-Matrizen die Kalibrierung des Verkehrsflussmodells. Die Verkehrszuflüsse stammen aus Detektordaten der Einfahrten. Dabei liegen vereinzelt Untererfassungen vor, die sich in Abweichungen der Verkehrsstärken zeigen und durch manuelle Anpassungen korrigiert werden müssen.

Neben den Fahrverhaltensparametern haben die Wunschgeschwindigkeiten einen großen Einfluss auf den Verkehrsfluss in der Simulation. Die aus dem Akzeptanzmodell resultierenden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für Pkw bilden die Befolgung der dynamischen Anzeigen sehr gut ab. Lediglich bei geringen Verkehrsdichten ohne Geschwindigkeitsbeschränkung werden die Wunschgeschwindigkeiten der Pkw mit dem gewählten Ansatz überschätzt, sodass hier eine Anpassung erforderlich ist. Zusätzlich ist zu beachten, dass zu geringe Wunschgeschwindigkeiten im Zuge einer Stauwarnung in der Simulation dazu führen können, dass sich der Verkehr nach Auflösung eines Engpasses nicht wieder erholt. Die SBA erkennt die Auflösung eines Staus durch einen Anstieg der mittleren Geschwindigkeiten und somit ist eine gewisse Missachtung der Anzeigen in der Stauauflösung erforderlich, die mithilfe von höheren Wunschgeschwindigkeiten im Stau modelliert werden kann. Für Lkw zeigen annähernd normalverteilte Wunschgeschwindigkeiten kein realitätsnahes Geschwindigkeitsverhalten. Die daraus resultierende große Spannweite der Lkw-Wunschgeschwindigkeiten führt zu einem dazu, dass vereinzelt, langsame Lkw den Verkehr aufhalten und zum anderen werden zu viele Überholwünsche bei den Lkw ausgelöst, was sich negativ auf die Fahrstreifenaufteilung auswirkt. Die Annahme von gleichverteilten Wunschgeschwindigkeiten für Lkw erweist sich als zielführend.

Die Fahrstreifenwechselformen haben einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsablauf an den Anschlussstellen. Es gilt unrealistische Nothalte aufgrund von zu geringen Werten und Kapazitätsprobleme aufgrund von zu hohen Werten in der Kalibrierung gegeneinander abzuwägen. Zusätzlich stellt sich die Annahme einer Verteilung anstelle eines einzelnen Wertes als zielführend heraus.

Für die Kalibrierung des Fahrverhaltens auf Autobahnen stellt sich ein fahrstreifenspezifisches Fahrverhalten, separat für Pkw und Lkw und unterschieden zwischen dem Fahrverhalten auf Strecken und in Anschlussstellen, als zielführend

heraus. Dabei ist für das Fahrzeugfolgeverhalten die Folgezeitlücken-Verteilung *CCI* für die Abbildung der Kapazität von besonderer Relevanz. Die Wahl der gleichen *CCI*-Werte auf der Strecke und in den Anschlussstellen ergibt gute Simulationsergebnisse. Zusätzlich wird *CCI* fahstreifenspezifisch definiert und es wird eine Verteilung anstatt eines Wertes hinterlegt, da so eine bessere Abbildung der realen Zeitlückenverteilungen in der Simulation gelingt.

Die Kalibrierung des Fahstreifenwechselverhaltens hat das Ziel, zwei Probleme in der Simulation zu minimieren. Zum einen fädeln die Fahrzeuge zunächst zu vorsichtig an den Anschlussstellen ein und aus und zum anderen fahren zu viele Lkw auf dem mittleren Fahstreifen, weswegen die Fahstreifenaufteilung nicht der Realität entspricht. Die Verflechtungsvorgänge können verbessert werden, indem sämtliche Parameter in Bezug auf die Verzögerung bei notwendigen Fahstreifenwechseln aggressiver gewählt werden. Der *Sicherheitsabstandsfaktor* zeigt eine positive Wirkung auf die Verflechtungen für geringere Werte für Pkw in den Anschlussstellen. Allgemein fördern reduzierte Werte für Lkw auf dem rechten Fahstreifen die Fahstreifenwechsel von Lkw zurück nach rechts. Die *Freifahrtzeit* hat einen großen Einfluss auf die Fahstreifenaufteilung. Die Simulationen erzielen gute Ergebnisse für sehr geringe Werte für Lkw, die sich dadurch nach einem Überholvorgang möglichst schnell wieder auf den rechten Fahstreifen einordnen. Für Pkw bilden hohe Parameterwerte auf dem rechten Fahstreifen eine geringe Befolgung des Rechtsfahrgebots ab. Geringere Freifahrtzeiten auf dem mittleren Fahstreifen fördern Fahstreifenwechsel von Pkw vom linken Fahstreifen zurück in die Mitte. Durch die vermehrte Nutzung des mittleren Fahstreifens durch Pkw reduzieren sich die Überholmöglichkeiten und folglich auch die Überholvorgänge der Lkw. Die Kalibrierung der Freifahrtzeit bewirkt eine deutliche Verbesserung der Fahstreifenaufteilung der Pkw und Lkw.

Es resultiert ein Verkehrsflussmodell, das die Verkehrssituation auf einer viel befahrenen deutschen Autobahn inkl. des Schaltverhaltens der SBA und der Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden an einem typischen Werktag realitätsnah abbildet. Ein solches Modell ermöglicht es, verkehrsbeeinflussende Maßnahmen vor einer Realimplementierung simulativ zu untersuchen. Als konkretes Anwendungsbeispiel wird die Ergänzung der konventionellen SARAH-Steuerung um

eine emissionsabhängige Verschärfung der Harmonisierungsprogramme simulativ untersucht. Die Modellierung und Auswertung dieses Anwendungsbeispiels zeigt, dass das entwickelte Verkehrsflussmodell für die Untersuchung der Auswirkungen von verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen gut geeignet ist.

Diese Dissertation liefert eine Methode zum Aufbau und zur Kopplung aller notwendigen Komponenten für die Abbildung einer Autobahn mit SBA in einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell. Neben dem entwickelten Akzeptanzmodell liefert die detaillierte Beschreibung der Modellkalibrierung und der für die Abbildung von Autobahnverkehr relevanten Parameter einen großen Mehrwert. Damit wird ein Leitfaden für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation von Autobahnverkehr am Beispiel der Software PTV Vissim bereitgestellt, der sowohl für die Abbildung von beeinflusstem als auch unbeeinflusstem Autobahnverkehr eingesetzt werden kann. Die Erkenntnisse können auf andere Simulationswerkzeuge übertragen werden.

8.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Im Laufe der Arbeiten am Akzeptanzmodell, der SARAH-Implementierung und dem Verkehrsflussmodell hat sich an mehreren Stellen weiterer Forschungsbedarf herauskristallisiert, der sich vorrangig auf die Akzeptanzanalysen und das Fahrverhalten bezieht. Die Erkenntnisse werden an den entsprechenden Stellen dieser Dissertation thematisiert und im Folgenden zusammengefasst.

Das entwickelte Akzeptanzmodell umfasst Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für verschiedene Fahrzeugklassen, Geschwindigkeitsbeschränkungen und Verkehrsdichten. Aufgrund der zu geringen Datenmenge an vorliegenden Einzelfahrzeugdaten inkl. Schaltdaten ist eine weitere Differenzierung nicht möglich. Für größere Datensätze wäre bspw. die separate Betrachtung der Auswirkungen von Gefahrenwarnungen auf die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen denkbar.

Zudem ist die angewendete modifizierte Kaplan-Meier Methode auf fließenden Verkehr, bestehend aus beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen, ausgelegt.

Mit steigender Verkehrsdichte sind solche Verkehrssituationen zunehmend nicht mehr gewährleistet, sodass die Methode keine sinnvollen Ergebnisse liefert. In diesen Fällen ist wenig über die tatsächliche Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten bekannt. In diesem Zusammenhang könnte die Untersuchung von Einzelfahrzeugdaten aus Trajektorien Abhilfe schaffen. Der Vorteil einer solchen Datengrundlage ist, dass gleiche Fahrzeuge bei unterschiedlichen Verkehrsdichten beobachtet werden können. Auch mithilfe einer Simulationsstudie zu den Effekten von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen auf die mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten könnte die Thematik weiter erforscht werden.

Des Weiteren haben die Simulationen gezeigt, dass die Anwendung der modifizierten Kaplan-Meier Methode für die Schätzung von Lkw-Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nicht geeignet ist und hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Es ist denkbar, dass die Grundidee von beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen aufgrund von geringeren Lkw-Geschwindigkeiten, größeren Zeitlücken, Pulkbildungen und Lkw-Überholverböten nicht ohne Weiteres auf Lkw übertragbar ist.

Es besteht außerdem weiterer Forschungsbedarf zu der Frage, wie sich das Folgeverhalten der Verkehrsteilnehmenden in Abhängigkeit der Verkehrssituation und der dynamischen SBA-Anzeigen ändert. Die Datenanalysen geben erste Hinweise auf eine Abnahme von *CCI* mit steigender Verkehrsstärke und auf ein allgemein abweichendes Folgeverhalten je nach A- und B-Anzeige. Ebenfalls denkbar ist ein variierendes Fahrstreifenwechselverhalten je nach SBA-Anzeige. Erkenntnisse zu dieser Forschungsfrage könnten im Akzeptanzmodell aufgenommen werden und die Abbildung einer SBA und ihrer Wirkung weiter verbessern.

Ein Praxistest könnte der Weiterentwicklung und Validierung des entwickelten Akzeptanzmodells dienen. Den Akzeptanzuntersuchungen liegen ausschließlich Daten von beeinflusstem Autobahnverkehr zugrunde. Vergleichsdaten von dem gleichen Abschnitt bei ausgeschalteter SBA würden dazu beitragen, die Auswirkungen der SBA besser von den verkehrlichen Einflüssen separieren zu können. Aspekte der Verkehrssicherheit stehen einem solchen Praxistest entgegen.

Mithilfe von fahrstreifenspezifischen Streckenverhaltenstypen kann unterschiedliches Fahrverhalten auf verschiedenen Fahrstreifen in der Simulation besser abgebildet werden. Zur Frage der Realitätsnähe dieser Modellierungsart besteht weiterer Forschungsbedarf. Inwieweit Verkehrsteilnehmende den Fahrstreifen entsprechend ihrem Fahrverhalten und ihrer Wunschgeschwindigkeit auswählen oder sie ihr Fahrverhalten an den jeweiligen Fahrstreifen anpassen, bleibt zu untersuchen.

In diesem Zusammenhang besteht ebenfalls Forschungsbedarf zum fahrstreifenfeinen Fahrverhalten auf vierstreifigen Autobahnstrecken. Im entwickelten Verkehrsflussmodell ist ein separates Fahrverhalten für die drei Fahrstreifen der Hauptfahrbahn hinterlegt. Bei geöffnetem Seitenstreifen wird diesem das Fahrverhalten des rechten Hauptfahrstreifens zugeteilt. Ein separates Fahrverhalten für den Seitenstreifen wäre ein Ansatz zur weiteren Verbesserung der Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Segmenten.

Im Zuge der Kalibrierung der Fahrstreifenaufteilung zeichnen sich einige Aspekte zur Abbildung des Fahrverhaltens in Vissim ab, die weiter erforscht werden sollten. Lkw nutzen bspw. in den Simulationen zu häufig den mittleren Fahrstreifen. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass Lkw in dichten Verkehrssituationen vermehrt nach einem Überholvorgang nicht mehr zurück auf den rechten Fahrstreifen wechseln können, weil dort keine ausreichend große Lücke vorhanden ist. Im Gegensatz zu notwendigen Fahrstreifenwechseln ist für freiwillige Fahrstreifenwechsel in Vissim keine aktive Behinderung der anderen Verkehrsteilnehmenden vorgesehen. Es ist jedoch denkbar, dass Lkw ein aggressives Fahrstreifenwechselverhalten für freiwillige Fahrstreifenwechsel in Kauf nehmen.

Die Simulationen zeigen außerdem, dass die Fahrzeuge bereits bei geringen Unterschieden zwischen der eigenen und der Wunschgeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs einen Fahrstreifenwechselwunsch generieren. Kleine Differenzen in der Wunschgeschwindigkeit werden jedoch möglicherweise von den Verkehrsteilnehmenden akzeptiert, eventuell sogar nicht wahrgenommen. Die Implementierung eines Parameters zur Abbildung der Akzeptanz der Wunschgeschwindigkeitsdifferenzen würde Abhilfe schaffen. Ein solcher Parameter würde die Verringerung der eigenen Geschwindigkeit im Verhältnis zur Wunschgeschwindigkeit, die ein

Fahrzeug akzeptiert, bevor ein Überholwunsch generiert wird, beschreiben. Dies würde zu einer Verbesserung der realitätsnahen Abbildung der Fahrstreifenaufteilung und der Pulkbildung von Lkw auf dem rechten Fahrstreifen beitragen.

Die Kalibrierung der Fahrstreifenaufteilung könnte ebenfalls durch die Implementierung der Freifahrtzeit als Verteilung anstelle eines festen Wertes für alle Fahrzeuge einer Fahrzeugklasse verbessert werden. Mithilfe der Freifahrtzeit kann u. a. die Akzeptanz des Rechtsfahrgebots durch Pkw abgebildet werden. Über eine Verteilung der Werte dieses Parameters könnte eine Spannweite für die Befolgung des Rechtsfahrgebots hinterlegt und entsprechend die Fahrstreifenaufteilung bei geringen Verkehrsstärken beeinflusst werden.

Die entwickelte Methode kann auf andere Autobahnabschnitte angewendet werden. Mithilfe solcher mikroskopischen Verkehrsflussmodelle inkl. der Steuerungsmaßnahmen und der Reaktionen der Verkehrsteilnehmenden können verschiedenste Fragestellungen untersucht werden. Neben der Analyse von verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen, Umweltauswirkungen und Anpassungen von Steuerungsmodellen und Parametrisierungen können auch bspw. Fragestellungen in Zusammenhang mit automatisiertem und autonomem Fahren oder kooperativen Verkehrssystemen erforscht werden.

Bei allen durchgeführten Untersuchungen spielt die Rahmenbedingung, dass keine allgemeine Geschwindigkeitsbeschränkung für Pkw auf deutschen Autobahnen gilt, eine wichtige Rolle. SBA beschränken die zulässige Höchstgeschwindigkeit nur dann, wenn es aus Gründen des Verkehrsflusses oder der Verkehrssicherheit erforderlich ist. In Anbetracht der aktuellen politischen Diskussion zu einer allgemeinen Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen stellt sich die Frage, wie sich die Steuerungsziele von SBA in Zukunft verändern werden. Vor allem die Harmonisierung 120 würde bei einer allgemeinen Geschwindigkeitsbeschränkung an Wichtigkeit verlieren. Zum Thema der Akzeptanz einer allgemeinen Geschwindigkeitsbeschränkung und den entsprechenden Auswirkungen auf den Verkehrsfluss besteht weiterer Forschungsbedarf.

Literaturverzeichnis

- [Ackaah und Bogenberger 2016] Ackaah, Williams ; Bogenberger, Klaus: Advanced Evaluation Methods for Variable Speed Limit Systems. In: *Transportation Research Procedia* 15 (2016), S. 652–663. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516305877>. – Zugriffsdatum: 24.09.2020. – ISSN 23521465
- [Ackaah u. a. 2015] Ackaah, Williams ; Huber, Gerhard ; Bogenberger, Klaus: Quality Evaluation Method for Variable Speed Limit Systems: Incident Detection and Warning Potential. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2484 (2015), Nr. 1, S. 80–89. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2484-09>. – Zugriffsdatum: 06.05.2021
- [Ackaah u. a. 2016] Ackaah, Williams ; Huber, Gerhard ; Bogenberger, Klaus ; Bertini, Robert L.: Assessing the Harmonization Potential of Variable Speed Limit Systems. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2554 (2016), Nr. 1, S. 129–138. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2554-14>. – Zugriffsdatum: 06.05.2021
- [van Aerde 1995] Aerde, Michel van: A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials. In: *TRB 74th Annual Meeting Compendium of Papers. Ed.: Transportation Research Board*. Washington D. C., 1995
- [Allaby u. a. 2007] Allaby, Peter ; Hellinga, Bruce ; Bullock, Mara: Variable Speed Limits: Safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy

- for Freeway Applications. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 8 (2007), Nr. 4, S. 671–680. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/4382934/>. – Zugriffsdatum: 01.12.2022. – ISSN 1524-9050
- [ASTRA 2015] *Richtlinie 15016 - Geschwindigkeitsharmonisierung und Gefahrenwarnung (GHGW), Grundsätze zu Planung und Betrieb*. Bern : Bundesamt für Strassen ASTRA (Hrsg.), 2015
- [ASTRA 2018] *Richtlinie 15019 - Verkehrstechnische Regelungslogik, Funktionale Minimalanforderungen für Planung und Betrieb der Regelung von Verkehrsmanagement-Systemen zur Verflüssigung des Verkehrs*. Bern : Bundesamt für Strassen ASTRA (Hrsg.), 2018
- [Autobahn GmbH 2021] *Autobahnreform*. Die Autobahn GmbH des Bundes (Hrsg.), 2021. – URL <https://www.autobahn.de/die-autobahn/autobahnreform>. – Zugriffsdatum: 28.11.2021
- [Balz und Ermer 1998] Balz, Werner ; Ermer, Peter: Feldversuche zur Bestimmung der Wirkungen verschiedener Kombinationen von WVZ-Anzeigen. In: *Straßenverkehrstechnik* (1998), Nr. 12, S. 644–649. – ISSN 0039–2219
- [Beentjes 2012] Beentjes, Robbert M.: Performance of rush-hour lanes and plus lanes: a study to behavioral factors and design factors. Delft University of Technology, Masterarbeit. (2012). – URL <http://resolver.tudelft.nl/uuid:6dca11c9-433f-4ffe-ae09-92f8e4eb283c>. – Zugriffsdatum: 30.01.2023
- [Bertini u. a. 2006] Bertini, Robert L. ; Boice, Steven ; Bogenberger, Klaus: Dynamics of Variable Speed Limit System Surrounding Bottleneck on German Autobahn. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1778 (2006), Nr. 1, S. 149–159. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198106197800119>. – Zugriffsdatum: 26.10.2022. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Bhowmick u. a. 2011] Bhowmick, Arun ; Qiu, Tony Z. ; Hadiuzzaman, Md.: Driver Compliance Analysis of Variable Speed Limit Based Freeway Traffic

- Control. In: *ICCTP 2011*. Nanjing : American Society of Civil Engineers, 2011, S. 4181–4192. – URL <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41186%28421%29416>. – Zugriffsdatum: 08.01.2021. – ISBN 978-0-7844-1186-5
- [Bode und Haller 1983] Bode, Karl-Rudolf ; Haller, Wolfgang: Geschwindigkeitssteuerung auf der A7 zwischen den Autobahndreiecken Hannover-Nord und Walsrode. In: *Straßenverkehrstechnik* (1983), Nr. 5, S. 145–151. – ISSN 0039–2219
- [Botma 1999] Botma, Hein: The Free Speed Distribution of Drivers: Estimation Approaches. In: Bovy, P. (Hrsg.): *Five years 'Crossroads of theory and practice'*. Delft : Delft University Press, 1999, S. 1–22
- [Breton u. a. 2002] Breton, P. ; Hegyi, Andreas ; De Schutter, Bart ; Hellendoorn, Hans: Shock wave elimination/reduction by optimal coordination of variable speed limits. In: *Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Singapore : IEEE, 2002, S. 225–230. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/1041219/>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISBN 978-0-7803-7389-1
- [Brilon und Geistefeldt 2010] Brilon, Werner ; Geistefeldt, Justin: *Überprüfung der Bemessungswerte des HBS für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte: Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 21.049/2007 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft, 2010 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1033). – ISBN 978-3-86509-991-4
- [Brilon u. a. 2005] Brilon, Werner ; Geistefeldt, Justin ; Regler, Matthias: Reliability of Freeway Traffic Flow: a Stochastic Concept of Capacity. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Maryland, 2005, S. 125–144. – ISBN 0-08-044680-9
- [Brilon u. a. 2007a] Brilon, Werner ; Geistefeldt, Justin ; Zurlinden, Hendrik: Implementing the Concept of Reliability for Highway Capacity Analysis. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*

2027 (2007), Nr. 1, S. 1–8. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2027-01>. – Zugriffsdatum: 30.01.2023. – ISSN 2169-4052

[Brilon u. a. 2007b] Brilon, Werner ; Harding, Jochen ; Hartmann, Dietrich ; Erlemann, Kai: *Weiterentwicklung des bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft, 2007 (Forschung - Straßenbau und Verkehrstechnik Heft 974). – ISBN 978-3-86509-730-9

[Brilon und Ponzlet 1995] Brilon, Werner ; Ponzlet, Martin: Application of traffic flow models. In: *Proceedings of the Workshop on Traffic and Granular Flow*. Singapore, 1995

[Brilon und Zurlinden 2003] Brilon, Werner ; Zurlinden, Hendrik: *Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen*. Bonn, 2003 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 870)

[Busch 1984] Busch, Fritz: Spurbelastungen und Häufigkeit von Spurwechseln auf einer dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahn. In: *Straßenverkehrstechnik* (1984), Nr. 6, S. 228–231. – ISSN 0039–2219

[Carlson u. a. 2011] Carlson, Rodrigo C. ; Papamichail, Ioannis ; Papa-georgiou, Markos: Local Feedback-Based Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (2011), Nr. 4, S. 1261–1276. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/5873154/>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 1524-9050

[Casas u. a. 2010] Casas, Jordi ; Ferrer, Jaime L. ; Garcia, David ; Perarnau, Josep ; Torday, Alex: Traffic Simulation with Aimsun. In: Barceló, Jaume (Hrsg.): *Fundamentals of traffic simulation* Bd. 145. New York : Springer, 2010, S. 173–232. – ISBN 978-1-4419-6141-9

[Chang u. a. 2011] Chang, Gang-Len ; Park, Sung Y. ; Paracha, Jawad: Intelligent Transportation System Field Demonstration: Integration of Variable Speed Limit Control and Travel Time Estimation for a Recurrently

- Congested Highway. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2243 (2011), Nr. 1, S. 55–66. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2243-07>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 2169-4052
- [Cremer 1979] Cremer, Michael: *Der Verkehrsfluß auf Schnellstraßen: Modelle, Überwachung, Regelung*. Berlin : Springer, 1979 (Fachberichte Messen, Steuern, Regeln; 3). – ISBN 978-3-540-09319-0
- [De Pauw u. a. 2018] De Pauw, Ellen ; Daniels, Stijn ; Franckx, Laurent ; Mayeres, Inge: Safety effects of dynamic speed limits on motorways. In: *Accident Analysis & Prevention* 114 (2018), S. 83–89. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001457517302270>. – Zugriffsdatum: 16.03.2021. – ISSN 00014575
- [DeGaspari u. a. 2013] DeGaspari, Michael ; Jin, Peter ; Wall, William ; Walton, Michael: The Effect of Active Traffic Management on Travel Time Reliability: A Case Study of I-5 in Seattle, Washington. Washington D. C., 2013
- [Denaes u. a. 2009a] Denaes, Samuel ; Schieferstein, Andrea ; Rieß, Stefanie ; Ermer, Peter: Neue Methoden zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen - Teil 1: Zielfunktion zur Wirkungsmodellierung von Harmonisierungssteuerprogrammen und Stauwarnungen. In: *Straßenverkehrstechnik* (2009), Nr. 3, S. 133–140. – ISSN 0039–2219
- [Denaes u. a. 2009b] Denaes, Samuel ; Schieferstein, Andrea ; Rieß, Stefanie ; Ermer, Peter: Neue Methoden zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen - Teil 2: Das neue Steuerungsverfahren INCA. In: *Straßenverkehrstechnik* (2009), Nr. 4, S. 233–240. – ISSN 0039–2219
- [Diegmann u. a. 2020] Diegmann, Volker ; Wursthorn, Heike ; Breitenbach, Yvonne ; Düring, Ingo ; Schönharting, Jörg ; Kraus, Thomas ; Klemm, Patrick ; Voigth, Rainer ; Kohlen, Ralf ; Löhner, Holger: *Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement*. Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft, 2020. – ISBN 978-3-95606-481-4

- [Dong u. a. 2015] Dong, Jing ; Hawkins, Neal ; Houchin, Andrew ; Shafieirad, Navid ; Lu, Chaoru: Vissim Calibration for Urban Freeways: Final Report. (2015)
- [Dörschel und Abel 2020] Dörschel, Lorenz ; Abel, Dirk: Traffic Control on Freeways Using Variable Speed Limits. In: *IFAC-PapersOnLine* 53 (2020), Nr. 2, S. 14924–14929. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896320325945>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 24058963
- [Drews 1997] Drews, Otfried: Verkehrliche Auswirkungen der Anordnung von Überholverboten für LKW auf Autobahnen. In: *Straßenverkehrstechnik* (1997), Nr. 4, S. 184–189. – ISSN 0039–2219
- [Duret u. a. 2012] Duret, Aurélien ; Ahn, Soyoung ; Buisson, Christine: Lane flow distribution on a three-lane freeway: General features and the effects of traffic controls. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24 (2012), S. 157–167. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X12000307>. – Zugriffsdatum: 30.01.2023. – ISSN 0968090X
- [Durth u. a. 1994] Durth, Walter ; Roos, Ralf ; Holldorb, Christian: *Wirksamkeit der Verkehrsbeeinflussungsanlage A5 Bad Homburg - Frankfurt: Untersuchung im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Straßenbau*. Darmstadt, 1994
- [Färber und Färber 2000] Färber, Berthold ; Färber, Brigitte: *Akzeptanz von Schildern einer variablen SBA (unveröffentlichter Zwischenbericht im FE 03.321)*. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), 2000
- [Farzaneh und Rakha 2006] Farzaneh, Mohamadreza ; Rakha, Hesham A.: Impact of Differences in Driver-Desired Speed on Steady-State Traffic Stream Behavior. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2006), Nr. 1965, S. 142–151. – URL <http://dx.doi.org/10.3141/1965-15>. – Zugriffsdatum: 30.01.2023

- [Fellendorf und Vortisch 2001] Fellendorf, Martin ; Vortisch, Peter: Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations. In: *TRB 80th Annual Meeting Compendium of Papers. Ed.: Transportation Research Board*. Washington D. C., 2001
- [Fellendorf und Vortisch 2010] Fellendorf, Martin ; Vortisch, Peter: Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. In: Barceló, Jaume (Hrsg.): *Fundamentals of traffic simulation* Bd. 145. New York : Springer, 2010, S. 63–93. – ISBN 978-1-4419-6141-9
- [FGSV 1992] *Hinweise für Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen*. Ausgabe 1992. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 1992 (FGSV W1 359)
- [FGSV 2006] *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation*. Ausgabe 2006. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2006
- [FGSV 2012a] *Empfehlungen für Verkehrserhebungen: EVE*. Ausgabe 2012. Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2012 (FGSV R2 125). – ISBN 978-3-941790-99-5
- [FGSV 2012b] *Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung*. Ausgabe 2012. Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2012 (FGSV W1 304). – ISBN 978-3-86446-022-7
- [FGSV 2017] *Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen*. Ausgabe 2017. Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2017 (FGSV W1 306). – ISBN 978-3-86446-191-0
- [FGSV 2020] *Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen: BBSV*. Stand Juni 2020. Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2020. – ISBN 978-3-86446-271-9

- [Garcia-Castro und Monzon 2013] Garcia-Castro, Alvaro ; Monzon, Andres: Variable Speed Limits. Review and Development of an Aggregate Indicator Based on Floating Car Data. In: *Proceedings of the 13th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication"*. Riga, 2013, S. 117–127
- [Geistefeldt 2007] Geistefeldt, Justin: *Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen*. Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum (Heft 30/2007), Dissertation, 2007
- [Geistefeldt 2009] Geistefeldt, Justin: Überprüfung der verkehrstechnischen Bemessungswerte des HBS für Autobahnen. In: *Straßenverkehrstechnik* (2009), Nr. 10, S. 643–650. – ISSN 0039–2219
- [Geistefeldt 2011] Geistefeldt, Justin: Capacity effects of variable speed limits on German freeways. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 16 (2011), S. 48–56. – ISSN 18770428
- [Geistefeldt 2015] Geistefeldt, Justin: Empirical Estimation of Desired Speed Distributions on Freeways for Microscopic Traffic Simulation. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2490 (2015), Nr. 1, S. 41–46. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Geistefeldt 2021] Geistefeldt, Justin: Zuverlässigkeit der Kapazität und optimale Auslastung von Autobahnen. In: *Straßenverkehrstechnik* (2021), Nr. 9, S. 651–655. – ISSN 0039–2219
- [Geistefeldt u. a. 2017] Geistefeldt, Justin ; Giuliani, Stefan ; Busch, Fritz ; Schendzielorz, Tobias ; Haug, Andrea ; Vortisch, Peter ; Leyn, Ulrike ; Trapp, Roland: *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen*. Bremen : Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2017 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrstechnik Heft V 279). – ISBN 978-3-95606-289-6
- [Geistefeldt u. a. 2014] Geistefeldt, Justin ; Giuliani, Stefan ; Vortisch, Peter ; Leyn, Ulrike ; Trapp, Roland ; Busch, Fritz ; Rascher, Andrea ; Celikkaya,

- Nihan: Assessment of Level of Service on Freeways by Microscopic Traffic Simulation. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2461 (2014), Nr. 1, S. 41–49. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2461-06>. – Zugriffsdatum: 31.07.2021. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Geistefeldt und Glatz 2010] Geistefeldt, Justin ; Glatz, Matthias: Temporäre Seitenstreifenfreigabe Das Beispiel Hessen in Deutschland. In: *Straßenverkehrstechnik* (2010), Nr. 12, S. 24–27. – ISSN 0039–2219
- [Gergely und Schwietering 2021] Gergely, Martin ; Schwietering, Christoph: Modernes Verkehrsmanagement auf Autobahnen - Erstmaliger Einsatz des Steuerungsmodells nach MARZ 2018. In: *HEUREKA '21. Optimierung in Verkehr und Transport*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2021
- [Google 2022] Google: *Google Earth*. 2022. – URL earth.google.com. – Zugriffsdatum: 24.10.2022
- [Google 2023] Google: *Google Maps*. 2023. – URL <https://www.google.de/maps>. – Zugriffsdatum: 12.04.2023
- [Grahl und Sander 2007] Grahl, Stefan ; Sander, Günter: *Ausstattung von Anschlussstellen mit dynamischen Wegweisern mit integrierter Stauinformation - dWiSta*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag N.W., Verlag für neue Wissenschaft, 2007 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik 162). – ISBN 978-3-86509-740-8
- [Grimm 2019] Grimm, Jan: Modeling the Effects of Motorway Traffic Control on Driving Behavior in a Microscopic Traffic Simulation. In: *2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. Cracow : IEEE, 2019, S. 1–8. – URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8883319/>. – Zugriffsdatum: 30.11.2022. – ISBN 978-1-5386-9484-8

- [Grimm 2022] Grimm, Jan: *Kontext-differenzierte Modellierung des Fahrverhaltens auf Autobahnen mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2022
- [Grumert u. a. 2018] Grumert, Ellen F. ; Tapani, Andreas ; Ma, Xiaoliang: Characteristics of variable speed limit systems. In: *European Transport Research Review* 10 (2018), Nr. 2. – URL <https://etrr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-018-0294-8>. – Zugriffsdatum: 23.10.2022. – ISSN 1867-0717, 1866-8887
- [Guerrieri und Mauro 2016] Guerrieri, Marco ; Mauro, Raffaele: Capacity and safety analysis of hard-shoulder running (HSR). A motorway case study. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 92 (2016), S. 162–183. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965856416306097>. – Zugriffsdatum: 10.01.2021. – ISSN 09658564
- [Habtemichael und de Picado Santos 2013] Habtemichael, Filmon G. ; Picado Santos, Luis de: Safety and Operational Benefits of Variable Speed Limits under Different Traffic Conditions and Driver Compliance Levels. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2386 (2013), Nr. 1, S. 7–15. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2386-02>. – Zugriffsdatum: 22.07.2020. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Hadiuzzaman u. a. 2015] Hadiuzzaman, Md. ; Fang, Jie ; Karim, Md. A. ; Luo, Ying ; Qiu, Tony Z.: Modeling Driver Compliance to VSL and Quantifying Impacts of Compliance Levels and Control Strategy on Mobility and Safety. In: *Journal of Transportation Engineering* 141 (2015), Nr. 12, S. 04015028. – URL <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000795>. – Zugriffsdatum: 04.12.2022. – ISSN 0733-947X, 1943-5436
- [Hadiuzzaman u. a. 2013] Hadiuzzaman, Md. ; Qiu, Tony Z. ; Lu, Xiao-Yun: Variable Speed Limit Control Design for Relieving Congestion Caused by Active Bottlenecks. In: *Journal of Transportation Engineering* 139 (2013), Nr. 4, S. 358–370. – URL [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29JTE.1943-5436.0000795)

- 29TE.1943-5436.0000507. – Zugriffsdatum: 29.12.2022. – ISSN 0733-947X, 1943-5436
- [Harbord u. a. 2006] Harbord, Brian ; White, Joanna ; McCabe, Keith ; Riley, Andy ; Tarry, Steve: A flexible approach to motorway control. In: *Proceedings of the 13th ITS World Congress*. London, 2006
- [Hartmann u. a. 2017] Hartmann, Martin ; Motamedidehkordi, Nassim ; Krause, Sabine ; Hoffmann, Silja ; Vortisch, Peter ; Busch, Fritz: Impact of Automated Vehicles on Capacity of the German Freeway Network. In: *ITS World Congress 2017 Compendium of Papers*. Montreal, 2017
- [Hartz und Schmidt 2005] Hartz, Birgit ; Schmidt, Marco: *Dynamische Wegweiser mit integrierten Stauinformationen (dWiSta): Zusammenfassung bisheriger Erfahrungen; Empfehlungen zur Gestaltung und Anwendung*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag N.W., Verlag für neue Wissenschaft, 2005 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 924). – ISBN 978-3-86509-354-7
- [HBS 2015] *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS 2015*. Ausgabe 2015. Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2015 (FGSV). – ISBN 978-3-86446-103-3
- [HCM 2010] *HCM 2010 : highway capacity manual*. Fifth edition. Washington, D. C. : Transportation Research Board (Hrsg.), 2010. – URL <https://search.library.wisc.edu/catalog/9910110589002121>. – Zugriffsdatum: 30.01.2023
- [Hegewald 2021] Hegewald, Jessica: Bewertung von Streckenbeeinflussungsanlagen mittels agentenbasierter Simulation. In: *HEUREKA '21. Optimierung in Verkehr und Transport*. Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2021
- [Hegyí u. a. 2005] Hegyí, Andreas ; De Schutter, Bart ; Hellendoorn, Hans: Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 13 (2005), Nr. 3, S. 185–209. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/>

retrieve/pii/S0968090X05000264. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 0968090X

[Hegyí und Hoogendoorn 2010] Hegyí, Andreas ; Hoogendoorn, Serge P.: Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways - Field test results of the SPECIALIST algorithm. In: *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Funchal, Madeira Island : IEEE, 2010, S. 519–524. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/5624974/>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISBN 978-1-4244-7657-2

[Hegyí u. a. 2008] Hegyí, Andreas ; Hoogendoorn, Serge P. ; Schreuder, Marco ; Stoelhorst, H. ; Viti, Francesco: SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory. In: *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Beijing : IEEE, 2008, S. 827–832. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/4732611/>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISBN 978-1-4244-2111-4

[Hellinga und Mandelzys 2011] Hellinga, Bruce ; Mandelzys, Michael: Impact of Driver Compliance on the Safety and Operational Impacts of Freeway Variable Speed Limit Systems. In: *Journal of Transportation Engineering* 137 (2011), Nr. 4, S. 260–268. – URL <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000214>. – Zugriffsdatum: 06.01.2021. – ISSN 0733-947X, 1943-5436

[Hilgers u. a. 2022] Hilgers, Torben ; Krabbe, Anja ; Haug, Andrea ; Grimm, Jan ; Kutter, Steffen ; Tempelhahn, Conny ; Schwietering, Christoph ; Füg, Johannes: *Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung*. Bremen : Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG, 2022. – ISBN 978-3-95606-696-2

[Höferl 2008] Höferl, Volker: *ASFINAG: Verkehrsbeeinflussungsanlage Umwelt Steiermark in Betrieb*. URL https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20081215_OTS0016/asfinag-verkehrsbeeinflussungsanlage-umwelt-steiermark-in-betrieb. – Zugriffsdatum: 30.01.2023, 2008

- [Hoffmann 2013] Hoffmann, Silja: *Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen*. München, Lehrstuhl Verkehrstechnik der Technischen Universität München, Dissertation, 2013
- [Hoogendoorn 2005a] Hoogendoorn, Serge P.: Unified Approach to Estimating Free Speed Distributions. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 39 (2005), Nr. 8. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261504001377>. – Zugriffsdatum: 31.05.2022. – ISSN 01912615
- [Hoogendoorn 2005b] Hoogendoorn, Serge P.: Vehicle-Type and Lane-Specific Free Speed Distributions on Motorways: A Novel Estimation Approach Using Censored Observations. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2005), Nr. 1934, S. 148–156. – URL <http://dx.doi.org/10.3141/1934-16>. – Zugriffsdatum: 23.01.2023
- [Hoogendoorn u. a. 2013] Hoogendoorn, Serge P. ; Daamen, Winnie ; Hoogendoorn, Raymond G. ; Goemans, J. W.: Assessment of Dynamic Speed Limits on Freeway A20 near Rotterdam, Netherlands. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2380 (2013), Nr. 1, S. 61–71. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2380-07>. – Zugriffsdatum: 26.01.2023. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Kaplan und Meier 1958] Kaplan, Edward L. ; Meier, Paul: Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. In: *Journal of the American Statistical Association* 53 (1958), Nr. 282, S. 457–481. – URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1958.10501452>. – Zugriffsdatum: 31.05.2022. – ISSN 0162-1459, 1537-274X
- [Kappich u. a. 2010] Kappich, Gerhard ; Westermann, Christoph ; Schmitz, Roland ; Reitenberger, Stefan ; Volkenhoff, Tobias ; Kemper, Dirk ; Brake, Martin ; Steinauer, Bernhard: *Echtzeitbeurteilung und -optimierung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen*. Bremerhaven : Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), 2010 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1040). – ISBN 978-3-86918-016-8

- [Kerner u. a. 2010] Kerner, Boris ; Rehborn, Hubert ; Aleksic, Mario ; Haug, Andreas ; Lange, Rainer: Verfolgung und Vorhersage von Verkehrsstörungen auf Autobahnen mit „ASDAünd „FOTOim online-Betrieb in der Verkehrsrechnerzentrale Rüsselsheim. In: *Straßenverkehrstechnik* (2010), Nr. 10, S. 521–527. – sehr relevant
- [Kerner 1999] Kerner, Boris S.: The physics of traffic. In: *Physics World* 12 (1999), Nr. 8, S. 25–30. – URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-7058/12/8/30>. – Zugriffsdatum: 2023-08-25. – ISSN 0953-8585, 2058-7058
- [Khondaker und Kattan 2015] Khondaker, Bidoura ; Kattan, Lina: Variable speed limit: an overview. In: *Transportation Letters* 7 (2015), Nr. 5, S. 264–278. – URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1942787514Y.0000000053>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 1942-7867, 1942-7875
- [Kianfar u. a. 2015] Kianfar, Jalil ; Edara, Praveen ; Sun, Carlos: Operational Analysis of a Freeway Variable Speed Limit System in St. Louis, Missouri. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* 19 (2015), Nr. 4, S. 385–398. – URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15472450.2014.989718>. – Zugriffsdatum: 26.10.2022. – ISSN 1547-2450, 1547-2442
- [Kim und Keller 2001] Kim, Youngho ; Keller, Hartmut: Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm. In: *Straßenverkehrstechnik* (2001), Nr. 9, S. 433–442. – ISSN 0039–2219
- [Kollmus u. a. 2017] Kollmus, Bernhard ; Treichelt, Hartmut ; Quast, Friedhelm: Tempolimits auf Bundesautobahnen 2015. (2017). – URL https://www.bast.de/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Verkehrstechnik/Downloads/V1-BAB-Tempolimit-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=6. – Zugriffsdatum: 02.02.2023
- [Kranabetter 2017] Kranabetter, Alexander: Evaluierung Luftreinhalteprogramm nach §9a IG-L - 2013. (2017). – URL <https://www.salzburg.g>

- v.at/umweltnaturwasser_/Documents/Evaluierung-2017.pdf. – Zugriffsdatum: 02.02.2023
- [Krause u. a. 2017a] Krause, Sabine ; Motamedidehkordi, Nassim ; Hoffmann, Silja ; Busch, Fritz: Mikroskopische Simulation von automatisierten Fahrzeugen zur Ermittlung der Wirkungen auf die Kapazität von Autobahnen. In: *Straßenverkehrstechnik* (2017), Nr. 12, S. 831–838. – ISSN 0039–2219
- [Krause u. a. 2017b] Krause, Sabine ; Motamedidehkordi, Nassim ; Hoffmann, Silja ; Busch, Fritz ; Hartmann, Martin ; Vortisch, Peter: Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. In: *Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.* (2017). – URL <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.20460.56968>. – Zugriffsdatum: 13.09.2021
- [Kurz und Reifeltshammer 2022] Kurz, Christian ; Reifeltshammer, Rafael: Evaluierung der VBA-Umwelt Steiermark für den Betriebszeitraum 2021. (2022). – URL http://app.luis.steiermark.at/berichte/Download/Fachberichte/Bericht_Evaluierung_VBA_2021.pdf. – Zugriffsdatum: 02.02.2023
- [Kušić u. a. 2020] Kušić, Krešimir ; Ivanjko, Edouard ; Gregurić, Martin ; Miletić, Mladen: An Overview of Reinforcement Learning Methods for Variable Speed Limit Control. In: *Applied Sciences* 10 (2020), Nr. 14, S. 4917. – URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/14/4917>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 2076-3417
- [Lange und Struif 1997] Lange, Dirk ; Struif, Ralf: Fahrerverhalten im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen. In: *Straßenverkehrstechnik* (1997), Nr. 8, S. 384–391. – ISSN 0039–2219
- [Lee u. a. 2004] Lee, Chris ; Hellinga, Bruce ; Saccomanno, Frank: Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1897 (2004), Nr. 1, S. 183–190. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1897-24>. – Zugriffsdatum: 08.01.2021. – ISSN 0361-1981, 2169-4052

- [Lee u. a. 2006] Lee, Chris ; Hellinga, Bruce ; Saccomanno, Frank: Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 14 (2006), Nr. 3, S. 213–228. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X06000404>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 0968090X
- [Leichter u. a. 2001] Leichter, Klaus ; Glatz, Matthias ; Junge, Torsten: *Verkehrstechnisches Lastenheft für Unterzentralen von Streckenbeeinflussungsanlagen*. Falkensee : Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen - Dezernat Telematik, Verkehrsbeeinflussung (Hrsg.), 2001
- [Lemke 2007] Lemke, Kerstin: *Standstreifenfreigabe - Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen*. Bergisch Gladbach : Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft, 2007 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft V 153). – ISBN 978-3-86509-649-4
- [Lennie und Han 2009] Lennie, S. ; Han, C.: *Best practice for variable speed limits: best practice recommendations*. Sydney : Austroads (Hrsg.), 2009. – ISBN 978-1-921551-72-7
- [Leutzbach und Busch 1984] Leutzbach, Wilhelm ; Busch, Fritz: *Spurwechselfvorgänge auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen: FA 1.082G81H des BMV*. Karlsruhe, 1984 (Forschungsbericht des Instituts für Verkehrswesen 576)
- [Leyn und Vortisch 2015] Leyn, Ulrike ; Vortisch, Peter: Calibrating VISSIM for the German Highway Capacity Manual. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2483 (2015), Nr. 1, S. 74–79. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2483-09>. – Zugriffsdatum: 30.06.2020. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Listl u. a. 2020] Listl, Gerhard ; Baumgartner, Norbert ; Schwietering, Christoph: Das neue Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 2018). In: *Straßenverkehrstechnik* (2020), Nr. 7, S. 454–463. – ISSN 0039–2219

- [Lopez u. a. 2018] Lopez, Pablo A. ; Wiessner, Evamarie ; Behrisch, Michael ; Bieker-Walz, Laura ; Erdmann, Jakob ; Flotterod, Yun-Pang ; Hilbrich, Robert ; Lucken, Leonhard ; Rummel, Johannes ; Wagner, Peter: Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Maui : IEEE, 2018, S. 2575–2582. – URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8569938/>. – Zugriffsdatum: 30.01.2023
- [Lorenz und Elefteriadou 2000] Lorenz, Matt ; Elefteriadou, Lily: A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity*. Washington D. C. : Transportation Research Board (Hrsg.), 2000
- [Lu u. a. 2014] Lu, Xiao-Yun ; Lee, Joyoung ; Chen, Danjue ; Bared, Joe ; Dailey, Daniel ; Shladover, Steven E.: Freeway Micro-simulation Calibration: Case Study Using Aimsun and VISSIM with Detailed Field Data. In: *TRB 93th Annual Meeting Compendium of Papers*. Ed.: Transportation Research Board. Washington D. C., 2014
- [Lu und Shladover 2014] Lu, Xiao-Yun ; Shladover, Steven E.: Review of Variable Speed Limits and Advisories: Theory, Algorithms, and Practice. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2423 (2014), Nr. 1, S. 15–23. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2423-03>. – Zugriffsdatum: 23.10.2022. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Mangold u. a. 1996] Mangold, Michael ; Träger, Klaus ; Lindenbach, Agnes ; Zackor, Heinz: *Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung*. Bonn : Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), 1996 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 729)
- [MARZ 1999] *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99)*. Bergisch Gladbach : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), 1999

- [MARZ 2018] *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 2018)*. Berlin : Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.), 2018
- [Matzer u. a. 2019] Matzer, Claus ; Weller, Konstantin ; Dippold, Martin ; Lipp, Silke ; Röck, Martin ; Rexeis, Martin ; Hausberger, Stefan: *HBEFA 4.1 Development Report*. URL https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf, 2019
- [Maunsell und Parkman 2007] Maunsell, Faber ; Parkman, Mouchel: *M25 Controlled Motorways Monitoring – Summary Report*. Bristol : Highways Agency Publications Group (Hrsg.), 2007
- [Müller u. a. 2016] Müller, Eduardo R. ; Carlson, Rodrigo C. ; Kraus, Werner: Cooperative Mainstream Traffic Flow Control on Freeways. In: *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016), Nr. 32, S. 89–94. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896316328671>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 24058963
- [Nagl u.a. 2007] Nagl, C. ; Spangl, W. ; Lichtblau, G.: Programm nach 9A IG-L für das Bundesland Tirol. (2007). – URL https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/umweltrecht/Programm__9a_Tirol_nach_Stng_v11.pdf. – Zugriffsdatum: 26.01.2023
- [Nissan 2013] Nissan, Albania: Evaluation of Recommended Variable Speed Limits for Motorway Traffic Control: Case of E4 in Stockholm, Sweden. In: *TRB 92th Annual Meeting Compendium of Papers*. Ed.: *Transportation Research Board*. Washington D. C., 2013
- [Nissan und Koutsopoulos 2011] Nissan, Albania ; Koutsopoulos, Haris N.: Evaluation of the Impact of Advisory Variable Speed Limits on Motorway Capacity and Level of Service. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 16 (2011), S. 100–109. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042811009797>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 18770428

- [Notter u. a. 2022] Notter, Benedikt ; Cox, Brian ; Hausberger, Stefan ; Mazer, Claus ; Weller, Konstantin ; Dippold, Martin ; Politschnig, Nicolas ; Lipp, Silke ; Allekotte, Michel ; Knörr, Wolfram ; André, Michel ; Gagnepain, Laurent ; Hult, Cecilia ; Jerksjö, Martin: *HBEFA 4.2 Documentation of Updates*. URL https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA42_Update_Documentation.pdf, 2022
- [Papageorgiou u. a. 2008] Papageorgiou, Markos ; Kosmatopoulos, Elias ; Papamichail, Ioannis: Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2047 (2008), Nr. 1, S. 37–48. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2047-05>. – Zugriffsdatum: 22.07.2020. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Pischner u. a. 2003] Pischner, Thomas ; Hangleiter, Stefan ; Lambacher, Uwe ; Trupat, Stefan ; Kühne, Reinhart ; Schick, Peter: *Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf*. Bonn : Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.), 2003 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 866). – ISBN 3-936892-01-6
- [Pompigna und Rupi 2017] Pompigna, Andrea ; Rupi, Federico: Lane-Distribution Models and Related Effects on the Capacity for a Three-Lane Freeway Section: Case Study in Italy. In: *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems* 143 (2017), Nr. 10. – ISSN 2473-2907
- [PTV 2022a] *Hilfe zu PTV Vissim und PTV Viswalk*. Karlsruhe : PTV Planung Transport Verkehr GmbH (Hrsg.), 2022
- [PTV 2022b] *Hilfe zu PTV Visum*. Karlsruhe : PTV Planung Transport Verkehr GmbH (Hrsg.), 2022
- [PTV 2022c] *PTV Validate // Verkehrsmodell und Verkehrsdatenlieferant*. PTV Planung Transport Verkehr GmbH (Hrsg.), 2022. – URL https://www.mypvtv.com/sites/default/files/2022-09/PTV_Validate_Flyer.pdf. – Zugriffsdatum: 08.01.2023

- [Pu u. a. 2021] Pu, Ziyuan ; Li, Zhibin ; Jiang, Ying ; Wang, Yin Hai: Full Bayesian Before-After Analysis of Safety Effects of Variable Speed Limit System. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 22 (2021), Nr. 2, S. 964–976. – URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8949438/>. – Zugriffsdatum: 04.12.2022. – ISSN 1524-9050, 1558-0016
- [Recker u. a. 2015] Recker, Christina ; Grošanic, Slavica ; Busch, Fritz: Temporäre Seitenstreifenfreigabe – Analyse der verkehrlichen Wirkungen. In: *Straßenverkehrstechnik* (2015), Nr. 12, S. 810–819. – ISSN 0039–2219
- [Riegelhuth und Glatz 2015] Riegelhuth, Gerd ; Glatz, Matthias: Zuverlässiger Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Basis einer antizipierenden, regelbasierten Steuerung. In: *Straßenverkehrstechnik* (2015), Nr. 4, S. 245–258. – ISSN 0039–2219
- [Riegelhuth und Sandrock 2018] Riegelhuth, Gerd (Hrsg.) ; Sandrock, Michael (Hrsg.): *Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen: aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz*. 1. Auflage 2018. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2018. – ISBN 978-3-658-22140-9
- [Riggins u. a. 2016] Riggins, Gary ; Bertini, Robert ; Ackaah, Williams ; Margreiter, Martin: Evaluation of Driver Compliance to Displayed Variable Advisory Speed Limit Systems: Comparison between Germany and the U.S. In: *Transportation Research Procedia* 15 (2016), S. 640–651. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516305865>. – Zugriffsdatum: 20.09.2022. – ISSN 23521465
- [Rivey 2010] Rivey, F.: *Evaluation of the Dynamic Speed Limit System on the A13 motorway in France*. Vorgestellt auf dem EasyWay Annual Forum, Lissabon. 2010
- [Röbig 2009] Röbig, Reiner: *Verkehrstechnische Funktionen für die Unterzentrale der Streckenbeeinflussungsanlage BAB A5 T+R Wetterau/AS Friedberg bis AS Zeppelinheim*. Falkensee : Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen - Verkehrszentrale Hessen (Hrsg.), 2009

- [RSA 1995] *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), 1995
- [RWB 2000] *Richtlinien für die wegweisende Beschilderung außerhalb von Autobahnen (RWB)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2000 (FGSV R1 329)
- [RWBA 2000] *Richtlinien für die wegweisende Beschilderung auf Autobahnen (RWBA)*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.), 2000 (FGSV R1 329/2)
- [RWVA 1997] *Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA 1997)*. Bonn : Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), 1997
- [RWVZ 1997] *Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ 1997)*. Bonn : Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), 1997
- [Sadat und Celikoglu 2017] Sadat, Mohd ; Celikoglu, Hilmi B.: Simulation-based Variable Speed Limit Systems Modelling: An Overview and A Case Study on Istanbul Freeways. In: *Transportation Research Procedia* 22 (2017), S. 607–614. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146517301874>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 23521465
- [Schelling u. a. 2011] Schelling, I. ; Hegyi, Andreas ; Hoogendoorn, Serge P.: SPECIALIST-RM - Integrated variable speed limit control and ramp metering based on shock wave theory. In: *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Washington, D. C. : IEEE, 2011, S. 2154–2159. – URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/6083116/>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022
- [Schick 2003] Schick, Peter: *Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses*. Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart (Heft 35), Dissertation, 2003. – ISBN 3-9808218-4-6

- [Schirokoff u. a. 2006] Schirokoff, Anna ; Rämä, Pirkko ; Tuomainen, Ari: County-wide variable speed limits? In: *Proceedings of the 13th ITS World Congress*. London, 2006
- [Schwietering 2010] Schwietering, Christoph: *Verfahren zur Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und Anwendung in der Verkehrssteuerung*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Dissertation, 2010
- [Schwietering u. a. 2021] Schwietering, Christoph ; Maier, Friedrich ; Hakenberg, Matthias ; Pyta, Lorenz ; Abel, Dirk: *Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs*. Bremen : Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2021. – ISBN 978-3-95606-548-4
- [Siegener u. a. 2000] Siegener, Wilfried ; Träger, Klaus ; Martin, Katrin ; Beck, Torsten: *Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung*. Bonn, 2000 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 787). – ISBN 978-3-934458-22-2
- [Soriguera u. a. 2017] Soriguera, Francesc ; Martínez, Irene ; Sala, Marcel ; Menéndez, Mónica: Effects of low speed limits on freeway traffic flow. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 77 (2017), S. 257–274. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0968090X17300396>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 0968090X
- [Soriguera u. a. 2013] Soriguera, Francesc ; Torné, Josep M. ; Rosas, Dulce: Assessment of Dynamic Speed Limit Management on Metropolitan Freeways. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems* 17 (2013), Nr. 1, S. 78–90. – URL <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15472450.2012.719455>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 1547-2450, 1547-2442
- [Sparmann 1978] Sparmann, Udo: *Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1978

- [Steinhoff 2003] Steinhoff, Christiane: *Online Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen*. München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, Dissertation, 2003. – ISBN 3-937631-00-3
- [Steinhoff u. a. 2002] Steinhoff, Christiane ; Kates, Ronald ; Keller, Hartmut ; Färber, Berthold ; Färber, Brigitte: *Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen*. Bonn : Bundesministerium für Verkehr Bau- und Wohnungswesen Abteilung Straßenbau Straßenverkehr (Hrsg.), 2002 (Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 853). – ISBN 3-934458-85-8
- [Strömgren und Lind 2016] Strömgren, Per ; Lind, Gunnar: Harmonization with Variable Speed Limits on Motorways. In: *Transportation Research Procedia* 15 (2016), S. 664–675. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516305889>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 23521465
- [StVO 2013] *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)*. 2013. – Datum des Inkrafttretens 01.04.2013
- [Thudium 2006] Thudium, Jürg: Lufthygienische Auswirkungen der Zukunftsszenarien 2005 – 2010 für die Verkehrsentwicklung auf der Inntalautobahn A12. (2006). – URL https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/umweltrecht/downloads/Thudium_Be_Massnahmen_b_nde12006.pdf. – Zugriffsdatum: 30.01.2023
- [Thudium und Chélala 2012] Thudium, Jürg ; Chélala, Carine: Evaluation des flexiblen Tempolimits auf der A10 zwischen Salzburg und Golling von Mai 2011 bis April 2012. (2012). – URL https://www.salzburg.gv.at/service/Documents/be_evalt100_salzburg2011_12.pdf. – Zugriffsdatum: 26.01.2023
- [Tiroler Landesregierung 2014] *Geschwindigkeitsbeschränkungen nach IGL (Tempo 100km/h)*. Amt der Tiroler Landesregierung (Hrsg.), 2014.

- URL <https://www.tirol.gv.at/umwelt/umweltrecht/luftreinhalterecht/100-kmh-luft/>. – Zugriffsdatum: 26.01.2023
- [TLS 2012] *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012)*. Bergisch Gladbach : Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), 2012
- [Toledo u. a. 2004] Toledo, Tomer ; Ben-Akiva, Moshe E. ; Darda, Deepak ; Jha, Mithilesh ; Koutsopoulos, Haris N.: Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models with Aggregate Data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1876 (2004), Nr. 1, S. 10–19. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1876-02>. – Zugriffsdatum: 26.01.2023. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Toledo u. a. 2003] Toledo, Tomer ; Koutsopoulos, Haris N. ; Davol, Angus ; Ben-Akiva, Moshe E. ; Burghout, Wilco ; Andréasson, Ingmar ; Johansson, Tobias ; Lundin, Christen: Calibration and Validation of Microscopic Traffic Simulation Tools: Stockholm Case Study. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1831 (2003), Nr. 1, S. 65–75. – URL <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1831-08>. – Zugriffsdatum: 26.01.2023. – ISSN 0361-1981, 2169-4052
- [Vizioli u. a. 2021] Vizioli, Helena T. ; Kušić, Krešimir ; Ivanjko, Edouard ; Cunha, André L.: A Method to Calibrate Variable Speed Limit Control on High-Truck Share Roads: A Case Study in Brazil. In: Iano, Yuzo (Hrsg.) ; Saotome, Osamu (Hrsg.) ; Kemper, Guillermo (Hrsg.) ; Seixas, Ana C. Mendes de (Hrsg.) ; Oliveira, Gabriel Gomes de (Hrsg.): *Proceedings of the 6th Brazilian Technology Symposium (BTSym'20)* Bd. 233. Springer International Publishing, 2021, S. 204–211. – URL https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-75680-2_24. – Zugriffsdatum: 08.09.2021. – ISBN 978-3-030-75680-2
- [Vrbanić u. a. 2021] Vrbanić, Filip ; Ivanjko, Edouard ; Kušić, Krešimir ; Čakija, Dino: Variable Speed Limit and Ramp Metering for Mixed Traffic Flows: A Review and Open Questions. In: *Applied Sciences* 11 (2021), Nr. 6, S. 2574. – URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/6/2574>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 2076-3417

- [Vukanovic u. a. 2005] Vukanovic, Svetlana ; Kates, Ronald ; Denaes, Samuel ; Keller, Hartmut: A novel algorithm for optimized, safety-oriented dynamic speed regulation on highways: INCA. In: *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2005, S. 260–265. – ISBN 2153-0017
- [VwV-StVO] *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO)*. – URL http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26012001_S3236420014.htm. – Zugriffsdatum: 24.01.2022. – Fassung vom 8. November 2021
- [Waleczek und Geistefeldt 2020] Waleczek, Helen ; Geistefeldt, Justin: Langzeitanalyse der Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit temporärer Seitenstreifenfreigabe. In: *Straßenverkehrstechnik* (2020), Nr. 4, S. 235–239. – ISSN 0039–2219
- [Wang u. a. 2021] Wang, Fujian ; Lu, Yixiao ; Dai, Hongliang ; Han, Haihang: Evaluation of Freeway Traffic Management and Control Measures Based on SUMO. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1910 (2021), Nr. 1. – URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1910/1/012044>. – Zugriffsdatum: 25.10.2022. – ISSN 1742-6588, 1742-6596
- [Wiedemann 1974] Wiedemann, Rainer: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Karlsruhe : Institut für Verkehrswesen - Universität Karlsruhe (Hrsg.), 1974 (Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen)
- [Wiedemann u. a. 1982] Wiedemann, Rainer ; Hubschneider, Hans ; Fritsche, Heiko: *Zusammenhang zwischen der Wunschgeschwindigkeit und relevanten Kenngrößen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen - Abschlussbericht*. Karlsruhe : Institut für Verkehrswesen - Universität Karlsruhe (Hrsg.), 1982
- [Wiedemann und Reiter 1992] Wiedemann, Rainer ; Reiter, U.: *Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System MISSION, Background and Actual State*. (1992)

- [Wu 2005] Wu, Ning: Impact of traffic regulation on lane flow - distribution and capacity of motorways. In: *Fifth International Conference of Transportation Professionals*. Xian, 2005
- [Wu und Geistefeldt 2022] Wu, Ning ; Geistefeldt, Justin: Ein neues Verkehrsflussmodell basierend auf der Warteschlangentheorie und seine Anwendung für Autobahnen. In: *Straßenverkehrstechnik* (2022), Nr. 3, S. 155–162. – ISSN 0039–2219
- [Yousif u. a. 2013] Yousif, Saad ; Al-Obaedi, Jalal ; Henson, Ralph: Drivers' Lane Utilization for United Kingdom Motorways. In: *Journal of Transportation Engineering* 139 (2013), Nr. 5, S. 441–447. – URL <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000531>. – Zugriffsdatum: 26.01.2023. – ISSN 0733-947X
- [Zackor 1972] Zackor, Heinz: *Beurteilung verkehrsabhängiger Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen*. Bonn : Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), 1972 (Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 128)
- [Zackor und Schwenzer 1988] Zackor, Heinz ; Schwenzer, Gerhard: *Beurteilung einer situationsabhängigen Geschwindigkeitsbeeinflussung auf Autobahnen*. Bonn : Bundesminister für Verkehr (Hrsg.), 1988 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 532)
- [Zeidler u. a. 2019] Zeidler, Verena ; Buck, H. S. ; Kautzsch, Lukas ; Vortisch, Peter ; Weyland, Claude: Simulation of Autonomous Vehicles Based on Wiedemann's Car Following Model in PTV VISSIM. In: *TRB 98th Annual Meeting Compendium of Papers*. Ed.: *Transportation Research Board*. Washington D. C., 2019

A Anhang

A.1 Schaltbildfolgen

Anhang A.1 zeigt die Schaltbildfolgen für die folgenden Schaltprogramme:

- Harmonisierung 120 km/h (siehe Abbildung A.1)
- Harmonisierung 100 km/h (siehe Abbildung A.2)
- Harmonisierung 80 km/h (siehe Abbildung A.3)
- Ausfahrharmonisierung (siehe Abbildung A.4)
- Stauwarnung (siehe Abbildung A.5)
- Lkw-Überholverbot (siehe Abbildung A.6)
- Niederschlagwarnung (siehe Abbildung A.7)
- Fahrstreifensperrung (siehe Abbildung A.8)
- Baustelle (siehe Abbildung A.9)

MQ_n steht in den Abbildungen für den auslösenden Messquerschnitt.

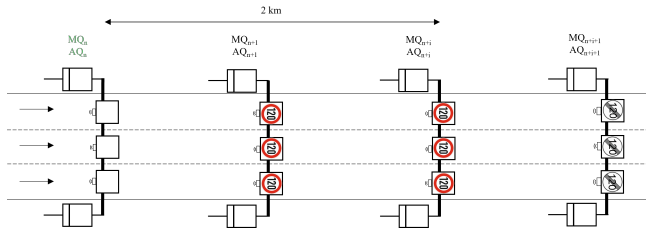


Abbildung A.1: Schaltbildfolge für die Harmonisierung 120 km/h (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

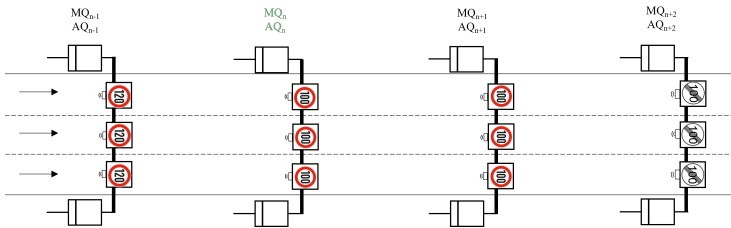


Abbildung A.2: Schaltbildfolge für die Harmonisierung 100 km/h (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

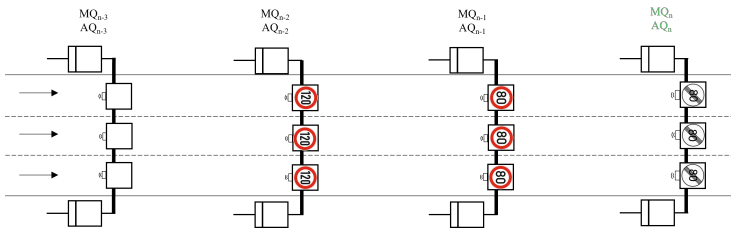


Abbildung A.3: Schaltbildfolge für die Harmonisierung 80 km/h (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

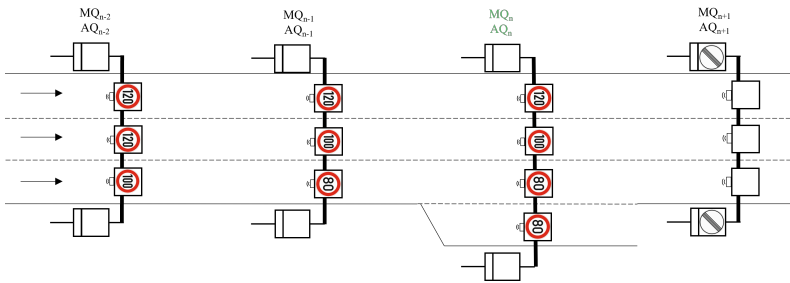


Abbildung A.4: Schaltbildfolge für die Ausfahrharmonisierung 80 km/h (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

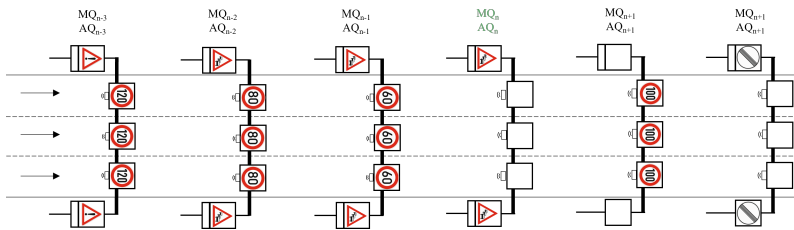


Abbildung A.5: Schaltbildfolge für die Stauwarnung (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

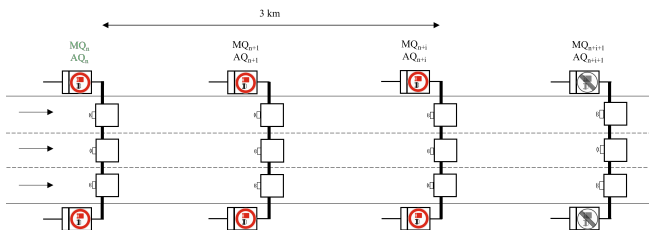


Abbildung A.6: Schaltbildfolge für das Lkw-Überholverbot (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

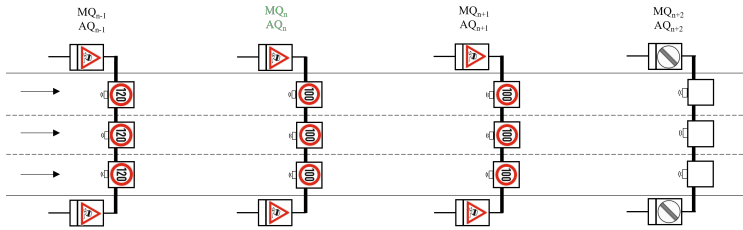


Abbildung A.7: Schaltbildfolge für die Niederschlagswarnung (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

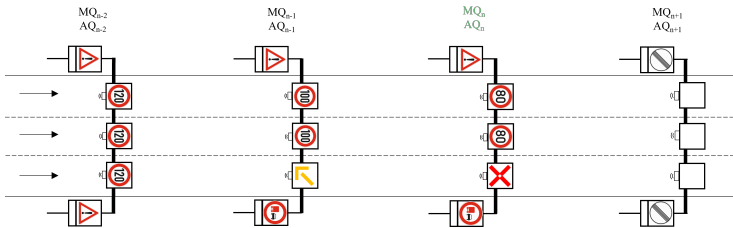


Abbildung A.8: Schaltbildfolge für die Fahrstreifensperrung (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

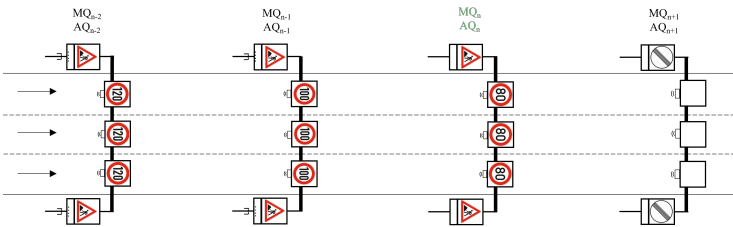


Abbildung A.9: Schaltbildfolge für das Baustellenprogramm (eigene Darstellung nach [Leichter u. a., 2001])

A.2 Ganglinien der Verkehrsstärke

Die Abbildungen A.10 bis A.13 zeigen typische Tagesganglinien basierend auf 15-Minuten-Intervallen der Segmente 1 bis 4 für das Jahr 2021.

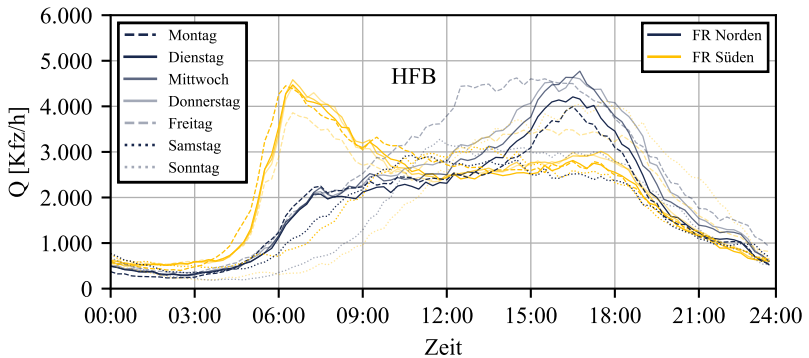


Abbildung A.10: Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 1 (eigene Darstellung)

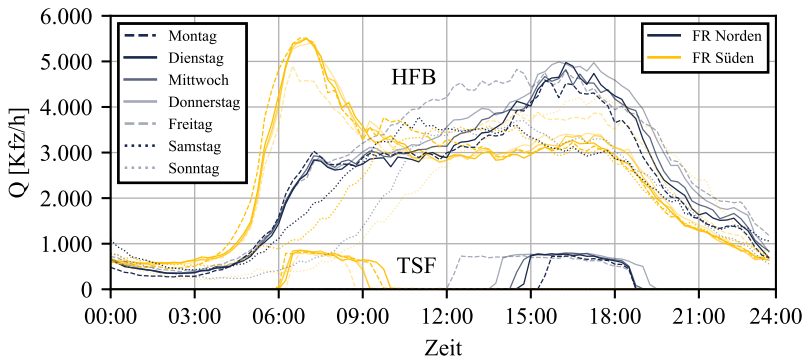


Abbildung A.11: Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 2 (eigene Darstellung)

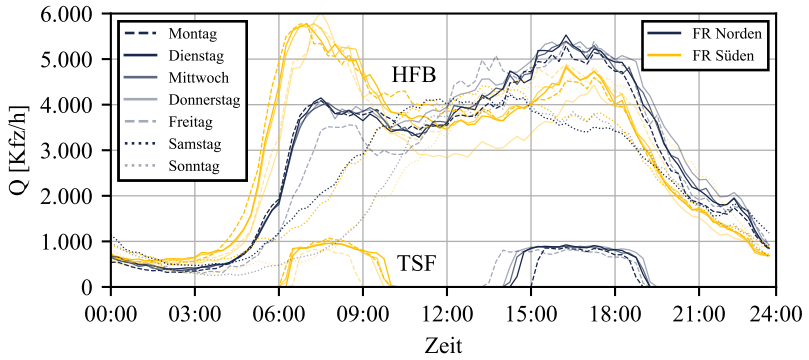


Abbildung A.12: Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 3 (eigene Darstellung)

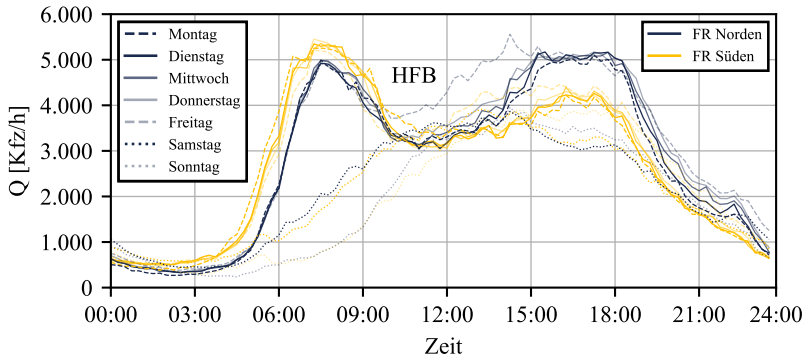


Abbildung A.13: Typische Tagesganglinien 2021 - Segment 4 (eigene Darstellung)

Die Abbildungen A.14 und A.15 zeigen Wochenganglinien der Verkehrsstärke basierend auf den Verkehrsdaten aus 5-Minuten-Intervallen der Segmente 1 bis 5 für die Woche vom 16.09.2019. Der Seitenstreifen ist nicht separat abgebildet, sondern in die jeweiligen Ganglinien integriert.

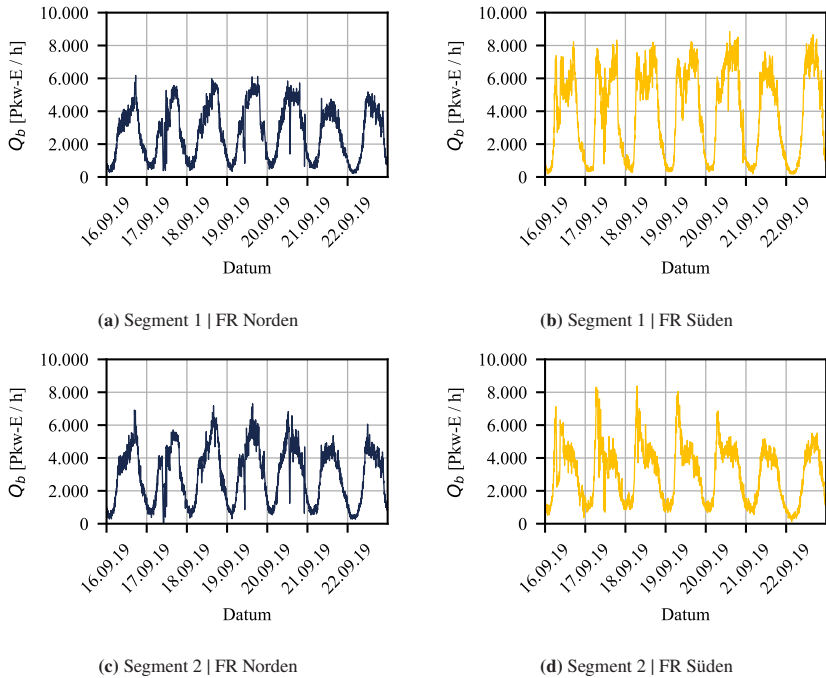
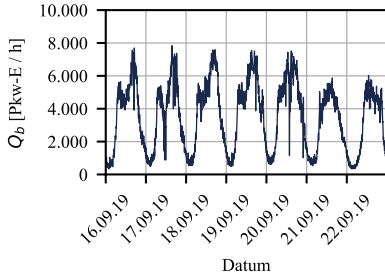
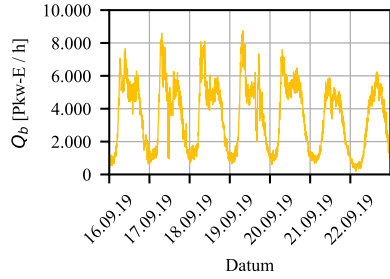


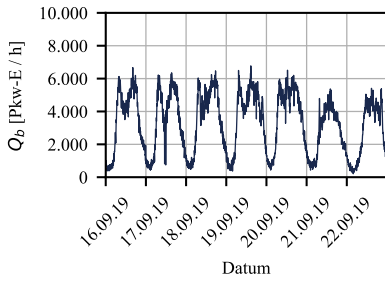
Abbildung A.14: Wochenganglinien - Segmente 1 bis 2 (eigene Darstellungen)



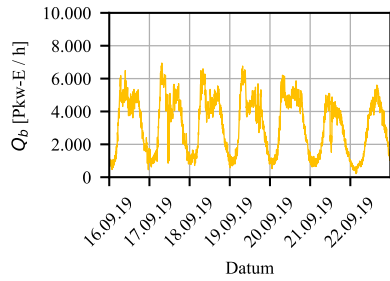
(a) Segment 3 | FR Norden



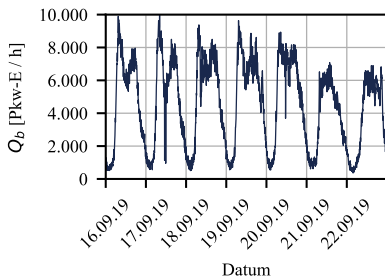
(b) Segment 3 | FR Süden



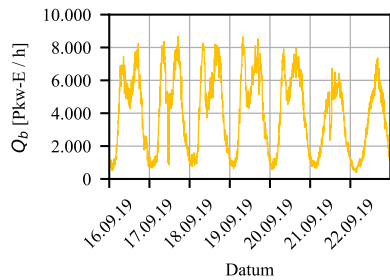
(c) Segment 4 | FR Norden



(d) Segment 4 | FR Süden



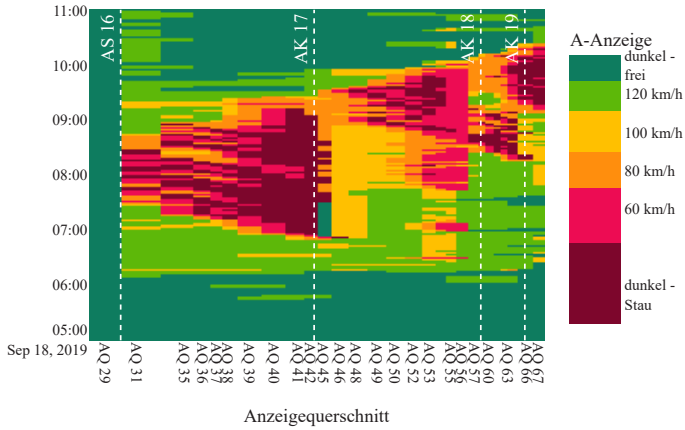
(e) Segment 5 | FR Norden



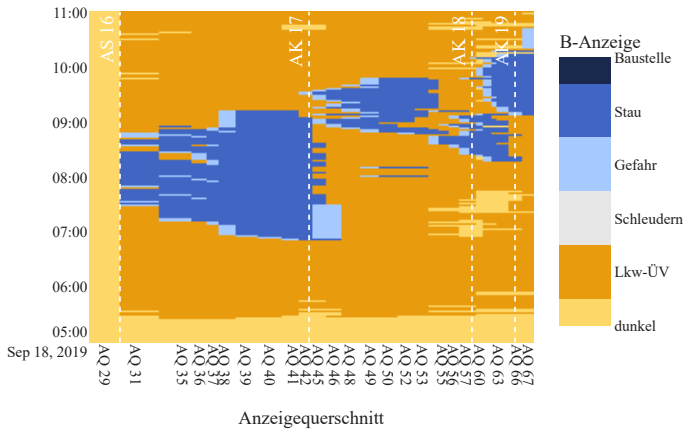
(f) Segment 5 | FR Süden

Abbildung A.15: Wochenganglinien - Segmente 3 bis 5 (eigene Darstellungen)

A.3 Verkehrszustände

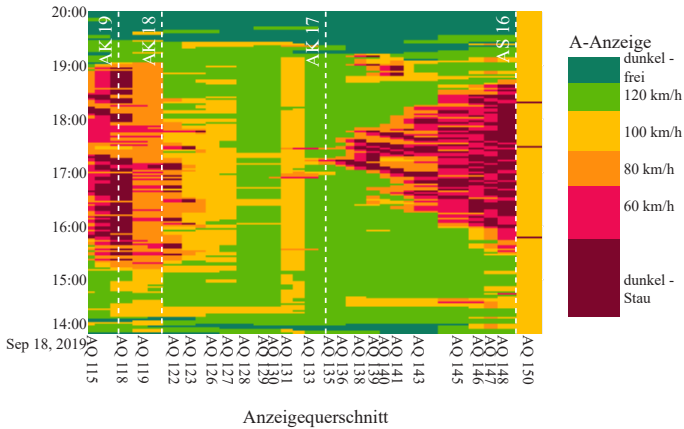


(a) A-Anzeige

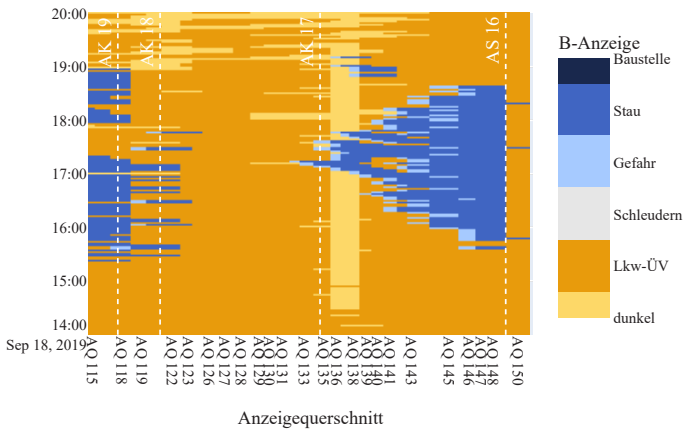


(b) B-Anzeige

Abbildung A.16: Raumzeitlicher Verlauf der A- und B-Anzeigen in FR Süden - 18.09.2019 vormittags (eigene Darstellungen)



(a) A-Anzeige

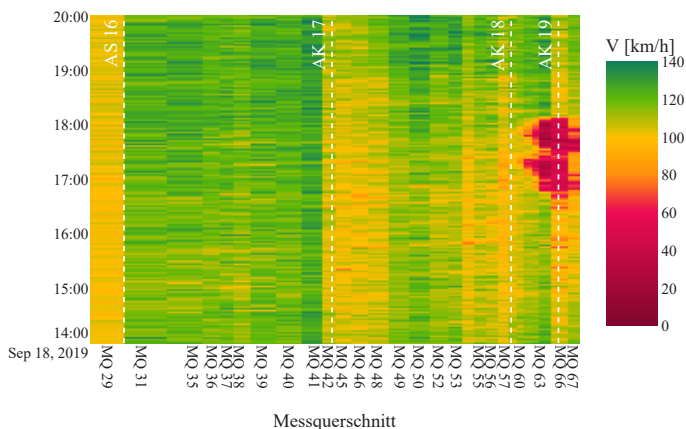


(b) B-Anzeige

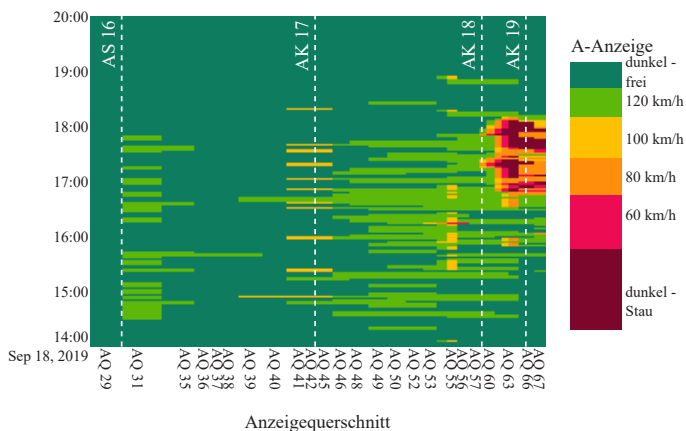
Abbildung A.17: Raumzeitlicher Verlauf der A- und B-Anzeigen in FR Norden - 18.09.2019 nachmittags (eigene Darstellungen)

Die Abbildungen A.16 und A.17 zeigen den raumzeitlichen Verlauf der geschalteten A- und B-Anzeigen für jeweils eine charakteristische Hauptverkehrszeit in Fahrtrichtung Süden und Norden.

Die Abbildungen A.18 und A.19 zeigen den raumzeitlichen Verlauf der Verkehrssituation jeweils für die Fahrtrichtung mit wenig verkehrlichen Beeinträchtigungen in Fahrtrichtung Süden und Norden.

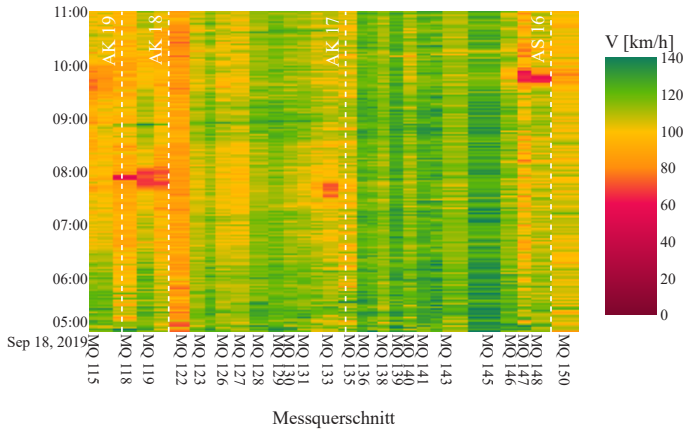


(a) querschnittsbezogene mittlere Pkw-Geschwindigkeit

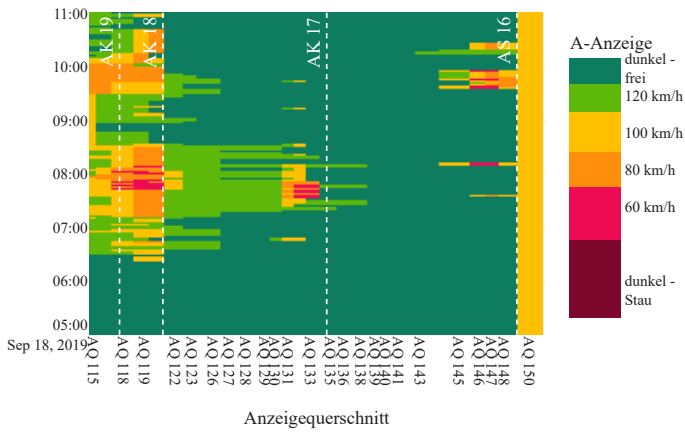


(b) A-Anzeige

Abbildung A.18: Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Süden - 18.09.2019 nachmittags (eigene Darstellungen)



(a) querschnittsbezogene mittlere Pkw-Geschwindigkeit



(b) A-Anzeige

Abbildung A.19: Raumzeitlicher Verlauf der Verkehrssituation in FR Norden - 18.09.2019 vormittags (eigene Darstellungen)

Abbildung A.20 zeigt die mittleren Pkw- und Lkw-Geschwindigkeiten separat in Abhängigkeit der A-Anzeige. Es ist zu beachten, dass die Skalierung der y-Achse in Abbildung 4.13 (Kapitel 4.3.3) und A.20 unterschiedlich ist. Abbildung A.20a zeigt, dass Fahrzeuge, die schneller als 120 km/h fahren, von der SBA automatisch als Pkw erkannt werden.

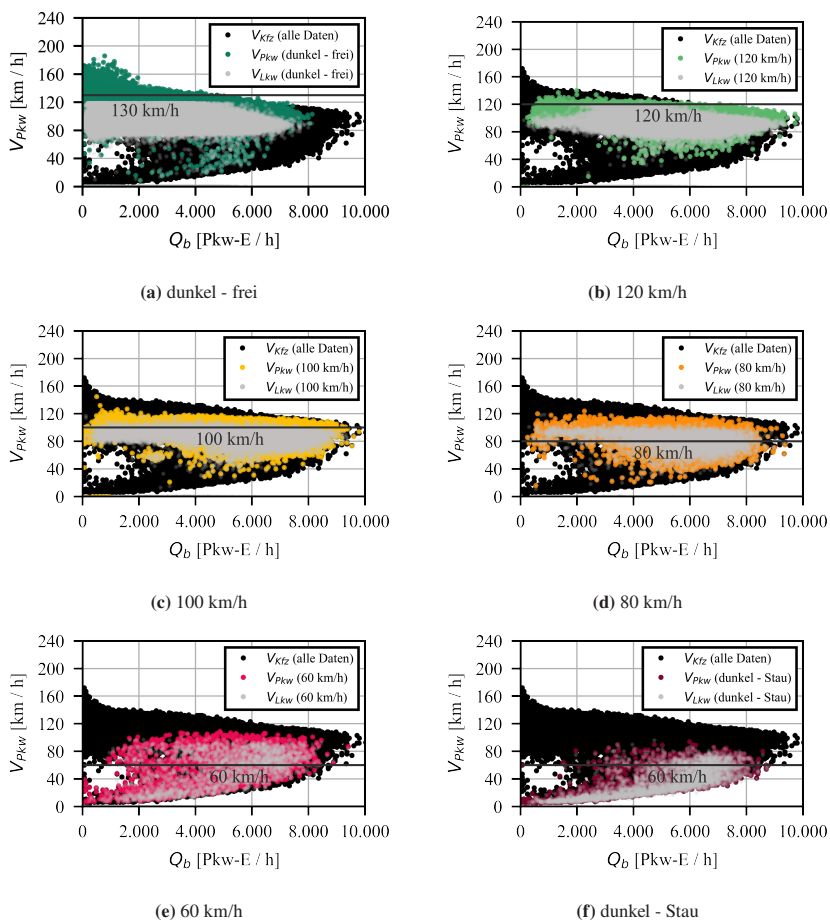
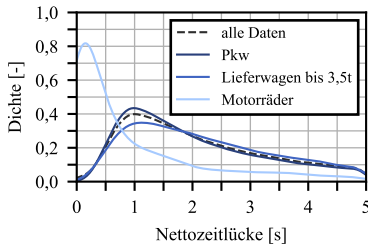


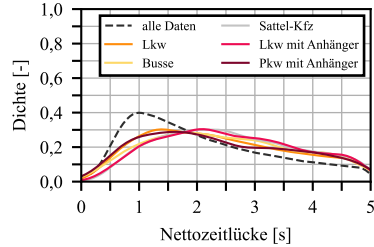
Abbildung A.20: q-v-Diagramme in Abhängigkeit der A-Anzeige und der Fahrzeugklasse auf Segment 3 in FR Norden (eigene Darstellungen)

A.4 Nettozeitlücken

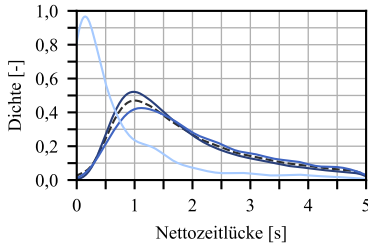
Abbildung A.21 zeigt die Nettozeitlücken kleiner fünf Sekunden für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeugklassen.



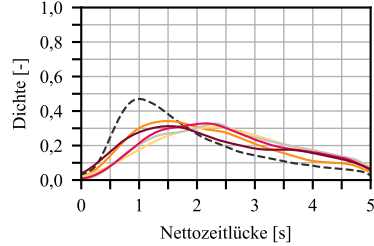
(a) $Q_b = 3000 - 4000$ Pkw-E/h



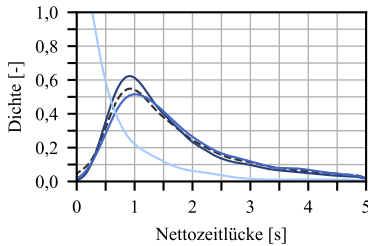
(b) $Q_b = 3000 - 4000$ Pkw-E/h



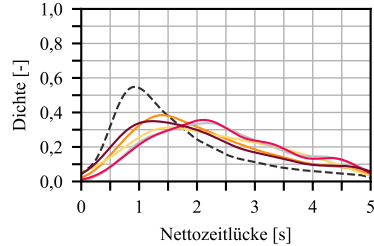
(c) $Q_b = 4000 - 5000$ Pkw-E/h



(d) $Q_b = 4000 - 5000$ Pkw-E/h



(e) $Q_b = 5000 - 6000$ Pkw-E/h



(f) $Q_b = 5000 - 6000$ Pkw-E/h

Abbildung A.21: Nettozeitlücken von Pkw-ähnlichen (links) und Lkw-ähnlichen Fahrzeugklassen (rechts) für verschiedene Verkehrsstärkeklassen (eigene Darstellungen)

A.5 Reisezeiten

Die Abbildungen A.22 und A.23 zeigen für beide Fahrtrichtungen und alle Segmente die Reisezeiten pro Kilometer für die Werktage Dienstag, Mittwoch und Donnerstag aus den FCD.

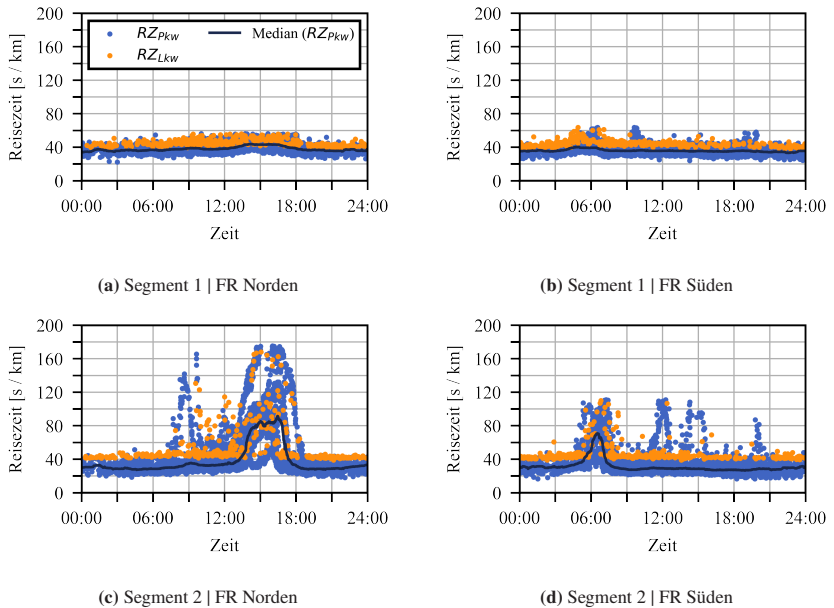
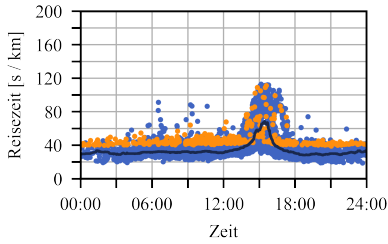
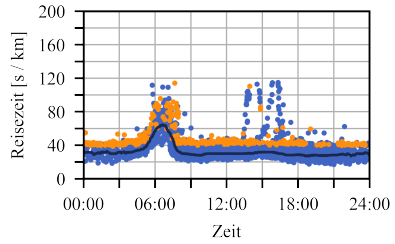


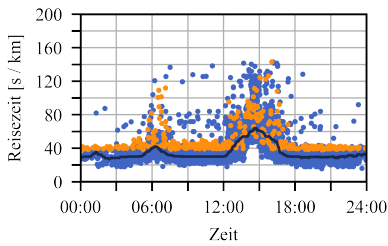
Abbildung A.22: Reisezeiten aus FCD (Di-Mi-Do) - Segmente 1 bis 2 (eigene Darstellungen)



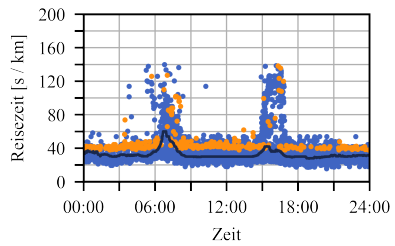
(a) Segment 3 | FR Norden



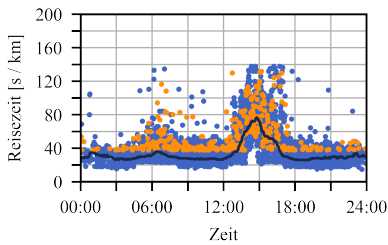
(b) Segment 3 | FR Süden



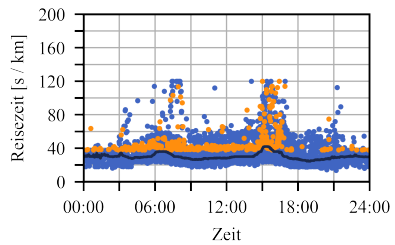
(c) Segment 4 | FR Norden



(d) Segment 4 | FR Süden



(e) Segment 5 | FR Norden



(f) Segment 5 | FR Süden

Abbildung A.23: Reisezeiten aus FCD (Di-Mi-Do) - Segmente 3 bis 5 (eigene Darstellungen)

Die Abbildungen A.24 bis A.27 zeigen für beide Fahrtrichtungen und alle Segmente die Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Werktages, an dem das jeweilige Fahrzeug erfasst wurde.

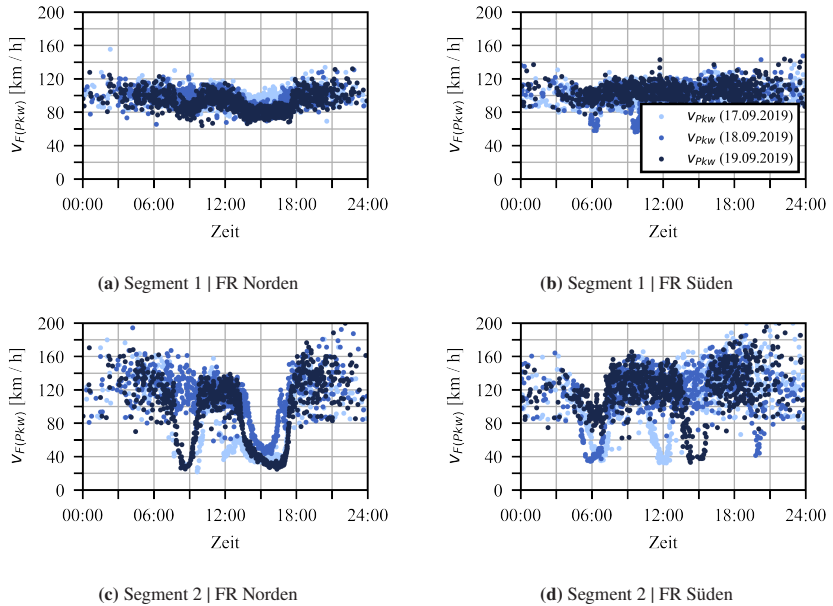
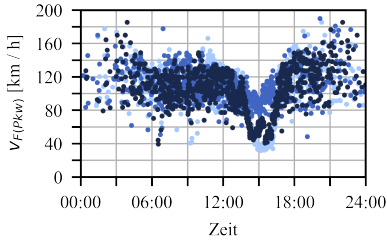
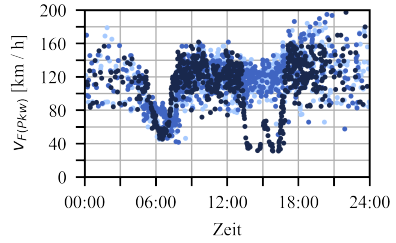


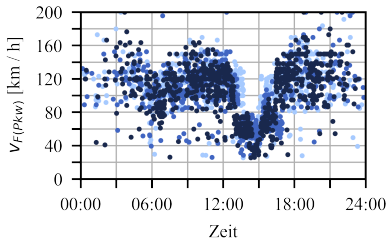
Abbildung A.24: Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (17. - 19.09.2019) - Segmente 1 bis 2 (eigene Darstellungen)



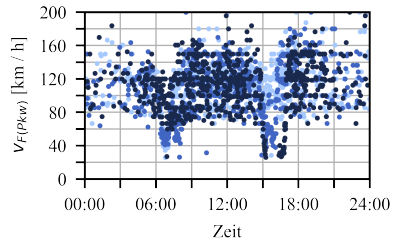
(a) Segment 3 | FR Norden



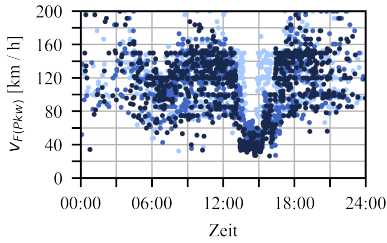
(b) Segment 3 | FR Süden



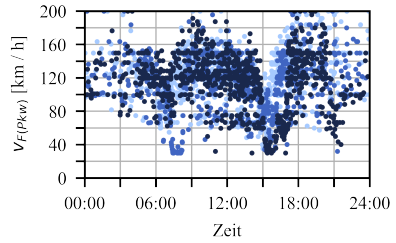
(c) Segment 4 | FR Norden



(d) Segment 4 | FR Süden



(e) Segment 5 | FR Norden



(f) Segment 5 | FR Süden

Abbildung A.25: Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (17. - 19.09.2019) - Segmente 3 bis 5 (eigene Darstellungen)

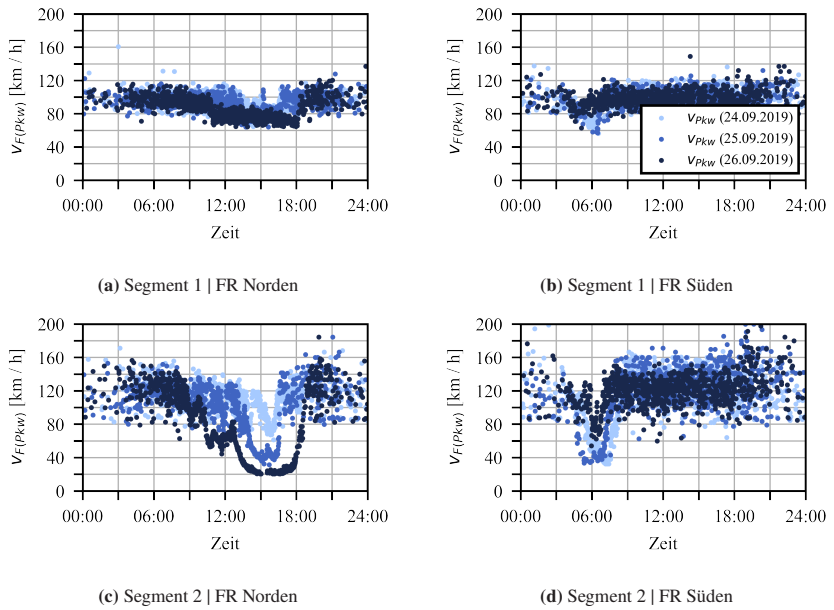
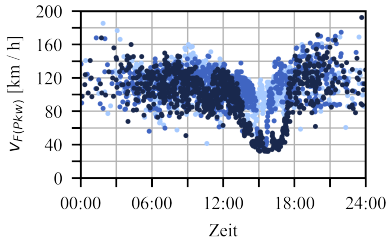
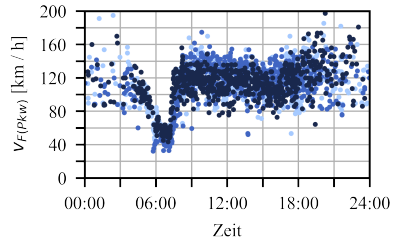


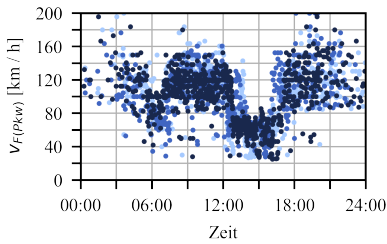
Abbildung A.26: Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (24. - 26.09.2019) - Segmente 1 bis 2 (eigene Darstellungen)



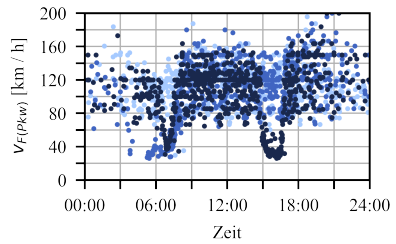
(a) Segment 3 | FR Norden



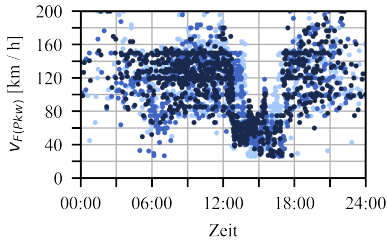
(b) Segment 3 | FR Süden



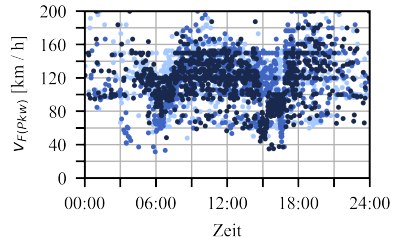
(c) Segment 4 | FR Norden



(d) Segment 4 | FR Süden



(e) Segment 5 | FR Norden



(f) Segment 5 | FR Süden

Abbildung A.27: Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten aus FCD (24. - 26.09.2019) - Segmente 3 bis 5 (eigene Darstellungen)

A.6 Verkehrskenngrößen bei Öffnung und Schließung der TSF

Die Tabellen A.1 und A.2 zeigen die Mediane der für die TSF relevanten Verkehrsgrößen fünf Minuten vor der Freigabe des Seitenstreifens.

Tabelle A.1: Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Öffnung der TSF - FR Süden

Segment	FR	MQ	Q_b	V_{Kfz}	V_{Pkw}	K_{Kfz}
			[Pkw-E/h]	[km/h]	[km/h]	[Pkw-E/km]
2	Süden	31	6.008	92	95	69
2	Süden	32	5.957	88	89	70
2	Süden	33	5.945	97	97	63
2	Süden	34	5.880	91	92	66
2	Süden	35	6.060	98	98	64
2	Süden	36	6.120	95	96	66
2	Süden	37	5.574	97	98	61
2	Süden	38	5.739	97	98	61
2	Süden	39	5.814	99	100	59
3	Süden	46	6.058	87	88	75
3	Süden	48	6.122	90	90	71
3	Süden	49	6.204	98	99	66
3	Süden	50	5.258	101	101	54
3	Süden	52	6.131	101	102	63
3	Süden	53	5.632	102	104	57

Tabelle A.2: Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Öffnung der TSF - FR Norden

Segment	FR	MQ	Q_b	V_{Kfz}	V_{Pkw}	K_{Kfz}
			[Pkw-E/h]	[km/h]	[km/h]	[Pkw-E/km]
2	Norden	136	2.937	118	122	25
2	Norden	137	4.931	103	105	50
2	Norden	138	4.947	93	94	59
2	Norden	139	5.274	96	98	62
2	Norden	140	4.519	84	84	60
2	Norden	141	5.211	91	91	64
2	Norden	142	4.632	84	85	61
2	Norden	143	4.860	78	78	65
2	Norden	144	4.800	87	90	58
2	Norden	145	4.812	93	96	55
2	Norden	146	4.801	86	89	59
2	Norden	147	4.907	78	79	64
2	Norden	148	4.686	90	92	52
3	Norden	123	5.268	86	86	69
3	Norden	124	5.743	85	87	71
3	Norden	126	5.467	84	85	68
3	Norden	127	5.136	87	88	61
3	Norden	128	5.556	97	98	59
3	Norden	129	5.600	101	103	57
3	Norden	130	5.400	98	99	57
3	Norden	131	5.514	99	100	58

Die Tabellen A.3 und A.4 zeigen die Mediane fünf Minuten vor der Schließung des Seitenstreifens.

Tabelle A.3: Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Schließung der TSF - FR Süden

Segment	FR	MQ	Q_b	V_{Kfz}	V_{Pkw}	K_{Kfz}
			[Pkw-E/h]	[km/h]	[km/h]	[Pkw-E/km]
2	Süden	31	4.594	109	114	43
2	Süden	32	4.481	101	103	45
2	Süden	33	4.453	109	112	42
2	Süden	34	4.416	103	106	44
2	Süden	35	4.558	110	115	42
2	Süden	36	4.516	106	110	43
2	Süden	37	4.397	106	111	42
2	Süden	38	4.467	104	107	44
2	Süden	39	4.419	109	113	41
3	Süden	46	5.021	100	101	51
3	Süden	48	5.190	102	104	51
3	Süden	49	5.182	109	112	48
3	Süden	50	4.568	114	117	41
3	Süden	52	5.080	109	113	47
3	Süden	53	4.794	109	112	45

Tabelle A.4: Mediane der Verkehrskenngrößen fünf Minuten vor Schließung der TSF - FR Norden

Segment	FR	MQ	Q_b	V_{Kfz}	V_{Pkw}	K_{Kfz}
			[Pkw-E/h]	[km/h]	[km/h]	[Pkw-E/km]
2	Norden	136	2.851	119	123	24
2	Norden	137	4.239	110	111	39
2	Norden	138	4.245	104	106	41
2	Norden	139	4.380	112	115	39
2	Norden	140	3.953	102	104	39
2	Norden	141	4.349	111	114	40
2	Norden	142	4.284	113	116	39
2	Norden	143	4.213	102	104	42
2	Norden	144	4.240	110	113	40
2	Norden	145	4.304	108	114	41
2	Norden	146	4.105	102	104	42
2	Norden	147	4.380	95	97	47
2	Norden	148	4.101	94	95	44
3	Norden	123	4.666	103	104	46
3	Norden	124	5.082	107	109	48
3	Norden	126	4.888	99	100	50
3	Norden	127	4.599	99	99	47
3	Norden	128	4.827	107	109	46
3	Norden	129	4.832	110	112	44
3	Norden	130	4.728	108	110	44
3	Norden	131	4.706	105	106	46

A.7 Geschwindigkeitsverteilungen

A.7.1 Datengrundlage der Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD

Die Tabellen A.5 bis A.7 zeigen die Datengrundlage für die Abbildungen 5.1 bis 5.3 in Kapitel 5.

Tabelle A.5: Datengrundlage für Kfz-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD

	Kfz - alle Daten		Kfz - ZL > 5 s	
	Datengrundlage [-]	Median [km/h]	Datengrundlage [-]	Median [km/h]
alle FS	767.810	111	203.893	114
FS1	208.129	89	89.355	91
FS2	308.307	114	65.778	122
FS3	251.374	125	48.760	141

In den Tabellen A.6 und A.7 beziehen sich die Dichteklassen auf die lokale Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen und sind wie folgt definiert:

- Dichteklasse 1: $0 < k_{FS3} \leq 5$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 2: $5 < k_{FS3} \leq 10$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 3: $10 < k_{FS3} \leq 15$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 4: $15 < k_{FS3} \leq 20$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 5: $20 < k_{FS3} \leq 25$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 6: $25 < k_{FS3} \leq 30$ Pkw-E/km
- Dichteklasse 7: $k_{FS3} > 30$ Pkw-E/km

Tabelle A.6: Datengrundlage für Pkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD

	Pkw - alle Daten		Pkw - ZL > 5 s	
	Datengrundlage [-]	Median [km/h]	Datengrundlage [-]	Median [km/h]
alle A-Anzeigen	641.050	117	152.247	123
dunkel - frei	350.552	123	116.302	127
120 km/h	241.853	111	30.825	118
100 km/h	22.343	87	2.887	102
80 km/h	13.851	83	1.275	91
60 km/h	6.660	63	403	60
alle B-Anzeigen	641.050	117	152.247	123
dunkel	397.854	122	123.748	125
Lkw-ÜV	215.078	111	25.059	118
Gefahr	1.440	105	357	103
Stau	17.354	68	978	70
Baustelle	3.926	110	430	120
alle Dichteklassen	641.050	117	152.247	123
Dichteklasse 1	184.419	127	86.159	129
Dichteklasse 2	204.047	122	44.655	123
Dichteklasse 3	110.794	114	14155	114
Dichteklasse 4	69.162	105	4.624	102
Dichteklasse 5	50.801	87	1.953	83
Dichteklasse 6	15.320	79	424	75
Dichteklasse 7	6.507	45	277	19

Tabelle A.7: Datengrundlage für Lkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus EFZD

	Lkw - alle Daten		Lkw - ZL > 5 s	
	Datengrundlage [-]	Median [km/h]	Datengrundlage [-]	Median [km/h]
alle A-Anzeigen	126.760	85	51.646	85
dunkel - frei	79.073	86	37.119	86
120 km/h	36.091	86	10.709	86
100 km/h	2.814	83	863	83
80 km/h	6.736	58	2.237	57
60 km/h	1.022	51	431	52
alle B-Anzeigen	126.760	85	51.646	85
dunkel	80.225	87	39.354	122
Lkw-ÜV	40.929	80	10.362	77
Gefahr	620	77	253	78
Stau	2.932	54	997	54
Baustelle	878	86	150	88
alle Dichteklassen	126.760	85	51.646	85
Dichteklasse 1	53.007	87	29.173	87
Dichteklasse 2	35.843	85	12.001	84
Dichteklasse 3	17.366	82	5.079	80
Dichteklasse 4	10.015	81	2.510	76
Dichteklasse 5	7.292	64	2.003	60
Dichteklasse 6	2.059	60	561	58
Dichteklasse 7	1.178	44	319	40

A.7.2 Geschwindigkeitsverteilungen aus Detektordaten

Die Abbildungen A.28 bis A.30 zeigen Geschwindigkeitsverteilungen aus den vorliegenden Detektordaten aus fünf Wochen im Jahr 2019.

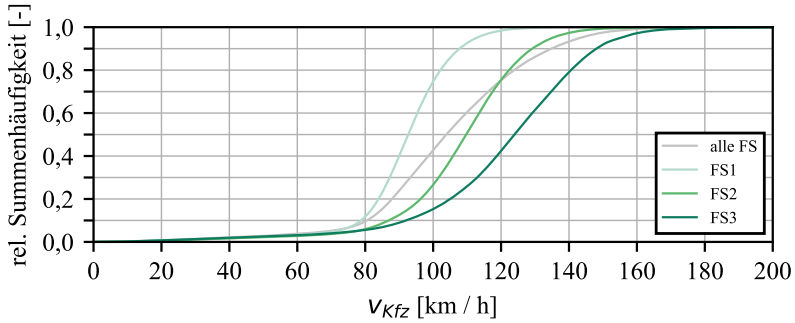
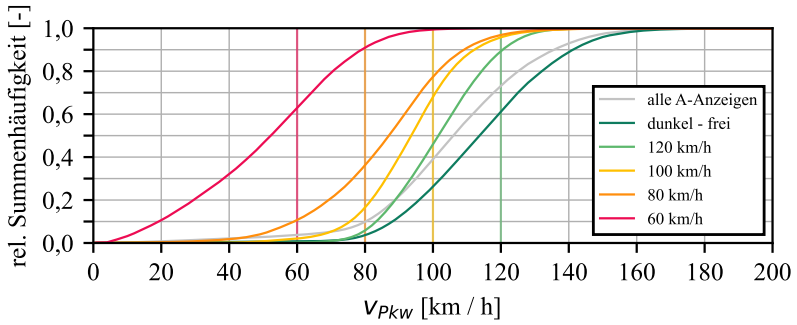
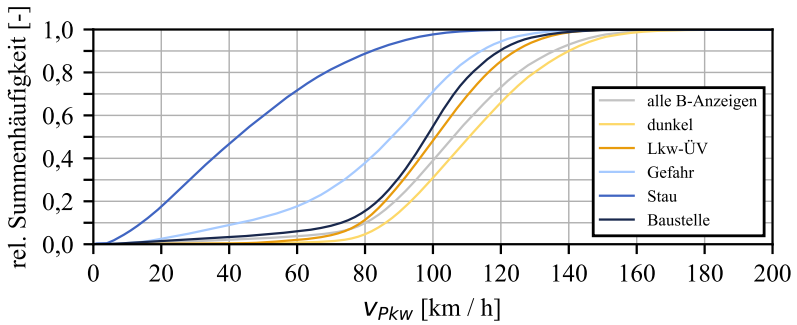


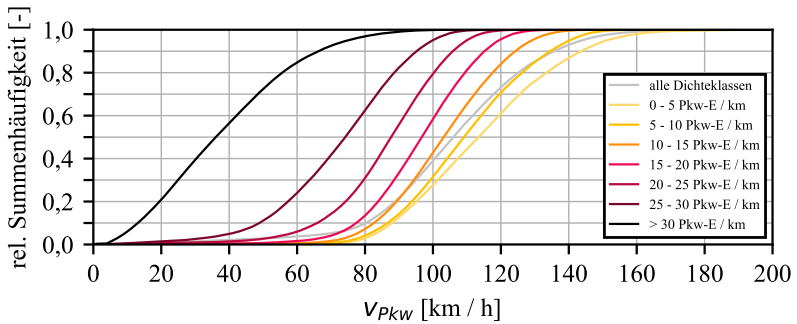
Abbildung A.28: Kfz-Geschwindigkeitsverteilungen in Abhängigkeit des Fahrstreifens aus Detektordaten (eigene Darstellungen)



(a) Verteilung in Abhängigkeit der A-Anzeige

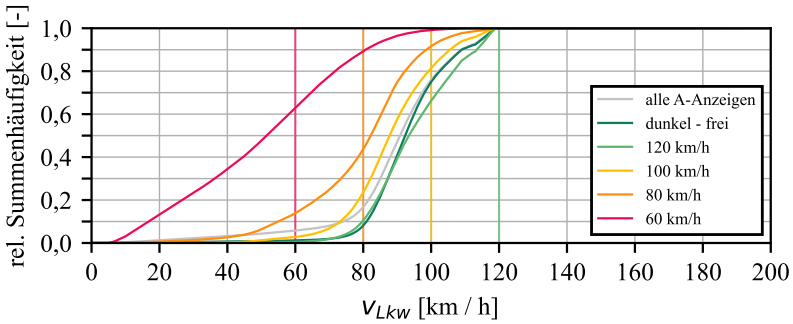


(b) Verteilung in Abhängigkeit der B-Anzeige

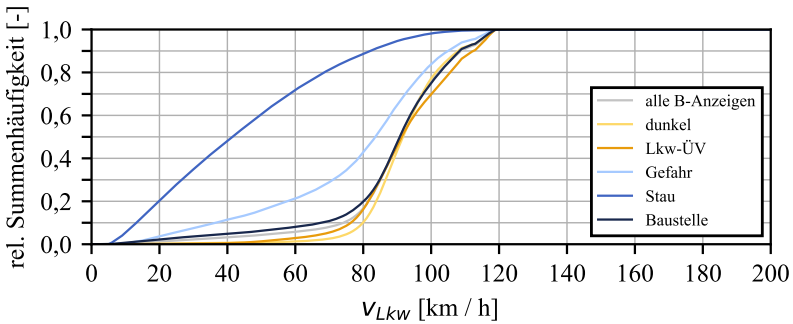


(c) Verteilung in Abhängigkeit der lokalen Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen

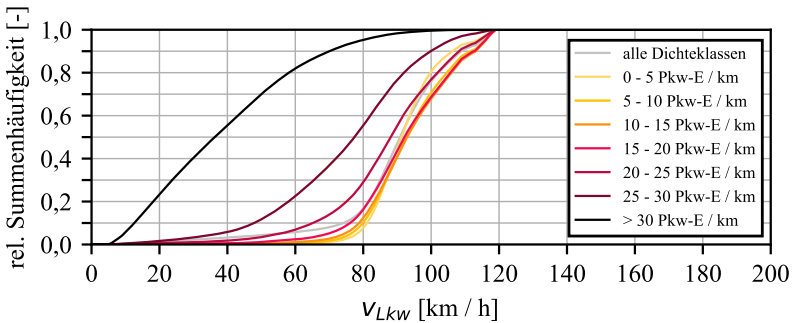
Abbildung A.29: Pkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus Detektordaten (eigene Darstellungen)



(a) Verteilung in Abhängigkeit der A-Anzeige



(b) Verteilung in Abhängigkeit der B-Anzeige

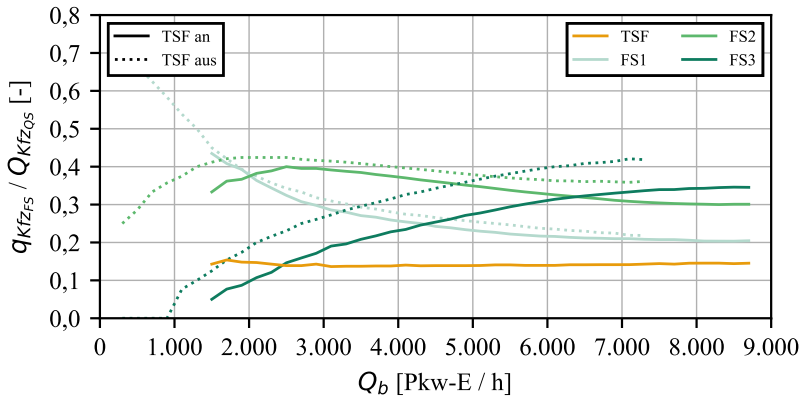


(c) Verteilung in Abhängigkeit der lokalen Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen

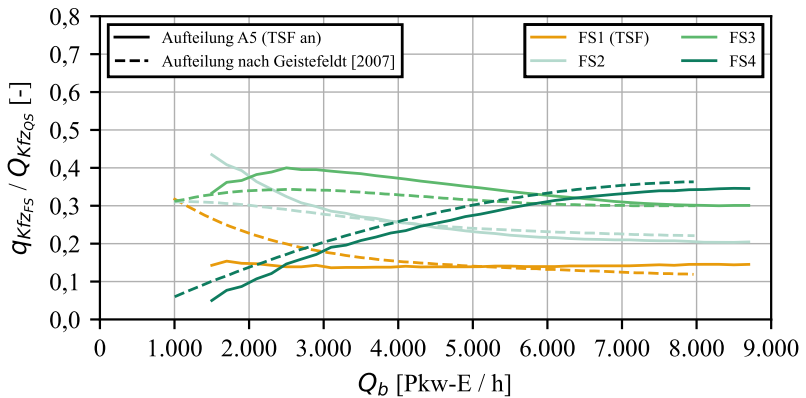
Abbildung A.30: Lkw-Geschwindigkeitsverteilungen aus Detektordaten (eigene Darstellungen)

A.8 Fahrstreifenaufteilung mit und ohne TSF

Die Abbildungen A.31 bis A.34 zeigen die Kfz-Fahrstreifenaufteilung bei geöffnetem und geschlossenem Seitenstreifen und den Vergleich mit der standardisierten Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen [Geistefeldt, 2007].

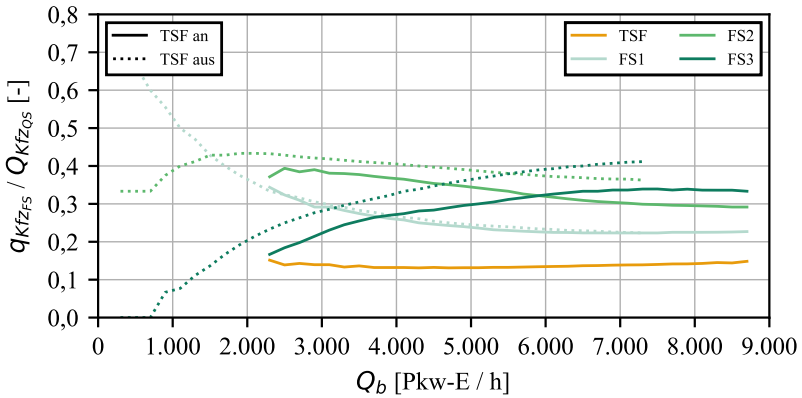


(a) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter und geschlossener TSF

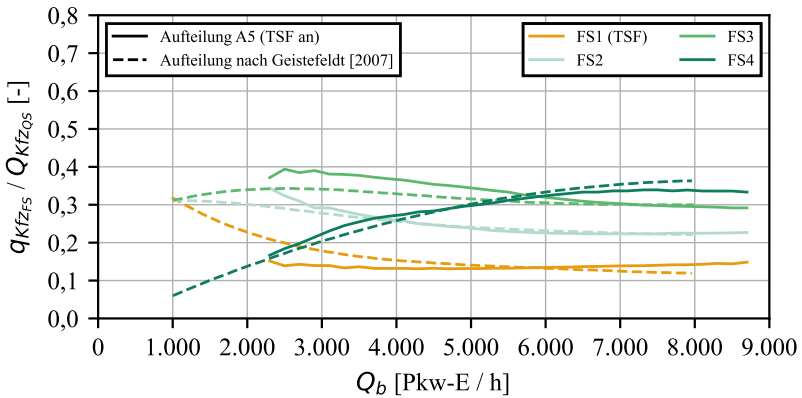


(b) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter TSF und vierstreifiger Abschnitt

Abbildung A.31: Kfz - FR Norden Segment 2 (eigene Darstellungen)

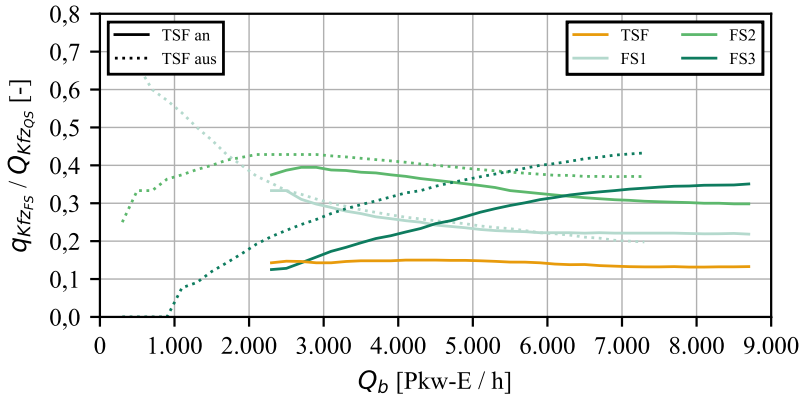


(a) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter und geschlossener TSF

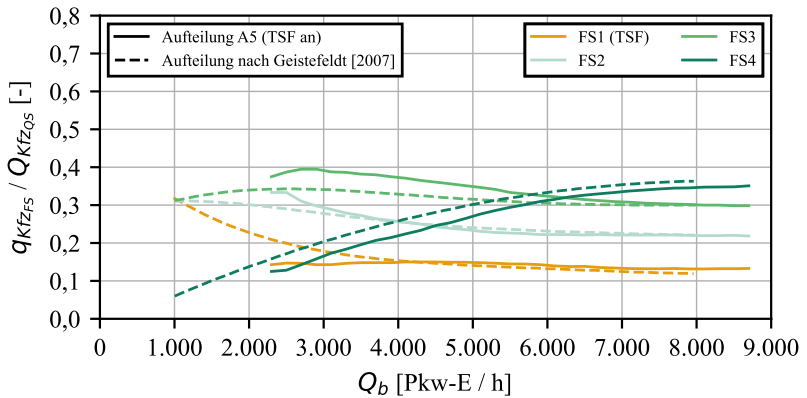


(b) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter TSF und vierstreifiger Abschnitt

Abbildung A.32: Kfz - FR Norden Segment 3 (eigene Darstellungen)

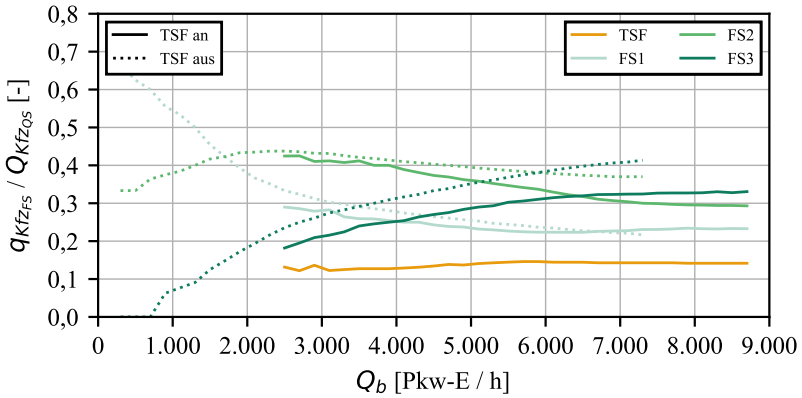


(a) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter und geschlossener TSF

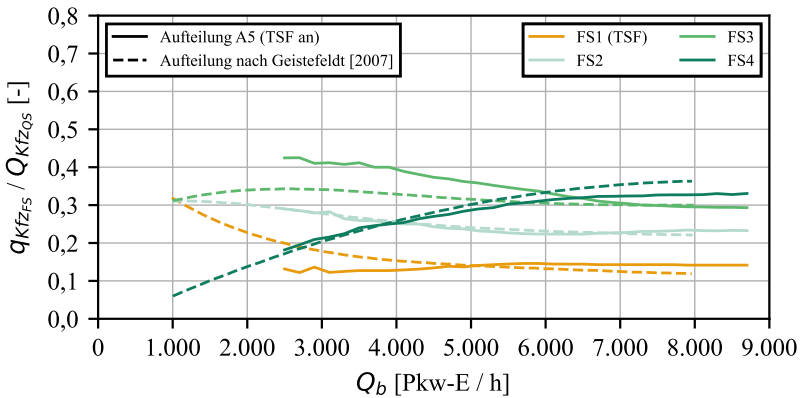


(b) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter TSF und vierstreifiger Abschnitt

Abbildung A.33: Kfz - FR Süden Segment 2 (eigene Darstellungen)



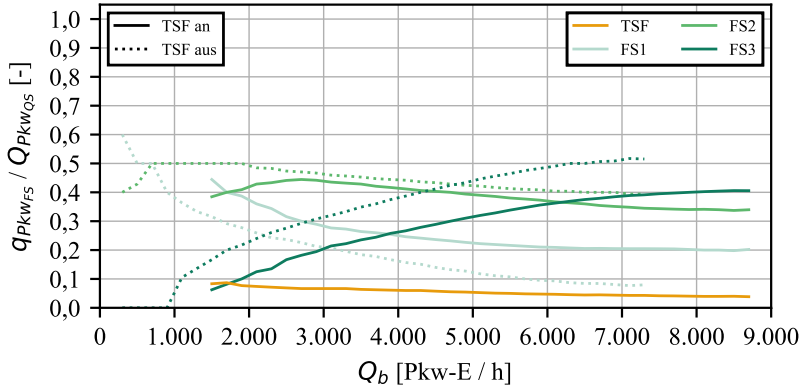
(a) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter und geschlossener TSF



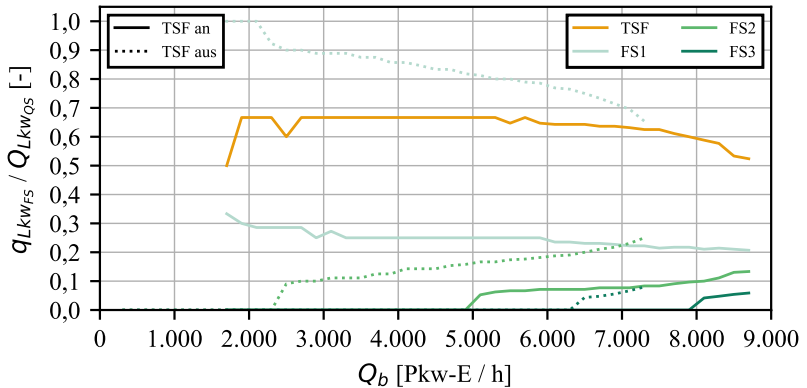
(b) Vergleich dreistreifiger Abschnitt bei geöffneter TSF und vierstreifiger Abschnitt

Abbildung A.34: Kfz - FR Süden Segment 3 (eigene Darstellungen)

Die Abbildungen A.35 bis A.38 zeigen die Fahrstreifenaufteilung bei geöffnetem und geschlossenem Seitenstreifen separat für Pkw und Lkw.

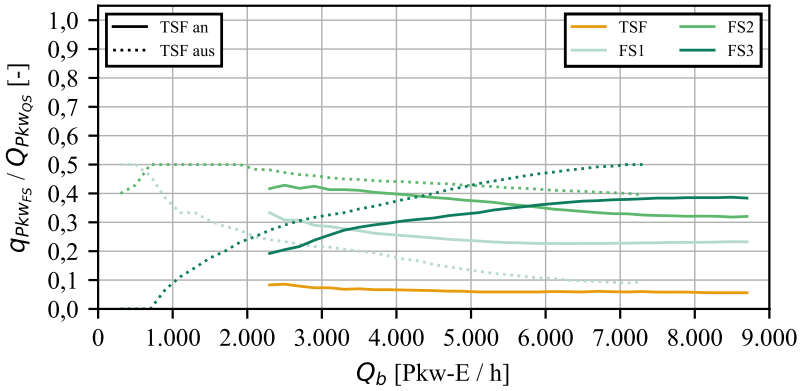


(a) Fahrstreifenaufteilung Pkw

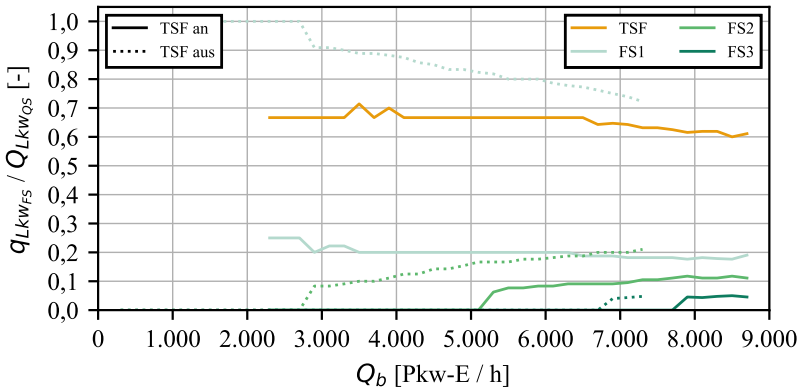


(b) Fahrstreifenaufteilung Lkw

Abbildung A.35: Pkw und Lkw - FR Norden Segment 2 (eigene Darstellungen)

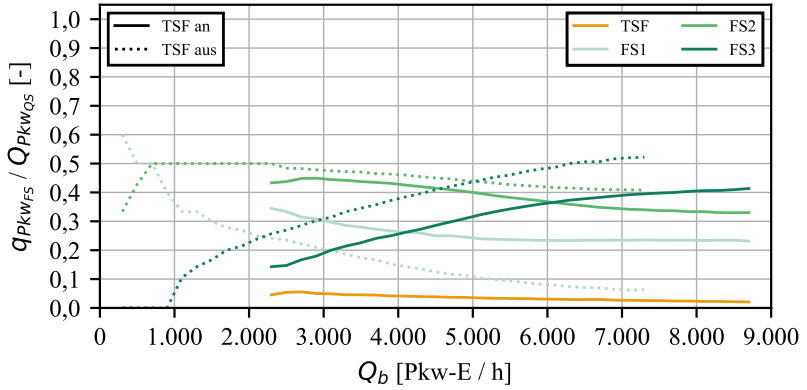


(a) Fahrstreifenaufteilung Pkw

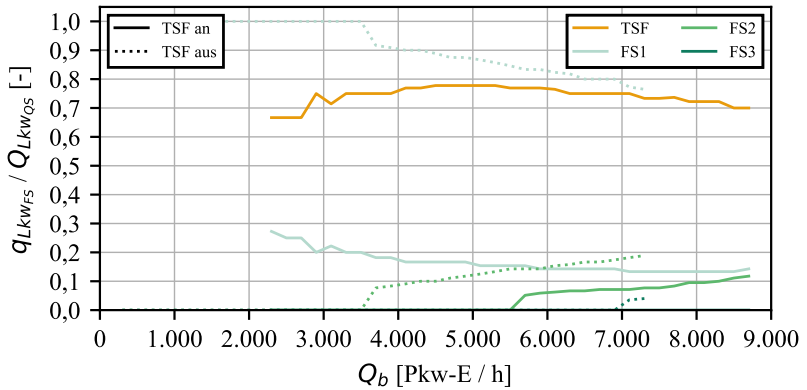


(b) Fahrstreifenaufteilung Lkw

Abbildung A.36: Pkw und Lkw - FR Norden Segment 3 (eigene Darstellungen)

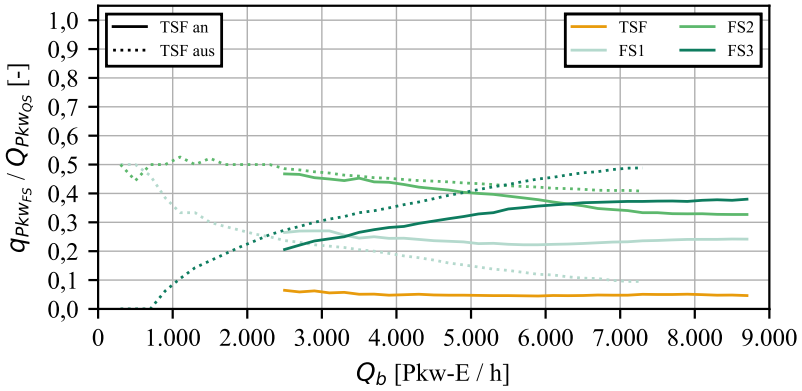


(a) Fahrstreifenaufteilung Pkw

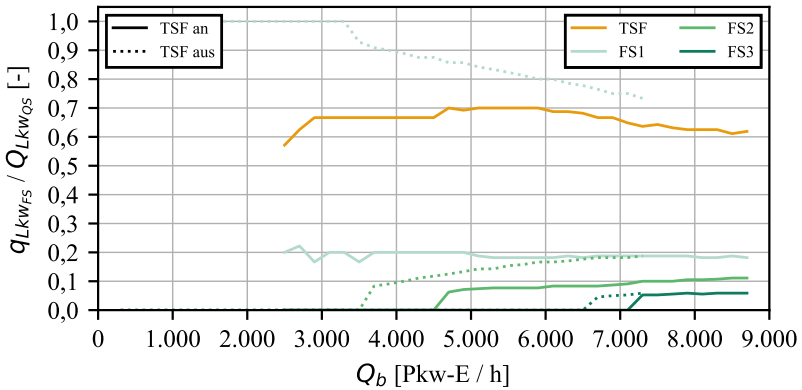


(b) Fahrstreifenaufteilung Lkw

Abbildung A.37: Pkw und Lkw - FR Süden Segment 2 (eigene Darstellungen)



(a) Fahrstreifenaufteilung Pkw



(b) Fahrstreifenaufteilung Lkw

Abbildung A.38: Pkw und Lkw - FR Süden Segment 3 (eigene Darstellungen)

A.9 Kalibriertes Akzeptanzmodell

Tabelle A.8 zeigt die Zuordnung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen an den Anzeigequerschnitten in Abhängigkeit der A-Anzeige, Fahrzeugklasse und Dichteklasse (DK) nach der Kalibrierung des Akzeptanzmodells.

Tabelle A.8: Zuordnung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen im Akzeptanzmodell

A-Anzeige	Fahrzeugklasse	Wunschgeschwindigkeitsverteilungen		
		Dichteklasse 1	Dichteklasse 2	Dichteklasse 3
60 km/h	Pkw	120_Pkw_DK3	80_Pkw_DK2	80_Pkw_DK3
	Lnf	80_Pkw_DK2	80_Pkw_DK2	80_Pkw_DK3
	Lkw	80_Lkw_DK1	80_Lkw_DK2	80_Lkw_DK2
	Bus	80_Lkw_DK1	80_Lkw_DK2	80_Lkw_DK2
80 km/h	Pkw	120_Pkw_DK3	80_Pkw_DK2	80_Pkw_DK3
	Lnf	80_Pkw_DK2	80_Pkw_DK2	80_Pkw_DK3
	Lkw	80_Lkw_DK1	80_Lkw_DK2	80_Lkw_DK2
	Bus	80_Lkw_DK1	80_Lkw_DK2	80_Lkw_DK2
100 km/h	Pkw	120_Pkw_DK3	100_Pkw_DK2	100_Pkw_DK3
	Lnf	100_Pkw_DK2	100_Pkw_DK2	100_Pkw_DK3
	Lkw	100_Lkw_DK1	100_Lkw_DK2	100_Lkw_DK3
	Bus	100_Lkw_DK1	100_Lkw_DK2	100_Lkw_DK3
120 km/h	Pkw	120_Pkw_DK1	120_Pkw_DK2	120_Pkw_DK3
	Lnf	120_Pkw_DK2	120_Pkw_DK2	120_Pkw_DK3
	Lkw	100_Lkw_DK1	100_Lkw_DK2	100_Lkw_DK3
	Bus	100_Lkw_DK1	100_Lkw_DK2	100_Lkw_DK3
dunkel - frei	Pkw	120_Pkw_DK1	140_Pkw_DK2	140_Pkw_DK3
	Lnf	140_Pkw_DK2	140_Pkw_DK2	140_Pkw_DK3
	Lkw	100_Lkw_DK1	100_Lkw_DK2	100_Lkw_DK3
	Bus	100_Lkw_DK1	100_Lkw_DK2	100_Lkw_DK3

Bei *120_Pkw_DK1* handelt es sich bspw. um die Wunschgeschwindigkeitsverteilung für Pkw bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h und einer geringen Verkehrsdichte auf dem linken Fahrstreifen. Die entsprechenden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen sind in Abbildung 6.9 dargestellt. Bei den Verteilungen in blauer Schriftfarbe handelt es sich um modifizierte Zuordnungen im Zuge des Kalibrierungsprozesses.

A.10 Verkehrszustände in der Simulation

Abbildung A.39 stellt eine Auswahl an raumzeitlichen Verläufen der Verkehrssituation in verschiedenen Simulationsläufen des kalibrierten Verkehrsflussmodells dar. Die einzelnen Darstellungen zeigen, dass die Auswirkungen der Engpässe je nach Simulationslauf variieren.

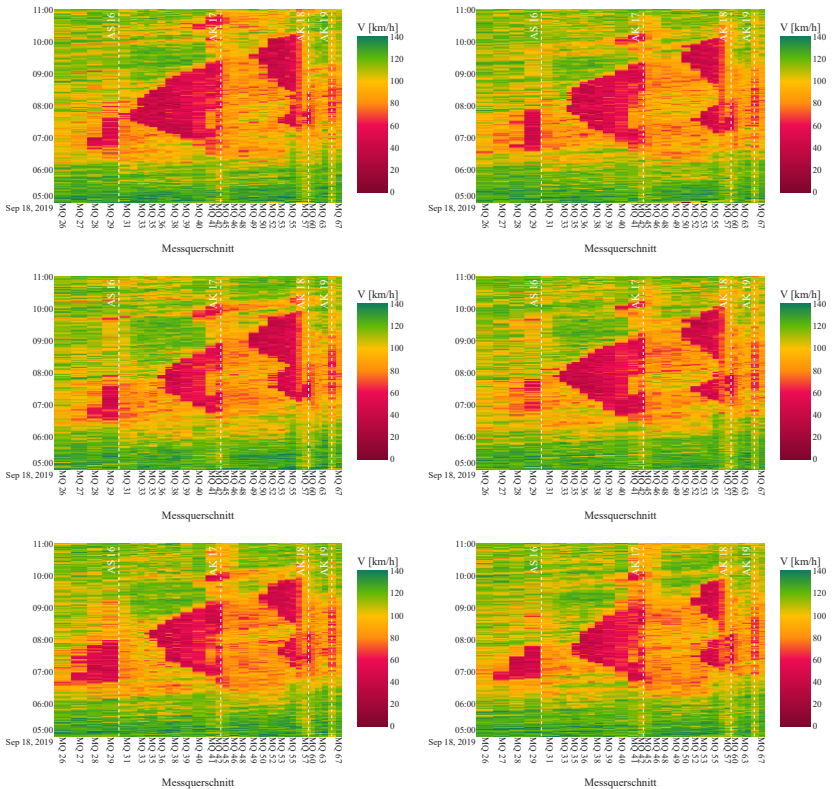


Abbildung A.39: Auswahl an raumzeitlichen Verläufen der Verkehrssituation in FR Süden in verschiedenen Simulationsläufen (eigene Darstellungen)