

Kontext-differenzierte Modellierung des Fahrverhaltens auf Autobahnen mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Ing.
Jan Grimm

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling
Zweitgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Regine Gerike

Tag der Einreichung: 23.07.2021
Tag der Verteidigung: 14.04.2022

Danksagung

Zuallererst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling für die Betreuung dieser Arbeit bedanken, die er auch nach seiner Emeritierung und trotz zuletzt widriger Umstände fortführte. Seine vielzähligen fachlichen und methodischen Hinweise bildeten einen wertvollen und unverzichtbaren Beitrag für diese Arbeit. Ebenfalls möchte ich Frau Prof. Dr.-Ing. Regine Gerike für ihre Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Wesentliche Teile der Arbeit entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme. Mein Dank gilt daher auch Herrn Dr. Torsten Gründel, Herrn Prof. Dr. Matthias Klingner und Herrn Dr. Thomas Otto, die mir die notwendigen Freiräume und Ressourcen zur Durchführung dieser Arbeit gewährten. Ebenso möchte ich Herrn Dr. Michael Klöppel-Gersdorf, Frau Dr. Katrin Braunschweig, Herrn Dr. André Steinborn, dem IT-Team sowie allen weiteren Kolleginnen und Kollegen recht herzlich danken, die mir stets mit Rat und Tat halfen, die vielfältigen technischen Schwierigkeiten beim Datenhandling und bei der Implementierung zu überwinden. Auch möchte ich Herrn Lorenz Breitsamter für seine engagierte Unterstützung im Rahmen seiner Tätigkeit als studentische Hilfskraft danken. Meinen jetzigen Kolleginnen und Kollegen beim sächsischen Landesamt für Straßenbau und Verkehr sei gedankt für den Freiraum, um diese Arbeit noch zum Abschluss bringen zu können.

Weiterer Dank gebührt allen Mitwirkenden am Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB „Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen“. Die stets konstruktive Zusammenarbeit im Projektkonsortium ebenso wie der fachliche Austausch im Betreuerkreis leisteten einen weiteren wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit. Besonderer Dank gilt der Autobahndirektion Südbayern und dem Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen, die durch die Bereitstellung umfangreicher Daten zu Streckenbeeinflussungsanlagen diese Arbeit überhaupt erst ermöglichten. Vielen Dank an dieser Stelle auch an Johannes Grötsch für die vielen Gespräche, die u. a. halfen, praktische Belange des Betriebs nicht aus den Augen zu verlieren.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Denise und meiner Tochter Phoebe für das große Maß an Geduld und Verständnis, das sie mir während dieser Arbeit entgegenbrachten. Vielen Dank auch für das „Rücken Freihalten“ sowie für die vielen motivierenden Worte, die sehr geholfen haben, an meinem Ziel festzuhalten. Meiner Frau, meinem Vater und meinem Bruder danke ich außerdem für ihre Korrekturen und Anregungen, die in die Arbeit eingeflossen sind.

Kurzfassung

Auf vielen hochbelasteten Autobahnabschnitten kommen Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) zum Einsatz, um die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss zu verbessern. Hierbei werden Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbeschränkungen und Warnungen weitestgehend automatisiert aufgrund der vorherrschenden Verkehrs- und Wetterbedingungen abgeleitet und über Wechselverkehrszeichen an die Verkehrsteilnehmer ausgegeben. Diese bewährte Form der Verkehrsbeeinflussung trifft auf sich verändernde Randbedingungen: Durch zunehmende Fahrzeugkonnektivität und -automatisierung sind signifikante Veränderungen im Fahrverhalten und somit auch in den Wirkungen einer SBA zu erwarten. Auch unabhängig davon stellt in der Praxis die Qualitätssicherung der komplexen automatisierten Steuerung einer SBA und die hierbei erforderliche Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen eine große Herausforderung dar.

Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation bietet Potenziale, um Wirkungen kollektiver Verkehrsbeeinflussung zu untersuchen und Veränderungen am Verkehrssystem a-priori zu bewerten. Jedoch wird mikroskopische Verkehrsflusssimulation bislang kaum in Untersuchungen zu SBA eingesetzt. Dies ist unter anderem auf die Vielfalt zu berücksichtigender Situationen und Einflüsse auf das Fahrverhalten zurückzuführen: Anzeigezustände der SBA können sich in kurzen Zyklen ändern und zugrunde liegende Beeinflussungsstrategien sich überlagern; zugleich wirken sich auch die Verkehrs- und Wetterbedingungen auf das Fahrverhalten aus. Bislang ist kein Modellierungsansatz bekannt, um derart vielfältige Einflüsse auf das Fahrverhalten in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Verfahren entwickelt, das erstmals eine differenzierte Modellierung des Fahrverhaltens in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation in einem sich dynamisch verändernden Situationskontext ermöglicht. Hierbei werden ausgewählte Parameter fahrzeugbezogener Verhaltensmodelle während der Simulation nachgeführt. Verschiedene Einflussfaktoren, Verhaltenskenngößen und Modellparameter wurden dabei als Zustandsknoten eines hybriden Bayesschen Netzes modelliert, das anhand empirischer Daten mehrerer realer SBA sowie verschiedener simulativer Untersuchungen kalibriert wurde. Die Eignung des Verfahrens konnte im Rahmen einer Validierung bestätigt werden. In einem Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurde das Verfahren pilothaft zur Untersuchung der Einflüsse automatisierten Fahrens auf SBA eingesetzt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Charakterisierung des Problems	7
1.2	Zielsetzung und Forschungsfragen	9
1.3	Lösungsansatz und wissenschaftlicher Beitrag	10
1.4	Aufbau dieser Arbeit	10
2	Stand der Wissenschaft und Technik	12
2.1	Streckenbezogene Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen	12
2.1.1	Wirkungsweise und Wirkziele	12
2.1.2	Systemarchitektur und Prozesse	13
2.1.3	Verfahren zur Situationserkennung und -bewertung	15
2.1.4	Ansätze zur Bewertung, Qualitätssicherung und Optimierung	19
2.1.5	Simulation streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung	21
2.1.6	Verbleibende Herausforderungen	22
2.2	Fahrverhalten: Beschreibung, Modellierung und Simulation	23
2.2.1	Fahrverhalten, Fahraufgabe und Fahrentscheidungs Ebenen	23
2.2.2	Quantitative Beschreibung des Fahrverhaltens	24
2.2.3	Fahrverhaltensmodelle	29
2.2.4	Kalibrierung und Validierung von Fahrverhaltensmodellen	35
2.2.5	Verbleibende Herausforderungen	37
2.3	Analyse und Modellierung von Wirkzusammenhängen	38
2.3.1	Der Begriff Wirkzusammenhang	38
2.3.2	Schritte der datengestützten Modellierung von Wirkzusammenhängen	38
2.3.3	Ansätze zur Modellierung von Wirkzusammenhängen	40
2.3.4	Anwendungen in der Fahrverhaltensanalyse, -prognose und -modellierung	45
2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	47
3	Randbedingungen für diese Arbeit	49
3.1	Simulationsumgebungen	49
3.2	Referenzstrecken und Datengrundlage	50
3.2.1	Zweck der Datennutzung und Anforderungen	51
3.2.2	Referenzstrecken	52
3.2.3	Infrastrukturdaten	54
3.2.4	Verkehrs- und Prozessdaten	56
4	Verfahren zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens	58
4.1	Beschreibung des Modellierungsgegenstands	58
4.1.1	Modellskala und Entitäten	59
4.1.2	Prozesse	63
4.1.3	Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen	65
4.2	Architektur: Simulationsmodule und Schnittstellen	72
4.3	Inferenzmodell: Kontextspezifische Einflüsse auf das Fahrverhalten	76
4.3.1	Annahmen und Anforderungen an das Inferenzmodell	76
4.3.2	Auswahl des Modellierungsansatzes	78

4.3.3	Aufbau und Eigenschaften des Modells	79
4.3.4	Aufstellung eines initialen Modells	80
4.3.5	Implementierung des Inferenzmodells	81
4.4	Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation	81
4.4.1	Anforderungen	82
4.4.2	Funktionen der Schnittstellenanwendung	83
4.4.3	Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens	85
4.4.4	Implementierung der Schnittstellenanwendung	87
4.5	Modellierung der Streckenbeeinflussungsanlagen	89
4.5.1	Anforderungen	89
4.5.2	Umsetzung für aimsun.next	90
4.5.3	Umsetzung für SUMO	91
5	Datenübernahme und -verarbeitung	94
5.1	Daten der Referenzstrecken	94
5.1.1	Datenübernahme	94
5.1.2	Aufbereitung und Erweiterung von Verkehrsdaten	96
5.1.3	Aufbereitung der Anzeigezustände	98
5.1.4	Aufbereitung der Wetter- und Umfelddaten	99
5.1.5	Automatisierte Annotation des Situationskontexts	100
5.2	Daten aus der Simulation	100
6	Einflüsse von Fahrsituation und -präferenzen auf das Fahrverhalten	102
6.1	Einflüsse streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung	102
6.2	Einflüsse der Verkehrssituation	107
6.3	Einflüsse der Parameter von Fahrverhaltensmodellen	110
6.3.1	Vorgehensweise	110
6.3.2	Parameter in aimsun.next	111
6.3.3	Parameter in SUMO	112
7	Modellkonfiguration, Kalibrierung und Validierung	118
7.1	Konfiguration und Kalibrierung der Verkehrsflusssimulation	119
7.2	Konfiguration der SBA-Simulation	125
7.3	Anpassung der Topologie des Inferenzmodells	126
7.4	Kalibrieren des Inferenzmodells	129
7.4.1	Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten	130
7.4.2	Zusammenhänge mit Einfluss auf die Wunschgeschwindigkeit	131
7.4.3	Zusammenhänge zwischen Abstandsverhalten und Abstandspräferenzen	133
7.5	Validierung	136
8	Anwendungspotenziale und -szenarien	141
8.1	Anwendungsmöglichkeiten in Wissenschaft und Praxis	141
8.2	Anwendungsszenario „Einflüsse automatisierter Fahrzeuge“	143
8.3	Diskussion: Anwendungs- und Entwicklungspotenziale	144
9	Zusammenfassung und Ausblick	146

Anhang	148
A Ausgewählte Fahrzeugfolgemodelle	149
B Bayessche Netze	157
C Interaktionen zwischen Simulationsmodulen	164
D Zustände von Anzeigequerschnitten	167
E Einflüsse der Parameter der Fahrverhaltensmodelle	171
F Ergebnisse der Validierung	177
Abbildungsverzeichnis	190
Tabellenverzeichnis	192
Abkürzungsverzeichnis	193
Symbolverzeichnis	194
Literatur	197

1 Einführung

Dieser Abschnitt führt in die Problemstellung und Zielsetzung dieser Arbeit ein. Es werden sieben Forschungsfragen definiert, die eine Richtschnur für diese Arbeit bilden. Anschließend wird der gewählte Lösungsansatz kurz beschrieben und der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit umrissen. Schließlich wird der Aufbau der Arbeit erläutert.

1.1 Charakterisierung des Problems

Im Personenverkehr in Deutschland wird laut Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [137] zwischen 2010 und 2030 trotz eines erwarteten Rückgangs der Bevölkerungszahl um etwa 2,4% eine Zunahme der Verkehrsleistung um über 12% prognostiziert. Dabei wird erwartet, dass der Personenfernverkehr überproportional zum Gesamtpersonenverkehr zunimmt. Obwohl eine leichte Verschiebung des Modal Split zugunsten des öffentlichen Verkehrs angenommen wird, werden ca. 75% der Verkehrsleistung¹ auf die Straße entfallen. Im Straßengüterverkehr wird sogar eine Zunahme der Transportleistung um ca. 19% im gleichen Zeitraum vorhergesagt. Die Entwicklung der Verkehrsleistungen im Straßenpersonen- und -güterverkehr seit 2010 bestätigen diesen Wachstumstrend grundsätzlich [128]. Daher kann ein weiter anhaltendes Wachstum des Straßenverkehrsaufkommens angenommen werden. Aufgrund der hohen Attraktivität vieler Großstädte sowie einer vielfach noch immer fortschreitenden Suburbanisierung ist zu erwarten, dass Autobahnen in und zwischen den großen Ballungsräumen überproportional von diesem Wachstum betroffen sein werden.

Bereits jetzt erreicht die Straßenverkehrsinfrastruktur häufig die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Auswertungen des Datenanbieters Tomtom ergaben, dass in den Jahren 2015 bis 2017 ein durchschnittlicher Berufspendler² in Deutschland knapp 30 h im Jahr im Stau verbracht hat [50]. Die Häufigkeit von Unfällen mit Personen- oder schwerem Sachschaden wies zwar in früheren Jahrzehnten einen fallenden Verlauf auf, seit ca. 2010 stagniert sie jedoch bzw. steigt tendenziell wieder leicht an. Dies betrifft auch das Unfallgeschehen auf Autobahnen. Selbst unter Berücksichtigung der Entwicklung der Fahrleistungen ist ein leichter Anstieg zu erkennen.

Um vor diesem Hintergrund die Verkehrssicherheit zu erhöhen und eine möglichst effiziente Nutzung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur zu ermöglichen, kommen kollektiv wirkende Verkehrsbeeinflussungssysteme zum Einsatz. Hierzu gehören u. a. auch Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA), welche abschnittsbezogene Ver- und Gebote sowie Warnungen weitgehend automatisiert in Abhängigkeit der gerade vorherrschenden Verkehrs- und Umfeldbedingungen ableiten und über Wechselverkehrszeichen an die Verkehrsteilnehmer ausgeben. Ergänzt werden diese kollektiv wirkenden Anlagen zukünftig um kooperative Dienste unter Verwendung von Infrastruktur-zu-Fahrzeug-Kommunikation, die bereits in mehreren Feldtests erfolgreich erprobt wurden und nunmehr schrittweise zur Anwendung gebracht werden. Diese Dienste ermöglichen eine gezieltere sowie im räumlichen und zeitlichen Kontext differenziertere Beeinflussung von Verkehrsteilnehmern. Hierdurch entstehen auch Potenziale zur Weiterentwicklung der konventionellen SBA über eine Einbeziehung fahrzeuggenerierter, räumlich durchgehender Daten bis hin zu einer räumlich durchgehenden Beeinflussung unabhängig von ortsfesten Schilderbrücken (virtuelle SBA) [141].

¹ Angabe unter Einbeziehung des Anteils nichtmotorisierten Verkehrs (Rad- und Fußverkehr). ² Annahme: zwei Wege à 30 km im morgendlichen bzw. nachmittäglichen Berufsverkehr.

Die Bewertung und Qualitätssicherung von Prozessen, Steuerverfahren und Maßnahmen stellt bereits für konventionelle SBA eine Herausforderung dar (vgl. Abschnitte 2.1.4 und 2.1.6). Die durch SBA dargestellten Ver- und Gebote erfordern zwar unmittelbar eine Verhaltensanpassung der Verkehrsteilnehmer, allerdings wird ein solcher Anzeigezustand je nach individuell wahrgenommenen Umgebungsbedingungen, Vorerfahrungen sowie weiteren intrinsischen und extrinsischen Einflüssen (z. B. Termindruck, Emotionen) individuell unterschiedlich bewertet und akzeptiert [149]. Dadurch unterscheidet sich auch die Bereitschaft zur Befolgung der Ver- und Gebote zwischen den Verkehrsteilnehmern. Reaktionen der Verkehrsteilnehmer auf Gefahrenwarnungen sind weitaus schwieriger zu bewerten, da durch diese keine konkreten Verhaltensweisen vorgegeben werden. Zusätzlich können sich verschiedene Steuerverfahren und Maßnahmen überlagern, sodass deren einzelne Wirkungen oft nicht ohne Weiteres voneinander abgegrenzt werden können.

Wirkungen und Wirksamkeit von SBA sind bereits vielfach empirisch untersucht worden, zumeist mit Bezug auf bestimmte Anlagen oder individuelle Steuerverfahren (vgl. Abschnitt 2.1.4). Aus den vorgenannten Gründen wurden Verkehrs- und Umgebungssituationen dabei nicht differenziert, sondern zusammengefasst über grob abgegrenzte Zustandsräume betrachtet (z. B. Verkehrsstärke- oder -dichteklassen). Hierdurch unterliegen die zu untersuchenden Kenngrößen des Fahrverhaltens großen Streuungen, sodass hinreichend lange Untersuchungszeiträume notwendig sind, um signifikante Aussagen treffen zu können.

Ebenfalls aufgrund der zuvor beschriebenen Herausforderungen gibt es bislang nur wenige Untersuchungen, in denen die Wirkungen von SBA mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation untersucht wurden. Die bekannten simulativen Untersuchungen zu streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung beschränken sich auf variable zulässige Höchstgeschwindigkeiten (engl.: variable speed limits), jedoch oftmals ohne die Befolgung dieser in einem differenzierteren, zeitlich und räumlich veränderlichen Situationskontext zu betrachten. Im Gegensatz dazu sind Wirkungen vernetzten Fahrens in zahlreichen Simulationsstudien untersucht worden. Fahrzeugseitig empfangene Nachrichten, die den Fahrzeugführenden über eine entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstelle präsentiert werden, sollen ähnlich wie Anzeigezustände einer SBA Verhaltensänderungen hervorrufen. Als Grundlage zur Festlegung der Fahrerreaktionen dienen z. B. Fahrstudien, Versuchsfahrten im Realverkehr oder auch begründete Annahmen. Untersuchungen in diesem Feld legen i. d. R. jedoch den Fokus auf eine begrenzte Menge an verkehrlichen Szenarien ohne Berücksichtigung veränderlicher äußerer Rahmenbedingungen.

Eine große Herausforderung bei der differenzierten Modellierung des Fahrverhaltens unter Berücksichtigung eines veränderlichen Situationskontexts ist, dass konventionelle Herangehensweisen der Kalibrierung und Validierung mikroskopischer Fahrverhaltensmodelle (vgl. Abschnitt 2.2.4) nicht mehr praktikabel sind. Die Identifikation geeigneter Modellparameter – oder gar ihre Optimierung – ist bereits für eine begrenzte Menge an Verkehrsszenarien eine umfangreiche Aufgabe. Durch verschiedene, teils gleichzeitig wirkende und sich überlagernde Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung im Zusammenspiel mit diversen äußeren Rahmenbedingungen wird die Menge der zu berücksichtigenden Szenarien sehr groß. Betrachtet man die Verkehrssituation nicht als diskreten Zustand, sondern als Vektor aus mehreren wertkontinuierlichen Größen (z. B. Verkehrsdichte und Geschwindigkeitsniveau), lässt sich keine endliche Menge an Szenarien mehr definieren.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und beispielhafte Erprobung eines neuartigen Verfahrens, das es erlaubt, während einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation Einflüsse und Wirkungen eines zeitlich-räumlich veränderlichen Situationskontexts zu berücksichtigen. Dadurch wird es erstmals möglich, auch komplexere streckenbezogene Beeinflussungssysteme mittels einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zu untersuchen, sodass Wirkungen einzelner Beeinflussungsalgorithmen, Systemanpassungen oder auch Maßnahmen der Qualitätssicherung differenziert im Vorfeld bewertet werden können. Der Situationskontext beinhaltet die an die Verkehrsteilnehmer ausgegebenen Informationen, Gefahrenwarnungen sowie Ver- und Gebote, die unmittelbar auf eine Anpassung des Fahrverhaltens abzielen. Darüber hinaus sind die Verkehrslage, die Eigenschaften der Strecke sowie die Witterungssituation ebenfalls Teil des Situationskontexts, da auch diese Einfluss auf das Fahrverhalten haben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass u. a. durch unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften, Fahrstile, Akzeptanz verkehrsrechtlicher Rahmenbedingungen und Emotionen das Fahrverhalten in einem gegebenen Situationskontext erheblich über das Fahrzeug- und Fahrerkollektiv variieren kann.

Um das zuvor formulierte Ziel zu erreichen, wurden zunächst relevante Zusammenhänge zwischen Situationskontext und Fahrverhalten bestimmender Parameter der Simulation identifiziert und beschrieben. Anschließend wurden Funktionen entwickelt, mit denen die so modellierten Zusammenhänge aus der Verkehrsflusssimulation heraus abgefragt und in einer Weise genutzt werden können, dass ein für die gerade vorherrschende Situation in der Realität typisches Verkehrsverhalten nachgebildet wird. Hierzu wiederum wurden auch die Zusammenhänge zwischen Situationskontext und Fahrverhalten in der Realität untersucht und beschrieben.

Aus dieser Vorgehensweise ergeben sich folgende Forschungsfragen, die dieser Arbeit zugrunde liegen:

- Welche Merkmale und Kenngrößen eignen sich zur Beschreibung des Situationskontexts?
- Welche Kenngrößen eignen sich zur Beschreibung des Fahrverhaltens einschließlich seiner Streuung über das Fahrer-/Fahrzeugkollektiv?
- Inwieweit sind die bestehenden Verhaltensmodelle in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation geeignet, um eine Anpassung des Fahrverhaltens als Reaktion auf einen veränderlichen Situationskontext zu realisieren?
- Wie kann in der Simulation von einem Situationskontext auf zugehörige Werte von Fahrverhalten bestimmenden Parametern geschlossen werden? Wie kann diese Abbildung effizient im Zusammenspiel mit der Simulation zur Laufzeit realisiert werden?
- Welche Parameter der Verhaltensmodelle in der Verkehrsflusssimulation haben einen signifikanten Einfluss auf die zuvor bestimmten Kenngrößen des Fahrverhaltens?
- Wie können Zusammenhänge zwischen Situationskontext, Fahrverhalten bestimmender Parameter und in der Realität beobachtetem Fahrverhalten mathematisch beschrieben, d. h. modelliert werden?
- Wie können die so modellierten Zusammenhänge kalibriert werden, sodass ein der Situation entsprechend realistisches Verkehrsverhalten nachgebildet wird? Inwiefern lässt sich dieser Prozess automatisieren?
- Wie kann das Modell kontext-differenzierten Fahrverhaltens evaluiert und validiert werden?

1.3 Lösungsansatz und wissenschaftlicher Beitrag

Die Modellierung der vorgenannten Zusammenhänge erfolgte mittels grafischer Modelle. Hierbei wurden die als relevant identifizierten Einflussgrößen, Verhaltenskenngößen und Parameter der Fahrverhaltensmodelle als Zufallsvariablen (Knoten) eines hybriden Bayesschen Netzes modelliert. Dieses ist dadurch gekennzeichnet, dass es sowohl diskrete als auch kontinuierliche Knoten aufweist. Dies erlaubt im Gegensatz zu rein diskreten Netzen, nicht nur auf Erwartungswerte, sondern auch auf die Streuung der durch die Knoten abgebildeten Zufallsvariablen zu schließen. Die Zusammenhänge zwischen Situationskontext und Fahrverhalten wurden auf Basis von Verkehrs- und Prozessdaten von mehreren SBA trainiert. Die Zusammenhänge zwischen Fahrverhalten und den Parametern der Fahrverhaltensmodelle wurden durch simulative Untersuchungen bestimmt. Im Bayesschen Netz sind diese Zusammenhänge über die Zustandsknoten des Fahrverhaltens miteinander verbunden. Somit kann bei Vorgabe eines in der Simulation vorherrschenden Situationskontexts die zugehörige Verteilung der Fahrverhaltensparameter abgeleitet werden. Indem die Verhaltensparameter als Verteilung gegeben sind, kann berücksichtigt werden, dass das Fahrverhalten zwischen Verkehrsteilnehmern variiert. Für jedes Fahrzeug, das während der Simulation beeinflusst wird, werden die Verhaltensparameter entsprechend der Verteilung zufällig bestimmt.

Als Ergebnis dieser Arbeit entstand somit ein Verfahren, das anhand eines vorgegebenen Situationskontexts mittels Schlussfolgern Verteilungen für Fahrverhaltensparameter der Verkehrsflusssimulation ableitet und diese in der Verkehrsflusssimulation zur Laufzeit anwendet. Nach Kenntnis des Autors ist ein vergleichbares Verfahren bislang nicht vorgestellt worden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zu Einflüssen von Parametern der Fahrverhaltensmodelle stellen einen weiteren wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit dar. Sie liefern insbesondere Aussagen zur Sensitivität bestimmter Modellparameter, die für die Modellkalibrierung in anderen wissenschaftlichen Arbeiten nützlich sein können.

Das vorgestellte Verfahren kann prinzipiell nicht nur in Verbindung mit konventioneller kollektiver Verkehrsbeeinflussung, sondern auch mit zukünftigen bzw. in Einführung befindlichen Anwendungen vernetzten Fahrens, einschließlich einer kooperativen Verkehrsbeeinflussung, genutzt werden (vgl. auch Abschnitt 9). Ähnlich wie Anzeigezustände einer SBA könnten auch durch Fahrzeuge oder die Infrastruktur versandte Nachrichten in die Bestimmung des Situationskontexts einbezogen werden. Somit besteht auch über den in dieser Arbeit vordergründig betrachteten Anwendungsfall hinaus ein erhebliches wissenschaftliches Anschlusspotenzial.

1.4 Aufbau dieser Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in neun Abschnitte. Nachdem dieser Abschnitt eine einführende Beschreibung der Problemstellung, der Zielsetzung und der im Rahmen der Arbeit zu beantwortenden Forschungsfragen lieferte, erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 2 eine umfassende Darstellung und Bewertung des Stands von Wissenschaft und Technik in den Themenfeldern streckenbezogene Verkehrsbeeinflussung, Fahrverhaltensmodellierung sowie Modellierung von Wirkzusammenhängen. Dabei werden Potenziale, aber auch noch verbleibende Herausforderungen bestehender Ansätze und Verfahren diskutiert, insbesondere in Bezug auf die zuvor genannten Forschungsfragen.

Abschnitt 3 beschreibt die Randbedingungen, unter denen diese Arbeit durchgeführt wurde. Dies betrifft einerseits die für eine Erprobung verfügbaren Simulationsumgebungen und andererseits die von

den jeweils zuständigen Straßenbaubehörden bereitgestellte Datengrundlage zu realen Autobahnabschnitten mit SBA.

In Abschnitt 4 wird das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Verfahren zur kontext-differenzierten Anpassung des Fahrverhaltens an einen sich dynamisch verändernden Situationskontext hergeleitet und sein Zusammenwirken mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation beschrieben. Ein Bestandteil des Verfahrens ist ein Inferenzmodell, das es ermöglicht, von einem bestimmten Situationskontext auf die jeweils zugehörigen Parameterverteilungen der Fahrverhaltensmodelle in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zu schließen. Im Anschluss an eine Darlegung der Herangehensweise der Modellierung wird eine initiale Topologie des Inferenzmodells vorgestellt, welche den Ausgangspunkt für die in Abschnitt 7 beschriebene Anpassung und Kalibrierung bildet. Einen weiteren Bestandteil des Verfahrens bildet eine Anwendung zur Interaktion mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, die u. a. Funktionen zur Klassifikation des Situationskontexts und zur Anwendung der Parameterverteilungen auf einzelne virtuelle Fahrzeuge in der Simulation beinhaltet. Darüber hinaus wird beschrieben, wie die automatische verkehrsabhängige Steuerung von SBA nachgebildet und an die mikroskopische Verkehrsflusssimulation angebunden wurde.

In Abschnitt 5 wird erläutert, wie die in Abschnitt 3 beschriebenen Daten importiert, aufbereitet, erweitert und dem zugehörigen Situationskontext zugeordnet wurden. Die so vorbereiteten Daten bildeten die Grundlage für die in Abschnitt 6 vorgestellten Untersuchungen zu Wirkzusammenhängen zwischen Situationskontext, messbaren Fahrverhaltenskenngrößen und Parametern der Fahrverhaltensmodelle. Wiederum darauf aufbauend beschreibt Abschnitt 7, wie das in Abschnitt 4 vorgestellte Inferenzmodell schrittweise angepasst wurde. Das Ziel dieser Anpassungen bestand insbesondere in der Eliminierung nicht signifikanter oder aber zu empfindlicher Zusammenhänge. Ebenfalls in Abschnitt 7 wird die Vorgehensweise zur Kalibrierung des Modells beschrieben sowie eine Methodik der Modellvalidierung vorgestellt. Auch auf die Konfiguration und Kalibrierung der Verkehrsflusssimulation und des Simulationsmoduls zur SBA-Steuerung wird eingegangen.

Das in dieser Arbeit entstandene Verfahren eignet sich für unterschiedliche Anwendungsszenarien in Wissenschaft und Praxis, die in Abschnitt 8 skizziert werden. Das Verfahren wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) erstmals pilothaft eingesetzt, um die Einflüsse automatisierter Fahrzeuge auf die Wirkung und Wirksamkeit von SBA zu untersuchen. Hierbei dient das Verfahren zur kontext-differenzierten Fahrverhaltensanpassung einerseits als Grundlage für das Referenzszenario des heutigen Verkehrsablaufs ohne automatisierte Fahrzeuge, andererseits bildet es das Verhalten der verbleibenden menschlich geführten Fahrzeuge in Mischverkehrsszenarien ab. Schließlich werden wichtige Erkenntnisse aus dieser ersten Anwendung zusammengefasst und hieraus Potenziale zur weiteren Forschung und Entwicklung abgeleitet.

Abschnitt 9 schließt diese Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick ab. Hierbei werden auch weitergehende Anwendungspotenziale des in dieser Arbeit entstandenen Verfahrens skizziert, z. B. für die Bewertung zukünftiger Formen der kooperativen Verkehrsbeeinflussung. In diesem Zusammenhang werden weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur Erschließung dieser Potenziale aufgezeigt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik in den Themenfeldern der streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung, der Beschreibung und Modellierung des Fahrverhaltens, der Verkehrsflusssimulation sowie der Analyse und datengestützten Modellierung von Wirkzusammenhängen gegeben. Hierbei werden bestehende Lösungsansätze vorgestellt und noch verbleibende Herausforderungen in Bezug auf die im ersten Abschnitt definierten Forschungsfragen benannt.

2.1 Streckenbezogene Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen

Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) tragen dazu bei, die Verkehrssicherheit und -qualität auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Schnellstraßen zu verbessern. In Deutschland waren Mitte 2020 ca. 3.180 km Richtungsfahrbahn mit SBA ausgestattet³, und auch in anderen Ländern weltweit existieren vergleichbare Anlagen zur streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung. Dieser Abschnitt beschreibt zunächst Einsatzgebiete, Systemaufbau und Funktionsweise von SBA nach der in Deutschland und Österreich vorherrschenden Systemarchitektur. Anschließend werden aktuelle Entwicklungen zu automatischen verkehrsabhängigen Steuerverfahren sowie Ansätze zu ihrer Evaluation und Qualitätssicherung beleuchtet. Schließlich werden bestehende und künftige Herausforderungen für den Betrieb herausgestellt.

2.1.1 Wirkungsweise und Wirkziele

SBA sind kollektiv wirkende Systeme zur streckenbezogenen Beeinflussung des Verkehrs. Mittels Wechselzeichengebern werden an die vorherrschende Situation angepasste Ver- und Gebote, Gefahrenwarnungen und andere Informationen ausgegeben, die für den nachfolgenden Streckenabschnitt gelten (daher streckenbezogen). Diese Informationen sind durch alle Vorbeifahrenden gleichermaßen wahrnehmbar (daher kollektiv wirkend). SBA nach der in Deutschland und Österreich etablierten Systemarchitektur (vgl. Abschnitt 2.1.2) erlauben die variable Darstellung [20]

- von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten⁴,
- von Überholverböten (insbesondere für Lkw),
- von Fahrstreifennutzungsbeschränkungen sowie
- von Gefahrenwarnungen (z. B. Unfall, Stauende, Arbeitsstelle, witterungsbedingte Gefahr).

Auch verträgliche Kombinationen aus diesen vier Zustandsmengen sind möglich.

³ Diese Angabe konnte einer tabellarischen Auflistung der durch die jeweiligen Landesbehörden gemeldeten Ausstattung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen entnommen werden. Die Tabelle stellte die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) dankenswerterweise auf Anfrage zur Verfügung. ⁴ In der englischsprachigen Literatur oft bezeichnet als variable speed limits (VSL).

Mit dem Einsatz von SBA ist das Ziel und die Erwartung verknüpft, die Verkehrssicherheit zu erhöhen und den Verkehrsfluss zu verbessern [20]. In Anlehnung an die Hinweise für das Qualitätsmanagement in der Verkehrsbeeinflussung [62] der FGSV sowie an Hilgers et al. (2020) [87] lassen sich folgende primären Wirkziele für SBA formulieren:

- Verringerung von Unfallhäufigkeit und -schwere⁵ sowie der Häufigkeit kritischer Situationen, insbesondere durch
 - erhöhte Aufmerksamkeit vor temporär bestehenden Gefahrenstellen,
 - bessere Anpassung von Fahrgeschwindigkeiten an die vorherrschende Verkehrs- und Wetersituation sowie
 - verringerte Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen einzelnen Fahrzeugen und infolgedessen auch weniger riskantes Abstandsverhalten
- Vermeidung oder Hinauszögern von Verkehrszusammenbrüchen bei dichtem Verkehr, insbesondere durch
 - Vermeidung oder zumindest Dämpfung von Stauwellen infolge einander angenäherter Fahrgeschwindigkeiten,
 - gleichmäßigere Fahrstreifenauslastung, d. h. durch eine effizientere Nutzung des vorhandenen Verkehrsraums sowie
 - Verringerung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen und infolgedessen Verringerung von Störeinflüssen durch Verflechtungsvorgänge

Die Wirkungen und die Wirksamkeit⁶ von SBA wurden in verschiedenen Studien eingehend untersucht. Dabei konnte die Wirksamkeit solcher Anlagen in Bezug auf die vorgenannten Ziele bestätigt werden, wengleich die erreichten Nutzenpotenziale oft durch streckenspezifische Gegebenheiten beeinflusst werden. Eine umfassende Zusammenfassung bisheriger vor allem empirischer Untersuchungen findet sich in Hilgers et al. (2020) [87]. Eine Diskussion hierbei verwendeter Bewertungsmethodiken, insbesondere hinsichtlich einer Differenzierung nach Situationskontext und einer Nutzbarkeit im Rahmen einer laufenden Qualitätsbewertung, erfolgt in Abschnitt 2.1.4.

Neben den zuvor genannten verkehrlichen Wirkungen rücken auch Nutzenpotenziale zur Verringerung negativer Umweltwirkungen des Verkehrs in den Fokus [83] [162].

2.1.2 Systemarchitektur und Prozesse

Der typische Systemaufbau einer SBA wird in *Abbildung 1* veranschaulicht. Eine SBA umfasst zunächst die streckenseitige Infrastruktur zur Datenerfassung, zur dezentralen Datenverarbeitung, zur Kommunikation sowie zur Darbietung von Wechselverkehrszeichen. Die Geräte zur Datenerfassung und die Wechselzeichengeber sind jeweils an eine im lokalen Umfeld befindliche Streckenstation angebunden. Die Streckenstationen wiederum sind an eine zentrale Recheneinheit angebunden, die im deutschsprachigen Raum als Unterzentrale bezeichnet wird. In einer Unterzentrale laufen die erfassten Daten der gesamten durch die SBA abgedeckten Strecke zusammen, und dort findet eine übergreifende Infor-

⁵ Ein Potenzial zur Verringerung von Unfallhäufigkeit und -schwere besteht vor allem für solche Unfälle, in denen hohe oder nicht angepasste Geschwindigkeiten einen Einfluss haben. ⁶ Die Begriffe *Wirkung* und *Wirksamkeit* werden hier gemäß der Begriffsdefinitionen in Hilgers et al. (2020) [87] verwendet (vgl. auch Abschnitt 2.3.1).

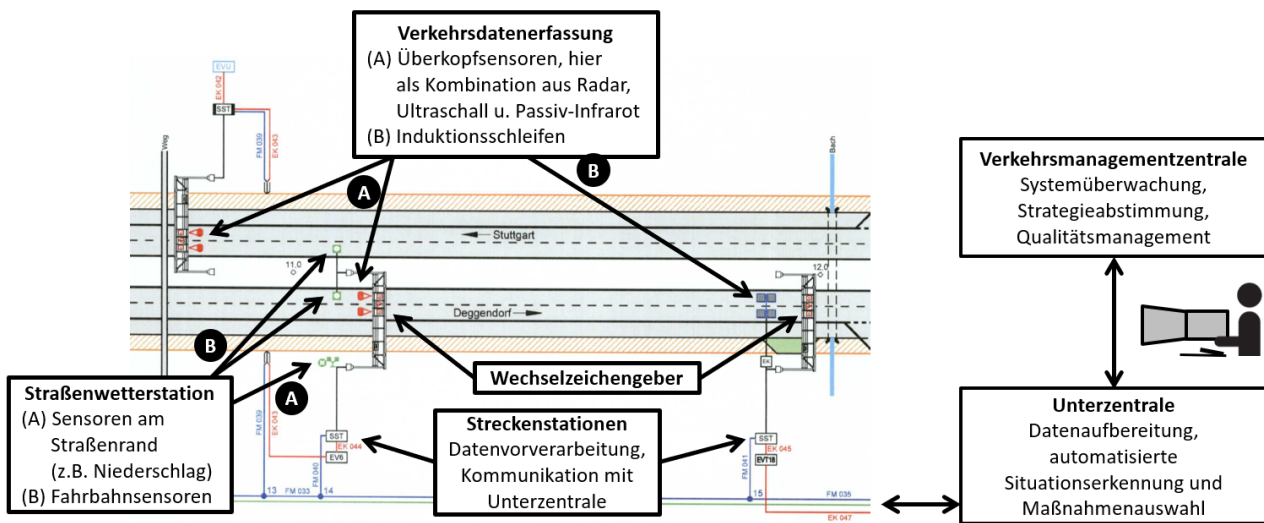


Abbildung 1: Systemaufbau einer Streckenbeeinflussungsanlage (Hintergrund: Ausschnitt aus dem Schema-plan der SBA A92, zur Verfügung gestellt von der Autobahndirektion Südbayern)

mationsverarbeitung und Maßnahmenauswahl statt. Mehrere Unterzentralen im Zuständigkeitsbereich einer Verkehrs- und Betriebszentrale sind zumeist an eine übergeordnetes Verkehrs- und Prozessmanagementsystem angebunden oder in ein solches integriert.

Für SBA in Deutschland und Österreich sind die Systemarchitektur, die technische Ausführung der Außenanlagen, die Prozesse der Informationsverarbeitung sowie die Schnittstellen zur Datenkommunikation durch folgende Dokumente spezifiziert:

- Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) [18]
- Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [21]
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ) [19]
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA) [20]
- DIN EN 12966: Vertikale Verkehrszeichen – Wechselverkehrszeichen [33]

Die Auswahl der Anzeigezustände einer SBA erfolgt weitestgehend automatisiert, wobei manuelle Eingriffe durch Operatoren einer Verkehrs- und Betriebszentrale insbesondere bei nicht automatisch detektierbaren Ereignissen vorgesehen sind. Die Prozesse der Informationsverarbeitung von der Datenaufbereitung über die Situationserkennung, -bewertung und Maßnahmenauswahl bis hin zur Ausgabe der damit verbundenen Anzeigezustände werden in *Abbildung 2* veranschaulicht.

Die Datenerfassung erfolgt zyklisch, und zwar meistens in Intervallen von einer Minute. Somit unterliegen auch die anschließenden Prozesse diesem Aktualisierungszyklus. Ein Wechsel des Anzeigezustands ist jedoch grundsätzlich zu jeder Zeit möglich, z. B. durch einen manuellen Eingriff, der sofort wirksam wird. In einigen SBA werden Datenerfassungsintervalle von 15 Sekunden verwendet, um die Verkehrsdynamik in dichtem Verkehr besser berücksichtigen zu können [131] [139].

Im MARZ sind eine Reihe von Verfahren zur Situationserkennung und -bewertung verankert (vgl. Abschnitt 2.1.3), die zunächst parallel und unabhängig voneinander ausgeführt werden. Die mit den

2.1 Streckenbezogene Verkehrsbeeinflussung auf Autobahnen

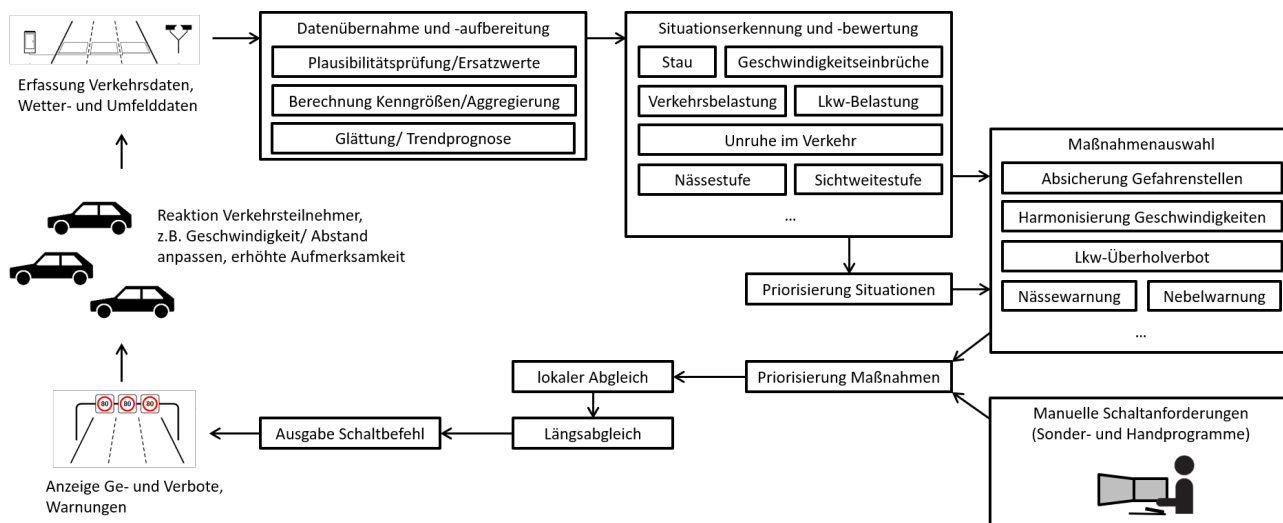


Abbildung 2: Prozesse der streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung, modifiziert nach Grimm (2019) [76]

erkannten Situationen assoziierten Maßnahmen, d. h. die Anforderungen bestimmter Anzeigezustände, werden anschließend priorisiert (vgl. RWVA [20] und Ausgabe 1999 des MARZ [17]). Mit Ausgabe 2018 des MARZ [18] wurde eine Priorisierung der erkannten Situationen im Vorfeld der Maßnahmenauswahl hinzugefügt. Dennoch ist weiterhin vorgesehen, dass verträgliche Anzeigezustände aus verschiedenen Maßnahmen sich überlagern können. Um unplausible oder im Streckenverlauf zu stark wechselnde Anzeigezustände zu vermeiden, werden die so ermittelten und priorisierten Zustandsanforderungen der einzelnen Wechselzeichengeber anhand verschiedener Regeln abgeglichen und bei Bedarf angepasst, bevor sie an die jeweilige Streckenstation ausgegeben werden.

Die Prozesse der Datenaufbereitung, der Situationserkennung und der Maßnahmenauswahl können durch diverse Parameter beeinflusst werden, z. B. um besonderen Eigenschaften eines Streckenabschnitts gerecht zu werden, um spezifische verkehrsrechtliche Vorgaben umzusetzen oder um im Rahmen der Qualitätssicherung Wirkungen und Wirksamkeit der Anlage zu verbessern. Zu diesen Parametern zählen u. a. Glättungskoeffizienten sowie Aktivierungs- und Deaktivierungsschwellen zur Erkennung bestimmter Situationen bzw. zur Aktivierung oder Rücknahme bestimmter Maßnahmen. Nach MARZ ist vorgesehen, dass diese Parameter je Standort einzeln anpassbar sein müssen.

2.1.3 Verfahren zur Situationserkennung und -bewertung

Verfahren zur automatisierten Situationserkennung im Kontext von SBA dienen

- der Erkennung von Störfällen und Gefahrensituationen zur Einleitung reaktiver Maßnahmen sowie
- der Ermittlung des Handlungsbedarfs für präventive Maßnahmen, um dem Eintreten von Verkehrszusammenbrüchen vorzubeugen.

Hierzu werden entsprechende Indikatoren oder Zustandsmerkmale aus aufbereiteten Verkehrs-, Wetter- und Umfelddaten ermittelt. Werden zur Erkennung von Situationen gleicher Art und gleichen Ortsbezugs mehrere Verfahren parallel eingesetzt, so müssen die Ergebnisse im Rahmen der Situations-

bewertung zusammengeführt werden, wobei die Konfidenz der Verfahrensergebnisse sowie aus vorhergehenden Untersuchungen bekannte Einschätzungen zur Verfahrensgüte einbezogen werden können [60] [18]. Die so ermittelten Situationen bilden die Grundlage für die anschließende Maßnahmenauswahl.

Nachfolgend werden einige wichtige Verfahren der Situationserkennung für SBA benannt. Für eine detailliertere Beschreibung wird auf die jeweils genannten Literaturquellen verwiesen.

Stand der Technik in Deutschland

In Deutschland sind vor allem die im MARZ (Ausgabe 1999) [17] verankerten Verfahren zur Situationserkennung im Einsatz. Die Verfahren des MARZ sind schwellenwertbasiert, d. h. eine bestimmte diskrete Situation wird erkannt, wenn bestimmte Kenngrößen jeweils parametrierbare Aktivierungsschwellen unter- bzw. überschreiten. Eine Übersicht über wichtige im MARZ definierte automatisiert erkennbare Situationen und zugehörige Maßnahmen liefert *Tabelle 1*. Indem entsprechende Schwellenwerte zur Rücknahme einer Situation gegenüber den Aktivierungsschwellen verschoben sind, wird ein zu häufiges Wechseln zwischen Situationen vermieden. Diese einfachen, schwellenwertbasierten Verfahren wurden weitestgehend auch in die Ausgabe 2018 des MARZ [18] übernommen, wobei die Situationserkennung von der anschließenden Maßnahmenauswahl entkoppelt wurde.

Unter den verkehrsbedingt aktivierten Maßnahmen kann zwischen solchen mit reaktivem und solchen mit präventivem Eingriff unterschieden werden. Reaktive Verfahren dienen primär der Absicherung, teils auch der Abmilderung einer bereits eingetretenen Verkehrsstörung. Im Gegensatz hierzu verfolgen präventive Steuerverfahren das Ziel, eine Verkehrsstörung hinauszuzögern oder ihre Entstehung ganz zu verhindern. Die Harmonisierung der Geschwindigkeit adressiert beides: Bei hoher Verkehrsstärke aber stabilem Verkehrsfluss tragen moderate Geschwindigkeitsbeschränkungen dazu bei, Geschwindigkeitsdifferenzen zu verringern und die Häufigkeit sehr hoher Geschwindigkeiten deutlich zu begrenzen, wodurch ein homogener Verkehrsfluss entsteht. Treten dennoch Geschwindigkeitseinbrüche auf, z. B. bei sich stromabwärts bewegenden Pulks infolge überholender langsamer Fahrzeuge, tragen restriktivere Geschwindigkeitsbegrenzungen dazu bei, diese Pulks zu entzerren und entstandene Stauwellen zu dämpfen. In der SBA auf der A92 im nördlichen Großraum München wurde die präventive und die reaktive Maßnahme zur Geschwindigkeitsharmonisierung daher separat und mit unterschiedlichem räumlichem Wirkungsbereich umgesetzt.

Neben den Verfahren des MARZ wurden und werden in einzelnen SBA auch alternative Verfahren eingesetzt. Einige solcher Verfahren sind in den Hinweisen zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung [60] der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) näher beschrieben. Hierzu zählt das auf den MARZ-Verfahren aufbauende Verfahren INCA [31], das eine verbesserte Störfallerkennung und eine modifizierte Verkehrszustandsklassifikation für die Geschwindigkeitsharmonisierung umfasst. Als vergleichsweise neues Verfahren kommt SARAH⁷ hinzu, das ebenfalls auf dem MARZ basiert, jedoch die Situationserkennung fahrstreifenweise ausführt [162] und auch fahrstreifenweise differenzierte zulässige Höchstgeschwindigkeiten ermöglicht. Das Verfahren ist in Riegelhuth und Glatz (2015) [131] näher beschrieben.

Daneben wurden in den 1980er und -90er Jahren diverse weitere Verfahren zur Situationserkennung entwickelt und teils auch pilothaft eingesetzt. Ein Beispiel hierfür ist das Verfahren „Zuverlässigkeit

⁷ SARAH steht für „Streckensteuerung mit antizipierendem regelbasiertem Ansatz in Hessen“.

Situation	Maßnahme	Typ
Stau, starker Geschwindigkeitseinbruch	Stauwarnung, Geschwindigkeitstrichter	reaktiv
moderater Geschwindigkeitseinbruch bei hoher Dichte	Harmonisierung der Geschwindigkeiten (max. 100, 80, teils 60 km/h)	reaktiv
hohe Verkehrsbelastung	Harmonisierung der Geschwindigkeiten (max. 120, 100, teils 80 km/h)	präventiv
Unruhe im Verkehr (große Streuung Fahrgeschwindigkeiten)	Harmonisierung der Geschwindigkeiten (max. 120 km/h)	präventiv
hohe Lkw-Belastung	Lkw-Überholverbot	präventiv
Niederschlag, Fahrbahnnässe	Nässewarnung, reduzierte zulässige Höchstgeschwindigkeit	reaktiv
reduzierte Sichtweite	Nebelwarnung, reduzierte zulässige Höchstgeschwindigkeit	reaktiv

Tabelle 1: Wichtige automatisiert erkennbare Situationen und zugehörige Maßnahmen nach MARZ [18]

des Verkehrs“ nach Ferrari [56] [57], das bei kurzfristig erhöhter Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs entsprechende präventive Gegenmaßnahmen ermöglicht. Nach Erkenntnissen aus einer Befragung von SBA-Betreibern aus Grimm (2009) [75] haben sich diese Verfahren jedoch u. a. aufgrund ihrer Komplexität im Vergleich zu den Verfahren nach MARZ in der Praxis nicht durchgesetzt. Auch benötigen einige der Verfahren Daten, die in Anlagen nach MARZ und TLS nicht ohne Weiteres bereitstehen.

Ausgewählte internationale Ansätze

Auch außerhalb Deutschlands sind SBA oder ähnliche kollektiv und streckenbezogen wirkende Beeinflussungssysteme im Einsatz. Nachfolgend wird der Stand der Technik bei Situationserkennungsverfahren in ausgewählten Ländern kurz vorgestellt.

In *Österreich* sind SBA gemäß der zuvor beschriebenen, auch in Deutschland vorherrschenden Systemarchitektur ausgeführt [83]. Dementsprechend kommen auch in Österreich die Steuerverfahren nach MARZ [18] zum Einsatz⁸. Als Ergänzung hierzu beschreibt Schwietering (2010) [138] ein Steuerverfahren, das basierend auf der Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs präventiv eingreift, um diesen zu verhindern. Das Verfahren berücksichtigt auch die Verkehrszusammensetzung und die Witterung als wesentliche Einflussfaktoren auf die Kapazität. Es wurde in einer SBA pilothaft eingesetzt und evaluiert, jedoch zunächst ohne Wirkung auf den Verkehr.

In der *Schweiz* werden regional unterschiedliche Verfahren zur Situationserkennung verwendet [139] [49]. Einige Anlagen verwenden eine Klassifizierung des Verkehrszustands nach Verkehrsstärke und Geschwindigkeit. Im Raum Basel kommt ein Verfahren zum Einsatz, das eine Schätzung der räumlich-zeitlichen Propagierung des Verkehrs mittels eines makroskopischen Verkehrsmodells und eines Kalman-Filters umfasst. Der Schätzfehler des Kalman-Filters fungiert dabei als Störfallindikator [60]. Ein neues, in Schwietering (2017a) [139] vorgestelltes Verfahren nutzt disaggregierte (einzelfahrzeugbezogene) Verkehrsdaten zur Staudetektion sowie zur Erkennung des Bedarfs zur Harmonisierung der Geschwin-

⁸ Ein Teil der SBA in Österreich dient vorwiegend dem Immissionsschutz und hat einen eingeschränkten Funktionsumfang.

digkeiten (sowohl reaktiv bei erkannten Pulks als auch präventiv bei hoher Verkehrsbelastung). Zusätzlich wird ein Verfahren vorgeschlagen, das Häufungen kritischer Nettozeitlücken oder Auffahrzeiten (Time to Collision, TTC, vgl. Abschnitt 2.2.2) erkennt und ermöglicht, auf diese zu reagieren. Eine weitere Anwendung dieses Verfahrens wurde jedoch nicht empfohlen, da eine hohe Sensitivität des Verfahrens bzgl. der Schwellenwerte zur Abgrenzung kritischer von nicht kritischen TTC bzw. Nettozeitlücken festgestellt wurde.

In den *Niederlanden* kommt ein System zur Geschwindigkeitsbeeinflussung und Fahrstreifensignalisierung zum Einsatz, das um 2010 etwa 42% des landesweiten Autobahnnetzes abdeckte [92]. Im Gegensatz zu SBA in Deutschland und Österreich werden hierbei lediglich Richtgeschwindigkeiten dargestellt (ohne rote Ronde). Im Rahmen der verkehrsabhängigen Steuerung wurde zunächst ein Verfahren zur Stauerkennung eingesetzt. Als Ergänzung hierzu beschreiben Smulders (1990) [147] sowie van den Hoogen und Smulders (1994) [160] ein präventiv wirkendes Verfahren zur Harmonisierung der Geschwindigkeiten. Hegyi et al. (2008) [88] beschreiben ein weiteres Verfahren, das mittels modellprädiktiver Regelung eine Entzerrung von Stauwellen bewirkt. Dieses wurde in einem Feldtest erprobt [89] [92] und in einer Simulationsstudie von Grumert et al. (2018) [78] anderen Verfahren gegenübergestellt.

Ähnlich wie in den Niederlanden wurde auch in *Schweden* zunächst eine Geschwindigkeitsbeeinflussung mittels Richtgeschwindigkeiten in Verbindung mit einer automatisierten Störfallerkennung eingesetzt [118] [78]. Ergänzend wird auch hier ein präventiv wirksames Verfahren zur Harmonisierung der Geschwindigkeiten eingesetzt, das in Strömrgren und Lind (2016) [151] vorgestellt und bewertet wird.

Einen weiteren, bislang nur mittels Simulation untersuchten Ansatz zur Geschwindigkeitsbeeinflussung beschreiben Lee et al. [104]. Dieser Ansatz basiert auf der Erkennung von Situationen mit hohem Risiko für Unfälle, auf die mit einer verringerten zulässigen Höchstgeschwindigkeit reagiert wird. Ebenfalls lediglich simulativ untersucht wurde der Motorway Traffic Flow Control (MTFC) Algorithmus nach Carlson et al. (2011) [25], der auch in die vergleichende Simulationsstudie von Grumert et al. (2018) [78] einbezogen wurde. Dieser Algorithmus beinhaltet einen Regler, mit welchem die Verkehrsbelastung möglichst nahe an der Kapazitätsgrenze gehalten und der Kapazitätseinbruch (Capacity Drop) bei Verkehrszusammenbrüchen vermieden werden soll [78].

Ausblick: Potenziale und Herausforderungen durch Einbeziehen vernetzten Fahrens

Auf einer Vernetzung von Fahrzeugen basierende Dienste und Anwendungen sind nicht mehr nur Gegenstand von Forschung und Entwicklung, sondern werden derzeit schrittweise zur Anwendung gebracht. In Europa wird die Einführung solcher Dienste z. B. in diversen durch die C-ROADS-Plattform konzertierten nationalen Piloten vorangetrieben [29]. Ebenso wie konventionelle kollektive Verkehrsbeeinflussungssysteme können sie zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit und zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses beitragen [28]. In entsprechend ausgestatteten Fahrzeugen können relevante Informationen, Warnungen und Fahrempfehlungen aus empfangenen Nachrichten extrahiert und mithilfe einer geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstelle an die Fahrzeugführenden ausgegeben werden. Alternativ ist auch denkbar, dass empfangene Informationen in automatisierten Fahrfunktionen berücksichtigt werden, z. B. indem Geschwindigkeitsempfehlungen in die automatisierte Längsführung einfließen [98]. Für einige Anwendungen vernetzten Fahrens genügt eine direkte Kommunikation zwischen Fahrzeugen,

andere basieren auf einer Informationsbereitstellung durch eine Verkehrsmanagementzentrale oder ein vergleichbares Hintergrundsystem anderer Diensteanbieter. Solche Dienste ermöglichen im Vergleich zur konventionellen Verkehrsbeeinflussung u. a. eine gezieltere, im räumlichen und zeitlichen Kontext differenziertere und auf bestimmte Zielgruppen abstellbare Information und Beeinflussung von Fahrzeugführenden. Gleichzeitig bietet eine räumlich durchgehende Verkehrserfassung aus fahrzeuggenerierten Daten erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Situationserkennung [141].

Bereits heute verfügen viele Neufahrzeuge über eine Mobilfunkkonnektivität, die es ermöglicht, verkehrsrelevante Informationen aus einem entfernten Hintergrundsystem im Fahrzeug darzustellen. Darüber hinaus wurde der Kommunikationsstandard IEEE 802.11p (auch ITS-G5) zur direkten Nahbereichskommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander sowie mit streckenseitigen Kommunikationsstationen etabliert [58]. Als konkurrierende Übertragungstechnologien werden auch Cellular Vehicle to Everything (C-V2X) [1] sowie der Mobilfunkstandard 5G zur Verfügung stehen.

Da aufgrund typischer Lebenszyklen von Kraftfahrzeugen die Marktdurchdringung vernetzter Fahrzeuge nur allmählich zunehmen wird, werden kollektive Verkehrsbeeinflussungsanlagen und auch SBA weiterhin benötigt. Durch Fahrzeugvernetzung entstehen jedoch Potenziale zur Weiterentwicklung konventioneller SBA, die von einer Einbeziehung fahrzeuggenerierter, räumlich durchgehender Daten bis hin zu einer räumlich durchgehenden Beeinflussung auch zwischen bzw. unabhängig von ortsfesten Schilderbrücken reicht (virtuelle SBA). Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0522/2014/IRB „Steuerungsstrategien für Verkehrsbeeinflussungsanlagen im Kontext von C2I-Kommunikation“ wurden Potenziale und Anwendungsszenarien der Einbindung vernetzten Fahrens in die Systemarchitektur kollektiver SBA skizziert und Handlungsempfehlungen für eine Umsetzung gegeben [141]. Einerseits zeigt die Untersuchung, dass Verfahren der Datenaufbereitung, Situationserkennung und Maßnahmenauswahl durch Integration fahrzeuggenerierter, räumlich durchgehender Verkehrsdaten und Ereignismeldungen wesentlich komplexer werden. Auf der anderen Seite werden auch die infrastrukturseitig bereitgestellten Informationen differenzierter. Wichtig ist in diesem Kontext auch, dass kollektiv und individuell (im Fahrzeug) wirkende Maßnahmen und Informationen aufeinander abgestimmt werden. Es ist zu erwarten, dass hierdurch künftig auch erhöhte Anforderungen an ein Qualitätsmanagement eines solchen kooperativen Verkehrsbeeinflussungssystems zu stellen sind.

2.1.4 Ansätze zur Bewertung, Qualitätssicherung und Optimierung

Wirksamkeit und Nutzen von SBA hinsichtlich der in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen verkehrlichen Ziele wurden bereits umfassend untersucht [76], wenngleich noch nicht alle Wirkpotenziale erfasst und erschöpfend analysiert worden sind [87]. Es wurden diverse Ex-Post-Bewertungen einzelner SBA durchgeführt, um nach Inbetriebnahme ihre Wirksamkeit nachzuweisen oder die Zweckmäßigkeit der gewählten Verfahrensparameter von Datenaufbereitung, Situationserkennung und Maßnahmenauswahl zu bestätigen. Darüber hinaus wurden Wirkungen, Wirksamkeit und Nutzen von Maßnahmen der SBA-Steuerung auch über mehrere SBA bewertet, um generelle Aussagen zu Nutzenpotenzialen von SBA abzuleiten, die u. a. eine Kosten-Nutzen-Abschätzung für neue Anlagen unterstützen. So untersuchten und quantifizierten u. a. Siegener et al. (2000) [146] den Einfluss von SBA auf das Unfallgeschehen. Steinhoff et al. (2002) [149], Pischner et al. (2003) [124], Kappich et al. (2010) [94] und weitere Studien untersuchten auch Potenziale von SBA zur Vermeidung von Verkehrszusammenbrüchen bei dichtem Verkehr (präventive SBA-Maßnahmen). Eine umfassende Beschreibung der wesentlichen Erkenntnisse aus den vorgenannten und einigen weiteren Studien zu Wirkungen, Wirksamkeit und Nutzenpotenzia-

len von SBA wird in Hilgers et al. (2020) [87] gegeben⁹.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 herausgestellt wurde, kann die automatisierte Steuerung von SBA durch eine große Zahl an Parametern beeinflusst werden. Diese Parameter werden im Rahmen der Inbetriebnahme versorgt und im Rahmen eines Probebetriebs überprüft. Jedoch können sich Verkehrszusammensetzung, Fahrverhalten und Eigenschaften des Fahrzeugkollektivs (z. B. Motorisierung, Ausstattung mit Fahrerassistenzsystemen) über die Zeit ändern, sodass eine regelmäßige Überprüfung und ggf. Nachführung der Parameter sinnvoll ist. Einen Ansatz zur Optimierung von Schwellenwerten der Stauwarnung und der Geschwindigkeitsharmonisierung wird z. B. in Denaes et al. (2009a) [30] vorgestellt.

Mit Einführung von Qualitätsmanagementsystemen in einigen Verkehrs- und Betriebszentralen [96] [62] gewinnt die laufende Qualitätssicherung der SBA-Steuerung weiter an Bedeutung. Diese Qualitätssicherung umfasst eine Bewertung der Qualität der Eingangsdaten, der Güte der Situationserkennung sowie auch der Wirksamkeit und Befolgung von SBA-Maßnahmen [140]. Zur Unterstützung dieser Aufgaben wurden verschiedene Werkzeuge und Verfahren entwickelt. Einen Überblick liefern der Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.0464/2010/IGB „Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen“ [140] sowie die Hinweise für das Qualitätsmanagement in der Verkehrsbeeinflussung [62] der FGSV. Werkzeuge zur Online-Bewertung von Wirksamkeit und Befolgung von SBA wurden z. B. in Steinhoff (2003) [150] oder in Kappich et al. (2010) [94] vorgeschlagen. Der Einsatz derartiger Qualitätswerkzeuge erfordert unterwiesenes Fachpersonal zur Interpretation der visualisierten Qualitätsparameter und zur Ableitung geeigneter Verbesserungsmaßnahmen. Heutige Formen der Qualitätssicherung sowohl der Verkehrsbeeinflussung als auch der zugrunde liegenden Datenerfassung berücksichtigen bislang nur unzureichend bestimmte Einflussfaktoren wie Witterung oder Verkehrszusammensetzung, die problemrelevant sein können. Vielmehr findet eine über verschiedene Situationskontexte aggregierte Bewertung innerhalb eines definierten Zeitraums statt. Vor allem aber wird nicht oder nur eingeschränkt berücksichtigt, dass sich verschiedene Maßnahmen der SBA-Steuerung durch Zusammenführung verträglicher Anzeigehalte überlagern können.

Die bisher genannten Studien sowie auch die Werkzeuge zur laufenden Qualitätsbewertung nutzten durch die betrachteten SBA aufgezeichnete Verkehrsdaten, Wetter- und Umfelddaten sowie Anzeigezustände, um SBA-Maßnahmen zu bewerten. Teils wurden auch Einzelfahrzeugdaten verwendet, um das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten differenzierter bewerten zu können. Insbesondere bei den früheren Untersuchungen standen diese Einzelfahrzeugdaten allerdings oft nur in geringem Umfang zur Verfügung, da sie meist mit entsprechendem Aufwand vor Ort in einer Streckenstation abgegriffen werden müssen. Dennoch gewinnt eine durch Einzelfahrzeugdaten mögliche Berechnung von Ersatzkenngrößen der Verkehrssicherheit (vgl. Abschnitt 2.2.2) an Bedeutung: Eine Bewertung des Unfallgeschehens erfordert lange Untersuchungszeiträume, da Unfälle seltene Ereignisse sind. Die Analyse kritischer Situationen (Konflikte) mithilfe von Ersatzkenngrößen der Verkehrssicherheit ist jedoch in kürzeren Zeiträumen möglich [90], was die Zuordnung einer sicherheitsbezogenen Wirkung zu einer bestimmten SBA-Maßnahme überhaupt erst ermöglicht. In der laufenden Qualitätssicherung von SBA werden Ersatzkenngrößen der Verkehrssicherheit bislang jedoch nach Kenntnis des Autors nicht eingesetzt.

⁹ Diese Beschreibung von Studien zu Wirkungen und Wirksamkeit von SBA entstand im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2. Sie wurde federführend durch das Ingenieurbüro Schwietering (Aachen) unter Mitwirkung des Autors erarbeitet.

2.1.5 Simulation streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung

Maßnahmen der Qualitätsverbesserung der SBA-Steuerung und der zugrunde liegenden Situationserkennung, etwa eine Parameteranpassung oder -optimierung, bedürfen einer Evaluierung. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Maßnahme tatsächlich eine Verbesserung bewirkt und dass keine negativen Auswirkungen auftreten. Werden hierzu ausschließlich aufgezeichnete Daten einer SBA verwendet, erfordert diese Evaluierung, dass die Verbesserungsmaßnahme zuvor umgesetzt für eine gewisse Zeit verkehrswirksam erprobt wird. Gleiches gilt auch, wenn neuartige SBA-Maßnahmen erprobt werden sollen. Die verkehrswirksame Evaluierung hat drei wesentliche Nachteile:

- Eine Bewertung erfordert ausreichend lange Zeiträume, in denen die Verbesserungsmaßnahme ihre verkehrliche Wirkung entfalten kann. Hierdurch kann nur eine begrenzte Anzahl an Varianten (z. B. alternative Parametersätze) untersucht werden, oftmals nur eine.
- Es muss sichergestellt werden, dass im Bewertungszeitraum und im Vergleichszeitraum vor Umsetzung der Maßnahme ähnliche äußere Rahmenbedingungen vorherrschten. Einflüsse z. B. durch Arbeitsstellen längerer Dauer im Umfeld des betrachteten Streckenabschnitts sowie Änderungen der Verkehrsnachfrage und -zusammensetzung (etwa durch saisonal unterschiedliche Ausflugsverkehre) sind weitestgehend zu vermeiden; dies ist jedoch in der Praxis nicht immer möglich.
- Treten in der Erprobungsphase negative Auswirkungen auf, sind diese u. U. für Verkehrsteilnehmer wahrnehmbar und könnten zu einer verringerten Akzeptanz von SBA-Maßnahmen beitragen.

Vor diesem Hintergrund wäre eine simulationsbasierte Evaluierung besonders dann vorteilhaft, wenn negative Nebenwirkungen einer Verbesserungsmaßnahme nicht ausgeschlossen werden können, wenn eine größere Zahl an Varianten gegenübergestellt werden soll oder wenn die Umsetzung einer Verbesserungsmaßnahme mit großem Aufwand verbunden wäre.

In verschiedenen Untersuchungen wurde mikroskopische Verkehrsflusssimulation (vgl. Abschnitt 2.2.3) genutzt, um Wirkungen streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung zu untersuchen [2] [104] [82] [88] [75] [80] [166] [77] [78] [162]. Die meisten Untersuchungen beschränken sich auf die Modellierung der Einflüsse einer Geschwindigkeitsbeeinflussung. Hierbei werden entweder feste Annahmen zur Befolgung zulässiger Höchstgeschwindigkeiten getroffen (z. B. in Grumert et al. (2018) [78]), oder es werden Wunschgeschwindigkeitsverteilungen für jede Stufe der Geschwindigkeitsvorgabe anhand vorhandener Kalibrierdaten bestimmt¹⁰ (z. B. in Weyland et al. (2019) [162]).

In einigen Untersuchungen, z. B. von Grumert et al. (2018) [78], wird eine wechselnde Geschwindigkeitsbeschränkung vereinfachend durch Anpassen der Eigenschaften eines Straßenabschnitts umgesetzt. In ähnlicher Weise werden Überholverbote für Lkw oftmals durch Fahrstreifensperrungen für diese Fahrzeugart berücksichtigt [162] [87]. Dies ist in kollektiven Verkehrsbeeinflussungssystemen insofern ungenau, als dass dadurch auch Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden könnten, die bereits in den beeinflussten Streckenabschnitt eingefahren sind, als die entsprechende Maßnahme noch nicht wirksam war. In der Realität können Verkehrsteilnehmer Maßnahmen nur bei Passieren eines Anzeigequerschnitts wahrnehmen und ihr Verhalten entsprechend anpassen.

Einflüsse von Gefahrenwarnungen im Zuge der Streckenbeeinflussung auf das Fahrverhalten wurden in Simulationsuntersuchungen nach Kenntnis des Autors bislang nicht berücksichtigt. Solche Einflüsse könnten z. B. in einer erhöhten Aufmerksamkeit oder einem angepassten Geschwindigkeits- und

¹⁰ Methoden hierzu und ihre Einsatzgrenzen werden in Abschnitt 2.2.4 diskutiert.

Abstandsverhalten bestehen, was jedoch kaum untersucht worden ist.

Die bisher bekannten Ansätze zur Modellierung und Simulation streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung haben gemeinsam, dass Einflüsse der Anzeigezustände mit nur grober Differenzierung abgebildet werden. Ein wesentlicher Grund dafür ist der hohe Aufwand zur Kalibrierung der Fahrverhaltensmodelle, durch den die Anzahl zu unterscheidender Szenarien begrenzt wird (vgl. auch Abschnitt 2.2.5). Vielfach werden bewusst synthetische Szenarien verwendet, in denen Störeinflüsse des realen Verkehrs ausgeblendet werden und sich Unterschiede z. B. zwischen zu vergleichenden Steuerverfahren deutlicher abheben. Nach Kenntnisstand des Autors wird das Mittel der Verkehrsflusssimulation derzeit noch nicht zur laufenden Qualitätssicherung von SBA eingesetzt. Gerade in diesem Anwendungsfall wäre die differenzierte Berücksichtigung vielfältiger Wirkeinflüsse erforderlich.

2.1.6 Verbleibende Herausforderungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Funktions- und Wirkungsweise von SBA beschrieben. Dabei wurde herausgestellt, dass die automatisierte Steuerung dieser Anlagen selbst bei Verwendung einfacher, schwellenwertbasierter Verfahren komplex ist, insbesondere weil das Systemverhalten durch eine Vielzahl von Parametern an die jeweiligen baulichen und verkehrlichen Gegebenheiten angepasst werden kann. Diese Komplexität stellt eine Herausforderung für die Qualitätssicherung (QS) im laufenden Betrieb dar. Für QS-Maßnahmen muss abgeschätzt werden, ob diese tatsächlich eine Verbesserung mit sich bringen. Hierzu müssen spezifische Wirkungen einzelner Veränderungen an einer SBA-Steuerung bewertet werden. Werden die Auswirkungen einer QS-Maßnahme im realen Verkehrsgeschehen untersucht, ist es schwierig, vergleichbare Rahmenbedingungen in den betrachteten Szenarien (hier: vor vs. nach einer QS-Maßnahme) sicherzustellen. Die Vergleichbarkeit könnte z. B. durch Arbeitsstellen längerer Dauer (auch stromauf- oder stromabwärts des Untersuchungsbereichs), durch saisonale Einflüsse auf das Fahrer-/Fahrzeugkollektiv oder durch jahreszeitbedingt abweichende Witterungsverhältnisse beeinträchtigt sein. Außerdem treten tages- und tageszeitspezifische Schwankungen von Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung sowie anderen äußeren Rahmenbedingungen auf. Um dennoch die Auswirkungen einer bestimmten QS-Maßnahme mit hinreichendem Signifikanzniveau beurteilen zu können, sind lange Untersuchungszeiträume erforderlich.

Oft ist eine A-priori-Abschätzung der Wirkungen einer QS-Maßnahme sinnvoll, etwa mittels Verkehrsflusssimulation. Potenzielle negative Wirkungen der QS-Maßnahme könnten so bereits im Vorfeld ohne Einfluss auf das reale Verkehrsgeschehen aufgedeckt werden. Durch Verkehrsflusssimulation könnten außerdem auch Vorteile und Wirkungen neuer Steuerverfahren vorab analysiert und etwaige Probleme ohne Einflussnahme auf den Verkehr in die Entwicklung zurückgespielt werden. Während mikroskopische Verkehrsflusssimulation zur Abschätzung der Nutzenpotenziale von anderen Arten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen sowie auch von Diensten und Anwendungen vernetzten Fahrens bereits breite Anwendung findet, wird dieses Mittel derzeit eher selten im Zusammenhang mit SBA eingesetzt. Eine Berücksichtigung der für Fahrzeugführende wahrnehmbaren Gesamtsituation, die neben der zu untersuchenden Verkehrsbeeinflussung auch weitere verkehrliche, bauliche und äußere Randbedingungen umfasst, erfolgt bislang nur in grober Differenzierung. Dabei wird entweder ein gewisses Spektrum an Situationen in einem Szenario zusammengefasst, oder es werden nur ausgewählte Situationen betrachtet, die lediglich einen Teil des in der Realität zu beobachtenden Verkehrsgeschehens abdecken.

2.2 Fahrverhalten: Beschreibung, Modellierung und Simulation

Die detaillierte Modellierung des Fahrverhaltens bildet einen Schwerpunkt dieser Arbeit. Daher werden zunächst bisherige Ansätze zur Systematisierung sowie zur quantitativen Beschreibung von Fahrverhalten und Fahrentscheidungen vorgestellt und diskutiert. Auf dieser Grundlage erfolgt in Abschnitt 4.1.3 eine Definition des Begriffs Fahrverhalten und eine Auswahl der im Rahmen dieser Arbeit relevanten Verhaltensmerkmale. Anschließend wird ein Überblick über etablierte Fahrverhaltensmodelle für die mikroskopische Verkehrsflussimulation gegeben, da vermutet wurde, dass diese als Grundlage für eine kontextdifferenzierte Nachbildung des Fahrverhaltens dienen können (vgl. Abschnitt 1.2). Darauf aufbauend werden Prozesse und Verfahren der Kalibrierung solcher Fahrverhaltensmodelle beschrieben und verbleibende Herausforderungen im Kontext dieser Arbeit aufgezeigt.

2.2.1 Fahrverhalten, Fahraufgabe und Fahrentscheidungsebenen

Für den Begriff *Fahrverhalten* konnte in der Literatur keine allgemein akzeptierte Definition gefunden werden. Vielfach wird auf eine explizite Einführung des Begriffs verzichtet. Ähnliches gilt auch für den Begriff *Verhalten*: selbst im Bereich der Psychologie, in welcher dieser Begriff eine zentrale Rolle spielt, gibt es keinen Konsens zur Begriffsdefinition [12].

Eine Betrachtung des Fahrverhaltens und des hierdurch bedingten Verkehrsgeschehens kann in verschiedenen Skalen erfolgen. In der Verkehrsflussmodellierung und -simulation werden u. a. folgende Skalen unterschieden [59]:

makroskopisch: Das Verkehrsgeschehen auf einem Streckenabschnitt wird in aggregierter Form beschrieben, d. h. einzelne Fahrzeuge bzw. Fahrzeugführende werden nicht abgebildet.

mikroskopisch: Es werden Verhalten und Eigenschaften individueller Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) beschrieben.

submikroskopisch: Es werden Handlungen der oder des Fahrzeugführenden oder auch Zustände und Systemverhalten einzelner Teilsysteme eines Fahrzeugs differenziert beschrieben.

Bei der Entwicklung, Erprobung und Simulation von Fahrzeugsystemen sowie der Bewertung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ist zumeist eine Betrachtung auf submikroskopischer Ebene erforderlich. Die Betrachtung beschränkt sich dabei i. d. R. auf ein einzelnes Fahrzeug (Ego-Fahrzeug) und seine unmittelbare Umgebung. Soll jedoch das individuelle Fahrverhalten mehrerer Verkehrsteilnehmer in einem größeren räumlichen Kontext abgebildet werden, eignet sich eine mikroskopische Betrachtung, in der Fahrzeugführende und Fahrzeuge jeweils zu einer Einheit (FFE) zusammengefasst werden. Bei mikroskopischer Betrachtung, die in dieser Arbeit im Vordergrund steht¹¹, wird der Begriff Fahrverhalten zumeist verwendet, um von außen beobachtbare oder messbare Zustände und Zustandsänderungen von FFE oder ihre Verteilung über das FFE-Kollektiv zu beschreiben. Diese Zustände und Zustandsänderungen sind das Ergebnis von Fahrentscheidungen, die im Rahmen der Ausführung der Fahraufgabe getroffen werden¹².

¹¹ Eine Begründung hierzu wird in Abschnitt 4.1.1 gegeben. ¹² Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Fahrverhalten entsprechend dieser Sichtweise verwendet (vgl. Definitionen 4.2 und 4.3 in Abschnitt 4.1.3).

Die *Fahraufgabe* umfasst z. B. nach Semrau (2018) [145] (vgl. dort Abschnitt 2.2)

- die Wahrnehmung von Objekten in der Fahrzeugumgebung einschließlich ihrer Eigenschaften,
- die Bewertung der wahrgenommenen Situation,
- die Handlungsplanung sowie
- die Ableitung und Ausführung von Fahrentscheidungen.

Fahrentscheidungen betreffen vorrangig die Routenwahl sowie die Längs- und Querverführung eines Fahrzeugs, aber auch die Kooperation und Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern (z. B. auch mittels des Fahrtrichtungsanzeigers).

Eine Beschreibung und Bewertung von Fahrentscheidungen wird für vielfältige Fragestellungen der Verkehrspsychologie, der Entwicklung von Fahrerassistenzfunktionen sowie der Verkehrsmodellierung benötigt. Rasmussen (1983) [129]¹³ unterscheidet z. B. zwischen wissens-, regel- und fertigkeitstbasiertem Verhalten. Fertigkeitstbasiertes Verhalten umfasst eingetübte Handlungen, die als Reiz-Reaktions-Mechanismus ohne bewusstes Handeln stattfinden, während wissensbasiertes Verhalten bewusste Abwägungsprozesse zwischen verschiedenen Handlungsalternativen in bisher nicht erlebten bzw. erlernten Situationen umfasst. Unter anderem Donges (1982) [47] und Michon (1985) [108]¹³ gliedern Fahrentscheidungen nach räumlichem und zeitlichem Betrachtungshorizont in drei Ebenen, sodass lang-, mittel- und kurzfristige Intentionen und Handlungen unterschieden werden können (vgl. *Abbildung 3*). Die Bezeichnung, Definition und Abgrenzung solcher räumlich-zeitlicher Fahrentscheidungsebenen erfolgt in der Literatur jedoch nicht einheitlich [87]. In den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflussimulation [59]¹⁴ der FGSV wird die folgende Abgrenzung verwendet:

Strategische Ebene: Auf dieser Ebene werden Entscheidungen vor allem zur Verkehrsmittel- und Routenwahl getroffen (Wirkbereich: gesamte Fahrt [59]). Hierdurch ergeben sich Randbedingungen für die Durchführung der Fahrt (z. B. Zeitdruck, welcher die Geschwindigkeitswahl und Risikobereitschaft beeinflusst) [108].

Taktische Ebene: Diese Ebene umfasst manöverübergreifende Fahrentscheidungen über einen gewissen räumlichen und zeitlichen Horizont, was die Grundlage u. a. für ein vorausschauendes Fahrverhalten bildet (Wirkbereich: 100 bis 1000 m bzw. „Sekunden bis Minuten“ [59]). Hierzu gehören z. B. Entscheidungen zur Fahrstreifenwahl sowie zur Wunschgeschwindigkeit inkl. hierdurch hervorgerufener Überholwünsche, aber auch die Kooperations- oder Risikobereitschaft [87].

Operationale Ebene: Auf dieser Ebene finden einzelne Fahrmanöver statt, z. B. Beschleunigen, Verzögern oder das Wechseln des Fahrstreifens (Wirkbereich: unmittelbare Fahrzeugumgebung, wenige Sekunden [59]).

2.2.2 Quantitative Beschreibung des Fahrverhaltens

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Kenngrößen vorgestellt, mit denen bestimmte Aspekte des Fahrverhaltens quantitativ beschrieben werden können. Einen wesentlichen Beitrag hierzu leistete eine Recherche zu Bewertungsgrößen, die in bisherigen Untersuchungen zu Wirkungen und Wirksamkeit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung verwendet wurden (vgl. Abschnitt 2.1.4) sowie eine darauf aufbauende Auswahl an Kenngrößen zur Beurteilung der Wirkungen automatisierten Fahrens im Kon-

¹³ wiedergegeben in Semrau (2018) [145] ¹⁴ wiedergegeben u. a. in Hilgers et al. (2020) [87]

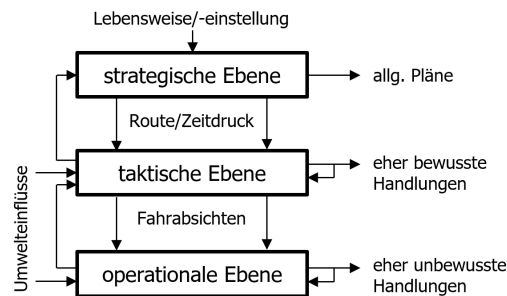


Abbildung 3: Räumlich-zeitliche Fahrentscheidungsebenen in Anlehnung an Janssen (1979) [91] (wiedergegeben in Michon (1985) [108] sowie Panou et al. (2007) [121], hier: modifizierte Darstellung nach Hilgers et al. (2020) [87])

text von SBA, welche im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB¹⁵ durchgeführt wurde (vgl. Hilgers et al. (2020) [87]).

Im Vordergrund standen solche Kenngrößen, die sich mittels lokaler Verkehrsdatenerfassung gewinnen lassen und die somit gleichermaßen für reale Streckenabschnitte als auch für ihre digitalen Abbilder in der Simulation bestimmt werden können. Gleichwohl soll vor allem individuelles Verhalten und seine Verteilung über das FFE-Kollektiv, weniger jedoch makroskopische Zustände eines Streckenabschnitts oder -querschnitts beschrieben werden¹⁶. Auf Kenngrößen, die sich ausschließlich aus fahrzeuggenerierten Daten bestimmen lassen, wird jedoch hier nicht vertieft eingegangen, da für diese Arbeit keine solchen Daten zur Verfügung standen (vgl. Abschnitt 3.2).

Ausgangspunkt der nachfolgenden Ausführungen bildet die Annahme, dass für jede FFE n folgende Informationen aus einer lokalen und einzelfahrzeugbezogenen Erfassung an einem bestimmten Standort und auf einem bestimmten Fahrstreifen zur Verfügung stehen:¹⁷

t_n	Zeitpunkt der Erfassung
c_n	Fahrzeugklasse (z. B. Pkw- oder Lkw-ähnlich)
v_n	individuelle Fahrgeschwindigkeit
$\Delta t_{\text{Bel},n}$	Belegzeit
h_n	Nettozeitlücke zu vorausfahrender FFE
l_n	Fahrzeuglänge

Tabelle 2 liefert eine Übersicht über wichtige Kenngrößen zur Beschreibung des Geschwindigkeits-, Fahrzeugfolge-, und Fahrstreifenwahlverhaltens, auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

Geschwindigkeitsverhalten

Informationen zum Geschwindigkeitsverhalten lassen sich in erster Linie aus lokal erfassten, individuellen Fahrgeschwindigkeiten und ihrer Verteilung ableiten. Fahrgeschwindigkeiten und ihre Verteilung

¹⁵ Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2. ¹⁶ Es ist zu beachten, dass dementsprechend zur Berechnung einiger Kenngrößen lokale Einzelfahrzeugdaten erforderlich sind, die in vielen SBA nicht unmittelbar zur Verfügung stehen und die dann gesondert aufgezeichnet werden müssen. ¹⁷ Datenstruktur Telegramm Typ 63 „Kfz-Einzelfahrzeugdaten“ der TLS [21], zur Vereinheitlichung teils abweichende Symbole.

Verhaltensaspekt	individuelles Fahrverhalten	Verteilung
Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> Fahrgeschwindigkeit Befolgungsgrad (zul. Höchstgeschwindigkeit) 	jeweils <ul style="list-style-type: none"> Mittelwert Standardabweichung/Varianz (ggf. differenziert z. B. nach Fahrzeugklasse)
Fahrzeugfolge, Abstand	<ul style="list-style-type: none"> Nettozeitlücke Geschwindigkeitsdifferenz Auffahrzeit (Time to Collision, TTC) zu vorausfahrender FFE 	jeweils <ul style="list-style-type: none"> Mittelwert Anteil kritischer Werte
	<ul style="list-style-type: none"> Individual Braking Time Risk (IBTR) Compensated IBTR (CIBTR) Platoon Braking Time Risk (PBTR) Compensated PBTR (CPBTR) zu vorausfahrender/-n FFE 	jeweils <ul style="list-style-type: none"> Mittelwert Mittelwert/Anteil Werte > 0 Anteil kritischer Werte
Fahrstreifenwahl	genutzter Fahrstreifen	mittlere Verkehrsstärkeanteile je Fahrstreifen

Tabelle 2: Kenngrößen zur Beschreibung des Fahrverhaltens

werden dabei oft auch differenziert nach Fahrzeugklasse oder Fahrstreifen betrachtet. Werden Fahrgeschwindigkeiten ins Verhältnis zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit gesetzt, kann der Grad ihrer Befolgung ermittelt werden.

Bei der Interpretation von Fahrgeschwindigkeiten ist zu beachten, dass diese durch vorausfahrende Fahrzeuge beeinflusst sein können und somit nicht unbedingt den angestrebten Wunschgeschwindigkeiten entsprechen. Sind Abstand bzw. Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug gering, kann die Wunschgeschwindigkeit möglicherweise oberhalb der aktuellen Fahrgeschwindigkeit liegen; lediglich bei größeren Abständen bzw. Zeitlücken kann unterstellt werden, dass die Fahrgeschwindigkeit bereits der Wunschgeschwindigkeit entspricht [68]. Daher kann es sinnvoll sein, Fahrgeschwindigkeiten beeinflusster und unbeeinflusster Fahrzeuge und ihre Verteilungen differenziert zu erfassen.

Die *mittlere Fahrgeschwindigkeit* kann zur Bewertung der Verkehrsqualität verwendet werden: Höhere mittlere Fahrgeschwindigkeiten können z. B. auf eine geringere Häufigkeit und Intensität von Verkehrszusammenbrüchen hindeuten [124] [87].

Der Verlauf der Fahrgeschwindigkeit während einer Fahrt liefert Rückschlüsse auf das Brems- und Beschleunigungsverhalten und somit indirekt auch auf den Fahrstil (risikobereite vs. vorausschauende und defensive Fahrweise). Gleichzeitig deuten häufige Bremsmanöver auf einen unsteten Verkehrsfluss hin, der zu einem Verkehrszusammenbruch oder zum Entstehen von Stauwellen führen kann. Informationen zum Brems- und Beschleunigungsverhalten lassen sich mittels konventioneller lokaler Verkehrsdatenerfassung nicht direkt ermitteln, jedoch können *Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Fahrzeugen* erfasst werden: Treten diese bei dichtem Verkehr häufig oder stark ausgeprägt auf, kann hieraus ebenfalls eine erhöhte Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs abgeleitet werden. In Untersuchungen zu staupräventiven Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung wurde daher vielfach die *Varianz oder Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten* herangezogen [149] [94] [131] [87]. Daneben existieren verschiedene Ansätze, eine Wahrscheinlichkeit des Verkehrszusammenbruchs [138] oder umgekehrt einen Indikator der Zuverlässigkeit des Verkehrs [57] zu bestimmen. Solche Indikatoren lassen jedoch keinen Rückschluss auf individuelles Fahrverhalten zu und werden daher hier nicht näher betrachtet.

Fahrzeugfolge- und Abstandsverhalten

Bei Annäherung an ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug sowie in Fahrzeugfolgesituationen werden Geschwindigkeit und Abstand so angepasst, dass das Risiko eines Auffahrunfalls als hinreichend gering angenommen wird. Anhand des Fahrzeugfolgeverhaltens werden daher auch Rückschlüsse auf die Verkehrssicherheit gezogen. Die Risikoeinschätzung unterscheidet sich zwischen individuellen Fahrzeugführern.

Maßgeblich zur Bewertung der Verkehrssicherheit ist zunächst das Unfallgeschehen, das in Form polizeilich erfasster Unfallmeldungen und Unfallstatistiken zur Verfügung steht. Daher wurden in einigen Untersuchungen die Auswirkungen von SBA auf Unfallhäufigkeit und -schwere betrachtet. Da jedoch Unfälle seltene Ereignisse sind, sind lange Betrachtungszeiträume notwendig, um Auswirkungen bestimmter Veränderungen am Verkehrssystem (einschließlich der SBA-Steuerung) erfassen zu können. Um kurzfristig sicherheitsbezogene Wirkungen von Verkehrsbeeinflussung oder Fahrerassistenz bewerten zu können, muss ersatzweise auf Kenngrößen zurückgegriffen werden, die sich fahrzeug- oder infrastrukturseitig erfassen lassen (wobei letzteres hier im Vordergrund steht, siehe oben). Solche sicherheitsbezogenen Ersatzkenngrößen werden auch als *Surrogate Safety Measures (SSM)* bezeichnet. SSM zur Bewertung des Fahrzeugfolgeverhaltens innerhalb eines Fahrstreifens basieren auf Abständen und teils auch Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge. Einige dieser Größen werden nachfolgend vorgestellt.

Der Abstand zweier aufeinanderfolgender FFE kann zeitlich oder räumlich beschrieben werden. Die Zeitlücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen ist der zeitliche Abstand, mit dem diese einen bestimmten Querschnitt passieren. Der Zeitabstand zwischen Passieren des Fahrzeughecks der vorausfahrenden FFE und der Fahrzeugfront der nachfolgenden FFE wird als *Nettozeitlücke* bezeichnet. Sind t_{n-1} und t_n die Zeitpunkte, zu denen die Fahrzeugfront der vorausfahrenden FFE $n-1$ bzw. der folgenden FFE n erfasst wurden, berechnet sich die Nettozeitlücke wie folgt [94]¹⁸:

$$h_n = t_n - t_{n-1} - \Delta t_{\text{Bel},n-1} \quad (1)$$

Zur Bewertung der Sicherheit des Abstandsverhaltens werden in verschiedenen Untersuchungen Häufigkeiten bzw. Anteile besonders kurzer, d. h. als kritisch eingestufte Zeitlücken betrachtet [149] [150] [90]. Die Grenzwerte zur Unterscheidung zwischen kritischen und nicht kritischen Zeitlücken wurden dabei jedoch sehr unterschiedlich gewählt. Hoffmann (2013) [90] bezeichnet solche Zeitlücken als kritisch, die unterhalb der Reaktionszeit der bzw. des Fahrzeugführern liegen.

In Hayward (1972) [86]¹⁹ wurde mit der *Auffahrzeit* (engl. *Time to Collision, TTC*) eine weitere Kenngröße zur Bewertung des Fahrzeugfolgeverhaltens eingeführt. Nähert sich eine FFE an eine vorausfahrende, langsamere FFE an, gibt diese Kenngröße die Zeitspanne an, nach der es zu einem Auffahrunfall kommt, wenn beide Fahrzeuge ihre gegenwärtige Geschwindigkeit beibehalten. Die TTC einer FFE n bezogen auf die vorausfahrende FFE $n-1$ berechnet sich wie folgt [123] [87]:

$$ttc_n = \frac{h_n \cdot v_n}{v_n - v_{n-1}} \quad (2)$$

¹⁸ Hierbei ist $\Delta t_{\text{Bel},n-1}$ die Belegzeit des Erfassungsquerschnitts durch die vorausfahrende FFE $n-1$. Beziehen sich die Erfassungszeitpunkte t_{n-1} und t_n stattdessen auf das jeweilige Fahrzeugheck, muss statt der Belegzeit der vorausfahrenden FFE die der folgenden FFE abgezogen werden. ¹⁹ wiedergegeben u. a. in Bevrani und Chung (2011) [13] sowie Hoffmann (2013) [90]

Hierbei sind v_n und v_{n-1} die Fahrgeschwindigkeiten der FFE n bzw. $n - 1$ in Metern pro Sekunde. Bei $v_n \leq v_{n-1}$ wird die TTC nicht berechnet, da es bei gleichbleibenden Geschwindigkeiten nie zu einem Auffahrunfall kommen könnte. Ähnlich wie bei Zeitlücken können Häufigkeiten bzw. Anteile kurzer und somit als kritisch eingeschätzter TTC genutzt werden, um die Verkehrssicherheit zu bewerten. Auch hier werden in der Literatur unterschiedliche Schwellen zur Abgrenzung solcher kritischen Zustände verwendet.

Nettozeitlücken und TTC können sowohl infrastrukturseitig als auch mittels fahrzeugseitig gemessener Folgeabstände berechnet werden. Bei über einen Fahrtverlauf erfassten Nettozeitlücken und TTC kann neben der Häufigkeit auch die Expositionsdauer und -stärke kritischer Zustände erfasst werden [90]. Diese Bewertungsgrößen können jedoch mittels konventioneller infrastrukturseitiger Verkehrsdatenerfassung nicht bestimmt werden.

Ein Nachteil von TTC ist u. a., dass sie auch bei beliebig kurzen Zeitlücken kein Risiko anzeigen, solange das vorausfahrende Fahrzeug nicht langsamer als das Ego-Fahrzeug ist [158] [13]. Muss das vorausfahrende Fahrzeug unerwartet verzögern, kann dennoch ein erhebliches Risiko eines Auffahrunfalls bestehen. Dieses Risiko kann z. B. durch vier weitere Indikatoren abgebildet werden, die aufeinander aufbauen. Nachfolgend wird eine Beschreibung dieser Indikatoren aus Hilgers et al. (2020) [87] unter Angabe der jeweils zugrunde liegenden Quellen verkürzt wiedergegeben.

Das *Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR)* entspricht zunächst dem Risiko eines Auffahrunfalls, welches allein in einer einzelnen Fahrzeugfolgesituation zweier aufeinanderfolgender FFE n und $n - 1$ und somit ohne Berücksichtigung weiterer Fahrzeuge besteht. Für eine FFE n berechnet sich das CIBTR zu [113]:

$$cibtr_n = \log_2 \left(\frac{v_n}{|\gamma_{\max}| \cdot \kappa \cdot h_n} \right) \quad (3)$$

Der Parameter γ_{\max} entspricht der maximalen Verzögerung, die für die Verzögerung der vorausfahrenden FFE angenommen wird. Dieser Parameter wird in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand festgelegt; bei Nässe wird z. B. eine mäßigere maximale Verzögerung unterstellt als bei trockener Fahrbahn [123] [113]. Mithilfe des Faktors κ kann skaliert werden, welches Fahrzeugfolgeverhalten gerade noch als sicher ($cibtr_n = 0$) angesehen wird.

Das CIBTR kann negative und positive Werte annehmen; je höher der Wert, desto höher das Risiko. Demgegenüber nimmt das *Individual Braking Time Risk (IBTR)* für alle sicheren Zustände stets den Wert 0 an:

$$ibtr_n = \max(0, cibtr_n) \quad (4)$$

Unter der Annahme, dass sich das Risiko eines Auffahrunfalls innerhalb hinreichend dichter Pulks akkumuliert, wurde zusätzlich das *Platoon Braking Time Risk (PBTR)* definiert, das für eine FFE n rekursiv aus den einzelnen Fahrzeugfolgesituationen vorausfahrender FFE bestimmt wird [113] [13]:

$$pbtr_n = \begin{cases} 0 & ibtr_n = 0 \\ ibtr_n + pbtr_{n-1} & ibtr_n > 0 \end{cases} \quad (5)$$

Wie aus Gleichung 5 hervorgeht, wird die Akkumulierung des Risikos unterbrochen, sobald eine hinreichend große Lücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen auftritt ($ibtr_n = 0$).

De Mouzon et al. (2008) [113] schlägt darüber hinaus mit dem *Compensated Platoon Braking Time Risk (CPBTR)* einen weiteren Indikator vor, welcher analog zum PBTR berechnet wird, wobei jedoch anstelle des IBTR das CIBTR akkumuliert wird. Hierdurch wird berücksichtigt, dass eine unsichere Fahrzeugfolgesituation durch ein sichereres Verhalten nachfolgender Fahrzeuge kompensiert werden kann; durch negative CIBTR kann das akkumulierte Risiko auch abnehmen. Dabei gilt jedoch die Festlegung, dass das akkumulierte Risiko selbst nicht negativ werden kann. Das CPBTR berechnet sich wie folgt [113]:

$$cpbtr_n = \max(0, cibtr_n + cpbtr_{n-1}) \quad (6)$$

Uno et al. (2005) [158] entwickelten einen weiteren Indikator, den *Potential Index for Collision with Urgent Deceleration (PICUD)*. Dieser dient ähnlich den CIBTR und IBTR der Abschätzung des Risikos eines Auffahrunfalls bei starker Verzögerung des Vorfahrenden. Der Wert des Indikators entspricht dem Fahrzeugabstand, der nach vollständigem Halt beider Fahrzeuge erreicht wird; ist dieser ≤ 0 , wäre ein Auffahrunfall in dieser Situation unvermeidlich. Parameter hierbei sind ebenfalls die angenommene Verzögerung der vorausfahrenden FFE sowie zusätzlich die Reaktionszeit der folgenden FFE.

Fahrstreifenwahl und -wechsel

Fahrstreifenwechsel können mit konventioneller infrastrukturseitiger Sensorik nicht direkt erfasst werden. In einigen empirischen Studien konnten Anzahl und räumliche Ausdehnung von Fahrstreifenwechseln mittels Videoaufzeichnung und -auswertung [24] oder auch automatisierter Extraktion von Fahrzeugtrajektorien aus Videobildern [99] ermittelt werden, was jedoch mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist.

Eine Beschreibung des Fahrstreifenwahlverhaltens ist dagegen durch die Verkehrsstärkeanteile der einzelnen Fahrstreifen möglich [124] [94]. Auf diese Weise können Einflüsse hinsichtlich einer gleichmäßigeren Fahrstreifenauslastung oder aber Überlastungen einzelner Fahrstreifen erkannt werden. Nachteilig ist hierbei, dass die Verkehrsstärkeanteile zwischen Standorten mit unterschiedlicher Fahrstreifenanzahl nicht vergleichbar sind [76]. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit zusätzliche normierte Indikatoren hergeleitet, welche eine Beschreibung der Fahrstreifenauslastung unabhängig von der Anzahl verfügbarer Fahrstreifen ermöglichen (vgl. Abschnitt 4.1.3).

2.2.3 Fahrverhaltensmodelle

Eine Modellierung des Fahrverhaltens wird für unterschiedliche Zwecke benötigt. Bei der Erprobung von Fahrfunktionen oder Fahrerassistenzsystemen, die z. B. auf einer Früherkennung kritischer Fahrerzustände oder auf einer Vorhersage von Fahrerreaktionen oder -manövern aufbauen, steht das Verhalten eines einzelnen Fahrzeugs (bzw. der oder des jeweiligen Fahrzeugführenden) in Interaktion mit seiner unmittelbaren Umgebung im Vordergrund. Gegenstand dieser Arbeit ist jedoch die Nachbildung des Verhaltens mehrerer Verkehrsteilnehmer und ihrer Interaktion untereinander innerhalb eines größeren

Ausschnitts des Straßennetzes. Daher werden nachfolgend lediglich *mikroskopische* Fahrverhaltensmodelle berücksichtigt, in denen Fahrzeuge und Fahrzeugführende als eine Einheit (FFE) betrachtet werden (vgl. Abschnitt 2.2.1). Solche mikroskopischen Fahrverhaltensmodelle bilden die Grundlage für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Sie können hinsichtlich der Fahraufgabe differenziert werden in [87]

- Fahrzeugfolgemodelle (innerhalb eines Fahrstreifens) inkl. Geschwindigkeitswahl,
- Fahrstreifenwahl- und -wechselmodelle sowie
- Lückenakzeptanzmodelle für plangleiche Knotenpunkte.

Da in dieser Arbeit der Verkehr auf Autobahnen im Vordergrund steht, werden hier lediglich die ersten beiden Modellarten betrachtet.

Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB²⁰ wurde eine umfassende Recherche und Aufbereitung des Stands der Wissenschaft und Technik zu mikroskopischen Fahrverhaltensmodellen und Simulationssoftware durchgeführt, für welche der Autor federführend verantwortlich war. An dieser Stelle sollen die wesentlichen Ergebnisse überblicksartig dargestellt werden. Für eine eingehendere Beschreibung sei auf den Projektbericht [87] sowie auf die jeweils genannten ursprünglichen Veröffentlichungen verwiesen. Eine Übersicht und Beschreibung verschiedener Fahrverhaltensmodelle für die Verkehrsflusssimulation wird auch z. B. in Treiber und Kesting (2010) [156] oder in Detering (2011) [32] gegeben. Ausgewählte Modelle, die für diese Arbeit bedeutsam sind, werden in Anhang A detaillierter beschrieben.

Modelle für Geschwindigkeitswahl und Fahrzeugfolge

Fahrzeugfolgemodelle bestimmen, wie eine FFE innerhalb eines Fahrstreifens beschleunigt oder verzögert sowie ihren Abstand zu vorausfahrenden FFE anpasst. Dieses Abstandsverhalten wird durch modellspezifisch unterschiedliche Parameter beeinflusst, z. B. Wunschverzögerungen oder Mindestzeitlücken. Besteht kein Einfluss durch vorausfahrende FFE, erfolgt eine Annäherung an eine Wunschgeschwindigkeit, die sich aus der zulässigen Höchstgeschwindigkeit der Strecke (i. d. R. verbunden mit einem FFE-spezifischen Befolgungsgrad) sowie aus einer FFE-spezifischen Maximalgeschwindigkeit ergibt.

Im realen Verkehrsgeschehen sind erhebliche Verhaltensunterschiede zwischen individuellen FFE zu beobachten. Werden diese Einflüsse nicht oder nur unzureichend berücksichtigt, können Verkehrszusammenbrüche und die Ausbreitung von Stauwellen u. U. nicht realistisch nachgebildet werden. Daher werden FFE-spezifische Verhaltensparameter teils nicht als feste deterministische Werte angegeben, sondern als Verteilungsfunktionen über das FFE-Kollektiv (z. B. Mittelwert und Standardabweichung einer Normalverteilung). Beim Einsetzen einer FFE in das Simulationsnetz werden die Verhaltensparameter einer FFE zufällig gemäß dieser Verteilung bestimmt. Darüber hinaus wurden in einigen Modellen stochastische Einflüsse wie z. B. zufälliges Trödeln oder Wahrnehmungsfehler unmittelbar in die Verhaltensmodelle integriert. Eine umfassende Beschreibung und Diskussion zu Ansätzen, um derartige menschliche Faktoren in Fahrzeugfolgemodelle zu berücksichtigen, wird z. B. in Saifuzzaman und Zheng (2014) [135] gegeben.

²⁰ Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2.

Fahrzeugfolgemodelle können hinsichtlich der ihnen zugrunde liegenden Modellannahmen in folgende Kategorien eingeordnet werden [32] [87]:

- Stimulus-Response-Modelle
- Safety-Distance-Modelle (auch: Collision-Avoidance-Modelle)
- Psycho-physische Modelle (auch: Action-Point-Modelle)
- zelluläre Automaten

Stimulus-Response-Modelle beschreiben die Beschleunigung bzw. Verzögerung einer FFE (Response) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsdifferenz zur vorausfahrenden FFE (Stimulus) sowie einer (parametrierbaren) Empfindlichkeit [135]. Im Gegensatz zu den anderen Modellkategorien wird das Verhalten durch zeitkontinuierliche Modellgleichungen beschrieben [32]. Zu den Stimulus-Response-Modellen zählen [32] [87]

- die Modelle nach Reuschel (1950) und Pipes (1953),
- das Modell nach Chandler, Herman und Montroll (1958),
- das Modell nach Gazis, Herman und Rothery (1961) [64],
- das Optimal Velocity Model nach Bando et al. (1995) [10] sowie
- das Intelligent Driver Model nach Treiber et al. (2000) [155].

In *Safety-Distance-Modellen* wird die Beschleunigung bzw. Verzögerung so gewählt, dass ein sicherer Abstand zur vorausfahrenden FFE eingehalten wird. Ein Fahrzeugabstand gilt als sicher, sofern ein Auffahrunfall auch dann nicht eintreten kann, wenn das vorausfahrende Fahrzeug unvermittelt verzögert. Um diese Anforderung zu erfüllen, wird die hierbei anzunehmende Verzögerung der vorausfahrenden FFE einbezogen. Zu dieser Modellkategorie gehören insbesondere die Modelle nach Gipps (1981) [71] sowie nach Krauss (1998) [100]. Aufgrund ihrer Bedeutung für diese Arbeit werden diese beiden Modelle in Anhang A genauer beschrieben. Es ist anzumerken, dass die Bedingung des sicheren Fahrzeugfolgeabstands aufgrund von Modellerweiterungen durchaus verletzt werden kann, z. B. durch im Modell berücksichtigte Wahrnehmungsfehler oder aggressives Fahrstreifenwechselverhalten sowie auch durch die sich hieraus ergebenden stärkeren Verzögerungen nachfolgender Fahrzeuge.

Psycho-physische Modelle berücksichtigen, dass die Wahrnehmung von Geschwindigkeitsänderungen vorausfahrender FFE mit zunehmendem Abstand ungenauer wird. Hierzu erfolgt eine Fallunterscheidung zwischen verschiedenen Fahrzuständen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Abstand zur Vorausfahrenden FFE. Diesen Fahrzuständen sind jeweils eigene Vorschriften zur Aktualisierung der Fahrgeschwindigkeit zugeordnet. Dieser Modellkategorie sind die Modelle nach Wiedemann (1974) [164] sowie Fritzsche (1994) [63] zuzuordnen. Im Modell nach Wiedemann werden z. B. folgende Fahrzustände unterschieden [87]:

- *unbeeinflusstes Fahren* (Anstreben oder Halten der Wunschgeschwindigkeit),
- *bewusst beeinflusstes Fahren* (Annähern an deutlich langsames vorausfahrendes Fahrzeug),
- *unbewusst beeinflusstes Fahren* (Folgefahrt mit ähnlichen Fahrgeschwindigkeiten),
- *Gefahrenbremsung*.

Bereits im ursprünglichen Modell nach Wiedemann wird die Unvollkommenheit menschlichen Verhaltens berücksichtigt: Beim bewusst beeinflussten Fahren werden Wahrnehmungsfehler, beim unbewusst beeinflussten Fahren eine unvollkommene Beherrschung des Gaspedals im Modell abgebildet. Im Rahmen verschiedener Modellerweiterungen werden diese Einflüsse ergänzt u. a. um zufällige Unachtsamkeit (kurzzeitig ausbleibende Reaktion auf vorausfahrende FFE) oder zufälliges Trödeln (kurzzeitig ausbleibende Beschleunigung, obwohl möglich) [87]. Harding (2007) [82] entwickelte ein Fahrverhaltensmodell, welches Fahrabsichten für Fahrzeugfolge und Fahrstreifenwahl bestimmt, die anschließend zusammengeführt und priorisiert werden. Hierbei wurde das Modell nach Wiedemann (erweitert um zufälliges Trödeln) integriert; das Fahrzeugfolgeverhalten wird jedoch auch durch weitere Kriterien beeinflusst. Wagner et al. (2016) [161] beschreiben stochastische Komponenten weiterer Fahrzeugfolgemodelle.

Bei Modellen auf Basis *zellulärer Automaten* wird der Verkehrsraum diskretisiert, d. h. in Zellen eingeteilt, die entweder durch ein Fahrzeug belegt oder unbelegt sind. Im ursprünglichen Modell nach Nagel und Schreckenberg (1992) [115] entsprach jede Zelle dem Verkehrsraum, den ein Fahrzeug belegt. Die Geschwindigkeit eines Fahrzeug wird somit ebenfalls diskret als Anzahl je Zeitschritt passierter Zellen angegeben. Das Modell sieht eine Aktualisierung der Zellenzustände in vier aufeinanderfolgenden Schritten vor, die parallel für jedes Fahrzeug ausgeführt werden:

- Erhöhung der Geschwindigkeit, wenn die aktuelle Geschwindigkeit noch nicht der Wunschgeschwindigkeit entspricht,
- Verringern der Geschwindigkeit, wenn durch vorausfahrende Fahrzeuge notwendig,
- zufälliges Trödeln, d. h. zufällige Verringerung der Geschwindigkeit,
- Versetzen der Fahrzeuge gemäß der in den vorherigen Schritten bestimmten Geschwindigkeiten.

Inzwischen existieren auch Ansätze, in denen ein Fahrzeug mehrere Zellen belegen kann und die somit eine genauere räumliche Auflösung und die Berücksichtigung unterschiedlich langer Fahrzeuge erlauben [82]. Miska (2007) [110] beschreibt in diesem Kontext einen Ansatz zur Aktualisierung der Zellenzustände mittels Bayesscher Netze (vgl. Abschnitt 2.3.4).

Modelle für Fahrstreifenwahl und -wechsel

Fahrstreifenwahl- und -wechselmodelle bilden sowohl die auslösende Motivation eines Fahrstreifenwechsels als auch seine Vorbereitung und Umsetzung ab [82]. Hierbei ist zwischen *notwendigen* und *freiwilligen* Fahrstreifenwechseln zu unterscheiden. Fahrstreifenwechsel gelten dann als notwendig, wenn der gerade genutzte Fahrstreifen zur Fortsetzung der Fahrt nicht weiter genutzt werden kann (z. B. da er endet oder nicht in die gewünschte Richtung führt). Fahrstreifenwechsel zum Überholen, d. h. um eine höhere Fahrgeschwindigkeit zu erreichen, gelten als freiwillig. Bei der Simulation von Autobahnverkehr ist es erforderlich, auch das Rechtsfahrgebot zu berücksichtigen.

Die Vorbereitung und Umsetzung eines Fahrstreifenwechsels ist eng mit dem Fahrzeugfolgeverhalten verzahnt. Einerseits wird zur Bewertung, ob die Abstände zu Fahrzeugen im Zielfahrstreifen einen sicheren Fahrstreifenwechsel zulassen, auf Kriterien der Fahrzeugfolgemodelle zurückgegriffen. Andererseits bedingen Fahrstreifenwechsel auch Anpassungen der Beschleunigung, etwa um eine Lücke im Zielfahrstreifen zu erreichen [52] oder um im Rahmen kooperativen Verhaltens den Abstand zum Vorausfahrenden zu vergrößern und so anderen Fahrzeugen das Einscheren zu ermöglichen.

Sparmann (1978) [148] stellte ein Modell für Fahrstreifenwechsel zum Überholen und zum Einhalten des Rechtsfahrgebots vor, das zunächst die Simulation von Autobahnverkehr ohne Berücksichtigung von Anschlussstellen ermöglichte. Theis (1997) [154] entwickelte ergänzend ein Modell für notwendige Fahrstreifenwechsel beim Aus- und Einfahren in eine Autobahn, das ein Verfahren zur Lückensuche auf dem Zielfahrstreifen sowie kooperatives Verhalten anderer FFE beinhaltet.

Gipps (1986) [72] entwickelte ein Modell, das sowohl notwendige als auch freiwillige Fahrstreifenwechsel abbildet und nicht nur für Autobahnen, sondern auch für innerstädtische Szenarien geeignet ist. Notwendige Fahrstreifenwechsel werden dabei in Abhängigkeit der Entfernung zum Zwangspunkt und somit in Abhängigkeit der Dringlichkeit unterschiedlich realisiert. Hierzu wird der Verkehrsraum im Vorfeld eines Knotenpunkts in drei Zonen eingeteilt:

Zone 1 (kein Einfluss der Fahrtroute): Es finden lediglich Fahrstreifenwechsel zum Überholen und (sofern anwendbar) zur Einhaltung des Rechtsfahrgebots statt; der vorausliegende Knotenpunkt hat noch keinen Einfluss auf die Fahrstreifenwahl.

Zone 2 (erster Einfluss der Fahrtroute): Fahrstreifenwechselwünsche zum Überholen und Einhalten des Rechtsfahrgebots werden unterdrückt, wenn dies der Einhaltung der Fahrtroute entgegensteht. Ist ein Fahrstreifenwechsel erforderlich, wird seine Durchführbarkeit geprüft. Ist der Fahrstreifenwechsel nicht unmittelbar durchführbar, wird eine Lücke auf dem Zielfahrstreifen gesucht, die durch Beschleunigen oder Verzögern erreicht werden kann.

Zone 3 (starker Einfluss der Fahrtroute): Wie Zone 2, jedoch wird eine Lücke auf dem Zielfahrstreifen nun nur noch stromaufwärts gesucht, sodass zur Erreichung dieser Lücke verzögert werden muss.

Das Modell nach Gipps wurde erweitert, um aggressives sowie auch kooperatives Verhalten im Zusammenhang mit notwendigen Fahrstreifenwechseln zu ermöglichen.

Harding (2007) [82] entwickelte ein Fahrverhaltensmodell, welches verschiedene Absichten zunächst unabhängig voneinander bestimmt und schließlich zu einer Gesamtentscheidung zu Längsbeschleunigung und Fahrstreifenwahl zusammenführt. Dabei wurden erweiterte Versionen des Fahrzeugfolgmodells nach Wiedemann sowie des Modells nach Sparmann integriert. Es werden Fahrstreifenwechsel zum Überholen, zum Einhalten des Rechtsfahrgebots, zum Folgen der Route sowie zur Unterstützung notwendiger Fahrstreifenwechsel anderer FFE berücksichtigt. Durch eine parametrierbare Entscheidungsträgheit wird verhindert, dass Fahrentscheidungen zu häufig wechseln.

Ein weiteres Fahrstreifenwechselmodell beschreibt Erdmann (2014) [53]. Dieses baut auf einem früheren Modell nach Krajzewicz [101] auf und bildet ähnlich den vorgenannten Modellen nach Gipps und Harding sowohl notwendige als auch freiwillige Fahrstreifenwechsel ab. Zunächst wird der Wunschfahrstreifen einer FFE ermittelt. Anschließend wird die Durchführbarkeit des Fahrstreifenwechsels bewertet. Kann der Fahrstreifenwechsel nicht unmittelbar durchgeführt werden, erfolgt eine Anpassung der Fahrgeschwindigkeit, um eine geeignete Lücke zu erreichen. Die so ermittelte Geschwindigkeitsanpassung umfasst mehrere Zeitschritte und wird an das Fahrzeugfolgmodell übergeben. Bei notwendigen Fahrstreifenwechseln wird ihre Dringlichkeit unter Berücksichtigung der Verkehrssituation und der Entfernung zum Zwangspunkt bestimmt. Auf dieser Grundlage kann u. a. eine Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern angestoßen werden.

Die bisher vorgestellten Modelle unterstellen, dass die Fahrstreifenwahl eine diskrete Entscheidung ist und dass Fahrzeuge nicht innerhalb eines Fahrstreifens nebeneinander fahren können. Bei überbreiten Fahrstreifen, bei Szenarien mit Zweiradverkehr sowie auch bei Szenarien, in denen Fahrstreifenbegren-

zungen nicht immer eingehalten werden, muss auch die Position eines Fahrzeug quer zur Fahrbahnachse betrachtet und modelliert werden. Ansätze hierzu werden z. B. in Semrau (2018) [145] sowie auch unter dem Begriff Sublane Model innerhalb der Dokumentation der Simulationssoftware SUMO [41] (siehe unten) vorgestellt.

Anwendung der Modelle in der Verkehrsflusssimulation

Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle werden in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation eingesetzt, um das Fahrverhalten der einzelnen FFE in Interaktion mit anderen FFE nachzubilden. Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation ist ein wichtiges Mittel zur Untersuchung der Wirkungen baulicher und organisatorischer Maßnahmen auf den Verkehr [59]. Mittels Simulation können der Nutzen einer Maßnahme im Vorhinein abgeschätzt und Realisierungsvarianten gegenüberstellend bewertet werden. Dies schließt auch Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung ein (vgl. Abschnitt 2.1.5). Darüber hinaus kommt Verkehrsflusssimulation auch zum Einsatz, wenn verkehrliche Einflüsse von Fahrzeugautomatisierung allgemein [159] [87] oder auch von bestimmten fahrzeugseitigen Anwendungen [90] [136] untersucht werden sollen. Der Vorteil einer Simulation gegenüber Versuchsfahrten im realen Straßenverkehr besteht darin, dass auch Szenarien mit höherer Durchdringung bezüglich der untersuchten Funktion mit vertretbarem Aufwand abgebildet werden können, und dass äußere Randbedingungen und Störeinflüsse weitgehend vorgegeben bzw. ausgeschlossen werden können [87].

Für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation stehen verschiedene Anwendungen zur Verfügung, darunter sowohl kommerzielle Software als auch nichtkommerzielle Entwicklungen im wissenschaftlichen Umfeld. In *Tabelle 3* sind ausgewählte, in Praxis oder Wissenschaft regelmäßig genutzte Anwendungen unter Angabe der darin verfügbaren Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwahlmodelle aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass die Modelle zumeist gegenüber der genannten Ursprungsveröffentlichung erheblich weiterentwickelt oder erweitert wurden.

Alle der vorgenannten Softwarelösungen verfügen über eine Schnittstelle, über die externe Programme zur Laufzeit in die Simulation eingreifen können. Über diese können Eigenschaften einzelner Netzelemente, der Verkehrssteuerung sowie auch der FFE abgefragt und teils auch verändert werden. Die Schnittstellen sind jedoch proprietär und unterscheiden sich ebenso wie die zugrunde liegenden Objektmodelle zwischen den Simulationsumgebungen.

Software	Anbieter	verwendete Modelle der ...	
		... Fahrzeugfolge	... Fahrstreifenwahl
aimsun.next [4]	AIMSUN SLU	Gipps (1981)	Gipps (1986)
BABSIM [16]	Ruhr-Universität Bochum (im Auftrag der BAST)	Harding, basierend auf Wiedemann	Harding, teils basierend auf Sparmann
Paramics [152]	SYSTRA Ltd.	Fritsche	eigenes Modell
SUMO [7]	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	mehrere, u. a.: • Krauß (Standard) • Intelligent Driver Model • Wiedemann (je in versch. Varianten)	mehrere: • Erdmann (Standard) • Krajzewicz • Sublane Model
VISSIM [126]	PTV AG	Wiedemann (erweitert)	eigenes Modell

Tabelle 3: Ausgewählte Software zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

Diskussion: Eignung zur Simulation des Autobahnverkehrs

Einige der vorgenannten Fahrverhaltensmodelle wurden zunächst vordringlich oder gänzlich zur Nachbildung des Autobahnverkehrs konzipiert, etwa das Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann (1974) oder die Fahrstreifenwechselmodelle nach Sparmann (1978) und Theis (1997). Die in Tabelle 3 genannten Simulationsanwendungen und darin verankerten Modelle sind grundsätzlich geeignet, um Verkehrsfluss und Fahrverhalten auf Autobahnen nachzubilden [87]. Die meisten dieser Anwendungen unterstützen gleichermaßen auch die Simulation des innerstädtischen Verkehrs.

Eine Herausforderung stellt die realistische Abbildung des Verhaltens an Anschlussstellen und in Verflechtungsbereichen dar. Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0460/2009/OGB „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ im Auftrag der BASt wurden die fünf Simulationsanwendungen AIMSUN, BABSIM, Paramics, SUMO und VISSIM dahingehend bewertet, ob nach entsprechender Kalibrierung die im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) definierten makroskopischen Charakteristika bestimmter Entwurfs Elemente auf Autobahnen hinreichend reproduziert werden können [70]. Darunter waren insbesondere auch verschiedene Ausführungen von Ein- und Ausfahrten. Für vier der fünf Simulationsanwendungen konnte grundsätzlich die Eignung zur Reproduktion der im HBS definierten Zusammenhänge bestätigt werden. Für SUMO ergaben sich erhebliche Abweichungen, wobei in der Untersuchung jedoch eine ältere Softwareversion verwendet wurde, in welcher das weiterentwickelte Fahrstreifenwechselmodell nach Erdmann noch nicht zur Verfügung stand. Ähnliche Untersuchungen mit neueren Versionen von SUMO zeigten beispielhaft, dass die durch das HBS gegebenen Zusammenhänge mit dem Modell nach Erdmann ebenfalls ausreichend nachgebildet werden können [54] [133]. Es ist anzumerken, dass die im HBS beschriebenen makroskopischen Zusammenhänge sich von Beobachtungen an realen Autobahnen im Einzelfall unterscheiden können, so dass i. d. R. eine Anpassung der Simulation an spezifische Zusammenhänge des betrachteten Autobahnabschnitts erforderlich ist. Unabhängig von der gewählten Simulationssoftware gilt, dass in Bereichen von Anschlussstellen und insbesondere auch in Verflechtungsbereichen im Einzelfall untersucht werden muss, ob es zu unrealistischen Anhaltevorgängen und Rückstauerscheinungen sowie auch zu Häufungen von Kompensationsmaßnahmen der Simulationssoftware kommt (z. B. Fahrzeug-Teleporting oder Re-Routing aufgrund fehlgeschlagener Fahrstreifenwechselversuche).

2.2.4 Kalibrierung und Validierung von Fahrverhaltensmodellen

Im Rahmen der *Kalibrierung* werden die Parameter der Fahrverhaltensmodelle (sowie auch weitere Parameter des Simulationsmodells) so gewählt, dass eine hinreichend realitätsgetreue Nachbildung des Verkehrsgeschehens erwartet wird. Dies kann grundsätzlich durch Experteneinschätzung, durch Schätzung auf Basis empirischer Daten oder auch durch Optimierung erfolgen. Im letzteren Fall werden einzelne oder mehrere Modellparameter iterativ angepasst, um die Abweichung zwischen empirischen und Simulationsdaten zu minimieren. Mit der *Validierung* wird der Nachweis erbracht, dass die erwartete Realitätstreue des Modells tatsächlich vorliegt [59]. Zur Bewertung werden hierbei ähnlich der Optimierung die nach der Kalibrierung verbleibenden Abweichungen zwischen empirischen und Simulationsdaten herangezogen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass zur Validierung ein anderer Teil der Datengrundlage verwendet wird als zur Kalibrierung, um z. B. die Generalisierungsfähigkeit des Modells beurteilen zu können [59]²¹. Für welche Kenngrößen die Validierung erfolgt, hängt von der

²¹ wiedergegeben in Hilgers et al. (2020) [87]

Aufgabenstellung der Simulationsuntersuchung ab. In den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation der FGSV [59] (dort Abschnitt 4.4.3) werden beispielhaft mögliche Validierungsgrößen für typische Fragestellungen der Simulation genannt. Die verbleibenden Abweichungen können durch verschiedene Fehlermaße, etwa den mittleren quadratischen Fehler, quantifiziert und somit einer objektiven Bewertung zugänglich gemacht werden.

Zu den zu kalibrierenden Parametern der Fahrverhaltensmodelle gehören z. B.

- Wunschgeschwindigkeiten sowie Befolungsgrade der zulässigen Höchstgeschwindigkeit,
- Wunschbeschleunigungen und -verzögerungen,
- Mindestzeitlücken oder -abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen,
- Reaktionszeiten,
- Wahrscheinlichkeiten für zufälliges Trödeln sowie
- Parameter zur Beeinflussung der Aggressivität und Kooperationsbereitschaft.

Oft werden diese Parameter nicht deterministisch, sondern als Zufallsverteilung über das FFE-Kollektiv festgelegt, z. B. als Normalverteilungen mit beschränktem Wertebereich, die jeweils durch einen Mittelwert, eine Standardabweichung sowie obere und untere Wertgrenzen beschrieben werden. Somit ergibt sich i. d. R. ein sehr großer Parameterraum. Daher wird die Kalibrierung oftmals auf solche Parameter beschränkt, die einen starken Einfluss auf zu untersuchende Aspekte des Fahrverhaltens haben. Dies kann z. B. im Vorfeld der Kalibrierung durch eine Sensitivitätsanalyse ermittelt werden [27] [65] [125].

Ausgangspunkt einer Kalibrierung können in der Modelldokumentation definierte Standardwerte, aber auch in früheren, ähnlichen Untersuchungen verwendete Parametersätze sein. Als Datengrundlage können fahrzeug- oder infrastrukturseitig aufgezeichnete Daten genutzt werden [145]. Fahrtdaten können z. B. im Rahmen von Versuchsfahrten durch Aufzeichnung der Eigenbewegung und im Fahrzeugumfeld sensorisch erfasster Objekte erhoben werden [52] [82] [161]. Alternativ können auch Fahr Simulatorstudien durchgeführt werden, um Referenzdaten zum Fahrverhalten in bestimmten Situationen zu erhalten [136]. Infrastrukturseitig erhobene Daten stammen zumeist aus der bestehenden lokalen Verkehrserfassung (z. B. mittels Induktionsschleifen). Seltener wurde auch Videobeobachtung bzw. Videodetektion eingesetzt, um bestimmte Verhaltensweisen wie z. B. Fahrstreifenwechsel detaillierter erfassen zu können [24] [99] (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Nach Detering (2011) [32] sowie nach Semrau (2018) [145] kann die Kalibrierung und Validierung mikroskopischer Modelle

- mittels *makroskopischer* Daten,
- mittels *mikroskopischer* Daten oder
- mittels *mikro- und makroskopischer* Daten (Mehr-Ebenen-Vorgehen)

erfolgen. Dabei gelten fahrtbezogene Daten (aus Versuchsfahrten oder Fahr Simulatorstudien) als mikroskopische Daten, während lokale Verkehrsdaten als makroskopische Daten angesehen werden, da sie zumeist in aggregierter Form vorliegen [145]. Lokal erfasste disaggregierte Einzelfahrzeugdaten sind jedoch ebenfalls mikroskopische Daten, da sie das Verhalten und Eigenschaften einzelner Fahrzeuge beschreiben.

Für Untersuchungen zu Einflüssen auf Verkehrsablauf und Verkehrsdynamik ist die Nutzung allein makroskopischer Daten i. d. R. ausreichend [145]. Jedoch eröffnen mikroskopische Daten zumindest aus lokaler Erfassung zusätzliche Möglichkeiten, um die Kalibrierung zu verbessern. So beschreibt Geisefeldt (2015a) [68] einen Ansatz zur Schätzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung, für den einzelne Fahrgeschwindigkeiten und Zeitlücken benötigt werden. Zunächst erfolgt mithilfe der individuellen Zeitlücken eine Unterscheidung zwischen durch vorausfahrende Fahrzeuge beeinflussten und unbeeinflussten Fahrzeugen. Die individuellen Fahrgeschwindigkeiten der unbeeinflussten bzw. beeinflussten Fahrzeuge werden anschließend zur Schätzung der Verteilungsfunktion der Wunschgeschwindigkeit mittels des Kaplan-Meier-Verfahrens verwendet. Sollen durch Anwendung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation auch Einflüsse auf die Verkehrssicherheit untersucht werden, müssen diese durch Ersatzkenngrößen der Verkehrssicherheit (Surrogate Safety Measures, SSM, vgl. Abschnitt 2.2.2) beschrieben werden. Auch hierzu ist es wichtig, individuelle Zeitlücken und Geschwindigkeiten zu erfassen, um bewerten zu können, wie genau Häufigkeiten und Ausprägungen sicherheitskritischen Fahrverhaltens reproduziert werden.

2.2.5 Verbleibende Herausforderungen

Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation ist ein häufig eingesetztes Werkzeug, auch zur Untersuchung und Bewertung von Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung. Wie bereits in Abschnitt 2.1.6 dargestellt, wird dieses Mittel jedoch seltener zur Untersuchung von streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung eingesetzt. Außerdem werden i. d. R. nur ausgewählte, eng abgegrenzte Maßnahmen oder Szenarien betrachtet. Eine differenzierte Abbildung des Fahrverhaltens unter Berücksichtigung eines dynamisch wechselnden Situationskontexts erfolgt nicht. Dies ist nicht zuletzt auf den hohen Aufwand zurückzuführen, der zur Kalibrierung und Validierung eines Simulationsszenarios erforderlich ist. Eine Parameteroptimierung oder auch eine Schätzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung mittels der Kaplan-Meier-Methode kann lediglich für eine sehr begrenzte Menge an Szenarien durchgeführt werden. Werden jedoch viele Szenarien zusammengefasst, können Einflüsse einzelner Maßnahmen oder auch äußerer Randbedingungen nur noch sehr eingeschränkt abgebildet werden, sodass u. U. wesentliche Wirkungen in der Simulation nicht mehr signifikant hervortreten. Ein Verfahren, das eine dynamische Beeinflussung des Fahrverhaltens während der Simulation ermöglicht und das mit vertretbarem Aufwand für eine sehr große Zahl an Situationskonstellationen kalibriert werden kann, ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht verfügbar. Diese Lücke soll durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur kontext-differenzierten Fahrverhaltensmodellierung (vgl. Abschnitt 4) geschlossen werden.

Eine weitere Herausforderung in der Fahrverhaltensmodellierung besteht hinsichtlich der Reproduzierbarkeit sicherheitsbezogener Kenngrößen (SSM). Diese werden benötigt, um z. B. vermutete Auswirkungen von Gefahrenwarnungen berücksichtigen zu können. In bisherigen Untersuchungen wurde festgestellt, dass besonders sicherheitskritisches Fahrverhalten, das in der Realität durchaus zuweilen auftritt, in der Simulation aufgrund der Modellannahmen nur bedingt abgebildet werden kann. Die Reproduzierbarkeit der Kenngrößen IBTR, CIBTR, PBTR und CPBTR (vgl. Abschnitt 2.2.2) in einer mikroskopischen Verkehrssimulation wurde bislang noch nicht ausreichend untersucht. Daher wurden diese Kenngrößen in dieser Arbeit in Untersuchungen zu Einflüssen von Modellparametern auf das Fahrverhalten (vgl. Abschnitt 6.3) sowie bei der Verfahrensvalidierung (vgl. Abschnitt 7.5) besonders berücksichtigt.

2.3 Analyse und Modellierung von Wirkzusammenhängen

In diesem Abschnitt werden Ansätze der Erfassung, Bewertung und objektiven Beschreibung von Wirkzusammenhängen vorgestellt, die für diese Arbeit relevant sind. Zuvor werden für die weiteren Ausführungen notwendige Begriffe und Prozesse eingeführt.

2.3.1 Der Begriff Wirkzusammenhang

Gemäß der im Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB²² verwendeten Begriffsdefinitionen²³ werden mit dem Begriff *Wirkung* die Einflüsse bestimmter Randbedingungen, hier insbesondere bestimmter Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung, auf den Verkehrsablauf und das Fahrverhalten charakterisiert. Im Gegensatz zur Wirksamkeit einer Maßnahme umfassten Wirkungen nicht nur erwünschte Einflüsse zugunsten eines Beeinflussungsziels (z. B. Harmonisierung des Verkehrsflusses), sondern auch weitere, u. U. auch negative Effekte.

Allgemein kann unter einer Wirkung der Einfluss eines bestimmten Zustands \vec{x} auf einen anderen Zustand \vec{y} verstanden werden. In diesem Falle wird der Zustand \vec{y} auch als *abhängig* (dependent) und der Zustand \vec{x} als *erklärend* (explanatory) bezeichnet [46]. Im Beispielfall der Wirkungen von Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung ließen sich verschiedene Merkmale zur Beschreibung der aktuell aktivierten Beeinflussungsmaßnahme sowie ggf. auch weiterer verkehrsrelevanter Randbedingungen als Elemente des Vektors \vec{x} zusammenfassen, während sich \vec{y} aus Kenngrößen zur quantitativen Beschreibung des Fahrverhaltens zusammensetzt.

Aufbauend auf diesem Verständnis des Begriffs Wirkung umfasst der Begriff *Wirkzusammenhang* im Kontext dieser Arbeit die Menge als signifikant erachteter Abhängigkeiten eines Zustands \vec{y} von einem erklärenden Zustand \vec{x} . Dementsprechend ist ein Wirkzusammenhang gerichtet, d. h. umgekehrte Wirkungen (Rückkopplungen) des Zustands \vec{y} auf \vec{x} existieren nicht oder werden ausgeblendet. Somit lässt sich ein Wirkzusammenhang mathematisch als Abbildung $\vec{x} \mapsto \vec{y}$ beschreiben. Die Signifikanz der Abhängigkeiten zwischen einzelnen Elementen von \vec{x} und \vec{y} kann auf Grundlage vorhandener Daten (Korrelation), durch explizite Formulierung in der Fachdomäne bekannter Gesetzmäßigkeiten oder kausaler Beziehungen sowie durch eine Kombination dieser Möglichkeiten bestimmt werden. In Abschnitt 2.3.3 werden verschiedene Ansätze hierzu vorgestellt.

2.3.2 Schritte der datengestützten Modellierung von Wirkzusammenhängen

Durch die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien in den vergangenen Jahrzehnten sind Daten und darin enthaltene Informationen inzwischen nicht nur wichtig für die Optimierung von Geschäftsprozessen, sondern sogar eine unverzichtbare Grundlage vieler Wertschöpfungsketten. Dabei ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, Wissen aus den verfügbaren Daten zu extrahieren, d. h. aus den Daten generell gültige Zusammenhänge oder Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, die z. B. als Grundlage für eine Entscheidungsfindung genutzt werden können (vgl. z. B. Borgelt et al. (2009) [14], Abschnitt 1.1). Dementsprechend hat sich die Wissensextraktion aus Daten (auch: *Data Mining*) als ein wichtiges Forschungsfeld etabliert. Auch im Bereich der Verkehrs- und Mobilitätsforschung haben Verfahren des Data Mining eine große Bedeutung erlangt. Eine Vielzahl internationaler

²² Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2. ²³ vgl. Hilgers et al. (2020) [87], dort Abschnitt 2.1.

Publikationen bildet sowohl ein breites Anwendungsspektrum innerhalb des Verkehrswesens als auch eine große Vielfalt an Methoden und Herangehensweisen ab. Einige Untersuchungen aus dem deutschsprachigen Raum und die zugrunde liegenden Ansätze wurden in einem Arbeitspapier der FGSV [61] veröffentlicht. Allein hier reichen die Anwendungen von einer Schätzung der Verkehrsnachfrage (Quelle-Ziel-Matrizen) über die Prognose und Fusion von Verkehrsdaten bis zur Abschätzung der Wirkungen von Anwendungen vernetzen Fahrens.

Der Prozess der Wissensextraktion aus Daten umfasst neben der eigentlichen Datenanalyse verschiedene Schritte der Vor- und Nachbereitung sowie den Aspekt der Datenvisualisierung, die in Anlehnung an Borgelt et al. (2009) [14] und Runkler (2010) [134] in *Abbildung 4* dargestellt sind.

Zu den typischen Aufgaben der Wissensextraktion zählen u. a. die Klassifizierung, Segmentierung und Clusterbildung, die Vorhersage sowie die Analyse von Abhängigkeiten (vgl. ebenfalls Borgelt et al. (2009) [14]). Bei der Modellierung von Wirkzusammenhängen stehen die letzten beiden Aspekte im Vordergrund: Es gilt zunächst, signifikante Zusammenhänge zwischen einem erklärenden Zustandsvektor \vec{x} und einem abhängigen Zustandsvektor \vec{y} zu identifizieren und objektiv zu beschreiben. Nicht signifikante oder Scheinzusammenhänge müssen dabei ausgeblendet werden. Das so erlangte Wissen dient der Formulierung und Kalibrierung eines Modells, welches eine Vorhersage von \vec{y} auch für bisher nicht empirisch erfasste Ausprägungen von \vec{x} ermöglicht. Speziell im Zusammenhang mit der Modellierung von Wirkzusammenhängen sind folgende Schritte innerhalb der in *Abbildung 4* gezeigten Prozesskette erforderlich (in der *Abbildung* ergänzt; in kursiver Schrift dargestellt):

- Definition des abhängigen Zustands \vec{y} (Modellausgabe) und des erklärenden Zustands \vec{x} (Modelleingabe)
- Formulierung eines Modells für die Abbildung $\vec{x} \mapsto \vec{y}$
- Kalibrierung, d. h. Anpassung der Modellparameter derart, dass die Abweichung zwischen Modell und Kalibrierdaten ($\vec{x}_{\text{Kal}}, \vec{y}_{\text{Kal}}$) minimal oder zumindest hinreichend gering ist
- Bewertung und Validierung des Modells

Im Zuge der Bewertung und Validierung eines Modells ist zunächst zu untersuchen, inwiefern das Modell die zur Kalibrierung verwendeten Daten reproduzieren kann. Die nach Abschluss der Kalibrierung verbleibende Abweichung zwischen Kalibrierdaten und Modellausgabe wird Kalibrier- oder Trainingsfehler genannt. Da das Modell auch der Prognose bisher unbekannter Konstellationen in den Eingabedaten dienen soll, muss außerdem überprüft werden, mit welcher Abweichung solche Daten reproduziert werden können, die nicht bereits zur Kalibrierung verwendet wurden. Die Menge

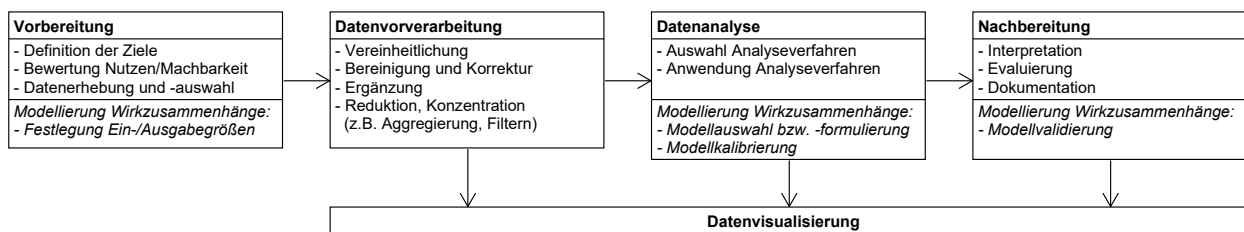


Abbildung 4: Prozesse der Wissensextraktion aus Daten (angelehnt an Borgelt et al. (2009) [14] und Runkler (2010) [134], ergänzt um spezielle Schritte für die Modellierung von Wirkzusammenhängen)

aller verfügbaren, aufbereiteten Referenzdaten muss daher analog zur Kalibrierung und Validierung einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation in zwei Teilmengen unterteilt werden, die Kalibrierdaten $(\vec{x}_{\text{Kal}}, \vec{y}_{\text{Kal}})$ und die Validierdaten $(\vec{x}_{\text{Val}}, \vec{y}_{\text{Val}})$. Auf diese Weise kann das Verhalten des Modells bei Inter- und ggf. auch Extrapolation, d. h. die Generalisierungsfähigkeit des Modells, bewertet werden. Daher wird die Abweichung zwischen Validierdaten und Modellausgabe auch Generalisierungsfehler genannt [134].

2.3.3 Ansätze zur Modellierung von Wirkzusammenhängen

Nachfolgend werden verschiedene Herangehensweisen zur Modellierung von Wirkzusammenhängen sowie zur Kalibrierung eines solchen Modells vorgestellt und ihre jeweiligen Vorteile, Voraussetzungen und Einsatzgrenzen beschrieben. Gemäß Abschnitt 2.3.1 ist hierbei ein Zustand \vec{y} in Abhängigkeit von einem erklärenden Zustand \vec{x} objektiv zu beschreiben. Dabei wird davon ausgegangen, dass \vec{x} und \vec{y} jeweils mehrdimensional sind, also jeweils mehr als ein Element besitzen. Dabei sei n_x und n_y die Länge der Vektoren \vec{x} bzw. \vec{y} . Es sei an dieser Stelle unterstellt, dass sämtliche Elemente beider Vektoren numerisch sind. Jedoch sei zunächst offengelassen, ob die Elemente wertdiskret (z. B. quantisiert), wertkontinuierlich ($\in \mathbb{R}$) oder eine Kombination aus beidem sind.

Multiple Regression

Im Verkehrswesen kommen Regressionsanalysen sehr häufig zum Einsatz. Viele der im Arbeitspapier „Data Mining im Verkehrsmanagement und in der Verkehrsplanung“ [61] der FGSV beschriebenen Anwendungsszenarien sowie auch die meisten in Abschnitt 2.1.4 erwähnten Untersuchungen zu Wirkungen streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung greifen auf diese Methodik zurück. Mittels Regression wird ein funktionaler Zusammenhang $\vec{y} = f(\vec{x})$ geschätzt, der einen unbekanntem tatsächlichen Zusammenhang in den zur Verfügung stehenden Kalibrierdaten $(\vec{x}_{\text{Kal}}, \vec{y}_{\text{Kal}})$ möglichst gut approximieren soll. Hat \vec{x} mehr als ein Element, spricht man von *multipler* Regression [134].

Der Schritt der Modellformulierung besteht in der Auswahl eines geeigneten Funktionsprototypen, d. h. einer Funktionsschar, durch deren Parameter ein bestimmter Repräsentant aus dieser Schar beschrieben wird. Im Rahmen der Kalibrierung des Modells müssen diejenigen Parameter des Funktionsprototypen bestimmt werden, für die der Fehler zwischen Modell und verwendeter Datengrundlage minimal wird. Die hier gegebene Beschreibung der Funktionsweise, Möglichkeiten und Herausforderungen der Regression basiert auf Hastie et al. (2008) [85] und Runkler (2010) [134].

Bei der *multiplen linearen Regression* wird für jedes Element y_j aus \vec{y} (mit $j \in \mathbb{N} \mid 1 \leq j \leq n_y$) jeweils ein funktionaler Zusammenhang als Linearkombination unter Einbeziehung aller Elemente x_i aus \vec{x} (mit $i \in \mathbb{N} \mid 1 \leq i \leq n_x$) gebildet. Dies geschieht nach folgender Vorschrift [85]:

$$y_j = f_j(\vec{x}) = \beta_{0,j} + \sum_{i=1}^{n_x} x_{i,j} \beta_{i,j} + \epsilon_j \quad (7)$$

Zu kalibrierende Parameter sind hierbei die Nullstellen $\beta_{0,j}$ sowie die Anstiegskoeffizienten $\beta_{i,j}$ der vorgenannten Funktion. Der Summand ϵ_j ergänzt eine additiv überlagernde normalverteilte Streuung um diesen funktionalen Zusammenhang, d. h. ϵ_j selbst ist normalverteilt um 0.

Die Schätzung der Parameter erfolgt durch Minimierung eines Fehlermaßes, das die Abweichungen zwischen den Funktionswerten $y_j = f_j(\vec{x})$ und den jeweils \vec{x} zugeordneten $y_{\text{Kal},j}$ für alle \vec{x} aus den Referenzdaten zusammenfasst. Als ein solches Fehlermaß kann z. B. die mittlere quadratische Abweichung verwendet werden. Um sicherzustellen, dass der als Ergebnis der Schätzung ermittelte funktionale Zusammenhang die zur Kalibrierung verwendeten Daten tatsächlich ausreichend widerspiegelt, müssen die nach der Minimierung noch verbleibenden Fehler, die Residuen, untersucht werden. Zur Einschätzung der Konfidenz des ermittelten Zusammenhangs kann außerdem z. B. das Bestimmtheitsmaß R^2 herangezogen werden. Analog zum Kalibrierfehler kann der Generalisierungsfehler als mittlere quadratische Abweichung zwischen den Funktionswerten und den jeweils zugehörigen Validierdaten bestimmt werden. Für eine detailliertere Beschreibung zu Fehlermaßen und anderen Kennzahlen zur Bewertung einer Regression sei z. B. auf Runkler (2010) [134] verwiesen.

Bei der multiplen linearen Regression wird unterstellt, dass die Elemente x_i aus \vec{x} untereinander nicht oder allenfalls schwach korreliert sind, also keine Multikollinearität vorherrscht. Auf der anderen Seite sollten die Elemente von \vec{x} alle wesentlichen Einflussfaktoren auf \vec{y} beinhalten, da sonst der Zusammenhang $\vec{x} \mapsto \vec{y}$ nicht vollständig erklärt werden kann. Dies wiederum kann sich in einer schwächeren Bestimmtheit des Modells äußern.

Grundsätzlich können auch *nichtlineare* Zusammenhänge mittels multipler Regression geschätzt werden. Dies kann durch Transformation einzelner erklärender Größen x_i (z. B. mittels Logarithmus-, Wurzel- oder quadratischer Funktionen) oder durch Verwendung nichtlinearer Funktionsprototypen wie z. B. Polynome erfolgen. Polynome eignen sich zur Nachbildung beliebiger stetiger Funktionen, sofern die Anzahl der Parameter des gewählten Polynom-Prototypen ausreichend hoch ist. Die gute Approximation wird jedoch lediglich für die zur Kalibrierung verwendeten Daten erreicht – durch Überschwingungen können sowohl bei Interpolation zwischen aus der Kalibrierung bekannten Datenpunkten als auch bei der Extrapolation größere Fehler auftreten [134]. Eine Generalisierungsfähigkeit besteht somit in diesem Falle nicht.

Die für die Kalibrierung verwendeten Daten müssen so umfassend sein, dass sämtliche für das Modell relevanten Teile des Wertebereichs von \vec{x} hinreichend und repräsentativ abgedeckt sind. Ist der Wertebereich von \vec{x} unvollständig abgedeckt oder stellen die Referenzdaten ein verzerrtes Abbild realer Zusammenhänge dar, können systematische Abweichungen zwischen Modell und Realität entstehen. Die Berücksichtigung fachlicher Randbedingungen neben der Kalibrierungsdaten, wie z. B. kausal begründeten Zusammenhängen oder in der jeweiligen Fachdomäne bekannten Gesetzmäßigkeiten, ist zwar grundsätzlich möglich. Diese müssen dann jedoch als Nebenbedingungen bei der Minimierung der Fehler zwischen Modell und Daten im Zuge der Kalibrierung berücksichtigt werden.

Bei vieldimensionalen Zusammenhängen, d. h. bei \vec{x} und \vec{y} mit sehr vielen Elementen, ist eine multiple Regression u. U. nicht mehr praktikabel. Bei linearer Regression sind n_y Nullstellen sowie $n_y \cdot n_x$ Koeffizienten der Linearkombination zu identifizieren. Die Zahl der Modellparameter n_{param} berechnet sich somit zu $n_y \cdot (n_x + 1)$. Die Bestimmung dieser Parameter wird entsprechend mit wachsender Dimension ressourcenintensiver. Außerdem wächst auch der Aufwand für eine fachliche Einschätzung der ermittelten Regressionskoeffizienten, z. B. zur Prüfung, ob durch die Regression ermittelte Zusammenhänge kausal erklärbar sind oder lediglich auf Scheinkorrelationen beruhen, oder ob durch Transformation einer erklärenden Größe eine bessere Anpassung erreicht werden kann. Eine weitere Herausforderung kann in höherdimensionalen Räumen außerdem durch häufig zu beobachtende Konzentrationseffekte entstehen, d. h. bestimmte Bereiche im betrachteten Raum sind dicht mit Daten besetzt, andere dagegen nur schwach [74] [153]. Derartigen Problemen kann u. a. begegnet werden, indem nur ein Teil der

Zusammenhänge zwischen den Elementen von \vec{x} und \vec{y} und somit nur ein Teil des Parameterraums einbezogen wird. Entsprechende Verfahren zur Reduzierung des Parameterraums werden an dieser Stelle nicht näher betrachtet; hierzu sei z. B. auf Hastie et al. (2008) [85] verwiesen.

Assoziationsanalyse

Handelt es sich bei \vec{x} und \vec{y} um diskrete Zustandsvektoren oder können sie diskretisiert werden, kann auch eine *regelbasierte Abbildung* mittels Wenn-Dann-Beziehungen in Frage kommen. Eine explizite, geschlossene Formulierung einer solchen Abbildung ist für höherdimensionale Probleme nicht handhabbar, da jede in der Praxis relevante Ausprägung von \vec{x} und \vec{y} a priori berücksichtigt werden müsste. Eine Bestimmung regelbasierter Abbildungen kann jedoch automatisiert mittels Assoziationsanalyse erfolgen. Hierbei werden Zusammenhänge zwischen diskreten Zuständen solange variiert, bis eine hinreichend sichere Abgrenzung zwischen signifikanten und nicht signifikanten Zusammenhängen erreicht wird. Neben einer binären Entscheidung, ob ein Zusammenhang vorliegt oder nicht, ist auch eine klassifizierte quantitative Bewertung der Stärke eines Zusammenhangs möglich. Die Abgrenzung der Stärke eines Zusammenhangs kann dabei deterministisch (fester Schwellenwert) oder auch unscharf sein. Diese Form der Kalibrierung ist als nicht überwachtetes Lernverfahren einzuordnen [61].

Die Assoziationsanalyse erfordert zunächst eine geeignete Unterteilung von \vec{x} und \vec{y} in diskrete Zustandsmengen. Ist diese Klassifizierung manuell nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar, ist der Einsatz von Clusteringverfahren denkbar.²⁴ Es ist anzumerken, dass das Clustering und die anschließende Assoziationsanalyse einander bedingen; eine gemeinsame Anwendung beider Verfahren ist zumindest für Anwendungen im Verkehrswesen bislang nicht bekannt.

Künstliche neuronale Netze (KNN)

Künstliche neuronale Netze (KNN) eignen sich insbesondere zur Modellierung komplexer, nichtlinearer Zusammenhänge und haben für verschiedenste Anwendungen, auch im Verkehrswesen, eine hohe Bedeutung erlangt. Anwendungsfälle von KNN im Verkehrswesen reichen von der Objekterkennung, -klassifizierung und -fusion über die Datenanalyse und Prognose bis hin zur Optimierung von Entscheidungen im operativen Verkehrsmanagement. Allein das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur fördert Anfang 2021 fast 30 Projekte, welche den Einsatz künstlicher Intelligenz in verschiedenen Themenfeldern mit Bezug zu Mobilität und Verkehr zum Ziel haben [22]. Und auch in den Forschungsprogrammen der Europäischen Kommission nimmt künstliche Intelligenz eine große Rolle ein [51]. Hierbei stehen vor allem KNN und mit ihnen verbundene Lernalgorithmen (etwa Deep Learning) im Vordergrund, auch wenn auch andere Technologien unter den Begriff künstliche Intelligenz fallen. Dies unterstreicht die große Bedeutung, die dieser Technologie zur Begegnung aktueller und künftiger Herausforderungen nicht nur in der Industrie und Wissenschaft, sondern auch in der Politik zugeschrieben wird.

KNN sind gerichtete Graphen, die das Verhalten natürlicher neuronaler Systeme insbesondere im Hinblick auf die Lern- und Generalisierungsfähigkeit nachempfinden sollen. Nachfolgend werden Aufbau

²⁴ Für eine Übersicht von speziell im Verkehrswesen genutzten Klassifizierungs- und Clusteringverfahren sei auf das Arbeitspapier „Data Mining im Verkehrsmanagement und in der Verkehrsplanung“ [61] der FGSV verwiesen.

und Merkmale eines KNN sowie Möglichkeiten seiner Kalibrierung kurz beschrieben. Die Beschreibung basiert auf Lämmel (2003) [103] und Runkler (2010) [134]; für eine eingehendere Auseinandersetzung mit KNN sei auf diese Literaturquellen verwiesen.

Die Knoten eines KNN werden entsprechend ihres natürlichen Vorbilds auch als künstliche Neuronen bezeichnet. Diesen ist jeweils eine Aktivität in Abhängigkeit von eingehenden Signalen zugewiesen. Die Neuronen sind untereinander mittels gerichteter Kanten verbunden. Durch die Menge eingehender Kanten ist für jedes Neuron die Menge der vorhergehenden Neuronen festgelegt, welche die eingehenden Signale liefern. Die Aktivität eines Neurons wird durch eine Aktivierungsfunktion bestimmt, dessen Ausgabe in Abhängigkeit der gewichteten Summe aller Eingaben von den vorhergehenden Neuronen bestimmt wird. Als Aktivierungsfunktion kommen u. a. sigmoide Funktionen wie z. B. die logistische Funktion in Betracht.

Bei Verwendung von KNN für die Abbildung $\vec{x} \mapsto \vec{y}$ bilden die Elemente von \vec{x} die Neuronen der Eingabeschicht und die Elemente von \vec{y} die der Ausgabeschicht. Zwischen diesen beiden Schichten können sich weitere, sogenannte verdeckte Neuronen befinden.

Die Kalibrierung eines KNN wird i. d. R. als Training bezeichnet. Hierbei gilt es, die den Kanten zugewiesenen Gewichte sowie die Schwellenwerte bzw. Parameter der den Neuronen zugewiesenen Aktivierungsfunktionen derart anzupassen, dass Eingaben den jeweils erwarteten Ausgaben entsprechen. Das Training kann grundsätzlich als überwachtes, bestätigendes oder nicht überwachtes Lernen (Selbstorganisation des Netzes) durchgeführt werden. Im dieser Arbeit zugrunde liegenden Anwendungsfall der Nachbildung eines Zusammenhangs $\vec{x} \mapsto \vec{y}$ anhand verfügbarer Kalibrierdaten kommen Verfahren des überwachten Lernens in Betracht, z. B. der Backpropagation-Algorithmus. Hierbei wird der Fehler zwischen Ausgabe des KNN und den entsprechenden Kalibrierdaten minimiert.

Wie eingangs erwähnt haben KNN die Fähigkeit zur Generalisierung, d. h. die Fähigkeit, auch bei nicht während des Trainings verwendeten Ausprägungen der Eingabe \vec{x} eine plausible Ausgabe \vec{y} zu erzeugen. Ein Nachteil ist jedoch, dass die Modellparameter (Gewichte) und die Zustände der Neuronen in den verdeckten Schichten keinen nachvollziehbaren Bezug zu Größen aus der jeweiligen Fachdomäne haben. Dies erschwert eine Einschätzung der Plausibilität des Modells aus fachlicher Sicht, sodass die Abbildung $\vec{x} \mapsto \vec{y}$ intransparent erscheint [46]. Der Einsatz von KNN erfordert eine sorgfältige Auswahl der zur Kalibrierung verwendeten Datensätze, um die gewünschte Generalisierungsfähigkeit zu erreichen, um gleichzeitig eine Überanpassung zu vermeiden sowie um zu verhindern, dass aus Sicht der Fachdomäne wichtige Zusammenhänge unberücksichtigt bleiben. Es muss sichergestellt werden, dass Ungenauigkeiten und Unsicherheiten in den Trainingsdaten keinen zu starken Einfluss auf die Ausgabe des KNN haben, insbesondere bei seltenen Konstellationen der Eingabegrößen. Auch muss verhindert werden, dass einmal erlernte Zusammenhänge während des Trainings wieder verlernt werden.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Intransparenz des Modells aus fachlicher Sicht ist es nicht ohne Weiteres möglich, bekannte oder einer Experteneinschätzung entstammende Zusammenhänge nachträglich in das Modell einzubeziehen sowie in den Daten identifizierte, aber nach Experteneinschätzung unplausible Zusammenhänge anzupassen oder zu entfernen.

Bayessche Netze (BN)

Ähnlich den KNN eignen sich auch Bayessche Netze (BN) zur Modellierung komplexer Zusammenhänge. Hierbei werden Zustandsmerkmale eines Systems als Knoten und Abhängigkeiten zwischen diesen als Kanten eines Graphen modelliert. Teilausschnitte des Modells lassen sich separat betrachten, indem die *bedingte Unabhängigkeit* der Knoten von anderen Knoten außerhalb ihrer unmittelbaren Umgebung ausgenutzt wird. Abhängigkeiten zwischen zwei Knoten werden nur dann berücksichtigt, wenn diese anhand der Daten (Korrelation) oder auch kausal begründbar ist. Vorteile von BN gegenüber KNN bestehen u. a. in einer besseren Nachvollziehbarkeit der Modellparameter durch Experten der jeweiligen Fachdomäne sowie der Möglichkeit zur Berücksichtigung von Zusammenhängen, die zwar in der Fachdomäne bekannt sind, jedoch durch die Kalibrierdaten nicht abgedeckt sind.

Eine Abfrage des in einem kalibrierten BN verankerten Wissens kann zudem in flexibler Weise erfolgen: Beliebige (disjunkte) Mengen der Zustandsgrößen des BN können als Ein- und Ausgabegrößen genutzt werden. Dies erlaubt für die als bekannt vorgegebenen Zustandsgrößen die Ermittlung sowohl ihrer wahrscheinlichen Auswirkungen (Zustände der Nachfolgerknoten gesucht) als auch ihrer wahrscheinlichen Ursachen (Zustände der Vorgängerknoten gesucht).

Aufgrund der vorgenannten Vorteile werden BN in vielfältigen Anwendungen auch im Verkehrswesen eingesetzt. Diese umfassen insbesondere

- die Sensordatenfusion [93],
- die Modellierung der Verkehrsnachfrage und Routenwahl [26],
- die Schätzung und Prognose des Verkehrszustands [167] [168] [127] [122] [79] [116] [105] [73],
- die Fehlerdiagnose und Qualitätsanalyse in Verkehrsbeeinflussungssystemen [140] [117],
- die Bewertung des Fahrerzustands (Ermüdung, Ablenkung, Aggression etc.), z. B. basierend auf dem Fahrverhalten [165] [6] oder auf Beobachtungen der oder des Fahrzeugführenden [106] [97] sowie
- die Bewertung, Vorhersage oder Modellierung des Fahrverhaltens [15] [67] [110] [8] [111] [95] [163].

Bisher veröffentlichte Anwendungen von BN zur Modellierung des Fahrverhaltens werden in Abschnitt 2.3.4 eingehender betrachtet.

Nachfolgend werden wesentliche Eigenschaften von BN basierend u. a. auf Kruse und Borgelt (1998) [102], Murphy (2002) [114] sowie Borgelt et al. (2009) [14] gegeben. Aufgrund der großen Bedeutung für den in dieser Arbeit verfolgten Ansatz werden theoretische Hintergründe und Ausprägungen von BN eingehender in Anhang B beschrieben.

Bayessche Netze (BN) sind gerichtete azyklische Graphen, deren Knoten Zustände eines modellierten Systems und deren Kanten bedingte Abhängigkeiten zwischen diesen Zuständen repräsentieren. Die Knoten eines BN sind Zufallsgrößen, sodass ein BN auch unsicheres oder unscharfes Wissen abbilden kann. Die Zufallsgrößen können sowohl diskrete als auch kontinuierliche Zustandsmengen abbilden. Besitzt ein Knoten eine oder mehrere eingehende Kanten von vorhergehenden Knoten, d. h. besitzt er Elternknoten, weist die ihm zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilung Abhängigkeiten zu den Zuständen der vorhergehenden Knoten auf. Somit lässt sich eine aus fachlicher Sicht nachvollziehbare qualitative (Netztopologie) und quantitative (bedingte Abhängigkeiten) Beschreibung eines komplexen Modellierungsgegenstands realisieren [14]. Wertdiskreten Zufallsgrößen in BN liegen i. d. R. Multinomialvertei-

lungen zugrunde, während wertkontinuierliche Zufallsgrößen u. a. normalverteilt sein können. BN mit ausschließlich normalverteilten Zufallsgrößen werden auch Gaußsche BN (GBN) genannt. Werden die Abhängigkeiten zwischen den Zufallsgrößen eines solchen GBN durch Linearkombinationen der Zustände der Elternknoten beschrieben, liegt ein lineares GBN vor. Umfasst ein BN sowohl wertdiskrete als auch wertkontinuierliche Zustandsgrößen, spricht man von einem hybriden BN. Diese Erscheinungsformen von BN werden in Anhang B.2 eingehender beschrieben. Es existieren diverse Verfahren, um sowohl die Netztopologie als auch Parameter der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus Daten zu erlernen (vgl. Anhang B.3).

Wie zuvor erwähnt, lassen sich die durch die Knoten eines BN repräsentierten Zustandsmerkmale derart wählen, dass sie fachlich interpretierbaren Kenngrößen oder Eigenschaften entsprechen. Somit sind sämtliche Modellzustände und -parameter durch Experten der Fachdomäne nachvollziehbar und plausibilisierbar. Während die zuvor beschriebenen Ansätze der Modellierung von Wirkzusammenhängen erfordern, dass einander zugeordnete Datensätze ($\vec{x}_{\text{Kal}}, \vec{y}_{\text{Kal}}$) zur Kalibrierung der Modellparameter verfügbar sind und dass diese sämtliche der wesentlichen Zusammenhänge vollständig abbilden, besteht diese Anforderung bei BN nicht. Vielmehr besteht aufgrund des durchgehenden Bezugs zu Größen und Merkmalen der betroffenen Fachdomäne die Möglichkeit, auch Teile des Gesamtmodells separat zu kalibrieren. Ist die verfügbare Datengrundlage unvollständig, d. h. können nicht alle abhängigen Zustände anhand der Daten erklärt werden, ist es möglich, fehlende Abhängigkeiten manuell zu ergänzen, z. B. unter Berücksichtigung von Gesetzmäßigkeiten aus vorherigen Untersuchungen oder der Fachliteratur sowie anhand kausaler Zusammenhänge. Ebenso ist es ohne Weiteres möglich, Zusammenhänge auf Grundlage einer Experteneinschätzung zu modifizieren oder zu entfernen. Verallgemeinernd kann festgestellt werden, dass BN (im Gegensatz z. B. zu KNN) eine Kalibrierung der Modellparameter auch modular in einem mehrstufigen Prozess erlauben.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil von BN gegenüber den zuvor vorgestellten Ansätzen ist, dass vielfältige Abfragen zu Zusammenhängen zwischen den im Modell enthaltenen Zustandsvariablen möglich sind. Die Menge der gesuchten Zustände (bisher \vec{y}) sowie auch die Menge der vorgegebenen erklärenden Zustände (bisher \vec{x} , im Kontext von BN Evidenzen genannt) können als beliebige disjunkte Teilmengen der Menge aller Zustandsvariablen gewählt werden. Hierbei werden die Zustände derjenigen Knoten des BN ersetzt, für die Evidenzen vorliegen. Anschließend werden die (bedingten) Wahrscheinlichkeitsverteilungen der übrigen Knoten des BN aufgrund des durch die Evidenzen nun schärferen Wissens angepasst (vgl. Anhang B.4).

2.3.4 Anwendungen in der Fahrverhaltensanalyse, -prognose und -modellierung

Nachfolgend werden ausgewählte Ansätze der Untersuchung, Vorhersage und Nachbildung von Fahrverhalten unter Verwendung einer Modellierung von Wirkzusammenhängen vorgestellt. Aufgrund der zuvor in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Eigenschaften und Vorteile wurden hierbei vielfach auch Bayesche Netze (BN) eingesetzt. Wegen der großen Bedeutung von BN für diese Arbeit beschränkt sich die Zusammenfassung auf Ansätze, denen BN zugrunde liegen.

Einige Arbeiten beschäftigen sich mit der Klassifizierung aktuellen Fahrverhaltens, um Rückschlüsse auf Zustände der Fahrzeugführenden zu ermöglichen und diese bei kritischen Zuständen wie Müdigkeit zu warnen. Dabei berücksichtigt z. B. Al-Sultan (2013) [6] auch einen durch Fahrzeugumgebung und äußere Einflüsse gegebenen Situationskontext, um eine ausreichende Klassifizierungsgüte sicherzustellen und unnötige Warnungen zu vermeiden. Derartige Ansätze erlauben jedoch keine Vorhersage des

zukünftigen Fahrverhaltens.

In anderen Arbeiten wurden Modelle vorgestellt, mit denen Fahrerreaktionen oder -manöver in bestimmten Ausgangssituationen vorhergesagt werden können. So setzten z. B. Boulimi et al. (2005) [15] ein BN ein, um den Zusammenhang zwischen bestimmten Ausgangsbedingungen und Fahrerreaktionen in Notsituationen nachzubilden und so zu erwartende Reaktionen in ähnlichen Situationen vorhersagen zu können. Amata et al. (2009) [8] untersuchten den Einfluss verkehrlicher und fahrerspezifischer Eigenschaften auf die Bereitschaft zur Verzögerung an unsignalisierten Knotenpunkten. Wheeler (2014) [163] beschreibt ein probabilistisches Fahrverhaltensmodell, das zur Vorhersage von Fahrstreifenwechseln und darauf aufbauend zur Fahrerwarnung bei kritischen Fahrstreifenwechselmanövern genutzt werden kann. Hierbei werden die Fahrzeugbeschleunigung und -ausrichtung als Kenngrößen der Bewegung auf einer zweidimensionalen Ebene (längs der Fahrbahnachse) als Zufallsvariablen abgebildet, die von Zuständen des Ego-Fahrzeugs sowie von anderen Fahrzeugen in unmittelbarer Umgebung abhängig sind. Auch Möbus und Eilers (2010) [111] entwickelten ein Modell eines menschlichen Fahrzeugführers, das der Vorhersage kritischen Fahrverhaltens und der Abschätzung der Wirkung von Gegenmaßnahmen dienen soll. Hierbei werden Zusammenhänge zwischen äußeren Randbedingungen und Fertigkeiten auf der einen und Aktionen der oder des Fahrzeugführenden auf der anderen Seite hergestellt. Wheeler sowie auch Möbus und Eilers setzen dynamische Bayessche Netze ein, welche besonders zur Modellierung über die Zeit veränderlicher Systeme geeignet sind (vgl. Anhang B.2). Diese letzteren beiden Ansätze erscheinen zwar nicht auf den vordergründig betrachteten Anwendungsfall beschränkt, jedoch ist eine Verwendung zur Fahrverhaltensmodellierung im breiteren Kontext einer Verkehrsflusssimulation nicht bekannt.

Miska (2007) [110] stellt demgegenüber ein Fahrverhaltensmodell speziell für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation vor, das die Wahrnehmungszustände (belief states) einzelner Fahrzeugführender sowie daraus resultierende Fahrentscheidungen (Längsführung und Fahrstreifenwahl) in einem (ebenefalls dynamischen) BN abbildet. Dieses Fahrverhaltensmodell wurde als Teil einer Testumgebung für neue Verfahren des Verkehrsmanagements konzipiert. Die Wahrnehmungszustände beinhalten ähnlich den vorgenannten Ansätzen Informationen zum Verhalten anderer Fahrzeuge in der Umgebung, darüber hinaus aber auch über einen gewissen zeitlichen und räumlichen Horizont wirkende taktische Fahrentscheidungen (hier: Wunschgeschwindigkeit und Wunschfahrstreifen), was für eine realistische mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs insgesamt (ohne Fokus auf einzelne Fahrzeuge und deren Manöver) unerlässlich ist. Die Fahrzeugbewegungen im Straßennetz werden mittels zellulärer Automaten nachgebildet, wobei Geschwindigkeit und Fahrstreifenwechsel durch die entsprechenden Entscheidungsvariablen des BN vorgegeben werden. Das dynamische BN übernimmt somit Funktionen, die in etablierten Fahrzeugfolge- bzw. Fahrstreifenwechselmodellen (vgl. Abschnitt 2.2.3) bereits enthalten sind: Geschwindigkeitsanpassungen und Fahrstreifenwechsel werden auf Grundlage von Abständen zu anderen Fahrzeugen in der Umgebung, dem eigenen bisherigen Zustand sowie Wunschgeschwindigkeit und -fahrstreifen bestimmt. Einflüsse einer insgesamt vorherrschenden Verkehrslage, von Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung oder von anderen äußeren Randbedingungen sind nicht im Modell abgebildet.

Nach Kenntnisstand des Autors wurden bislang keine Lösungsansätze vorgestellt, in denen eine situationsdifferenzierte Anpassung modellierten Fahrverhaltens in einem manöverübergreifenden, über eine gewisse Zeit und eine gewisse Strecke wirkenden Zusammenhang erfolgte, wie dies zur Abbildung der Wirkungen streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung notwendig ist. Obwohl BN in der Fahrverhaltensmodellierung vielfach verwendet werden, und obwohl BN sich für die Modellierung komplexer

Ursache-Wirk-Beziehungen besonders eignen, wurden sie bislang für diese Art der Beeinflussung virtueller Fahrer-Fahrzeug-Einheiten in der Simulation noch nicht eingesetzt. Auch Anwendungsbeispiele anderer Methoden der Modellierung von Wirkzusammenhängen, etwa KNN, sind in diesem Kontext nicht bekannt.

2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Wie zuvor in Abschnitt 2.1.5 herausgestellt, wird mikroskopische Verkehrsflusssimulation zwar vielfach zur Untersuchung von Verkehrssteuerung und -beeinflussung eingesetzt, jedoch bislang seltener im Zusammenhang mit SBA oder anderen komplexeren Formen der streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung. Bisher bekannte simulative Untersuchungen in diesem Bereich beschränken sich überwiegend auf den Einfluss wechselnder zulässiger Höchstgeschwindigkeiten. Dabei wird eine begrenzte Zahl an Szenarien berücksichtigt, die entweder nur ausgewählte, eng abgegrenzte Ausschnitte des realen Verkehrsgeschehens abbilden oder die jeweils ein gewisses Spektrum situativer Randbedingungen zusammenfassen. Die realitätsgetreue Einbeziehung der vielfältigen, situationsspezifisch unterschiedlichen Einflüsse auf das Fahrverhalten und eine entsprechende generalisierungsfähige, d. h. szenarienübergreifend anwendbare Kalibrierung der Fahrverhaltensmodelle stellt eine bislang ungelöste Herausforderung dar. Diese Lücke soll im Rahmen dieser Arbeit geschlossen werden.

Bei der Simulation von Lichtsignalanlagen, Zuflussregelungsanlagen oder Fahrstreifensperrungen ist die Reaktion der Verkehrsteilnehmer definiert und weitgehend invariant gegenüber den vorherrschenden Umgebungsbedingungen. Eine Nichtbefolgung kann zumeist vernachlässigt werden. Zwar bestehen auch hier Verhaltensunterschiede, z. B. hinsichtlich der Verzögerung bei Annäherung an eine Lichtsignalanlage, der Anfahrbeschleunigung oder der Entfernung vor Beginn einer Fahrstreifensperrung, ab dem ein Fahrstreifenwechsel eingeleitet wird. Um derartige Verhaltensunterschiede abzubilden, ist es jedoch in diesen Fällen ausreichend, ein Kollektiv aus unterschiedlichen FFE-Typen vorzusehen, bestimmte Fahrverhaltensparameter einer zufälligen Verteilung zu unterwerfen oder auf zufällige Komponenten der Fahrverhaltensmodelle (z. B. zufälliges Trödeln) zurückzugreifen. Die Fahrverhaltensparameter variieren hierbei zwar über das Fahrer-/Fahrzeugkollektiv, müssen jedoch im Fahrtverlauf einer FFE nicht verändert werden.

Im Gegensatz hierzu ist die Wirkung einer SBA auf das Fahrverhalten stark von den vorherrschenden Verkehrs- und Umgebungsbedingungen abhängig, die sich im zeitlichen und räumlichen Kontext erheblich und kurzfristig ändern können (z. B. Stauwellen oder stromabwärts wandernde Pulks durch überholende Lkw). Aufgrund der Eigenschaften und Komplexität einer SBA-Steuerung (z. B. Überlagerung verschiedener Maßnahmen, Längsabgleich) sind sehr viele Kombinationen an dargestellten Ge-/Verboten und Warnungen möglich, und jede Kombination des Anzeigezustands wiederum kann in einer großen Bandbreite an Verkehrs- und Umgebungsbedingungen angetroffen werden. Sowohl die Anzeigezustände als auch die Verkehrs- und Umgebungsbedingungen haben einen Einfluss auf das Geschwindigkeits-, Abstands- und Fahrstreifenwahlverhalten. Dabei ist das Verhalten der Verkehrsteilnehmer in der Praxis keineswegs direkt aus den Anzeigezuständen ableitbar. Zulässige Höchstgeschwindigkeiten führen zwar zumeist zu einer Anpassung der Fahrgeschwindigkeiten, nicht jedoch zu einer exakten Befolgung. Einflüsse auf das Abstandsverhalten unterliegen noch größeren Unsicherheiten, da hier den Verkehrsteilnehmern nicht unmittelbar ein bestimmtes Verhalten vorgegeben und da das Abstandsverhalten sehr stark durch die Verkehrssituation bestimmt wird.

Für eine realitätsgetreue Modellierung der Wirkungen streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung ist es somit nicht ausreichend, das Fahrverhalten beeinflussende Parameter der Fahrverhaltensmodelle als über den Simulationszeitraum unveränderliche Eigenschaften einer FFE zu betrachten. Vielmehr müssen diese im Verlauf der Simulation in Abhängigkeit von bestimmten für Fahrzeugführende wahrnehmbaren Einflussfaktoren nachgeführt werden. Die Herausforderung besteht also darin, für jede im betrachteten Simulationsszenario potenziell relevante Kombination aus Einflussfaktoren einen geeigneten Parametersatz zur Verfügung zu stellen. Hierbei wird es als nicht ausreichend angesehen, diese Parametersätze lediglich in Abhängigkeit der für das betrachtete Szenario relevanten Anzeigezustände zu bestimmen, da dann die Einflüsse sich unterscheidender Verkehrs- und Umgebungssituationen unberücksichtigt blieben. Die bisherigen Ansätze der Kalibrierung oder gar Parameteroptimierung ließen sich aufgrund des hohen Aufwands lediglich auf eine begrenzte Menge zu differenzierender Situationskontexte anwenden. Mit einer großen Anzahl einzubeziehender Situationskombinationen, und erst recht bei Einbeziehung nicht-diskreter Einflussfaktoren wie z. B. der Verkehrsdichte, ist dieses Vorgehen nicht praktikabel.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Verfahren zur kontextdifferenzierten Modellierung des Fahrverhaltens entwickelt, das auf Bayessche Netze zurückgreift, um Zusammenhänge zwischen Situation, Verhalten und entsprechenden Parametern der Fahrverhaltensmodelle herzustellen. Ein vergleichbares Verfahren konnte trotz eingehender Untersuchung des Stands der Wissenschaft und Technik nicht gefunden werden. Das Verfahren wird in Abschnitt 4 vorgestellt.

3 Randbedingungen für diese Arbeit

Für die Validierung, Erprobung und Anwendung des in dieser Arbeit entstandenen und in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahrens zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens wird eine Simulationsumgebung benötigt, die sämtliche relevanten Objekte des Verkehrssystems und ihr Verhalten abbildet und an die externe Funktionsmodule angebunden werden können. Eine potenziell hierfür geeignete Simulationsumgebung stand im Rahmen eines Forschungsprojekts zur Verfügung. Um u. a. eine produktunabhängige Anwendbarkeit des Verfahrens zu demonstrieren, wurde darüber hinaus eine weitere Simulationsumgebung ins Auge gefasst. In Abschnitt 3.1 werden die beiden verfügbaren Simulationsumgebungen kurz beschrieben. Ihre Eignung im Hinblick auf spezifische Anforderungen aus dieser Arbeit wird in Abschnitt 4 bewertet.

Für Untersuchungen zu Zusammenhängen zwischen Situationskontext und Fahrverhalten (vgl. Abschnitt 6) sowie auch für die Kalibrierung und Validierung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens (vgl. Abschnitt 7) werden darüber hinaus umfassende Daten des realen Verkehrssystems benötigt. In Abschnitt 3.2 werden daher zwei Referenzstrecken mit SBA vorgestellt und die für diese Anlagen bereitgestellten Rohdaten beschrieben.

3.1 Simulationsumgebungen

Die Funktionsmodule zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens stehen in Interaktion mit Simulationsmodulen

- zur Nachbildung des Fahrverhaltens (Verkehrsflusssimulation) sowie
- zur Nachbildung der SBA-Steuerung.

Diese beiden Simulationsmodule werden für den Test, die Validierung, die Erprobung und die Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens benötigt. Die verschiedenen Funktionsmodule und ihr Zusammenwirken werden in Abschnitt 4.2 detaillierter spezifiziert. An dieser Stelle werden zunächst zwei Konstellationen der beiden vorgenannten Simulationsmodule beschrieben, die für diese Arbeit zur Verfügung standen.

Wie in Abschnitt 4.1.1 hergeleitet wird, muss im Kontext dieser Arbeit das Fahrverhalten auf der mikroskopischen Ebene modelliert werden. Für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation existieren bereits diverse in Wissenschaft und Praxis erprobte Simulationsumgebungen (vgl. Abschnitt 2.2.3, speziell Tabelle 3 auf Seite 34), die über proprietäre Schnittstellen eine Interaktion mit externen Funktionsmodulen während der Simulationslaufzeit zulassen.

Der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz soll grundsätzlich auf mehrere Simulationsumgebungen anwendbar sein. Daher wird gefordert, dass die Simulationsmodule trotz produktspezifischer Modellimplementierungen und Schnittstellen austauschbar sein müssen. Diese Anforderung wurde bei der Erarbeitung der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Architektur berücksichtigt. Um die Austauschbarkeit der Simulationsmodule demonstrieren und auch z. B. die Auswirkungen produktspezifisch unterschiedlicher Fahrverhaltensmodelle untersuchen zu können, wurden zwei verschiedene Simulationsmodule für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation und – damit verbunden – zwei verschiedene Implementierungen der SBA-Steuerung einbezogen, die nachfolgend beschrieben werden.

aimsun.next mit Unterzentralensoftware der Heusch/Boesefeldt GmbH

Im Rahmen des durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragten Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB „Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen“ wurde das in dieser Arbeit entstandene Verfahren eingesetzt, um das Verhalten menschlicher Verkehrsteilnehmer in Autobahnabschnitten mit SBA möglichst realistisch nachzubilden. Diese Nachbildung menschlichen Fahrverhaltens diente einerseits als Referenz zur Bewertung verschiedener Ausprägungen automatisierten Fahrens; andererseits wurde sie in Mischverkehrsszenarien mit sowohl menschlich geführten als auch automatisierten Fahrzeugen benötigt. Hauptauftragnehmer dieses Projekts war die Heusch/Boesefeldt GmbH aus Aachen. Als weitere Projektpartner waren das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (Fraunhofer IVI) in Dresden, der Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik an der Technischen Universität Dresden, das Ingenieurbüro Schwietering aus Aachen sowie die Firma Aimsun SLU aus Barcelona eingebunden. Das Projekt und die Anwendung des Verfahrens ist kurz in Abschnitt 8.2 sowie detaillierter im Projektbericht [87] beschrieben.

Im Rahmen des vorgenannten Projekts wurde durch den Partner Aimsun SLU eine Lizenz für die kommerzielle Software *aimsun.next* (Version 8.4) zur Verfügung gestellt. Zur Nachbildung der SBA-Steuerung stellte außerdem die Heusch/Boesefeldt GmbH eine vollumfängliche Unterzentralensoftware bereit, die auch in realen Verkehrsbeeinflussungsanlagen zum Einsatz kommt. Die Unterzentralensoftware wurde für die beiden in Abschnitt 3.2.2 genannten Referenzstrecken A92 und A57 auf Servern der Heusch/Boesefeldt GmbH aufgesetzt, getestet und für den Einsatz im Projekt vorbereitet. Zur Ermöglichung der Interaktion mit *aimsun.next* wurde der Zugriff auf die so vorbereiteten Instanzen der Unterzentralen gewährt und eine eigens durch die Heusch/Boesefeldt GmbH entwickelte Schnittstellenanwendung bereitgestellt.

SUMO mit eigener Implementierung der SBA-Steuerung

Als Alternative zu *aimsun.next* wurde die Open-Source-Software *Simulation of Urban Mobility (SUMO)* ausgewählt, welche ebenso wie *aimsun.next* eine Schnittstelle zur Interaktion während der Simulationslaufzeit besitzt und ein ähnliches, ebenfalls der Familie der Safety-Distance-Modelle zugehöriges Fahrzeugfolgmodell bereitstellt. In dieser Arbeit wurde die Version 1.6.0 verwendet. Für SUMO wurde eine eigene Implementierung der wesentlichen Funktionalitäten einer SBA vorgenommen, die in Abschnitt 4.5 beschrieben wird. Durch diese eigene Implementierung soll sichergestellt werden, dass ein prototypischer Einsatz neuer Steuerverfahren sowie auch Anpassungen an der Konfiguration und Parametrierung der SBA mit geringerem Aufwand realisiert werden können als mit einer vollumfänglichen Unterzentralensoftware. Darüber hinaus stand die Unterzentralensoftware der Heusch/Boesefeldt GmbH nur im Rahmen des vorgenannten Forschungsprojekts und nur für die Simulationssoftware *aimsun.next* zur Verfügung.

3.2 Referenzstrecken und Datengrundlage

In dieser Arbeit wurden Infrastruktur-, Verkehrs- und Prozessdaten von zwei SBA genutzt. Diese wurden dankenswerterweise von den jeweils zuständigen Landesbehörden zur Verfügung gestellt. Außerdem

wurden Kartendaten sowie von Projektpartnern vorbereitete Simulationsszenarien für die betreffenden Autobahnabschnitte verwendet. Nachfolgend werden die Referenzstrecken mit SBA sowie die als Ausgangspunkt verfügbaren Rohdaten beschrieben. Wie diese Daten aufbereitet und somit für diese Arbeit nutzbar gemacht wurden, wird in Abschnitt 5 beschrieben.

3.2.1 Zweck der Datennutzung und Anforderungen

Die Daten der beiden SBA wurden verwendet,

- um Wirkzusammenhänge im Kontext von SBA zu untersuchen (vgl. Abschnitte 6.1 und 6.2) und als Modell zu formulieren (vgl. Abschnitt 7.3),
- um dieses Modell zu kalibrieren (vgl. Abschnitt 7.4) sowie
- um die automatische SBA-Steuerung für die Simulation nachzubilden (vgl. Abschnitt 4.5).

Autobahnabschnitte mit SBA unterscheiden sich zum Teil erheblich. Die Unterschiede betreffen bauliche Randbedingungen wie Fahrstreifenanzahl, Streckentopologie oder Anschlussstellenabstände, aber auch das vorherrschende Fahrer- und Fahrzeugkollektiv. Um eine Übertragbarkeit der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren auf andere SBA zu ermöglichen, sollten die verwendeten Referenzstrecken in ihren Charakteristika vergleichbar mit anderen SBA in Deutschland sein. Gleichzeitig ist wichtig, dass auf den verwendeten Referenzstrecken regelmäßig dichter Verkehr nahe der Kapazitätsgrenze vorherrscht und zumindest gelegentlich auch Verkehrszusammenbrüche auftreten.

Für diese Arbeit ist wichtig, dass Einflüsse auf das Verkehrsgeschehen möglichst detailliert erfasst und den das Verkehrsverhalten beschreibenden Verkehrsdaten zugeordnet werden können. Dies schließt insbesondere die aktuelle Verkehrssituation, die wirksamen Maßnahmen der SBA sowie die Witterungssituation ein. Hierzu müssen neben den Verkehrsdaten auch die Zustände der Anzeigequerschnitte sowie Wetter- und Umfelddaten zur Verfügung stehen. Somit muss bereits bei der Auswahl der Referenzstrecken darauf geachtet werden, dass diese über eine ausreichende Wettersensorik verfügen.

Um Geschwindigkeitsverteilungen und Abstandsverhalten differenzierter bewerten zu können, ist die Verfügbarkeit nicht nur aggregierter, sondern auch einzelfahrzeugbezogener Verkehrsdaten notwendig. Allgemein werden die Verkehrsdaten bereits in der Streckenstation auf ein bestimmtes Zeitintervall aggregiert und die zugrunde liegenden Einzelfahrzeugdaten nicht aufgezeichnet. In diesem Falle käme nur ein temporäres Mitschreiben der Einzelfahrzeugdaten direkt in der Streckenstation in Betracht, was jedoch den Einsatz von Servicepersonal erfordert und nur für eine begrenzte Zeit und Menge an Messquerschnitten möglich ist. Daher ist eine Referenzstrecke mit dauerhafter Aufzeichnung von Einzelfahrzeugdaten zu bevorzugen.

Eine Verwendung streckenbezogener und vor allem auch fahrzeuggenerierter Daten (Fahrtrajektorien, Aufzeichnungen zu Fahrzeugfolgeabständen und Fahrgeschwindigkeiten im Streckenverlauf) wäre für diese Arbeit vorteilhaft gewesen. Diese zusätzlichen Daten hätten eine bessere Grundlage für die Kalibrierung und Validierung von Fahrverhalten in der Verkehrssimulation bilden können. Derartige Daten standen nicht zur Verfügung. Die allein aus den SBA verfügbare Datenbasis (lokal/querschnittsbezogen erfasste Verkehrsdaten) wird jedoch für die Herleitung, Kalibrierung und Anwendung des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes als ausreichend erachtet, sofern lokale Einzelfahrzeugdaten in hinreichendem Umfang bereitgestellt werden können.

3.2.2 Referenzstrecken

Zu Beginn dieser Arbeit erfolgte in Abstimmung mit der Autobahndirektion Südbayern und unter Berücksichtigung der zuvor genannten Kriterien eine Vorauswahl potenzieller Referenzstrecken. Hierbei wurden zunächst zwei Strecken mit unterschiedlichen Charakteristika ausgewählt, und zwar ein Abschnitt der A92 im Norden des Großraums München sowie ein Abschnitt der A8 zwischen München und Salzburg. Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB (vgl. Projektbericht [87]) wurden nach ähnlichen, projektspezifischen Kriterien ebenfalls zwei Strecken ausgewählt, und zwar der bereits erwähnte Abschnitt der A92 sowie ein Abschnitt der A57 im Rheinland.

Die Referenzstrecken A92 und A57 befinden sich innerhalb von Metropolregionen. Dementsprechend treten dort vor allem im Berufsverkehr regelmäßig hohe Verkehrsbelastungen bis hin zu Verkehrszusammenbrüchen auf. Wenngleich Häufigkeit und Ausprägung von Verkehrsstörungen sich unterscheiden, sind diese beiden Strecken vergleichbar, da die Verkehrszusammensetzung und baulichen Eigenschaften ähnlich sind. Im Gegensatz hierzu entstehen verkehrliche Probleme auf dem betrachteten Abschnitt der A8 hauptsächlich im Ferienreiseverkehr, da die Strecke über die Brenner- und Tauernroute eine wichtige Verbindung in und über die Alpen darstellt. Außerdem ist der betrachtete Abschnitt der A8 durch erhebliche Längsneigungen gekennzeichnet, die sich auf den Verkehrsablauf auswirken. Zusätzlich ist anzumerken, dass durch die SBA im Bereich der Steigungs- und Gefällstrecken eine zulässige Höchstgeschwindigkeit sowie teils ein Lkw-Überholverbot als Voreinstellung angeordnet ist. Die SBA-Steuerung kann diese Anordnungen nur durch restriktivere Maßnahmen überschreiben. Hinzu kommt, dass zu bestimmten Zeiten ein Überholverbot für Lkw (bzw. teils für Lkw und Gespanne) mittels statischer Verkehrszeichen angeordnet wird.

Aufgrund dieser erheblichen Besonderheiten der A8 werden in dieser Arbeit lediglich die Referenzstrecken A92 und A57 berücksichtigt. *Abbildung 5* zeigt die Lage der Referenzstrecken einschließlich der SBA. Beide Referenzstrecken werden nachfolgend detaillierter beschrieben.

Referenzstrecke A92 (Freising)

Die A92 verbindet die Stadt München mit dem Flughafen und den nordöstlichen Vororten, und führt darüber hinaus weiter nach Niederbayern. Die SBA auf der A92 umfasst insgesamt einen ca. 32 km langen Autobahnabschnitt im Norden des Großraums München, der sich vom Autobahndreieck München-Feldmoching bis zur Anschlussstelle Erding erstreckt. Die SBA umfasst beide Fahrtrichtungen und somit insgesamt ca. 64 km Richtungsfahrbahn. Die Strecke weist große Kurvenradien und keine erhebliche Längsneigung auf, sodass keine Einflüsse der Streckentopologie auf das Fahrverhalten zu erwarten sind. Sie ist vor allem durch Berufsverkehr von und nach München hoch belastet, wobei die Spitzenbelastung in Fahrtrichtung München (Frühspitze) stärker ausgeprägt ist als in der stadtauswärtigen Richtung (Nachmittagsspitze).

Innerhalb des mit der SBA ausgestatteten Abschnitts befindet sich das Kreuz Neufahrn. Dieses hat einen erheblichen verkehrlichen Einfluss: ca. 40 bis 50% der Fahrzeuge verlassen hier die A92, um auf die A9 als bedeutende Nord-Süd-Verbindung zu wechseln (ähnlich in beiden Fahrtrichtungen). Ein etwa ebenso großer Anteil an Fahrzeugen fährt von der A9 in die A92 ein (bezogen auf den Gesamtverkehr stromabwärts des Kreuzes, ebenfalls in beiden Fahrtrichtungen). Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit nur der Abschnitt östlich des Kreuzes Neufahrn betrachtet. Dieser Teilabschnitt mit nunmehr

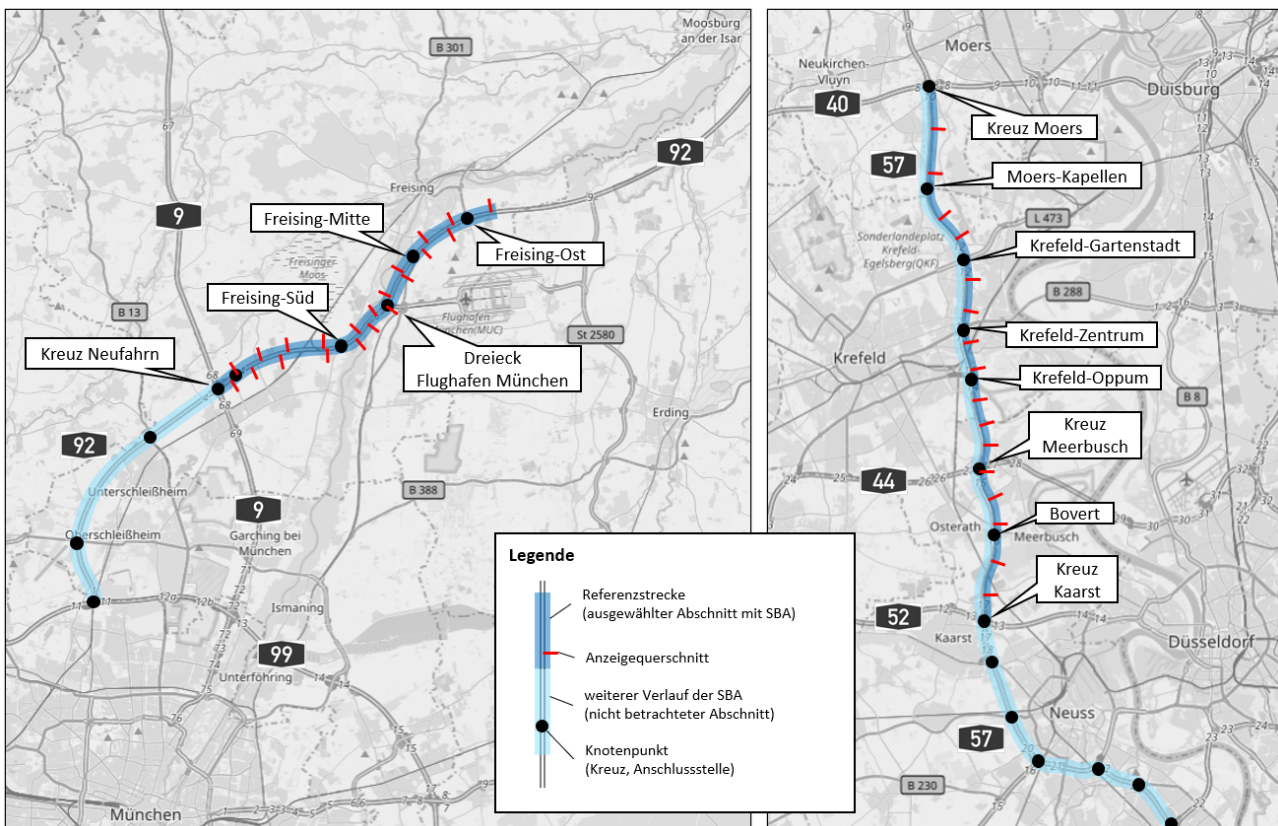


Abbildung 5: Lage der Referenzstrecken A92 (links) und A57 (rechts) (Karte: OpenStreetMap [120])

ca. 38 km Richtungsfahrbahn, sowohl zwei- als auch dreistreifigen Fahrbahnquerschnitten und vier Anschlussstellen bildet die Referenzstrecke A92.

Die SBA in diesem Abschnitt umfasst je Fahrtrichtung zehn Mess- und Anzeigequerschnitte entlang der Hauptfahrbahn. Diese sind jeweils an einem Standort konzentriert, d.h. bei jedem Anzeigequerschnitt befindet sich auch ein Messquerschnitt. Darüber hinaus befinden sich weitere Messquerschnitte in allen Ein- und Ausfahrten. Der Abschnitt ist mit neun Nebelmessgeräten sowie fünf Messstellen für Niederschlag und Fahrbahnzustand ausgestattet. Hervorzuheben ist, dass an 16 Messquerschnitten (davon elf auf der Hauptfahrbahn) durchgehend Einzelfahrzeugdaten aufgezeichnet werden. Daher ist diese Strecke in besonderem Maße als Referenzstrecke für diese Arbeit geeignet.

Eine weitere Besonderheit der SBA auf der A92 ist, dass die SBA-Steuerung Unterschiede zu anderen SBA aufweist. So wird z. B. als obere Stufe der Harmonisierung der Geschwindigkeit eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h anstelle von 120 km/h eingesetzt. Die Harmonisierung der Geschwindigkeit gliedert sich außerdem in einen präventiven Eingriff (bei erhöhter Verkehrsstärke, Anwendung im Umfeld des auslösenden Messquerschnitts) sowie einen reaktiven Eingriff (aufgrund hoher Verkehrsdichte und niedriger Geschwindigkeit, Anwendung stromabwärts des auslösenden Messquerschnitts). Diese Besonderheiten widersprechen der zuvor formulierten Anforderung einer Übertragbarkeit auf andere SBA. Der Vorteil der Verfügbarkeit der Einzelfahrzeugdaten wiegt jedoch stärker, sodass dieser Umstand in Kauf genommen wird.

Referenzstrecke A57 (Krefeld)

Die A57 verbindet Köln mit dem westlichen Großraum Düsseldorf (Neuss, Krefeld) und den Niederlanden (Nimwegen). Die Strecke ist auf einem Abschnitt von ca. 40 km Länge im Bereich der Städte Neuss und Krefeld in beiden Fahrtrichtungen mit einer SBA ausgestattet. Die Referenzstrecke A57 umfasst einen Teilabschnitt von ca. 23 km Länge und darin ausschließlich die Fahrtrichtung Nimwegen (Nord).

Ähnlich wie die A92 dominiert auf der A57 der Einfluss des Berufsverkehrs, der jedoch deutlich stärker ausgeprägt ist und in der betrachteten Fahrtrichtung vor allem in der Nachmittagsspitze zu häufigen und schwerwiegenderen überlastungsbedingten Staus führt.

Die Referenzstrecke A57 hat ebenso wie die A92 sowohl zwei- als auch dreistreifige Fahrbahnquerschnitte. Sie wird durch die Autobahnkreuze Kaarst im Süden und Moers im Norden begrenzt, dazwischen liegen ein weiteres Autobahnkreuz (Meerbusch) sowie fünf Anschlussstellen und eine Tank- und Rastanlage. Das Kreuz Meerbusch hat ähnlich wie das Kreuz Neufahrn auf der A92 einen signifikanten verkehrlichen Einfluss, zumal sich hier die Anzahl der Fahrstreifen von drei auf zwei reduziert. Allerdings ist der Anteil des durchgehenden Verkehrs mit fast 70% größer als beim Kreuz Neufahrn²⁵.

Die SBA im betrachteten Abschnitt besteht aus 16 Anzeige- und 25 Messquerschnitten entlang der Hauptfahrbahn. Anders als bei der A92 sind diese nicht an einem Standort konzentriert, d.h. Anzeige- und nächstgelegene Messquerschnitte liegen teils in erheblicher Entfernung zueinander. Es befinden sich Messquerschnitte in allen Ein- und Ausfahrten (nicht jedoch in der Ein- und Ausfahrt der Tank- und Rastanlage). Der Abschnitt ist mit zwei Messstellen für Wetter- und Umfelddaten ausgestattet.

Eine Besonderheit der Referenzstrecke A57 ist, dass im Bereich des Stadtgebiets Krefeld eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h als Voreinstellung angeordnet ist, die nur durch restriktivere Maßnahmen überschrieben werden kann. Als weitere Besonderheit sind drei der Anschlussstellen mit Zuflussregelungsanlagen ausgestattet, die flankierend zur SBA dazu beitragen, einen Verkehrszusammenbruch auf der Hauptfahrbahn zu vermeiden.

3.2.3 Infrastrukturdaten

Die Daten zur Infrastruktur umfassen zum einen Kartendaten, welche insbesondere für die realitätstreue Abbildung der Straßeninfrastruktur in der Simulation benötigt werden. Zum anderen beinhalten sie Informationen über die streckenseitigen Einrichtungen sowie die Konfigurationen und Betriebsparameter der SBA.

Die Daten zu den SBA wurden dankenswerterweise von der Autobahndirektion Südbayern (Strecken A92 und A8)²⁶ sowie vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW, Strecke A57) zur Verfügung gestellt.

²⁵ Im durch die Heusch/Boesefeldt GmbH beigestellten, kalibrierten Simulationsszenario [87] für einen repräsentativen Nachmittagszeitraum mit starkem Berufsverkehr verlassen ca. 31% der stromaufwärts des Kreuzes Meerbusch fahrenden Fahrzeuge die A57, während ca. 32% der stromabwärts des Kreuzes angetroffenen Fahrzeuge in die A57 eingefahren sind.

²⁶ Daten der A8 wurden zwar zunächst aufgenommen und aufbereitet, jedoch aus den in Abschnitt 3.2.2 angeführten Gründen im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht verwendet.

Kartendaten und Netzmodelle

Für die Nachbildung der Referenzstrecken in SUMO wurden frei verfügbare Kartendaten des Projekts OpenStreetMap [120] verwendet. Hierbei wurden die ausgewählten Kartenausschnitte mithilfe der SUMO-Anwendung netconvert importiert [38][40] und in ein für SUMO spezifisches Kartenformat konvertiert. Dieses wiederum wurde manuell mit der ebenfalls zu SUMO gehörigen Anwendung netedit [39] überprüft und nachbearbeitet.

Für aimsun.next wurden im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB durch den Projektpartner Heusch/Boesefeldt GmbH kalibrierte Simulationsszenarien bereitgestellt, in denen auch das Netzmodell verankert ist. Die Vorgehensweise zur Erstellung der Szenarien und des zugehörigen Netzmodells ist im Projektbericht [87] beschrieben.

Infrastrukturdaten der SBA

Informationen zu streckenseitigen Infrastrukturkomponenten der SBA beinhalten für alle relevanten Mess- und Anzeigeelemente eine eindeutige Bezeichnung, ihre Lage im Straßennetz (geo- sowie netzreferenziert durch Strecke, Fahrtrichtung, Betriebskilometer und ggf. Fahrstreifen) sowie ihre Adressierung innerhalb der SBA (referenziert durch Inselbus, Streckenstation und Knotennummer, Funktionsgruppe nach TLS [21] und Datenendgerätekanal). Beides wird benötigt, um bei der Datenaufnahme und -verarbeitung (vgl. Abschnitt 5.1.1) die Datensätze aus Archivdateien eindeutig zuzuordnen und um die SBA in der Simulation nachbilden zu können (vgl. Abschnitt 4.5). Daten zur SBA-Infrastruktur wurden in Tabellenform und in Form schematischer Streckenpläne übergeben. Für die bayerischen Referenzstrecken standen außerdem Streckenfotos bereit, mit denen z. B. die Lage einzelner Infrastrukturelemente überprüft werden konnte.

Konfiguration und Betriebsparameter der SBA

Die Konfiguration und Betriebsparameter einer SBA umfassen die Definitionen von Maßnahmen der SBA, zugehörige Schaltbilder entlang der Strecke, die Zuordnung von Auslösekriterien zu diesen Maßnahmen sowie Parameter der Datenaufbereitung, Situationserkennung, Maßnahmenauswahl und Längs- und Querabgleichsregeln. Die Bereitstellung dieser umfassenden Versorgungsstände der SBA ist sehr aufwändig und erfolgte daher lediglich für die A92. Durch diese Informationen war es möglich, die Steuerung der SBA für diese Strecke entsprechend der realen Anlage nachzubilden (vgl. Abschnitt 4.5).

Für die SBA auf der A57 standen Konfigurations- und Betriebsparameter zwar nicht unmittelbar zur Verfügung, jedoch wurde im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB durch den Projektpartner Heusch/Boesefeldt GmbH ein Abbild der realen Unterzentrale bereitgestellt, das über eine entsprechende Schnittstelle durch die Simulationssoftware aimsun.next angesprochen werden konnte [87].

3.2.4 Verkehrs- und Prozessdaten

Die für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Verkehrs- und Prozessdaten der SBA umfassen

- lokale aggregierte Verkehrsdaten,
- lokale Einzelfahrzeugdaten,
- Zustandswechsel der Wechselzeichengeber,
- Wetter- und Umfelddaten sowie
- aufbereitete Verkehrsdaten.

Diese Daten wurden dankenswerterweise von der Autobahndirektion Südbayern (Strecken A92 und A8)²⁷ sowie vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Straßen.NRW, Strecke A57) zur Verfügung gestellt. Sie wurden als Archivdaten in systemspezifischen Dateiformaten (XML- bzw. Textdateien) übergeben, die sich zwischen den beiden Straßenbetreibern unterscheiden.

Die Daten für die bayerischen Referenzstrecken A92 und A8 umfassen einen Zeitraum von zwei Jahren, und zwar vom 01.01.2014 bis einschließlich zum 31.12.2015. Die Daten der A57 decken die Zeiträume vom 01.01.2017 bis zum 31.12.2017 sowie vom 01.06.2018 bis zum 31.08.2018 ab.

Lokale aggregierte Verkehrsdaten

An ortsfesten Messquerschnitten erfasste Verkehrsdaten standen durchgehend fahrstreifenfein und in Ein-Minuten-Intervallen zur Verfügung. Diese Daten lagen auf den Referenzstrecken A92 und A57 auch für sämtliche Ein- und Ausfahrten vor. Es handelt sich hierbei um Rohdaten von den Streckenstationen, die noch keiner weiteren Verarbeitung auf Seite der Unterzentrale unterzogen wurden, d. h. insbesondere keiner Glättung, Plausibilitätsprüfung oder Ersatzwertbildung. Die Dateninhalte entsprechen den TLS [21] und umfassen je Intervall und Fahrstreifen u. a.

- Verkehrsstärken (gesamt sowie Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge),
- mittlere Geschwindigkeiten (gesamt sowie für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge),
- die Standardabweichung der Geschwindigkeiten sowie
- die mittlere Nettozeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen.

Für die A92 standen ca. 110 Mio. und für die A57 ca. 55 Mio. Datensätze zur Verfügung.

Lokale Einzelfahrzeugdaten

Lokale Einzelfahrzeugdaten, d. h. Daten zu einzelnen Fahrzeugüberfahrten eines Detektors, lagen zeitlich durchgehend für den Teilabschnitt der A92 zwischen dem Kreuz Neufahrn und dem Dreieck Flughafen München in beiden Fahrtrichtungen vor (über 300 Mio. Datensätze). Für die A57 wurden für das Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB im Sommer 2018 Einzelfahrzeugdaten an vier Messquerschnitten jeweils für einen Zeitraum von drei zusammenhängenden Tagen aufgezeichnet (jeweils

²⁷ Daten der A8 wurden zwar zunächst aufgenommen und aufbereitet, jedoch aus den in Abschnitt 3.2.2 angeführten Gründen im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht verwendet.

dienstags bis donnerstags). Anzumerken ist, dass die Aufzeichnung an drei der vier Messquerschnitten innerhalb der Sommerferien erfolgte. Die Einzelfahrzeugdaten entsprechen ebenfalls den TLS (hier: Telegramm-Typ 63).

Zustandswechsel der Wechselverkehrszeichen

Die Zustandswechsel der Wechselverkehrszeichen wurden ereignisbasiert, d. h. nicht in festen Zeitintervallen aufgezeichnet. Dabei wurde der jeweils neue Anzeigezustand aller Zeichen eines Anzeigequerschnitts mit Schaltgrund und teils weiteren Informationen protokolliert, sobald mindestens ein Zeichen (oder auch nur die Anzeigehelligkeit) verändert wurde. Die Schaltzustände der Wechselverkehrszeichen sind über Codes definiert (teils gemäß TLS, teils proprietär). Für die A92 standen ca. 2,8 Mio. und für die A57 ca. 4,6 Mio. protokollierte Zustandswechsel zur Verfügung.

Wetter- und Umfelddaten

Die Wetter- und Umfelddaten wurden ebenso wie die lokalen Verkehrsdaten in Ein-Minuten-Intervallen erfasst. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Intervalle teilweise um einige Sekunden zu denen der Verkehrsdaten verschoben sind. Die A92 weist eine dichte Ausstattung mit Wetter- und Umfelddaten auf, während die A57 über nur zwei Messstellen auf der betrachteten Strecke verfügt. Auch die Wetter- und Umfelddaten entsprechen den TLS. Relevant für diese Arbeit sind insbesondere Sichtweite, Niederschlagsintensität und -art, Wasserfilmdicke sowie Fahrbahnzustand.

Aufbereitete Verkehrsdaten

Durch die Autobahndirektion Südbayern wurden zusätzlich weitere aufbereitete Verkehrszustände und -daten bereitgestellt. Dies umfasst

- Contour-Plots (Weg-Zeit-Diagramme Geschwindigkeitsniveau),
- Tagesklassen aus einer Clusteranalyse,
- Stauzeiträume und -abschnitte sowie
- modellbasiert ermittelte Reisezeiten (nur für einzelne Referenztage).

Die Contour-Plots sind Weg-Zeit-Diagramme mit farbcodiertem Geschwindigkeitsniveau. Sie stehen je Strecke, Fahrtrichtung und Tag als Grafik bereit. Innerhalb der Grafiken ist durch eine Kennziffer auch eine Zuordnung des Verkehrsstärke-Tagesgangs zu einer bestimmten streckenspezifischen sowie netzweiten Tagesklasse angegeben, die im Rahmen einer Clusteranalyse bestimmt wurde [157]. Zusätzlich wurden Stauzeiträume und -abschnitte als CSV-Datei bereitgestellt. Diese Daten helfen, bestimmte Situationen im empirischen Datenbestand zu identifizieren.

Darüber hinaus wurden Reisezeitdaten der A92 für einzelne Referenztage bereitgestellt. Die Reisezeiten wurden modellbasiert aus lokalen Verkehrsdaten abgeleitet. Wie gut sie mit tatsächlichen Reisezeiten übereinstimmen, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht bewertet.

4 Verfahren zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens

Wie in Abschnitt 2.4 dargestellt, besteht eine der wesentlichen Herausforderungen für die Untersuchung komplexer Systeme zur streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation in der Schwierigkeit, die vielfältigen, situationspezifisch unterschiedlichen Einflüsse auf das Fahrverhalten realitätsgetreu einzubeziehen. Gegenstand dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Verfahrens, das es den Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) während der Simulation ermöglicht,

- den individuell wahrnehmbaren Situationskontext zu erfassen sowie
- das eigene (individuelle) Fahrverhalten derart anzupassen, dass das für diesen Situationskontext in der Realität beobachtete (kollektive) Fahrverhalten insgesamt möglichst gut nachgebildet wird.

Hierzu wurde ein *Inferenzmodell* erarbeitet, das es ermöglicht, von einem aktuell vorherrschenden Situationskontext auf die jeweils zugehörigen das Fahrverhalten bestimmenden Parameter der FFE zu schließen. Zudem umfasst das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Verfahren eine Anwendung zur Interaktion mit der Verkehrsflusssimulationssoftware, um den Situationskontext abzurufen und die durch das Inferenzmodell ermittelten Parameter auf die FFE anzuwenden.

In Abschnitt 4.1 wird zunächst der Gegenstand der Modellierung definiert, indem die relevanten Objektklassen (Entitäten) und Prozesse im Kontext der Fahraufgabe sowie der streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung identifiziert und charakterisiert werden. Dabei werden u. a. Zustandsmerkmale und Kenngrößen zur Beschreibung der wahrnehmbaren Fahrsituation, des hierdurch beeinflussten Fahrverhaltens und dahinterstehenden Handlungsmotive benannt.

Anschließend wird in Abschnitt 4.2 die gewählte Architektur zur Implementierung der zuvor definierten Prozesse vorgestellt und begründet. In Abschnitten 4.3 und 4.4 wird erläutert, wie das Inferenzmodell bzw. die Funktionen zur Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation konzipiert und implementiert wurden. Das Verfahren wird im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) auf Autobahnen validiert und pilothaft angewendet (vgl. Abschnitte 7.5 bzw. 8). Daher wird in Abschnitt 4.5 beschrieben, wie die hierfür benötigten Funktionalitäten der SBA nachgebildet und für die Simulation verfügbar gemacht wurden.

4.1 Beschreibung des Modellierungsgegenstands

Ein Modell ist eine Nachbildung eines Ausschnitts der Realität. Simulationsmodelle werden z. B. eingesetzt, um die Auswirkungen von Veränderungen an einem komplexen System abschätzen oder die weitere Entwicklung eines bestimmten Prozesses vorhersagen zu können [23]. Da die Realität durch eine sehr große Komplexität gekennzeichnet ist und i. d. R. nicht alle Einflüsse auf den zu betrachtenden Vorgang bekannt oder beobachtbar sind, kann diese Nachbildung lediglich ein partielles und abstrahiertes Abbild der Realität sein. Dieses sollte eine möglichst geringe Komplexität aufweisen, damit der Aufwand der Modellierung und der späteren Validierung begrenzt und damit ein günstiges Verhältnis zwischen Simulations- und Realzeit erreicht werden kann. Ein solches Modell muss jedoch sämtliche für den Betrachtungsgegenstand wesentlichen Zusammenhänge beinhalten. Um dies zu gewährleisten, wird nachfolgend der Gegenstand der Modellierung definiert und die relevanten Entitäten und Prozesse beschrieben. Dabei werden auch die Begriffe *Fahrsituation*, *Fahrverhalten* und *Fahrpräferenzen* eingeführt und Zustandsmerkmale bzw. Kenngrößen zu ihrer Beschreibung definiert.

4.1.1 Modellskala und Entitäten

Gegenstand der Modellierung ist der Verkehrsablauf auf einem Autobahnabschnitt mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung. Dies umfasst konventionelle, kollektiv wirkende SBA sowie darüber hinaus auch Dienste und Anwendungen vernetzten Fahrens.

Ziele und Anforderungen

Der so umrissene Modellierungsgegenstand umfasst

- die Straßeninfrastruktur,
- das Straßenumfeld sowie
- Fahrzeuge und Fahrzeugführende.

Diese Elemente seien nachfolgend durch den Begriff *Verkehrssystem* zusammengefasst. Unter *Straßeninfrastruktur* wird hier die Gesamtheit aller baulichen und verkehrstechnischen Elemente innerhalb eines ausgewählten Ausschnitts des realen Straßennetzes verstanden. Dies wiederum beinhaltet neben der Fahrbahn auch Einrichtungen zur Verkehrs-, Wetter- und Umfelddatenerfassung, Wechselzeichengeber, die für den Betrieb dieser Einrichtungen notwendige Informations- und Kommunikationstechnik sowie die in einer entfernten Verkehrszentrale implementierten Steueralgorithmen und -prozesse. Das *Straßenumfeld* beinhaltet die Umgebung des Verkehrsraums und dient der Berücksichtigung äußerer Einflüsse, insbesondere der Wettersituation. Unter dem Begriff *Fahrzeug* werden sämtliche technischen Eigenschaften und Ausstattungsmerkmale subsummiert. Fahrzeuge können mit Assistenz- oder Fahrfunktionen ausgerüstet sein, einschließlich solcher, die auf einer Vernetzung mit streckenseitiger Infrastruktur, einer entfernten Zentrale oder anderen Fahrzeugen beruhen. Die Assistenz- oder Fahrfunktionen liefern entweder den Fahrzeugführenden Informationen, die ihr Fahrverhalten beeinflussen können, oder nehmen als automatisierte Fahrfunktionen unmittelbar Einfluss auf die Fahraufgabe. Die *Fahrzeugführenden* unterliegen dem Einfluss von Erfahrungen, Fähigkeiten und Fertigkeiten, Handlungsmotiven und Emotionen.

Um festzulegen, wie detailliert das zuvor skizzierte System beschrieben werden muss, werden zunächst die Ziele der Modellierung konkreter gefasst. Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, dienen SBA der Erhöhung der Verkehrssicherheit (u. a. durch erhöhte Aufmerksamkeit und angepasste Geschwindigkeit) sowie der Verbesserung der Leichtigkeit des Verkehrs und der Leistungsfähigkeit (u. a. durch Angleichung der Fahrgeschwindigkeiten und eine damit verbundene Vermeidung von Verkehrszusammenbrüchen). Für Dienste und Anwendungen vernetzten Fahrens, etwa die im Projekt CROADS definierten Day-One-Anwendungen [28], sind vergleichbare Zielsetzungen definiert. Daher wird aus wissenschaftlicher Sicht folgende Anforderung gestellt:

Anforderung 1. Das Modell des Verkehrssystems muss einen ausreichenden Detaillierungsgrad aufweisen, um Wirkungen streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung auf relevante Indikatoren für Verkehrssicherheit, Leichtigkeit des Verkehrs und Leistungsfähigkeit realistisch nachbilden zu können. Dabei müssen auch weitere diese Wirkungen überlagernde Einflüsse durch Verkehrs- und Umgebungsbedingungen einbezogen werden. Es ist zu berücksichtigen, dass das Fahrverhalten über das Fahrzeug- und Fahrerkollektiv variieren kann.

Bei Anwendung des Modells wird zunächst ein Referenzszenario definiert, d. h. eine Ausprägung des Systems, mit der andere Szenarien verglichen werden können. Für dieses Referenzszenario muss eine ausreichende Datengrundlage zur Kalibrierung und Validierung des Modells zur Verfügung stehen. Ein mögliches Referenzszenario im Kontext dieser Arbeit ist z. B. die aktuell vorhandene Ausprägung der SBA-Steuerung. Aus dem Referenzszenario können die übrigen zu untersuchenden Szenarien abgeleitet werden, indem bestimmte Merkmale des Verkehrssystems verändert werden (hier: z. B. Ergänzung eines SBA-Steuerverfahrens oder Anpassung der Konfiguration der SBA, vgl. Abschnitt 8.1). Auch Veränderungen am Fahrer- oder Fahrzeugkollektiv können Gegenstand der Untersuchung sein, z. B. ein Hinzufügen automatisierter oder vernetzter Fahrzeuge mit im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen abweichenden Verhaltensweisen (vgl. Abschnitt 8.2). Hieraus ergibt sich eine weitere Anforderung:

Anforderung 2. Das Modell des Verkehrsbeeinflussungssystems muss einen ausreichenden Detaillierungsgrad aufweisen, um Veränderungen an ausgewählten Prozessen (z. B. einzelnen Steuerverfahren) vornehmen zu können. Veränderungen in übergeordneten oder nachfolgenden Prozessen der Verkehrsbeeinflussung müssen insoweit berücksichtigt werden, dass die resultierenden Anzeigezustände mit denen eines realen, auf gleiche Weise veränderten Verkehrsbeeinflussungssystems übereinstimmen.

Festlegung der Modellskala

Als Rahmen für die Festlegung des Detaillierungsgrads bei der Modellierung des Verkehrssystems muss zunächst eine geeignete Modellskala (vgl. Abschnitt 2.2.1) gewählt werden. Durch die vorgenannten Anforderungen an das Verkehrssystemmodell ist eine Modellierung auf *mikroskopischer* Ebene erforderlich:

In einem *makroskopischen Modell* wäre das Abstands- und Geschwindigkeitsverhalten nur aggregiert über alle FFE in einem Streckenabschnitt abgebildet; auf einzelnen Zeitlücken und Fahrgeschwindigkeiten beruhende Bewertungsgrößen, wie sie in der Literatur zur Bewertung von Verkehrssicherheit sowie der Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs vielfach eingesetzt wurden (vgl. Abschnitt 2.2.2), könnten dabei nicht bestimmt werden. Auch lassen sich Einflüsse heterogener Fahrzeug- bzw. Fahrerkollektive in einem makroskopischen Modell nicht abbilden, z. B. Mischverkehrsszenarien, in denen konventionelle Fahrzeuge mit automatisierten oder vernetzten Fahrzeugen interagieren, für die ein abweichendes Fahrverhalten unterstellt wird. Hinzu kommt, dass in einem makroskopischen Modell die Auswirkung der SBA-Steuerung auf die Stabilisierung des Verkehrsflusses bei dichtem Verkehr vorgegeben werden müsste – dies ist jedoch ein Nutzenpotenzial einer SBA, das mit Hilfe der Simulation untersucht werden soll.

In einem *mikroskopischen Modell* wird dagegen das Verhalten einzelner Fahrzeuge bzw. Verkehrsteilnehmer und ihre gegenseitige Interaktion abgebildet. Dabei werden Fahrzeug und Fahrzeugführende als eine Einheit betrachtet, die als Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE) bezeichnet wird. Erst in dieser Modellskala können die zuvor beschriebenen Einflüsse untersucht werden. Eine Modellierung des Verkehrs auf mikroskopischer Ebene wird gleichwohl als ausreichend angesehen. Eine noch detailliertere submikroskopische Modellierung, in der Fahrzeug und Fahrzeugführende sowie ggf. auch einzelne Fahrzeugsysteme und -funktionen getrennt betrachtet werden, ist für die Zielsetzung dieser Arbeit nicht notwendig.

Abgrenzung der Modellentitäten

In Einklang mit den vorgenannten Festlegungen zeigt *Abbildung 6* die als relevant erachteten Entitäten (Objektklassen) zur modellhaften Beschreibung des Verkehrssystems. Diese sind in Form eines Klassendiagramms gemäß Unified Modeling Language (UML) dargestellt. Hierbei werden auch Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Entitäten beschrieben sowie ausgewählte Attribute (Merkmale) – zunächst vereinfacht – angegeben. Grau dargestellte Entitäten werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt, sind hier jedoch der Vollständigkeit halber aufgeführt. Dies betrifft zum einen Roadside Units (RSU) und zentralensseitige Dienste für vernetztes Fahren sowie zum anderen Einflüsse von Wetter- und Umfeldbedingungen. Potenzielle diesbezügliche Modellerweiterungen werden in Abschnitt 9 diskutiert.

Durch Festlegung auf eine mikroskopische Modellierung ist vorgegeben, dass Fahrer und Fahrzeug als eine Einheit (FFE) zusammengefasst, aber jede FFE individuell betrachtet wird. Eine FFE ist durch unveränderliche Fahrzeugeigenschaften und veränderliche Zustandsmerkmale gekennzeichnet. Während sich eine FFE durch den Verkehrsraum bewegt, nimmt sie laufend ihre Umgebung wahr und leitet daraus eine Fahrsituation ab. Das individuelle Fahrverhalten der FFE wird neben den Fahrzeugeigenschaften und der Fahrsituation auch durch Fahrpräferenzen determiniert, die aufgrund von Erfahrungen, Fähigkeiten und Fertigkeiten, Handlungsmotiven und Emotionen der Fahrzeugführenden über das FFE-Kollektiv variieren können. Eine für das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Verfahren

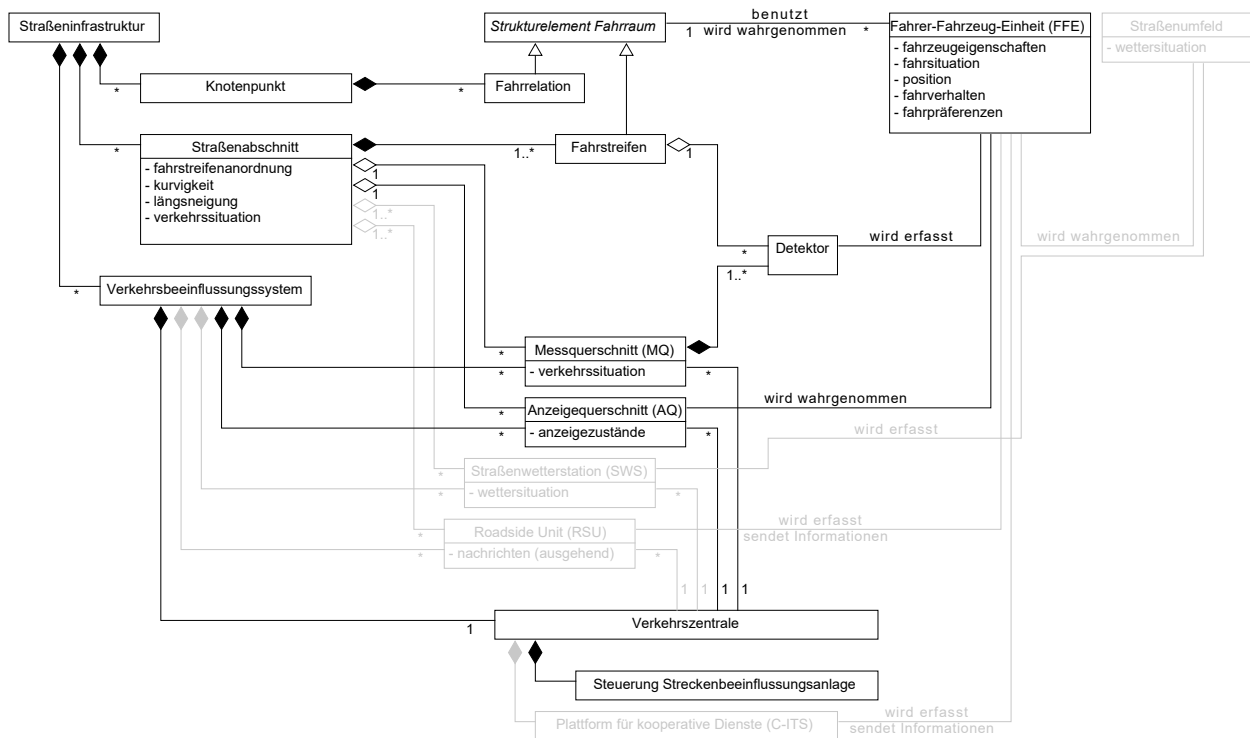


Abbildung 6: Entitäten eines Autobahnabschnitts mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung

essentielle Forderung ist, dass die Fahrpräferenzen über die Simulation nicht konstant bleiben, sondern sich mit der Fahrsituation verändern. Die Begriffe Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen werden in Abschnitt 4.1.3 definiert, und es werden Merkmale und Kenngrößen zu ihrer Beschreibung benannt.

Das Straßennetz wird durch Knoten (Knotenpunkte) und gerichtete Kanten (Straßenabschnitte) abgebildet. Für mikroskopische Verkehrsmodelle muss dieses Abbild fahrstreifenfein sein, und an den Knotenpunkten müssen die zulässigen Fahrbeziehungen (Fahrrelationen) fahrstreifenweise vorgegeben werden.

Die lokale Verkehrsdatenerfassung in einer SBA erfolgt zunächst über in den Fahrstreifen eingebaute Detektoren (z. B. Doppelinduktionsschleifen) oder auf die Fahrstreifen bezogene Detektionsfelder. Beide Formen fahrstreifenbezogener Datengeber werden in dieser Arbeit unter dem Begriff Detektoren subsummiert. Die fahrstreifenbezogenen Verkehrsdaten werden über alle Detektoren einer bestimmten Fahrtrichtung (bzw. Fahrrelation) aggregiert. Eine solche Zusammenfassung von Detektoren wird als Messquerschnitt (MQ) bezeichnet. Da einzelne SBA-Steuerverfahren auch auf fahrstreifenbezogene Kenngrößen zurückgreifen (z. B. Unruhe im Verkehr nach MARZ [18]), wird die Verkehrsdatenerfassung auch im Modell fahrstreifenbezogen abgebildet.

Neben einer streckenseitigen Datenerfassung wird zukünftig auch die Aufnahme von Daten vernetzter Fahrzeuge (Probe Vehicle Data) eine Rolle spielen, welche eine räumlich durchgehende Bewertung des Verkehrszustands ermöglicht. Diese Datenaufnahme erfolgt entweder durch eine streckenseitige Kommunikationseinheit (Roadside Unit, RSU) oder direkt durch ein entferntes Hintergrundsystem, welches hier vereinfachend der Verkehrszentrale zugeordnet wird. Eine abschnittsbezogene Verkehrsdatenerfassung mittels Fahrzeugwiedererkennung findet zwar zunehmend Verbreitung, wird jedoch bislang nicht in SBA verwendet und deshalb auch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Beeinflussung des Verkehrs erfolgt durch Ausgabe von Ge- und Verboten, Warnungen und anderen Informationen an die Verkehrsteilnehmer. In konventionellen SBA erfolgt dies über mehrere Wechselzeichengeber, die zu einem Anzeigequerschnitt (AQ) zusammengefasst sind. Die Informationen stehen den Verkehrsteilnehmern somit beim Passieren des entsprechenden Querschnitts zur Verfügung und gelten für den nachfolgenden Straßenabschnitt. An dieser Stelle wird auf eine Modellierung der einzelnen Wechselzeichengeber verzichtet und nur die AQ insgesamt berücksichtigt. Die Zustände der einzelnen Wechselzeichengeber lassen sich vollständig durch vier auf den AQ bezogene Zustandsmengen beschreiben (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Bei Anwendungen vernetzten Fahrens erfolgt die Informationsverbreitung an die Verkehrsteilnehmer analog zur Datenaufnahme entweder durch streckenseitige RSU oder durch ein Hintergrundsystem. Die Informationsbereitstellung geschieht somit nicht querschnittsbezogen, sondern innerhalb definierter geografischer Gebiete bzw. Streckenabschnitte.

Auf eine explizite Modellierung von Kommunikationsprozessen zwischen Infrastrukturelementen wird hier verzichtet. In konventionellen SBA erfolgt der Datenaustausch zwischen streckenseitiger Infrastruktur und der entfernten Verkehrszentrale leitungsgebunden. Ausfälle und Fehler in der Datenübertragung kommen zwar vor, können aber ebenso wie andere technische Störungen vernachlässigt werden. Demzufolge können Funktionen einer SBA von der Datenerfassung bis zur Ansteuerung der Wechselzeichengeber zusammengefasst betrachtet werden, auch wenn sie in der Realität zwischen Streckenstationen und der Zentrale verteilt sind.

Im Kontext vernetzten Fahrens wäre die Modellierung der Funkkommunikation durchaus sinnvoll, da hier Einflüsse auf die Kommunikationsreichweite oder auch Überlastungen des Kommunikationskanals bedeutsam sind. Da vernetztes Fahren jedoch in dieser Arbeit nicht im Vordergrund steht, wird hierauf verzichtet. Entsprechende Modellansätze existieren aber bereits und könnten grundsätzlich in das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren integriert werden.

Einflüsse des Wetters auf das Fahrverhalten werden hier ebenfalls nicht näher betrachtet. Sie werden ausgeblendet, indem lediglich Szenarien ohne Niederschlag, Fahrbahnnässe und Sichtweitereinschränkungen betrachtet werden.

4.1.2 Prozesse

Im bisher beschriebenen Modell eines Verkehrssystems mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung laufen zweierlei Prozesse, und zwar der *Fahrprozess* in jeder FFE sowie die *Steuerung der SBA* durch die Verkehrszentrale. *Abbildung 7* zeigt als UML-Aktivitätsdiagramm, wie diese Prozesse modelliert werden. Dabei repräsentieren die schwarzen Pfeile den Kontrollfluss und die farbigen Linien den Informationsfluss zwischen den Aktivitäten. Beide Prozesse werden zeitdiskret abgebildet und zyklisch wiederholt. Der Fahrprozess umfasst die gesamte Fahrt einer FFE durch den im Modell abgebildeten Ausschnitt des Straßennetzes und endet, wenn dieses verlassen wird. Die SBA-Steuerung wird bis zum Ende des Betrachtungszeitraums fortgeführt.

Der Fahrprozess

Wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, lässt sich die Fahraufgabe gliedern in die Umgebungswahrnehmung, die Situationserkennung und -bewertung sowie die Vorbereitung und Ausführung von Fahrentscheidungen, welche sich im individuellen Fahrverhalten²⁸ widerspiegeln.

Die *Umgebungswahrnehmung* und *Situationserkennung* muss insoweit modelliert werden, als dass die wesentlichen Einflussfaktoren auf das individuelle Fahrverhalten in einem Autobahnabschnitt mit SBA berücksichtigt werden. Diese Einflussfaktoren müssen gleichermaßen im Modell abbildbar und aus der verfügbaren Datengrundlage (vgl. Abschnitt 3.2) ermittelbar sein, damit eine situationsdifferenzierte Kalibrierung des Modells erfolgen kann. Die wahrnehmbaren Einflussfaktoren umfassen im Wesentlichen das Verhalten anderer Fahrzeuge (grüner Informationsfluss) sowie die Anzeigezustände der AQ (blauer Informationsfluss). Dass das Fahrverhalten darüber hinaus auch durch weitere, äußere Faktoren wie z. B. das Wetter beeinflusst werden kann, sei an dieser Stelle ausgeblendet. Eine genauere Charakterisierung des Begriffs *Fahrsituation* und eine Festlegung der konkret wahrnehmbaren Merkmale des Verkehrssystems wird in Abschnitt 4.1.3 gegeben.

Veränderungen des *Fahrverhaltens* erfolgen nicht nur als Reaktion auf die gerade wahrgenommene Umgebungssituation, sondern beziehen auch über einen gewissen räumlichen und zeitlichen Horizont die bisher wahrgenommene Situation ein. Nicht nur die unmittelbar miteinander interagierenden FFE, sondern auch die Verkehrslage insgesamt beeinflusst das Fahrverhalten – ist z. B. die Verkehrsdichte hoch und das allgemeine Geschwindigkeitsniveau niedrig, kann unterstellt werden, dass viele Verkehrsteilnehmer akzeptieren, selbst nur mäßige Geschwindigkeiten erreichen zu können. Auch führt das Passieren eines AQ nicht zu einer einmaligen Reaktion des Verkehrsteilnehmers, sondern die Anzeigehalte be-

²⁸ vgl. Definition 4.2 in Abschnitt 4.1.3

4 VERFAHREN ZUR KONTEXTSPEZIFISCHEN ANPASSUNG DES FAHRVERHALTENS

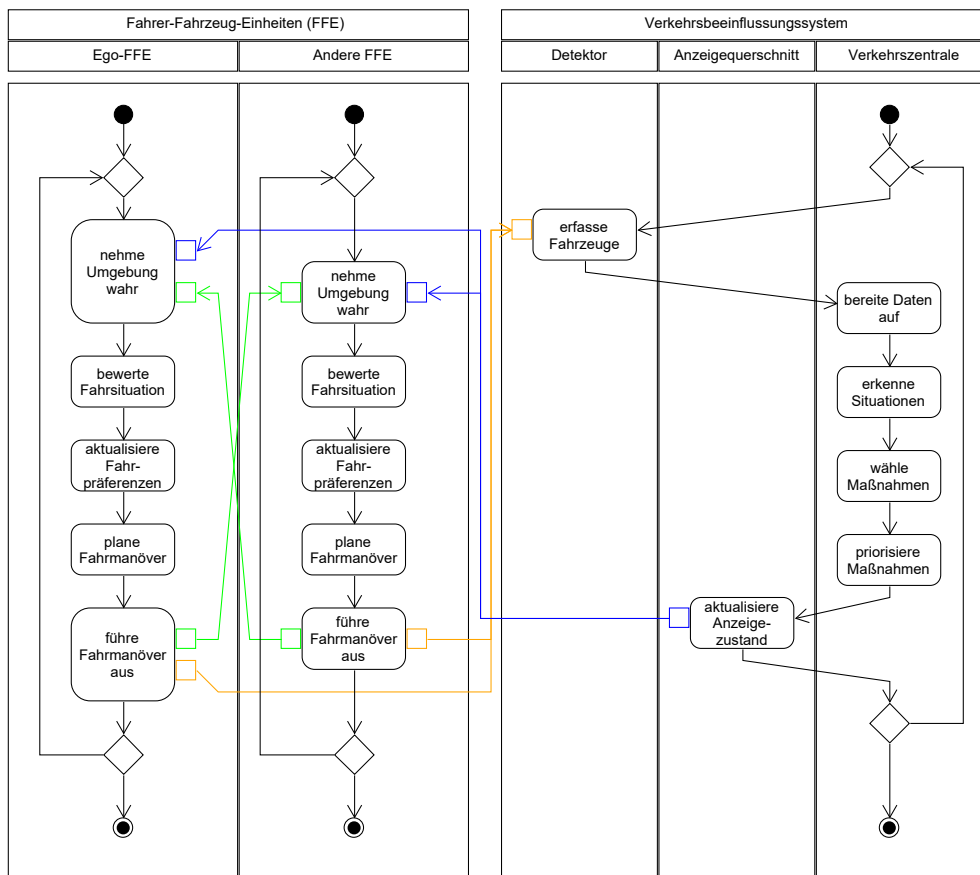


Abbildung 7: Prozesse des Autobahnverkehrs mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung

ziehen sich auf den nachfolgenden Streckenabschnitt und werden somit über einen gewissen räumlichen und zeitlichen Bereich berücksichtigt. Es wird angenommen, dass dieser Wirkungsbereich eines AQ bis zum nachfolgenden AQ reicht. Somit wirkt sich eine SBA weniger auf die operationale Fahrentscheidungs-ebene (einzelne Fahrmanöver, Fahrzeugfolge), sondern vielmehr auf die taktische Fahrentscheidungs-ebene²⁹ aus. Daher ist ein essentielles Merkmal des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Verfahrens, dass die Fahrpräferenzen, welche Eigenschaften des Fahrverhaltens über einen längeren Zeitraum bestimmen, sich im Verlauf einer Fahrt in Abhängigkeit der beobachteten Fahrsituation ändern können. Diese Anpassung der Fahrpräferenzen wird als Zwischenschritt zwischen Situationserkennung und der Einleitung konkreter Fahrmanöver eingeführt. Wie die Fahrpräferenzen beschrieben werden können, wird ebenfalls in Abschnitt 4.1.3 beleuchtet.

²⁹ Der Begriff „taktische Fahrentscheidungsebene“ wird hier gemäß der Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsfluss-simulation der FGSV [59] verwendet (vgl. auch Abschnitt 2.2.1). Bei typischen Abständen der AQ zwischen 1.000 und 1.500 m liegt der räumliche Planungshorizont zwar oberhalb des im FGSV-Hinweispapier für diese Ebene angegebenen Bereichs, jedoch liegen die zu erwartenden Durchfahrzeiten bei stabilem Verkehrsfluss (z. B. 1.500 m bei 100 km/h: knapp 1 min) i. d. R. innerhalb des zeitlichen Planungshorizonts.

Prozesse der SBA-Steuerung

Die Prozesse der größtenteils automatisierten Steuerung einer SBA gemäß der in Deutschland und Österreich vorherrschenden Systemarchitektur nach MARZ [18] wurden in Abschnitt 2.1.2 eingehend beschrieben. Bei der Modellierung der SBA müssen zumindest die für Erprobung und Anwendung relevanten Prozesse hinreichend genau nachgebildet werden. Welche Funktionalitäten einer SBA dabei berücksichtigt werden müssen, wird in Abschnitt 4.5.1 beschrieben. Es wird nicht differenziert, ob die Prozesse in einer realen SBA in der Verkehrszentrale, der Unterzentrale oder der Streckenstation implementiert sind.

4.1.3 Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen

Aufgrund ihrer Bedeutung für die weiteren Ausführungen sollen hier die Begriffe *Fahrsituation*, *Fahrverhalten* und *Fahrpräferenzen* definiert sowie Merkmale und Kenngrößen zu ihrer formalen Beschreibung ausgewählt werden. Alle drei Begriffe stehen im Kontext des Fahrprozesses in einer FFE.

Fahrsituation

Ausgangspunkt aller weiteren Fahrentscheidungen ist die Umgebungswahrnehmung und die Bewertung der wahrgenommenen Situation (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die wahrnehmbare und schließlich wahrgenommene Umgebung ist lediglich eine Teilmenge der insgesamt vorherrschenden Umgebungssituation. Donges (1982) [47] (zitiert u. a. in Semrau (2018) [145]) definiert die Fahrsituation als den vom Fahrer wahrnehmbaren sowie die Fahrersituation als den tatsächlich wahrgenommenen Teil der Umgebungssituation. Eine Diskrepanz zwischen Fahr- und Fahrersituation kann z. B. durch Unaufmerksamkeit, Ablenkung oder Müdigkeit entstehen. Eine explizite Modellierung derartiger Wahrnehmungsfehler ist für diese Arbeit nicht notwendig und auch nicht möglich, da die hierzu benötigten Daten nicht zur Verfügung stehen. Deshalb werden Fahr- und Fahrersituation als deckungsgleich betrachtet; nachfolgend wird lediglich der Begriff Fahrsituation verwendet. Der Begriff Fahrsituation sei dementsprechend in Anlehnung an Donges wie folgt definiert:

Definition 4.1 (Fahrsituation). Die Fahrsituation umfasst sämtliche durch eine(n) Fahrzeugführende(n) wahrnehmbaren Teile der Verkehrssituation, d. h. den durch eine(n) Fahrzeugführende(n) wahrnehmbaren Teil der insgesamt vorherrschenden zeitlichen und räumlichen Konstellation verkehrsrelevanter Objekte.

Abbildung 8 und *Tabelle 4* zeigen, welche Größen zur Klassifizierung und quantitativen Beschreibung der Fahrsituation einer FFE herangezogen werden und in welcher räumlichen Zuordnung diese zur betrachteten FFE stehen. Diese in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise zur Modellierung der Fahrsituation wurde bereits vorab in Grimm (2019) [76] sowie im Bericht des Forschungsprojektes FE 03.0538/2015/IGB [87] (dort Abschnitt 3.5.2) beschrieben. Sie wird nachfolgend näher erläutert und begründet.

Eine wichtige Annahme ist, dass eine FFE nur solche Objekte wahrnehmen kann, die sich in einer gewissen Umgebung um diese befinden. Zunächst einmal stehen dabei unmittelbar vorausfahrende oder auf den benachbarten Fahrstreifen fahrende Fahrzeuge im Vordergrund, mit denen eine bestimmte FFE

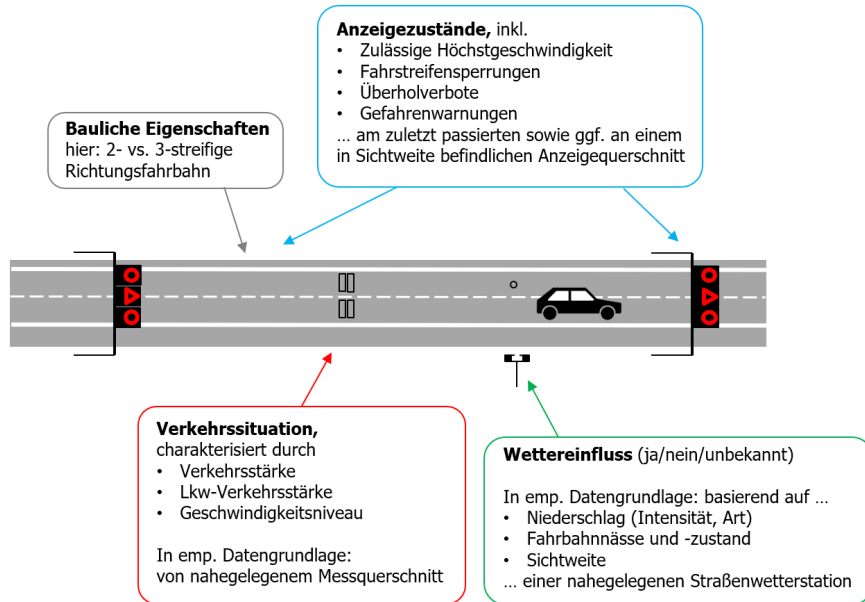


Abbildung 8: Merkmale zur Beschreibung einer Fahrsituation (modifiziert und erweitert nach Grimm (2019) [76] und Hilgers et al. (2020) [87])

Merkmal der Fahrsituation	Symbol	Wertebereich
Anzeigezustand lokal (in Sichtweite befindlicher Anzeigequerschnitt)		
... zul. Höchstgeschwindigkeit	$z_{V,0}$	diskret, vgl. Tabelle 10 in Anhang D
... Fahrstreifensperrungen	$z_{FS,0}$	diskret, vgl. Tabelle 11 in Anhang D
... Überholverbote	$z_{ÜV,0}$	diskret, vgl. Tabelle 12 in Anhang D
... Gefahrenwarnungen	$z_{GW,0}$	diskret, vgl. Tabelle 13 in Anhang D
Anzeigezustand stromaufwärts (zuletzt passierter Anzeigequerschnitt)		
... zul. Höchstgeschwindigkeit	$z_{V,-1}$	diskret, vgl. Tabelle 10 in Anhang D
... Fahrstreifensperrungen	$z_{FS,-1}$	diskret, vgl. Tabelle 11 in Anhang D
... Überholverbote	$z_{ÜV,-1}$	diskret, vgl. Tabelle 12 in Anhang D
... Gefahrenwarnungen	$z_{GW,-1}$	diskret, vgl. Tabelle 13 in Anhang D
bauliche Eigenschaften der Richtungsfahrbahn		
	$z_{Fahrbahn}$	{2-streifig, 3-streifig}
Verkehrssituation		
... Kfz-Verkehrsstärke	q	kontinuierlich
... Lkw-Verkehrsstärke	q_{Lkw}	kontinuierlich
... Geschwindigkeitsniveau	v_s	kontinuierlich
Wettersituation		
	z_{Wetter}	{Einfluss, kein Einfluss, unbekannt}

Tabelle 4: Kenngrößen zur Beschreibung einer Fahrsituation mit Wertebereichen

in Interaktion steht. Jedoch wird auch das Verkehrsgeschehen insgesamt wahrgenommen und bewertet. Hierzu dient nicht nur ein momentaner Ausschnitt der Verkehrssituation, sondern auch die Entwicklung dieser über einen gewissen zurückliegenden Zeitraum. Ähnliches gilt auch für die Einbeziehung von Wetter- und Umfeldbedingungen.

Der Anzeigezustand der AQ kann nur wahrgenommen werden, wenn sich die FFE in hinreichendem Abstand vor diesem befindet. Dementsprechend ist im Modell zu berücksichtigen, dass der Zustandswechsel eines AQ außerhalb des Wahrnehmungsbereichs einer FFE nicht zu einer Verhaltensanpassung führen kann. Konsequenzen aus dieser Forderung werden in Abschnitt 4.4.1 diskutiert. Der Zustand eines AQ muss ähnlich der Verkehrssituation über einen gewissen Zeitraum berücksichtigt werden, und zwar in diesem Fall solange, bis der nächste AQ erreicht wird.

Die Charakterisierung der Fahrsituation muss einerseits im Rahmen des modellhaft abgebildeten Fahrprozesses erfolgen, um Fahrpräferenzen und schließlich das individuelle Fahrverhalten der FFE daran anpassen zu können. Andererseits muss die Fahrsituation auch in der verfügbaren Datengrundlage zu realen SBA ermittelt und den das Fahrverhalten beschreibenden Datensätzen zugeordnet werden, damit der Zusammenhang zwischen Einflussfaktoren und resultierendem Verhalten in gleicher Weise auch aus den empirischen Daten abgeleitet werden kann. Daraus ergibt sich, dass zur Beschreibung der Fahrsituation nur solche Merkmale und Kenngrößen verwendet werden können, die sich auch aus der verfügbaren Datengrundlage heraus ermitteln lassen. Dies wurde bei der Auswahl der in Tabelle 4 genannten Merkmale zur Beschreibung einer Fahrsituation berücksichtigt.

Es ist festzustellen, dass einige dieser Merkmale naturgemäß diskrete Zustandsmengen sind, und zwar die Anzeigezustände der AQ und die Fahrstreifenanordnung. Der Wiedereinfluss wird ebenfalls auf eine diskrete (hier: dreiwertige) Zustandsmenge reduziert. Für die weiterführenden Betrachtungen ist dies ausreichend, da der Wiedereinfluss auf das Fahrverhalten nicht modelliert wird. Die Einteilung wird lediglich genutzt, um in der empirischen Datengrundlage Situationen ohne Wiedereinfluss zu identifizieren. Verkehrssituationen werden hingegen durch wertkontinuierliche Größen beschrieben, welche die Verkehrsnachfrage und -zusammensetzung³⁰ sowie auch die vorherrschende Verkehrsqualität widerspiegeln. Diese Größen ließen sich ebenfalls diskretisieren oder ähnlich dem Wiedereinfluss sogar in eine diskrete Verkehrszustandsklasse zusammenführen. Im hier gewählten Ansatz sollen diese Größen jedoch als kontinuierliche Größen einbezogen werden (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Fahrverhalten

Wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, wird der Begriff Fahrverhalten bei Betrachtung auf der mikroskopischen Skala i. d. R. verwendet, um von außen beobachtbare Zustände und Zustandsänderungen individueller FFE zu beschreiben. Über mehrere FFE können diese Zustände bzw. Zustandsänderungen als Verteilungen entsprechender Kenngrößen beschrieben werden. Dieser Sichtweise folgend sei *individuelles* und *kollektives* Fahrverhalten wie folgt definiert:

Definition 4.2 (Fahrverhalten, individuell). Das individuelle Fahrverhalten umfasst sämtliche von außen beobachtbaren und objektiv erfassbaren Handlungen und Zustände einer individuellen Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE), die aus der Ausführung der Fahraufgabe resultieren.

³⁰ Die Verkehrszusammensetzung lässt sich als Anzahl bzw. Anteil an Fahrzeugen bestimmter Fahrzeugklassen ausdrücken. An dieser Stelle wird lediglich eine grobe Unterscheidung zwischen Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen vorgenommen. Zu den Lkw-ähnlichen Fahrzeugen zählen gemäß Anhang 2.2.1 der TLS [21] neben Lkw auch Busse und Pkw mit Anhänger.

Definition 4.3 (Fahrverhalten, kollektiv). Das kollektive Fahrverhalten ist die Verteilung des individuellen Fahrverhaltens mehrerer FFE in einem bestimmten Zeitintervall (querschnittsbezogene Erfassung) oder Streckenabschnitt (momentane Erfassung).

Abweichend zu Definition 4.2 wird der Begriff Fahrverhalten in der Literatur zuweilen auch verwendet, um Handlungen der oder des Fahrzeugführenden im Rahmen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu beschreiben. Da diese jedoch in dieser Arbeit nicht im Vordergrund stehen, werden Fahrzeuge und jeweils Fahrzeugführende hier vereinfachend als eine Einheit (FFE) betrachtet (vgl. Abschnitt 4.1.1).

Als objektiv erfassbar und von außen beobachtbar gelten insbesondere

- die Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung längs eines Fahrstreifens,
- der genutzte Fahrstreifen,
- die jeweils zu anderen FFE eingehaltenen Abstände bzw. Zeitlücken sowie
- die Signalisierung von Fahrabsichten (z. B. Ankündigung Fahrstreifenwechsel).

Nicht von außen beobachtbar hingegen sind hinter dem Fahrverhalten stehende (nicht signalisierte) Fahrabsichten und Handlungsmotive. Letztere werden weiter unten im Unterabschnitt „Fahrpräferenzen“ betrachtet.

Eine quantitative Beschreibung des Fahrverhaltens wird in dieser Arbeit benötigt,

- um im Zuge der Kalibrierung Zusammenhänge zwischen Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen (s.u.) zu untersuchen und zu modellieren,
- um im Zuge der Validierung das im Modell nachgebildete Fahrverhalten mit dem Fahrverhalten in der Realität vergleichen zu können sowie
- um im Zuge der Anwendung des Verfahrens verschiedene Szenarien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Fahrverhalten bewerten zu können.

Tabelle 5 zeigt die Kenngrößen, die in dieser Arbeit zur Beschreibung des Fahrverhaltens herangezogen werden. Im Vordergrund stehen solche Kenngrößen, von denen angenommen wird, dass sie durch eine SBA erheblich beeinflusst werden. Durch Anordnung zulässiger Höchstgeschwindigkeiten bestimmen SBA insbesondere das Geschwindigkeitsverhalten. Gleichwohl ist zu berücksichtigen, dass durch indivi-

Verhaltensaspekt	Kenngröße	Symbol	Referenz
Geschwindigkeit	Fahrgeschwindigkeiten	v_b	
	Fahrgeschwindigkeiten unbeeinflusster Fahrzeuge	$v_{unbeeinfl}$	Abschnitt 5.1.2
	Anteil unbeeinflusster Fahrzeuge	$p_{unbeeinfl}$	
Fahrzeugfolge, Abstand	Nettozeitlücke	h	Gleichung 1 (S. 27)
	Auffahrzeit (Time to Collision, TTC)	t_{tc}	Gleichung 2 (S. 27)
	Individual Braking Time Risk (IBTR)	$ibtr$	Gleichung 4 (S. 28)
	Compensated IBTR (CIBTR)	$cibtr$	Gleichung 3 (S. 28)
	Platoon Braking Time Risk (PBTR)	$pbtr$	Gleichung 5 (S. 28)
	Compensated PBTR (CPBTR)	$cpbtr$	Gleichung 6 (S. 29)
Fahrstreifenwahl	Gleichmäßigkeit Fahrstreifenauslastung	δ_q, δ_k	Gleichung 8 (S. 70)
	Schwerpunktlage Fahrstreifenauslastung	$\varepsilon_q, \varepsilon_k$	Gleichung 9 (S. 70)

Tabelle 5: Ausgewählte Kenngrößen zur Beschreibung des Fahrverhaltens

duell unterschiedliche Einstellungen und Situationseinschätzungen der Fahrzeugführenden sowie auch aufgrund der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten zu beobachten sind, die auch oberhalb des zulässigen Rahmens liegen können. Weiterhin wird vermutet, dass zulässige Höchstgeschwindigkeiten einen indirekten Einfluss auf die Fahrstreifenwahl haben. Durch Verringerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wird der Reisezeitvorteil durch Überholen geringer, was auch eine bessere Ausnutzung des rechten Fahrstreifens bewirken kann. Ein Lkw-Überholverbot wirkt sich unmittelbar auf die Fahrstreifenwahl der Lkw aus. Ferner ist davon auszugehen, dass Einflüsse der SBA auch auf das Abstandsverhalten bestehen, etwa bei Gefahrenwarnungen. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht werden (vgl. Abschnitt 6.1).

Zur Bewertung des Fahrverhaltens sind insbesondere solche Kenngrößen geeignet, die einen unmittelbaren Zusammenhang zu der zu untersuchenden Wirkdimension einer SBA aufweisen. Um eine Vergleichbarkeit der Kenngrößen zu gewährleisten, sollten diese außerdem möglichst über verschiedene Situationen hinweg einheitlich interpretierbar sein. Bei der Bewertung des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens sind diese Anforderungen für die in Abschnitt 2.2.2 genannten Kenngrößen erfüllt. Die Wirkung zur Harmonisierung des Verkehrsflusses kann z. B. anhand einer verringerten Streuung der Fahrgeschwindigkeiten, eine Verbesserung der Verkehrssicherheit anhand einer positiven Entwicklung entsprechender SSM bewertet werden. Dementsprechend wurden zur Beschreibung des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens die in Abschnitt 2.2.2 aufgeführten Kenngrößen weitestgehend in Tabelle 5 übernommen. Um eine Validierung des Verfahrens zu ermöglichen, können ebenso wie bereits bei der Fahrssituation jedoch nur solche Merkmale und Kenngrößen zur Beschreibung des Fahrverhaltens herangezogen werden, die sich auch aus der verfügbaren Datengrundlage realer SBA ermitteln lassen. Da für diese Arbeit in ausreichendem Umfang ausschließlich lokale Verkehrsdaten vorlagen und fahrtbezogene Daten gar nicht zur Verfügung standen, ist die Menge der verwendbaren Merkmale und Kenngrößen eingeschränkt. Aus einem mikroskopischen Modell könnten zwar einzelne Fahrmanöver und Konflikte (Beschleunigung, Fahrstreifenwechsel, Encroachment Time) sowie fahrtbezogen aggregierte Kenngrößen (z. B. Time-Exposed bzw. Time-Integrated Time to Collision, vgl. Abschnitt 2.2.2) einbezogen werden, jedoch ist nicht gewährleistet, dass sich diese Größen hinreichend realitätsgetreu verhalten.

Zur Bewertung der Fahrstreifenwahl wurden in bisherigen Untersuchungen i. d. R. Verkehrsstärkeanteile einzelner Fahrstreifen herangezogen. Dabei ist bei dichtem Verkehr oftmals eine gleichmäßige Verteilung der Fahrzeuge über die Fahrstreifen wünschenswert, weil so der verfügbare Verkehrsraum bestmöglich ausgenutzt wird.³¹ Insbesondere bei drei- oder mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen lässt sich aus den einzelnen Verkehrsstärkeanteilen jedoch nicht unmittelbar ableiten, ob die Fahrstreifenauslastung gleichmäßig ist. Außerdem haben Verkehrsstärkeanteile der Fahrstreifen den Nachteil, dass sie nur innerhalb der gleichen Fahrstreifenkonstellation vergleichbar sind, d. h. Verkehrsstärkeanteile der Fahrstreifen bei zweistreifiger Richtungsfahrbahn sind nicht mit solchen von drei- oder mehrstreifigen Fahrbahnen vergleichbar. Um eine unmittelbare Bewertung der Fahrstreifenwahl unabhängig vom Fahrbahnquerschnitt zu ermöglichen, wurden zwei zusätzliche Indikatoren eingeführt, die *Gleichmäßigkeit* δ und die *Schwerpunktlage* ε der Fahrstreifenauslastung. Beide Indikatoren können sowohl auf Grundlage der Verkehrsstärke (δ_q, ε_q) als auch der Verkehrsdichte (δ_k, ε_k) ermittelt werden, wobei nachfolgend nur die Berechnung mithilfe der Verkehrsstärke vorgestellt wird. Diese beiden im Rahmen dieser Arbeit hergeleiteten Indikatoren wurden bereits vorab in Grimm (2019) [76] sowie im Bericht des Forschungsprojektes FE 03.0538/2015/IGB [87] vorgestellt.

³¹ An hochbelasteten Einfahrten kann auch eine weniger starke Belastung des rechten Fahrstreifens wünschenswert sein.

Die Gleichmäßigkeit der Fahrstreifenauslastung berechnet sich wie folgt:

$$\delta_q = \begin{cases} 0 & n_{FS} = 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^{n_{FS}} \sum_{j=1}^{n_{FS}} |q_{B,i} - q_{B,j}|}{2q_B(n_{FS} - 1)} & n_{FS} > 1 \end{cases} \quad (8)$$

Hierbei sind:

n_{FS}	Anzahl Fahrstreifen
i, j	Fahrstreifenindizes
$q_{B,i}, q_{B,j}$	Bemessungsverkehrsstärke Fahrstreifen i bzw. j
q_B	Bemessungsverkehrsstärke gesamte Richtungsfahrbahn

Der Indikator kann Werte im Bereich von 0 bis einschließlich 1 annehmen. Ist $\delta_q = 0$, so ist die Fahrstreifenaufteilung gleichmäßig, d. h. auf allen Fahrstreifen herrscht die gleiche Bemessungsverkehrsstärke vor. $\delta_q = 1$ hingegen bedeutet, dass sämtliche Fahrzeuge ausschließlich einen von mehreren verfügbaren Fahrstreifen nutzen (maximale Ungleichmäßigkeit).

Der Indikator δ_q lässt eine Bewertung zu, inwieweit die Fahrstreifenaufteilung ausgeglichen ist. Ist die Fahrstreifenaufteilung nicht ausgeglichen, kann mit dem Indikator Schwerpunktlage beurteilt werden, auf welchen Teilen der Richtungsfahrbahn eine Über- bzw. Unterauslastung vorliegt. Die Schwerpunktlage ε_q wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon_q = \begin{cases} 0,5 & n_{FS} = 1 \\ \frac{\sum_{i=1}^{n_{FS}} i q_{B,i}}{q_B(n_{FS} - 1)} - \frac{1}{n_{FS} - 1} & n_{FS} > 1 \end{cases} \quad (9)$$

Hierbei sind:

n_{FS}	Anzahl Fahrstreifen
i	Fahrstreifenindex (beginnend mit 1 für den äußerst rechten Fahrstreifen)
$q_{B,i}$	Bemessungsverkehrsstärke Fahrstreifen i
q_B	Bemessungsverkehrsstärke gesamte Richtungsfahrbahn

Auch dieser Indikator hat einen Wertebereich von 0 bis einschließlich 1. Die Extremfälle $\varepsilon_q = 0$ und $\varepsilon_q = 1$ bedeuten, dass sämtliche Fahrzeuge ausschließlich den äußerst rechten bzw. äußerst linken Fahrstreifen nutzen. Bei $\varepsilon_q = 0,5$ ist eine symmetrische Verteilung der Fahrzeuge über die Fahrstreifen zu beobachten.

Nicht alle der hier ausgewählten und in Tabelle 5 genannten Kenngrößen sind zwangsläufig auch für die Nutzung im gewählten Modellansatz geeignet. In Abschnitt 7.3 wird vorgestellt, nach welchen Kriterien die schlussendlich im Modell verwendeten Kenngrößen festgelegt wurden. Unabhängig davon eignen sich jedoch alle genannten Kenngrößen für eine Bewertung und Analyse verkehrlicher Zusammenhänge, auch im Kontext einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation.

Fahrpräferenzen

Unter dem Begriff Fahrpräferenzen wird im Rahmen dieser Arbeit folgendes verstanden:

Definition 4.4 (Fahrpräferenzen). Fahrpräferenzen sind eine Menge objektiv beschreibbarer intrinsischer Eigenschaften einer FFE, die bestimmte Aspekte des Fahrverhaltens beeinflussen. Fahrpräferenzen können sich in Abhängigkeit von der Fahrsituation ändern.

Fahrpräferenzen spiegeln u. a. Ziele und Handlungsmotive einer bzw. eines Fahrzeugführenden wider, die sich als unterschiedliche Fahrstile im Fahrverhalten niederschlagen. Hierzu zählen insbesondere die Bereitschaft zur Befolgung verkehrsrechtlicher Vorgaben und darüber hinausgehender Empfehlungen, die Risikobereitschaft, Ungeduld und Aggressivität sowie die Kooperationsbereitschaft. Daneben zählen auch Nutzereinstellungen und Betriebsparameter von Fahrerassistenzsystemen (z. B. Geschwindigkeits- und Abstandsvorgaben eines Abstandsregeltempomaten) zu den Fahrpräferenzen.

Mikroskopische Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwahlmodelle (vgl. Abschnitt 2.2.3) verfügen über diverse Parameter, mit denen nicht nur unterschiedliche physische Eigenschaften der Fahrzeuge, sondern auch unterschiedliche Fahrzustände und Fahrstile nachgebildet werden können. Diese Parameter eignen sich also grundsätzlich, um Fahrpräferenzen quantitativ zu beschreiben. Jedoch unterscheiden sich solche Parameter teilweise zwischen Modellen und Simulationsumgebungen. Wie in Abschnitt 3.1 geschildert, muss die Simulationsumgebung austauschbar sein. Daher besteht eine Herausforderung darin, solche Parameter der Fahrverhaltensmodelle zu identifizieren, die zumindest in den für diese Arbeit relevanten Modellen in ähnlicher Weise verwendet werden. Die Verhaltensparameter müssen Eigenschaften einer FFE sein und während der Simulationszeit, d. h. während einer Fahrt, verändert werden können. Unveränderliche Eigenschaften einer FFE sowie auch globale Parameter der Simulationsumgebung oder auf Elemente des Straßennetzes bezogene Parameter eignen sich nicht.

In dieser Arbeit werden die Simulationsumgebungen `aimsun.next` und SUMO verwendet (vgl. Abschnitt 3.1). Die darin verankerten Fahrzeugfolgemodelle nach Gipps (1981) [71] (vgl. Anhang A.1) bzw. Krauß (1998) [100] (vgl. Anhang A.2) sind beide Safety-Distance-Modelle und haben ähnliche Parameter. Das Fahrzeugfolgeverhalten wird vor allem durch Wunschgeschwindigkeiten sowie verschiedene Parameter zur Beeinflussung des Fahrzeugfolgeabstands determiniert. *Tabelle 6* liefert eine Übersicht über die wesentlichen Parameter dieser Modelle³². Es ist zu beachten, dass durch Unterschiede in den Fahrverhaltensmodellen der Einfluss eines Parameters zwischen den Simulationsumgebungen abweichen kann; die semantische Bedeutung zwischen den Parametern, sofern in beiden Modellen vorhanden, ist jedoch vergleichbar.

Im Gegensatz zur Fahrzeugfolge bestehen bei den Fahrstreifenwechselmodellen erhebliche Unterschiede, auch hinsichtlich der Modellparameter. Motivationen für Fahrstreifenwechsel, etwa die Neigung zum Überholen, zur Einhaltung des Rechtsfahrgebots sowie zum frühzeitigen Einordnen vor Knotenpunkten sind in unterschiedlichem Maße und auf unterschiedliche Weise konfigurierbar. In einigen Simulationsumgebungen, teils auch in `aimsun.next`, wird das Fahrstreifenwechselverhalten weniger durch Parameter einer FFE, sondern größtenteils durch Merkmale eines Streckenabschnitts oder Knotenpunkts beeinflusst. Aus diesem Grunde wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine Beeinflussung des Fahrstreifenwahlverhaltens verzichtet.

³² In der Beschreibung der Modelle in Anhang A wurden die Bezeichnungen der Modellparameter bezogen auf eine individuelle FFE n angegeben. In *Tabelle 6*, Spalte „Symbol“, sind sie jedoch als Zufallsgröße zu verstehen, die die Verteilung über ein FFE-Kollektiv beschreibt. Daher wurde hier auf den Index n verzichtet.

Verhaltensaspekt	Parameter	Symbol (vgl. Anhang A)
Geschwindigkeit	fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit	v_{\max}
	Befolgungsfaktor streckenspezifische zulässige Höchstgeschwindigkeit	f_{compl}
	Wunschbeschleunigung	a_{\max} (Gipps/aimsun.next) a_{desired} (Krauß/SUMO)
Fahrzeugfolge, Abstand	Wunschverzögerung im Normalfall	d
	Sensitivitätsfaktor bzw. von außen wahrnehmbare Wunschverzögerung	α (Gipps/aimsun.next) d_{apparent} (Krauß/SUMO)
	Mindestnettoabstand im Stillstand	g_{\min}
	Mindestzeitlücke	h_{\min} (Gipps/aimsun.next) τ (Krauß/SUMO)
	Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten	σ (nur Krauß/SUMO)

Tabelle 6: Ausgewählte Parameter der Fahrzeugfolgemodelle in aimsun.next und SUMO

Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass in der Realität Fahrpräferenzen über das FFE-Kollektiv variieren. Die Fahrzeugführenden in einem FFE-Kollektiv besitzen individuell unterschiedliche und auch während einer Fahrt veränderliche Einstellungen (z. B. Risikobereitschaft, Aggressivität), aus denen unterschiedliches Fahrverhalten hervorgeht. Die Variationen der Fahrpräferenzen können u. a. berücksichtigt werden, indem Parameter der Fahrverhaltensmodelle als Verteilung über das FFE-Kollektiv beschrieben werden (vgl. Abschnitt 2.2.4). Bei einer Anpassung dieser Verteilungen ist zu berücksichtigen, dass ein Fahrer- bzw. Fahrzeugtyp sich während einer Fahrt nicht grundlegend ändert – z. B. darf ein im Vergleich zum restlichen Kollektiv sportlicher FFE-Typ nicht infolge einer veränderten Fahrsituation plötzlich einen vergleichsweise konservativen Fahrstil zeigen.

Bei der Bestimmung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ist zu berücksichtigen, dass Wunschgeschwindigkeiten in der Praxis auch über die durch die SBA vorgegebene zulässige Höchstgeschwindigkeit hinausgehen können, insbesondere wenn die Verkehrssituation dies zulässt oder eine Diskrepanz zwischen Anzeigezustand und wahrgenommener Situation besteht. Die Wunschgeschwindigkeit und auch das Ausmaß der Abweichung zwischen zulässiger Höchstgeschwindigkeit und Wunschgeschwindigkeit variiert situationsabhängig. Wirkungen einer SBA auf das Abstandsverhalten, und insbesondere auch die Wirkungen von Gefahrenwarnungen, unterliegen noch größeren Unsicherheiten, da hier den Fahrzeugführenden nicht unmittelbar ein bestimmtes Verhalten vorgegeben wird.

4.2 Architektur: Simulationsmodule und Schnittstellen

Nachfolgend wird eine Architektur für das in dieser Arbeit entstandene Verfahren vorgestellt, mit der die zuvor in Abschnitt 4.1.2 hergeleiteten Prozesse abgebildet werden. Eine Übersicht über die in dieser Architektur vorgesehenen Systemkomponenten und ihre Schnittstellen bietet *Abbildung 9*.

Einen Ausgangspunkt für die Aufstellung der Architektur bildeten die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Festlegungen zu im Modell zu berücksichtigenden Entitäten und zugehörigen Beschreibungsmerkmalen. Wie in Abschnitt 4.1.1 begründet wurde, ist im Kontext dieser Arbeit eine Modellierung des Verkehrssystems auf mikroskopischer Ebene erforderlich. Für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation existieren bereits diverse in Wissenschaft und Praxis erprobte Simulationsumgebungen (vgl. Ab-

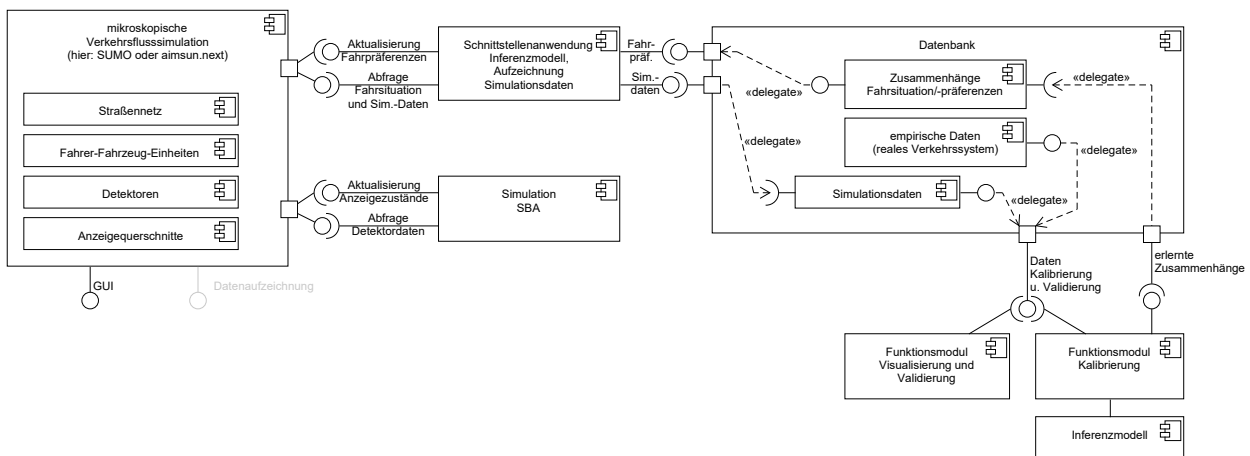


Abbildung 9: Architektur des Verfahrens zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens

schnitt 2.2.3, hier speziell Tabelle 3 auf Seite 34). In diesen etablierten Simulationsumgebungen sind nicht nur die FFE mit den entsprechenden Fahrverhaltensmodellen, sondern auch das Straßennetz und Objekte der streckenseitigen Ausstattung abgebildet. Darüber hinaus bieten diese Simulationsumgebungen auch Funktionen zur Simulationsdatenaufzeichnung sowie eine Nutzerschnittstelle zur Visualisierung der modellierten Objekte und ihres Verhaltens während der Simulation. Ferner besitzen die Simulationsumgebungen zur mikroskopischen Verkehrsflussimulation i. d. R. eine Schnittstelle, über die Zustände von Objekten (z. B. FFE) während der Simulationslaufzeit abgefragt und zumeist auch verändert werden können. Auf diese Weise können externe Funktions- oder Simulationsmodule an die Software zur Verkehrsflusssimulation angebunden werden.

Aufgrund dieses Funktionsumfangs dient eine Software zur mikroskopischen Verkehrsflussimulation als zentrale Komponente der hier vorgestellten Architektur, an welche die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Funktionsmodule angebunden werden. Die laufende Anpassung der Fahrpräferenzen in Abhängigkeit der wahrnehmbaren Fahrsituation, welche den wissenschaftlichen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet, erfolgt durch ein Inferenzmodell (Abschnitt 4.3), das über eine gesonderte Schnittstellenanwendung an die Verkehrsflusssimulation angebunden ist (Abschnitt 4.4). Um das Verfahren am Beispiel von SBA anwenden zu können, werden die entsprechenden Prozesse der SBA-Steuerung in einem weiteren Simulationsmodul nachgebildet (vgl. Abschnitt 4.5), was die Möglichkeit der Interaktion mit in der Verkehrsflusssimulation abgebildeten Mess- und Anzeigeelementen voraussetzt. Grundsätzlich soll auch eine spätere Erweiterung um andere Formen der streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung möglich sein.

Der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz soll grundsätzlich auf mehrere Simulationsumgebungen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation anwendbar und somit nicht spezifisch auf ein bestimmtes Produkt zugeschnitten sein. Um die Austauschbarkeit der Simulationsmodule demonstrieren und auch z. B. die Auswirkungen produktspezifisch unterschiedlicher Fahrverhaltensmodelle untersuchen zu können, wird das Verfahren beispielhaft mit zwei verschiedenen Simulationsumgebungen eingesetzt. Eine Herausforderung hierbei ist, dass die Schnittstellen zur Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation proprietär sind und sich hinsichtlich des Funktionsumfangs, der Art der Anbindung externer Funktionsmodule sowie auch des Objektmodells erheblich unterscheiden. Die Beschaffenheit der Schnittstelle

bestimmt jedoch maßgeblich, wie eine externe Anwendung realisiert werden muss. Damit das Inferenzmodell trotzdem mit verschiedenen Simulationsumgebungen eingesetzt werden kann, wurde es nicht direkt an eine solche angebunden, sondern es wurde die zuvor erwähnte gesonderte Schnittstellenanwendung als Zwischenschicht vorgesehen, die eine flexible Anpassung an das jeweilige Objektmodell und die proprietäre Schnittstelle der Simulationsumgebung ermöglicht.

Diese Entkopplung des Inferenzmodells von der Verkehrsflusssimulation stellt nicht nur die Austauschbarkeit der Simulationsumgebung sicher, sondern bietet auch Vorteile für die Implementierung des Inferenzmodells: Eine unmittelbare Anbindung hätte u. a. die Wahl der hierzu verwendbaren Werkzeuge bzw. Bibliotheken eingeschränkt. Darüber hinaus wurde erwartet, dass eine direkte Abfrage von Fahrverhaltensparametern zu einer gegebenen Fahrsituation während der Simulation diese erheblich verlangsamen könnte. Um noch vertretbare Simulationslaufzeiten zu erreichen, wurde auch die zuvor beschriebene Schnittstellenanwendung nicht unmittelbar an das Inferenzmodell angebunden. Stattdessen wurde das Inferenzmodell im Vorfeld für eine breite Auswahl praxisrelevanter Fahrsituationen abgefragt und die resultierende Zuordnung zwischen Fahrsituationen und Fahrverhaltensparametersätzen in einer Datenbank abgelegt. Die Schnittstellenanwendung greift wiederum auf diese Datenbank zu, was durch entsprechende Indizierung mit nur geringen Antwortzeiten verbunden ist.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Erwägungen wurden folgende Anforderungen an die im Kontext dieser Arbeit zu verwendende Software zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation gestellt³³:

- Die Simulationssoftware muss die Möglichkeit bieten, die in Abschnitt 4.1.1 identifizierten Entitäten mit ihren relevanten Zustandsmerkmalen abzubilden. Dies schließt auch Detektoren und Anzeigeelemente einer SBA ein.
- Die Simulationssoftware und die darin verankerten Fahrverhaltensmodelle müssen grundsätzlich geeignet sein, den Verkehrsablauf auf Autobahnen realitätsgetreu nachzubilden. Dies betrifft insbesondere das Auftreten überlastungsbedingter Verkehrszusammenbrüche und die maximal erreichten Verkehrsstärken, Verflechtungsvorgänge und Fahrstreifenauslastungen sowie Geschwindigkeits- und Zeitlückenverteilungen [87].
- Die Simulationssoftware muss eine Schnittstelle bieten, über welche während der Simulationslaufzeit
 - Zustände von FFE, Straßennetzelementen (Knoten und Kanten), Detektoren und Anzeigequerschnitten abgefragt sowie
 - Zustände von FFE, Straßennetzelementen und Anzeigequerschnitten verändert werden können.
- Die Simulationssoftware muss es ermöglichen, über die vorgenannte Schnittstelle mehrere externe Funktionsmodule zugleich anzubinden und die Ausführung der darin verankerten Funktionen mit der Verkehrsflusssimulation zu synchronisieren.
- Fahrpräferenzen, hier insbesondere Parameter des jeweils verwendeten Fahrzeugfolgmodells, müssen als Eigenschaft einer individuellen FFE modelliert sein und während der Simulationslaufzeit mittels der vorgenannten Schnittstelle verändert werden können.

³³ Ähnliche und teils überlappende Anforderungen an die Software zur Verkehrsflusssimulation wurden auch im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB formuliert (vgl. Projektbericht [87], dort Abschnitt 2.2.5). Ein Teil der dort genannten Anforderungen sind durch die beabsichtigte Anwendung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur kontext-differenzierten Fahrverhaltensmodellierung begründet.

Die vorgenannten Anforderungen werden durch mehrere Simulationsumgebungen erfüllt [87]. Hierzu gehören auch die beiden für diese Arbeit verfügbaren Simulationsumgebungen `aimsun.next` und `SUMO` (vgl. Abschnitt 3.1). In beiden Fällen ist eine Interaktion mit FFE und Infrastrukturelementen in der Verkehrsflusssimulation sowie eine gleichzeitige Anbindung mehrerer externer Funktionsmodule möglich [3] [42] (vgl. auch Abschnitt 4.4.4). Auch die Eignung zur Nachbildung des Autobahnverkehrs ist für beide Simulationsumgebungen gegeben (vgl. Abschnitt 2.2.3, Unterabschnitt „Diskussion: Eignung zur Simulation des Autobahnverkehrs“).

Das Inferenzmodell wurde u. a. anhand der verfügbaren empirischen Datenbasis zu SBA kalibriert. Die bereitgestellten Rohdaten wurden zuvor aufbereitet, erweitert und der vorherrschenden Fahrsituation zugeordnet (vgl. Abschnitt 5). Für die Kalibrierung des Inferenzmodells als der Simulation vorgelagerter Prozess wurde ein eigenständiges Funktionsmodul entwickelt. Die Methodik der Kalibrierung wird in Abschnitt 7.4, die Umsetzung des Funktionsmoduls in Abschnitt 4.3.5 beschrieben.

Die Simulationsumgebungen für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich des Datenmodells und der Schnittstelle zur Interaktion während der Simulation, sondern auch hinsichtlich der Aufzeichnung von Simulationsdaten für die Auswertung im Nachgang. Viele der in Abschnitt 4.1.3 genannten Kenngrößen lassen sich nicht direkt aufzeichnen und müssten in einem nachgelagerten Prozess aus in verschiedenen Formaten und Objektmodellen vorliegenden Daten berechnet werden. Eine Herausforderung bestünde darin, diesen Ausgabedaten nachträglich die jeweils vorherrschende Fahrsituation zuzuordnen. Um eine Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse zu gewährleisten, wurde die Schnittstellenanwendung zur Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation um eigene Funktionen zur Datenaufzeichnung erweitert (vgl. Abschnitt 5.2). Dabei erfolgt die Abfrage, die Berechnung der Kenngrößen und ihre Aufzeichnung während der Simulationslaufzeit. Die Daten werden in einer Datenbank mit einheitlichem Datenmodell abgelegt. Die vorherrschende Fahrsituation steht in der Schnittstellenanwendung unmittelbar zur Verfügung und kann somit den aufzuzeichnenden Daten direkt zugeordnet werden. Auf die Nutzung der bereits in den Simulationsumgebungen vorhandenen Funktionen zur Datenaufzeichnung wurde gänzlich verzichtet, sodass nachgelagerte Prozesse der Datenaufbereitung und Situationszuordnung vermieden werden.

Ein weiteres Funktionsmodul ermöglicht die Visualisierung und den Vergleich der Simulationsausgabedaten sowie auch der Daten realer SBA. Dieses eignet sich für die Analyse von Wirkungen einer SBA in der Realität (Abschnitt 6), für die Validierung des Modells gegenüber der Realität (Abschnitt 7.5) sowie zum Vergleich verschiedener Simulationsszenarien im Rahmen der Anwendung des Verfahrens (Abschnitt 8).

Das Simulationsmodul zur Nachbildung der SBA-Steuerung interagiert nicht mit dem Inferenzmodell oder der zugehörigen Schnittstellenanwendung, sondern ausschließlich mit der Verkehrsflusssimulation. Damit die Zustände der Verkehrsbeeinflussung für die Bestimmung der Fahrsituation zur Verfügung stehen, müssen die Anzeigezustände der SBA in einem Objekt innerhalb der Simulationsumgebung abgebildet werden, wo sie von der Schnittstellenanwendung des Inferenzmodells abgefragt werden können. Hierdurch werden Abhängigkeiten zwischen dem Inferenzmodell und dem Simulationsmodul für die SBA-Steuerung vermieden.

4.3 Inferenzmodell: Kontextspezifische Einflüsse auf das Fahrverhalten

Als ein zentraler Baustein des Verfahrens zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell entwickelt, das die Bestimmung von Fahrpräferenzen in Abhängigkeit von einer aktuell vorherrschenden Fahrsituation ermöglicht³⁴. Da dies mittels Schlussfolgern (Inferieren) erfolgt, wird dieses Modell als *Inferenzmodell* bezeichnet. Der hier beschriebene Ansatz wurde in Teilen bereits in Grimm (2019) [76] sowie im Projektbericht des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB [87] (dort Abschnitt 3.5.3) veröffentlicht.

4.3.1 Annahmen und Anforderungen an das Inferenzmodell

Das Inferenzmodell dient der Bestimmung solcher Fahrpräferenzen, mit denen ein *für eine gegebene Fahrsituation charakteristisches kollektives Fahrverhalten* nachgebildet wird. Eine Modellierung solcher Zusammenhänge kann grundsätzlich anhand von empirischen Daten oder Experimenten, durch Einbeziehung bekannter Gesetzmäßigkeiten oder, wo diese Möglichkeiten nicht zur Verfügung stehen, durch fachliche Einschätzung erfolgen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Während die Fahrsituation und das Fahrverhalten aus der zur Verfügung stehenden Datengrundlage unmittelbar abgeleitet und beschrieben werden können, sind die Fahrpräferenzen als intrinsische Merkmale einer FFE in der Realität jedoch nicht ohne Weiteres erfassbar und zumindest nicht von außen beobachtbar. Zwar könnten dem Fahrprozess zugrunde liegende Einstellungen, Handlungsmotive und Ziele mit Hilfe von verkehrspsychologischen Untersuchungen (z. B. Fahrsimulatorstudien) erhoben werden, jedoch ist dies mit einem sehr großen Aufwand verbunden und kann – um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten – nur für bestimmte, eng abgegrenzte Szenarien erfolgen. Hinzu kommt, dass Fahrpräferenzen hier als Parameter der Fahrverhaltensmodelle in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation beschrieben werden (vgl. Abschnitt 4.1.3), die jedoch nicht zwangsläufig identisch mit tatsächlichen realen Gegebenheiten sind. Der gesuchte Zusammenhang zwischen Fahrsituation und Fahrpräferenzen ist also unbekannt.

Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen werden durch die jeweils in Abschnitt 4.1.3 genannten Kenngrößen beschrieben, die nun jeweils als Vektoren zusammengefasst werden. Eine wahrnehmbare Fahrsituation sei als \vec{s} bezeichnet; die Menge aller im Modell berücksichtigten Fahrsituationen sei \mathbf{S} . Aufgrund der mikroskopischen Betrachtungsweise werden Fahrverhalten und Fahrpräferenzen als Eigenschaften individueller FFE angesehen: Das individuelle Fahrverhalten einer bestimmten FFE n sei als \vec{b}_n und ihre Fahrpräferenzen als \vec{p}_n bezeichnet. Es sei weiterhin $\vec{b}_{\text{Koll}}(\vec{s})$ das kollektive Fahrverhalten zu einer bestimmten Fahrsituation \vec{s} . Das kollektive Fahrverhalten wurde definiert als die Verteilungen der Kenngrößen individuellen Fahrverhaltens über das betrachtete Kollektiv, d. h. über eine Menge an individuellen Verhaltensbeobachtungen \vec{b}_n innerhalb eines bestimmten räumlichen oder zeitlichen Bereichs (vgl. Definition 4.3).

Entsprechend dieser Festlegungen besteht die Aufgabe des Inferenzmodells darin, Zusammenhänge zwischen Fahrsituationen \vec{s} und den individuellen Fahrpräferenzen \vec{p}_n derart herzustellen, dass für alle $\vec{s} \in \mathbf{S}$ die Abweichung zwischen empirisch beobachtetem Fahrverhalten $\vec{b}_{\text{Koll,Obs}}(\vec{s})$ und dem Fahrverhalten im Modell $\vec{b}_{\text{Koll}}(\vec{s})$ minimal wird oder zumindest innerhalb als akzeptabel angesehener Grenzen bleibt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei gleichbleibender Situation \vec{s} das individuelle Fahrverhalten \vec{b}_n über das FFE-Kollektiv variiert. Um derartige Variationen des Fahrverhaltens zu erreichen,

³⁴ Die Begriffe Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen werden hierbei entsprechend der in Abschnitt 4.1.3 gegebenen Definitionen verwendet.

müssen auch die Fahrpräferenzen variieren, z. B. indem sie gemäß einer vorgegebenen Verteilungsfunktion zufällig gewählt werden. Jeder Situation $\vec{s} \in \mathbf{S}$ muss somit ein Vektor $\vec{p}_{\text{Koll}}(\vec{s})$ zugeordnet sein, der die Verteilungsfunktionen für die Wahl der individuellen Fahrpräferenzen $\vec{p}_n(\vec{s})$ enthält. Gesucht wird somit die Abbildung $\vec{s} \mapsto \vec{p}_{\text{Koll}}$ für alle $\vec{s} \in \mathbf{S}$.

Dem hier vorgestellten Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass die gesuchte Abbildung aus zwei Zusammenhängen hergestellt werden kann:

1. Aus der Datengrundlage realer SBA können Fahrverhaltenskenngrößen extrahiert und der jeweils vorherrschenden Fahrsituation zugeordnet werden. Somit kann die Abbildung $\vec{s} \mapsto \vec{b}_{\text{Koll}}$ aus in der empirischen Datengrundlage enthaltenen Zusammenhängen $\vec{s} \mapsto \vec{b}_{\text{Koll,Obs}}$ geschätzt werden.
2. Durch Simulationsexperimente kann untersucht werden, wie das Fahrverhalten bei Variation ausgewählter Parameter von Fahrverhaltensmodellen beeinflusst wird, d. h. wie sich unterschiedliche Fahrpräferenzen auf das Fahrverhalten auswirken. Hierdurch lässt sich der Zusammenhang $\vec{p}_{\text{Koll}} \mapsto \vec{b}_{\text{Koll}}$ und daraus wiederum der umgekehrte Zusammenhang $\vec{b}_{\text{Koll}} \mapsto \vec{p}_{\text{Koll}}$ ableiten.

Das Inferenzmodell und somit die Abbildung $\vec{s} \mapsto \vec{p}_{\text{Koll}}$ müssen folgende Anforderungen erfüllen:

Umfang der Modellierung: Es müssen alle wesentlichen in der Realität beobachteten oder kausalen Wirkzusammenhänge berücksichtigt werden, d. h. eine signifikante Änderung der Fahrsituation muss zu einer der Realität entsprechenden Anpassung des Fahrverhaltens führen. Nicht signifikante oder nicht kausal begründbare Zusammenhänge (Scheinkorrelationen) sollen jedoch nicht berücksichtigt werden.

Automatisierung der Kalibrierung: Die Anpassung von Modellparametern derart, dass empirische Zusammenhänge hinreichend realitätsgetreu nachgebildet werden, muss automatisch erfolgen. Das hierzu verwendete Verfahren muss sich in einem angemessenen Zeitrahmen an einen Satz an Parametern annähern, für den die Abweichung zwischen Modell und Realität tolerierbar³⁵ ist.

Angemessene Empfindlichkeit: Bei geringfügiger Änderung der Fahrsituation, z. B. bei einer geringfügigen Erhöhung der Verkehrsnachfrage, dürfen auch die Auswirkungen auf Fahrpräferenzen und Fahrverhalten nur gering sein.

Generalisierbarkeit: Auch für Fahrsituationen, die in der Realität selten auftreten und daher in der empirischen Datenbasis nicht oder nur in geringem Umfang repräsentiert sind, muss ein plausibles Fahrverhalten abgeleitet werden können.

Nachvollziehbarkeit: Die modellierten Zusammenhänge müssen auf Plausibilität geprüft werden können. Dadurch bedingt müssen die Zustandsgrößen und Parameter des Modells einen Bezug zu im Verkehrswesen geläufigen Kenngrößen bzw. Merkmalen aufweisen und unmittelbar fachlich interpretierbar sein.

Erweiterbarkeit und Änderbarkeit: Um zukünftig auch weitere Einflussfaktoren oder Beeinflussungssysteme berücksichtigen zu können, muss es möglich sein, Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen um weitere Kenngrößen bzw. Merkmale zu erweitern. Auch muss es möglich sein, einzelne Wirkzusammenhänge nachträglich zu ergänzen, zu entfernen oder zu ändern. Dazu ist es erforderlich, Modellparameter nicht nur im Rahmen der automatischen Kalibrierung, sondern auch manuell anpassen zu können, um z. B. zusätzliche theoretische oder kausale Zusammen-

³⁵ Toleranzen bezüglich ausgewählter Fahrverhaltenskenngrößen wurden im Zuge der Validierung festgelegt und können Anhang F.2 (Seite 180) entnommen werden.

hänge einbeziehen zu können. Damit soll sichergestellt werden, dass das Modell später auch für andere als die in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsszenarien genutzt werden kann, etwa für die Simulation der Wirkungen neuartiger Dienste vernetzten Fahrens.

4.3.2 Auswahl des Modellierungsansatzes

Um die zuvor beschriebene Abbildung $\vec{s} \mapsto \vec{p}_{\text{Koll}}$ herzustellen, kommen insbesondere folgende Möglichkeiten in Betracht (vgl. Abschnitt 2.3.3 sowie auch Abschnitt 3.5.3.1 des Projektberichts zu Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB [87]):

- direkte Abbildung, etwa durch
 - multiple Regression (funktionaler Zusammenhang wertkontinuierlicher Größen) oder
 - Assoziation (regelbasierte Abbildung diskreter Größen)
- Künstliche Neuronale Netze (KNN)
- Bayessche Netze (BN)

Alle der vorgenannten Ansätze erlauben es grundsätzlich, signifikante Zusammenhänge aus Daten umfänglich und durch automatisierte Kalibrierung zu berücksichtigen. KNN und BN sind vorteilhaft, wenn komplexe, auch nichtlineare Zusammenhänge dargestellt werden sollen und wenn das Modell generalisierungsfähig sein soll. BN haben darüber hinaus den Vorteil, dass eine fachliche Beurteilung des Modells sowie darauf aufbauend ein manuelles Ergänzen, Modifizieren und Entfernen von Teilzusammenhängen möglich ist. Dadurch bedingt können u. a. auch Zusammenhänge eliminiert werden, die nicht kausal begründbar sind (Scheinkorrelationen).

Der Zusammenhang $\vec{s} \mapsto \vec{p}_{\text{Koll}}$ ist, wie zuvor in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, nicht unmittelbar aus der verfügbaren Datengrundlage ableitbar, sondern muss aus den Zusammenhängen $\vec{s} \mapsto \vec{b}_{\text{Koll}}$ und $\vec{b}_{\text{Koll}} \mapsto \vec{p}_{\text{Koll}}$ gebildet werden. Bei Modellierung als funktionaler Zusammenhang, als regelbasierte Abbildung oder mittels KNN müssten beide Teilzusammenhänge separat modelliert und anschließend miteinander verknüpft werden. Ein BN erlaubt jedoch, beide Zusammenhänge in einem Modell zu vereinen und dennoch beide Teilmodelle unabhängig voneinander zu kalibrieren.

Aus den vorgenannten Gründen wurde das Inferenzmodell als BN realisiert. Die Knoten dieses BN sind die Elemente der drei Zustandsvektoren \vec{s} , \vec{b}_{Koll} und \vec{p}_{Koll} , welche entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu diesen Vektoren in drei Schichten (Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen, vgl. Abschnitt 4.3.3) angeordnet sind.

Einige der Merkmale einer Fahrsituation sind diskret, etwa die Anzeigezustände der SBA (vgl. Abschnitt 4.1.3). Grundsätzlich wertkontinuierlich sind demgegenüber die Größen zur Beschreibung der Verkehrssituation als Teil der Fahrsituation sowie die Kenngrößen zur Beschreibung des Fahrverhaltens und der Fahrpräferenzen. Die wertkontinuierlichen Größen könnten diskretisiert werden, sodass ein vollständig wertdiskretes, multinomiales BN entstünde. Hierauf wird jedoch verzichtet, da insbesondere die kollektiven Fahrpräferenzen als wertkontinuierliche Verteilungsfunktionen bereitstehen sollen. Gemäß Abschnitt 4.3.1 soll diese Verteilungsfunktion genutzt werden, um individuelle Fahrpräferenzen einzelner FFE zufällig zu bestimmen. Daher wurde das BN als *hybrides BN* mit sowohl wertdiskreten als auch wertkontinuierlichen Knoten umgesetzt.

4.3.3 Aufbau und Eigenschaften des Modells

Ein Bayessches Netz (BN) wird durch einen gerichteten azyklischen Graphen gebildet, der wiederum aus einer Menge an Knoten und Kanten besteht (vgl. Anhang B). Dementsprechend sei

$\mathcal{B}_{IM} = (\mathcal{G}_{IM}, \mathbf{X}_{IM})$ das als hybrides BN formulierte Inferenzmodell und
 $\mathcal{G}_{IM} = (\mathbf{X}_{IM}, \mathbf{A}_{IM})$ der zugehörige Graph mit den Knoten \mathbf{X}_{IM} und Kanten \mathbf{A}_{IM} .

Die prinzipielle Struktur dieses Modells wird in *Abbildung 10* veranschaulicht. Dementsprechend setzt sich die Menge der Knoten \mathbf{X}_{IM} aus folgenden disjunkten Teilmengen zusammen:

- \mathbf{X}_s^d Fahrsituation, wertdiskrete Zustandsmerkmale
- \mathbf{X}_s^k Fahrsituation, wertkontinuierliche Kenngrößen
- \mathbf{X}_f FFE-Typ (diskret)
- \mathbf{X}_b kollektives Fahrverhalten
- \mathbf{X}_p kollektive Fahrpräferenzen

Das Inferenzmodell wurde derart aufgebaut, dass wertdiskrete Knoten zwar Elternknoten wertkontinuierlicher Knoten sein können, jedoch nicht umgekehrt. Daher kann das BN in ein inneres Netz

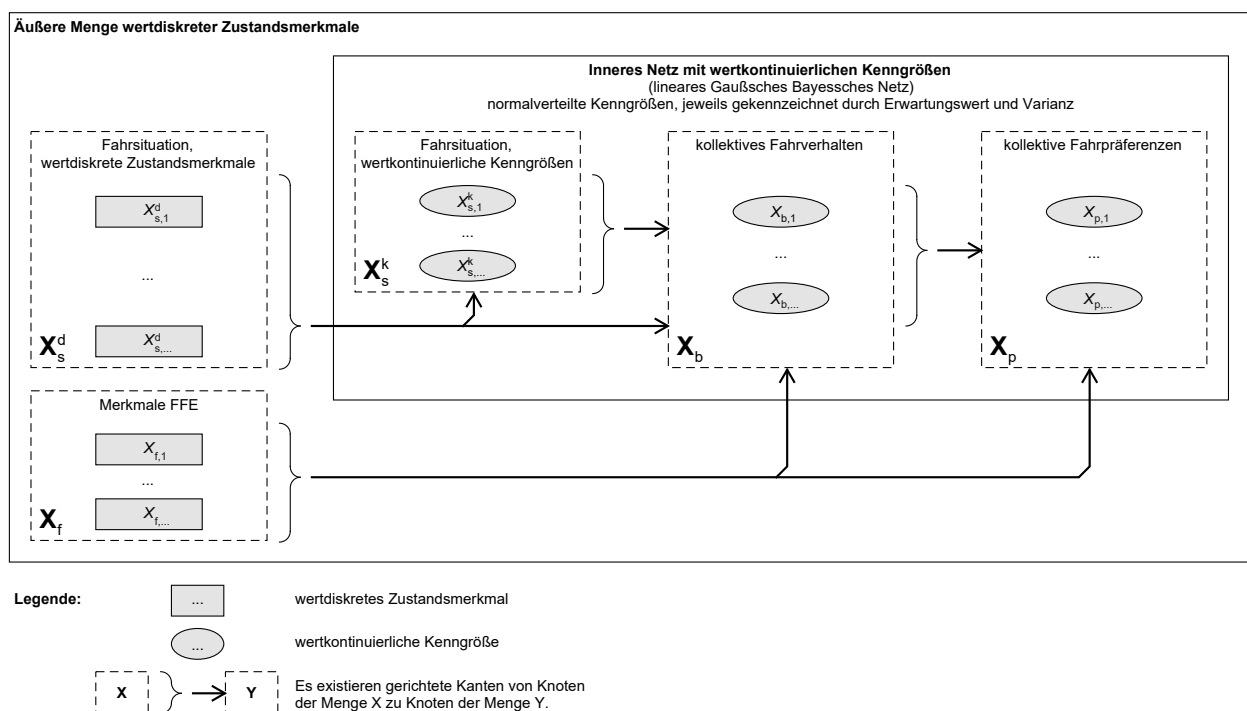


Abbildung 10: Struktur des als hybrides Bayessches Netz realisierten Inferenzmodells (in modifizierter Form vorab veröffentlicht in Grimm (2019) [76] und im Projektbericht des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB [87])

wertkontinuierlicher Knoten und eine äußere Menge wertdiskreter Knoten unterteilt werden³⁶. Für das innere, wertkontinuierliche Netz wurde angenommen, dass sämtliche Kenngrößen sich zumindest näherungsweise als normalverteilte Zufallsgrößen abbilden lassen. Außerdem wurde angenommen, dass Zusammenhänge zwischen diesen Zufallsgrößen zumindest in einem durch die Zustandskombination der äußeren, diskreten Knoten definierten Arbeitsbereich näherungsweise linear sind. Dementsprechend wurde das innere BN als *lineares Gaußsches BN* (lineares GBN) modelliert. Im Rahmen der in Abschnitten 6.2 und 6.3 beschriebenen Untersuchungen konnten diese Annahmen im Wesentlichen bestätigt werden; soweit sie nicht erfüllt sind, wurden betroffene Knoten und Kanten aus dem BN entfernt (vgl. Abschnitt 7.3).

4.3.4 Aufstellung eines initialen Modells

Als Ausgangspunkt für

- Untersuchungen zu Zusammenhängen zwischen Zustandsmerkmalen (vgl. Abschnitte 6) sowie
- die darauf aufbauende Anpassung der Modelltopologie (vgl. Abschnitt 7.3)

wurde zunächst ein BN mit einer möglichst umfassenden Menge an Knoten und Kanten aufgestellt. Im Rahmen der Anpassung der Modelltopologie wurden insbesondere solche Zusammenhänge entfernt, die nicht signifikant sind, die zu sensitiv auf geringfügige Änderungen der erklärenden Zustände reagieren oder die sich nicht als linearer Zusammenhang beschreiben lassen (siehe oben). Das auf diese Weise reduzierte Modell wurde anschließend gemäß der in Abschnitt 7.4 beschriebenen Vorgehensweise kalibriert.

Zur Beschreibung der Fahrsituation (Mengen \mathbf{X}_s^d und \mathbf{X}_s^k), des Fahrverhaltens (Menge \mathbf{X}_b) sowie der Fahrpräferenzen (Menge \mathbf{X}_p) wurden dementsprechend zunächst sämtliche der in Abschnitt 4.1.3 angegebenen Kenngrößen und Merkmale berücksichtigt:

$$\mathbf{X}_s^d = \{z_{V,0}, z_{FS,0}, z_{ÜV,0}, z_{GW,0}, z_{V,-1}, z_{FS,-1}, z_{ÜV,-1}, z_{GW,-1}, z_{Fahrbahn}, z_{Wetter}\} \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_s^k = \{q, q_{Lkw}, v_s\} \quad (11)$$

$$\mathbf{X}_b = \{v_b, v_{unbeeinfl}, p_{unbeeinfl}, h, ttc, ibtr, cibtr, pbtr, cpbtr, \delta_q, \varepsilon_q\} \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_p = \begin{cases} \{v_{max}, f_{compl}, a_{max}, d, \alpha, g_{min}, h_{min}\} & \text{für aimsun.next} \\ \{v_{max}, f_{compl}, a_{desired}, d, d_{apparent}, g_{min}, \tau, \sigma\} & \text{für SUMO} \end{cases} \quad (13)$$

Zur Abgrenzung verschiedener FFE-Typen wird in dieser Arbeit lediglich ein zweiwertiges Zustandsmerkmal z_{FFE} zur Unterscheidung zwischen Pkw-ähnlichen und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen verwendet:

$$\mathbf{X}_f = \{z_{FFE}\} \mid z_{FFE} \in \{\text{Pkw-ähnlich}, \text{Lkw-ähnlich}\} \quad (14)$$

Die Menge der FFE-Typen ist aber erweiterbar, z. B. um zukünftig differenziertere Fahrzeugklassifizierungen sowie auch verschiedene Fahrstile berücksichtigen zu können.

³⁶ Diese Vorgehensweise wird in Anhang B.2 (Unterabschnitt „Hybride Bayessche Netze“) unter Verweis auf die Dokumentation der Software GeNIe [11] beschrieben.

Innerhalb des GBN wurden zunächst Kanten von allen Knoten der Menge \mathbf{X}_s^k zu allen Knoten in \mathbf{X}_b sowie wiederum von allen Knoten in \mathbf{X}_b zu allen Knoten in \mathbf{X}_p definiert. Zwischen zwei Knoten, die sich beide in der gleichen Menge befinden, existieren jedoch keine Kanten. Auch werden keine Kanten zwischen den Mengen \mathbf{X}_s^k und \mathbf{X}_p einbezogen; Zusammenhänge zwischen diesen beiden Mengen ergeben sich nur indirekt über Knoten der Menge \mathbf{X}_b . Dies verdeutlichen die Pfeile, die in Abbildung 10 innerhalb des inneren Netzes (GBN) dargestellt sind.

Die wertdiskreten Knoten der Menge \mathbf{X}_s^d , d. h. bauliche Streckeneigenschaften, Anzeigezustände und Wetter, haben Einfluss auf das Fahrverhalten und somit auf die Zustände der Knoten in \mathbf{X}_b . Zusätzlich wird unterstellt, dass die Knoten in \mathbf{X}_s^d auch die Verteilungen der unter diesen Randbedingungen zu beobachtenden Verkehrssituationen (Knoten in \mathbf{X}_s^k) beeinflussen. Dies ist ebenfalls durch entsprechende Pfeile in Abbildung 10 kenntlich gemacht. Fahrverhalten und Fahrpräferenzen werden teils separat für die beiden Fahrzeugklassen „Pkw-ähnlich“ und „Lkw-ähnlich“ abgebildet, was als Einfluss von \mathbf{X}_f auf Knoten in \mathbf{X}_b und \mathbf{X}_p in der Abbildung berücksichtigt wurde.

4.3.5 Implementierung des Inferenzmodells

Die Funktionen zur Erzeugung und Abfrage sowie auch zur Kalibrierung des hybriden BN wurden in der Statistikumgebung *R* [130] unter Verwendung u. a. des Zusatzpakets *bnlearn* [144] implementiert. Bei der Erzeugung des BN wurden lediglich die wertkontinuierlichen Knoten, d. h. die Knoten des GBN, explizit als Graph abgebildet. Die Zustände der äußeren, wertdiskreten Knoten werden berücksichtigt, indem je Zustandskombination eine eigene Instanz des GBN erzeugt, kalibriert und als R-Datenobjekt (RDS-Datei) gespeichert wird. Bei der Kalibrierung dieser GBN (vgl. Abschnitt 7.4) werden die zugrunde liegenden Daten für eine bestimmte Zustandskombination der äußeren Knoten verwendet. Bei der Abfrage (Inferenz) wird zunächst dasjenige GBN ausgewählt, das der als Evidenz vorliegenden Zustandskombination der äußeren Knoten entspricht; anschließend werden Evidenzen zu Knoten des inneren GBN eingesetzt und die gesuchten Zufallsvariablen abgefragt.

Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, wird das Inferenzmodell nicht direkt an die Simulationsumgebung zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation angebunden, weil erwartet wurde, dass dies zu einer erheblichen Verlangsamung der Simulation führen könnte. Stattdessen wurde das Inferenzmodell im Vorfeld für eine breite Auswahl praxisrelevanter Fahrsituationen abgefragt und die resultierende Zuordnung zwischen Fahrsituationen und Fahrpräferenzen in einer Datenbank abgelegt. Diese Zuordnungen können dort durch die nachfolgend in Abschnitt 4.4 beschriebene Schnittstellenanwendung abgerufen und in der Verkehrsflusssimulation angewendet werden.

4.4 Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation

Die mit dem Inferenzmodell bestimmten Fahrpräferenzen müssen auf die Fahrzeuge (FFE) in der Verkehrsflusssimulation angewendet werden. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, kann hierzu über proprietäre Schnittstellen auf die jeweils verwendete Simulationsumgebung zugegriffen werden. Da der Einsatz verschiedener Simulationsumgebungen mit unterschiedlichen Schnittstellen und Objektmodellen möglich sein soll, wurde hierzu ein softwareunabhängiges Verfahren entworfen, das anschließend für die Software *aimsun.next* und *SUMO* implementiert wurde. Nachfolgend werden Anforderungen an die Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation formuliert sowie das hierzu konzipierte Verfahren und seine Umsetzung beschrieben.

4.4.1 Anforderungen

Im Rahmen der Einführung des Begriffs „Fahrsituation“ (vgl. Abschnitt 4.1.3) wurde festgestellt, dass Fahrzeugführende die Anzeigezustände einer SBA nur dann in ihrem Verhalten berücksichtigen können, wenn sie diese tatsächlich wahrnehmen konnten. Reaktionen auf Schaltbilder einer SBA sind dementsprechend nur dann zu erwarten, wenn eine FFE einen Anzeigequerschnitt (AQ) passiert. In zahlreichen Simulationsstudien wurden zulässige Höchstgeschwindigkeiten oder Einschränkungen zur Fahrstreifenutzung umgesetzt, indem entsprechende Eigenschaften des betroffenen Streckenabschnitts verändert wurden. Beim Wechsel zwischen zwei Anzeigezuständen, z. B. von einer höheren auf eine niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeit, hätte dies zur Folge, dass auch das Verhalten von Fahrzeugen verändert wird, die den neuen Schaltzustand nicht wahrgenommen haben können (vgl. *Abbildung 11*, links). Hieraus können erhebliche Abweichungen hinsichtlich der Verkehrsdynamik entstehen. Diese können u. U. in Kauf genommen werden, wenn Anzeigezustände selten wechseln und die Zeiträume, die dieser Diskrepanz unterliegen, gegenüber dem gesamten Auswertezeitraum vergleichsweise kurz sind. Dies ist jedoch insbesondere bei variablen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten i. d. R. nicht gegeben. Bei dichtem Verkehr entstehende Pulks, Stauwellen sowie Störeinflüsse durch Verflechtungsvorgänge können bewirken, dass Wechsel des Anzeigezustands durchaus im Rahmen des typischen Entscheidungsintervalls von einer Minute (in einigen SBA auch geringer) auftreten können.

Aus diesem Grund sollen möglichst nur Eigenschaften von FFE verändert werden, und dies auch nur dann, wenn eine wahrnehmbare Veränderung des Situationskontexts eintritt, z. B. beim Passieren eines AQ (vgl. *Abbildung 11*, rechts). Diese Anforderung ist auch im Simulationsmodul für die SBA-Funktionalitäten zu beachten, das gesondert mit der Verkehrsflusssimulation interagiert.

Bei der technischen Umsetzung der Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation muss sichergestellt werden, dass die Simulationsgeschwindigkeit nicht zu stark beeinträchtigt wird. Außerdem soll ein möglichst großer Teil des Funktionsumfangs unabhängig von der verwendeten Simulationssoftware realisiert werden, um den Bedarf zur Anpassung an die jeweilige proprietäre Schnittstelle so gering wie möglich zu halten.

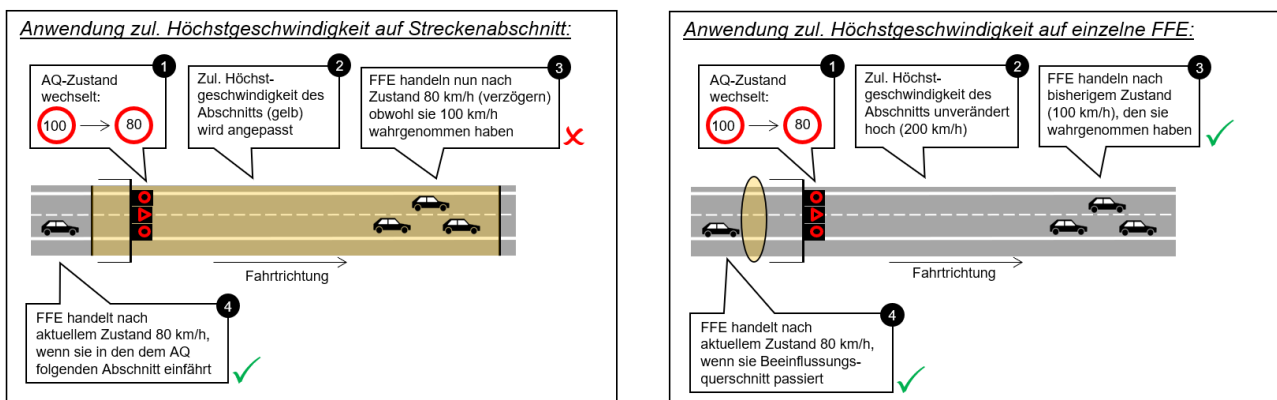


Abbildung 11: Varianten der Anwendung von Streckenver- und -geboten in der Simulation

4.4.2 Funktionen der Schnittstellenanwendung

Die Schnittstellenanwendung zur Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation umfasst Funktionen, die vor, während und nach der Durchführung eines Simulationslaufs ausgeführt werden. Eine Übersicht liefert *Abbildung 12*. Eine detailliertere Darstellung des Zusammenspiels zwischen den verschiedenen Simulationsmodulen findet sich in Anhang C.

Vor Durchführung der Simulation werden insbesondere

- die Konfiguration der Schnittstellenanwendung im gegebenen Szenario eingelesen und verarbeitet,
- die Verbindung zur Datenbank aufgebaut,
- Eigenschaften von Infrastrukturobjekten aus der Datenbank abgerufen sowie
- Datencontainer (Listen bzw. Dictionaries) initialisiert.

Im Rahmen der Konfiguration werden *Beeinflussungsquerschnitte* definiert, an denen sich die Fahr-situation ändern kann und an denen somit eine Anpassung der Fahrverhaltensparameter möglich sein

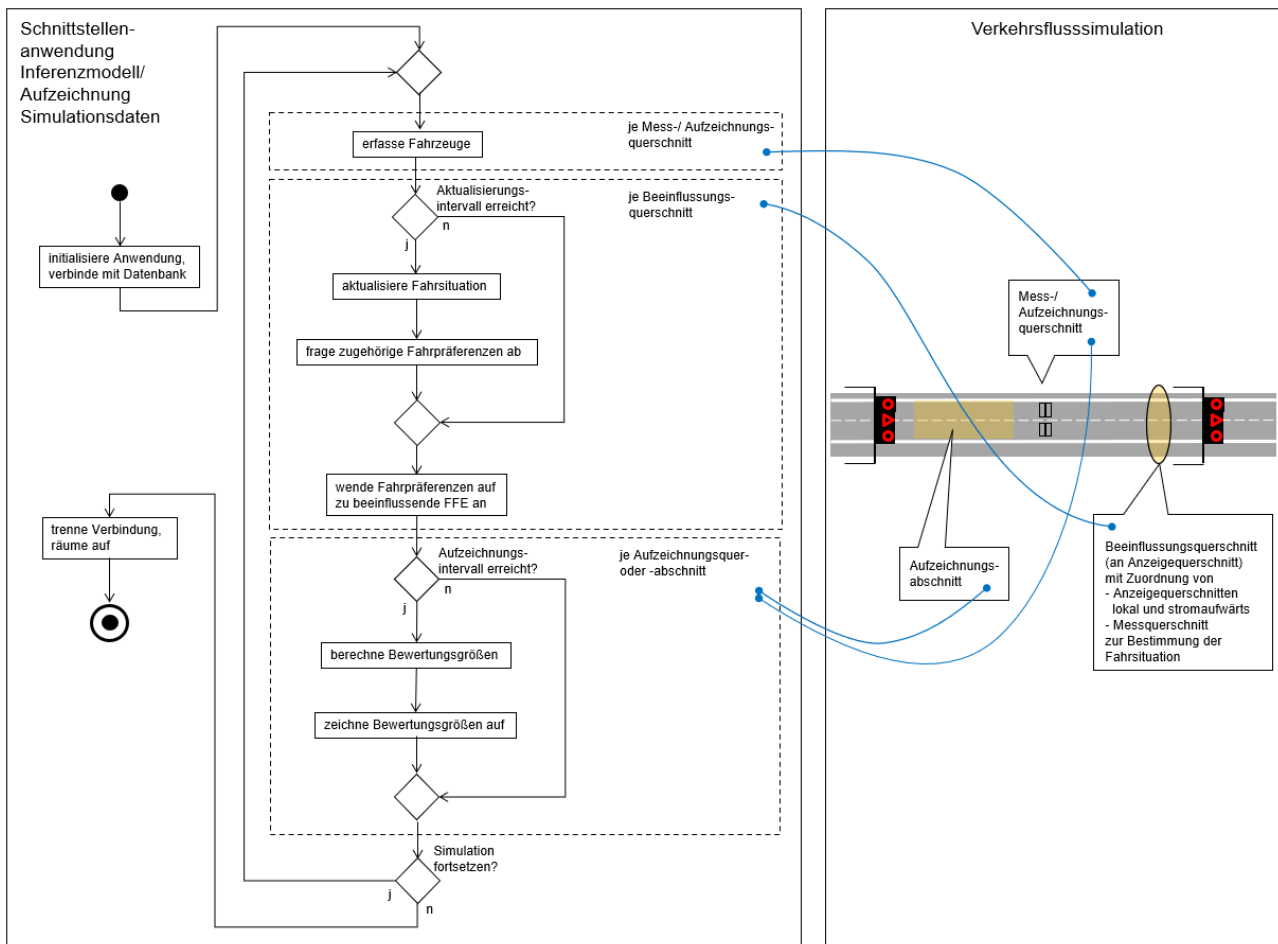


Abbildung 12: Interaktionen zwischen Inferenzmodell und Verkehrsflusssimulation

muss. Dies sind insbesondere die AQ einer SBA. Darüber hinaus können Beeinflussungsquerschnitte auch an Übergängen zwischen Abschnitten mit verschiedenen baulichen oder verkehrlichen Randbedingungen sinnvoll sein, etwa bei Fahrstreifenreduktion oder in Rampen. Jedem Beeinflussungsquerschnitt sind per Konfiguration

- ein Messquerschnitt zur Bestimmung der vorherrschenden Verkehrssituation,
- der lokal am Beeinflussungsquerschnitt befindliche AQ sowie
- der unmittelbar zurückliegende (stromaufwärtige) AQ

zugeordnet. Die baulichen Eigenschaften der Strecke (hier: zwei- oder dreistreifige Richtungsfahrbahn) stehen als Eigenschaft des lokalen AQ zur Verfügung.

Während der Durchführung der Simulation werden zyklisch folgende Funktionen ausgeführt:

Erfassung von Fahrzeugen an Messquerschnitten: Zu jedem Simulationsschritt und an jedem Messquerschnitt werden alle Fahrzeuge erfasst, die diesen Querschnitt überquert haben. Dabei werden auch die Geschwindigkeiten und weitere Eigenschaften der FFE erfasst, die zur späteren Bestimmung der Fahrsituation und Aufzeichnung von Bewertungsgrößen notwendig sind.

Aktualisierung der Fahrsituation: In einem bestimmten Aktualisierungszyklus wird an jedem Beeinflussungsquerschnitt die dort vorherrschende Fahrsituation neu bestimmt. Diese umfasst die Verkehrssituation am zugeordneten Messquerschnitt, die Anzeigezustände des lokalen und stromaufwärtigen AQ sowie die baulichen Randbedingungen am Beeinflussungsquerschnitt.

Abfrage der zugehörigen Fahrpräferenzen: Hat sich im Rahmen der vorangegangenen Funktion die Fahrsituation an einem Beeinflussungsquerschnitt verändert, werden die zu dieser diskretisierten Situation zugehörigen Verteilungen der Fahrverhaltensparameter abgefragt. Diese sind als Mittelwert, Standardabweichung sowie obere und untere Wertebereichsgrenze einer abgeschnittenen Normalverteilung gegeben.

Erfassung der zu beeinflussenden FFE: Zu jedem Simulationsschritt und an jedem Beeinflussungsquerschnitt werden alle Fahrzeuge erfasst, die diesen Querschnitt überquert haben.

Anwendung Fahrpräferenzen auf die FFE: Jeder zu beeinflussenden FFE (siehe vorheriger Schritt) werden Fahrverhaltensparameter gemäß der Verteilungen zugewiesen, die zuvor als zur vorherrschenden Fahrsituation zugehörig ermittelt wurden. Allgemein wird ein Parameter zufällig gemäß der Verteilung gewählt, ohne Abhängigkeiten zu bisherigen Verhaltensweisen der FFE zu berücksichtigen. Bei der Aktualisierung der Wunschgeschwindigkeiten wurde jedoch vorausgesetzt, dass die grundsätzliche Ausprägung einer FFE (sportlicher vs. konservativer Fahrstil) während einer Fahrt ähnlich bleibt. Das Verfahren hierzu ist in Abschnitt 4.4.3 beschrieben.

Aufzeichnung von Bewertungsgrößen: In bestimmten Aufzeichnungszyklen werden querschnitts- und abschnittsbezogen bestimmte Bewertungsgrößen berechnet und in einer Datenbank aufgezeichnet. Die Berechnung querschnittsbezogener Größen erfolgt wie auch für Einzelfahrzeugdaten einer realen SBA (vgl. Abschnitt 5.1), während für die Berechnung abschnittsbezogener Kenngrößen ein gesondertes Verfahren entwickelt wurde, mit dem sich auch die pulkbezogenen Risikoindikatoren PBTR und CPBTR berechnen lassen (vgl. Abschnitt 5.2). In beiden Fällen werden die Bewertungsgrößen automatisch dem vorherrschenden Situationskontext (hier: Anzeigezustand) zugeordnet.

Aktualisierungs- sowie Aufzeichnungszyklus sind unabhängig voneinander konfigurierbar und müssen jeweils Vielfache der Simulationsschrittweite sein. Auf eine Abfrage der Fahrpräferenzen wird verzichtet, wenn sich die Fahrsituation an einem Beeinflussungsquerschnitt nicht geändert hat.

4.4.3 Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens

In den beiden hier betrachteten Fahrzeugfolgmodellen in aimsun.next (Gipps) und SUMO (Krauß) wird die Wunschgeschwindigkeit $v_{\text{desired},n}$ einer FFE n begrenzt durch die fahrzeugspezifische Maximalgeschwindigkeit $v_{\text{max},n}$ sowie durch die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Streckenabschnitts bzw. Fahrstreifens (unter Anwendung eines wiederum fahrzeugspezifischen Befolungsgrads $f_{\text{compl},n}$, vgl. Gleichung 25 in Anhang A.1). In Abschnitt 4.4.1 wurde u. a. die Anforderung formuliert, dass das Geschwindigkeitsverhalten der FFE nur dann beeinflusst werden darf, wenn eine Änderung der Fahrsituation wahrnehmbar ist. Würde die Änderung einer in einem AQ dargestellten zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf den nachfolgenden Streckenabschnitt angewendet, wären auch FFE betroffen, die den AQ bereits zuvor passiert haben und die Zustandsänderung deshalb nicht wahrnehmen konnten. Aus diesem Grund wurde festgelegt,

- dass auf eine Anwendung der im AQ dargestellten zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf Streckenabschnitte verzichtet wird und
- dass in durch SBA beeinflussten Streckenabschnitten stattdessen eine feste zulässige Höchstgeschwindigkeit gesetzt wird, die so hoch gewählt ist, dass sie die Geschwindigkeitswahl praktisch nicht beeinflusst (z. B. 200 km/h).

Daraus folgt, dass die Wunschgeschwindigkeit $v_{\text{desired},n}$ ausschließlich durch die FFE-spezifische Maximalgeschwindigkeit $v_{\text{max},n}$ beeinflusst wird, die nunmehr sowohl die physische Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs als auch die Geschwindigkeitswahl der oder des Fahrzeugführenden unter Berücksichtigung der SBA-Maßnahmen abbildet. Der Befolungsgrad $f_{\text{compl},n}$ bzgl. der zulässigen Höchstgeschwindigkeit der Strecke wird aufgrund der vorgenannten Festlegungen nicht zur Beeinflussung des Fahrverhaltens herangezogen.

Zur aktuellen Fahrsituation passende Verteilungen von Fahrverhaltensparametern sind als abgeschnittene Normalverteilungen, d. h. durch Mittelwert und Standardabweichung sowie obere und untere Wertebereichsgrenze beschrieben. Je FFE, das einen Beeinflussungsquerschnitt überquert hat, wird ein Verhaltensparameter zufällig gemäß dieser Verteilung bestimmt. Besonders bei der Anpassung der Wunschgeschwindigkeit muss jedoch der bisherige Fahrstil einbezogen werden: Würde die Wunschgeschwindigkeit $v_{\text{desired},n} = v_{\text{max},n}$ einer FFE n unabhängig vom bisherigen Geschwindigkeitsverhalten bestimmt, könnten sportliche Fahrzeugführende beim Passieren eines AQ plötzlich in einen konservativen Fahrstil wechseln und umgekehrt. Hierdurch könnte es im Umfeld eines AQ zu unrealistischen Beschleunigungs- und Verzögerungsmanövern kommen. Um dies zu verhindern, wurde folgendes Verfahren zur Wahrung der Konsistenz der Geschwindigkeitswahl entwickelt (vgl. *Abbildung 13*):

- Wird eine FFE in die Simulation eingesetzt, wird ihr automatisch eine initiale Maximalgeschwindigkeit $v_{\text{max,init},n}$ zugewiesen. Diese wird ebenfalls aus einer Normalverteilung bestimmt. Mittelwert $\mu_{v,\text{max,init}}$ und Standardabweichung $\sigma_{v,\text{max,init}}$ dieser Verteilung werden als Eigenschaft des FFE-Typs vorgegeben und sind daher bekannt.

- Bei Fahrzeugeintritt wird ein Abweichungsfaktor der Geschwindigkeit $f_{v,n}$ berechnet, der als feste Eigenschaft der FFE während der Simulation erhalten bleibt. Dieser berechnet sich nach Gleichung 15 (vgl. auch Abbildung 13, links).
- Passiert eine FFE einen Beeinflussungsquerschnitt, wird die neue Maximalgeschwindigkeit $v_{\max,n}(t)$ bestimmt, indem der Faktor $f_{v,n}$ auf die zum aktuellen Zeitschritt t anzuwendende Verteilung $N(\mu_{v,\max}(t), \sigma_{v,\max}^2(t))$ übertragen wird. Dabei wird ein additiver normalverteilter Störeinfluss ϑ mit geringer Standardabweichung $\sigma_{v,\max,\text{var}}$ einbezogen. Dieser Vorgang ist durch Gleichungen 16 und 17 beschrieben und wird ebenfalls in Abbildung 13 (rechts) veranschaulicht.

$$f_{v,n} = \frac{v_{\max,\text{init},n} - \mu_{v,\max,\text{init}}}{\sigma_{v,\max,\text{init}}} \quad (15)$$

$$v_{\max,n}(t) = \mu_{v,\max}(t) + f_v \cdot \sigma_{v,\max}(t) + \vartheta \quad (16)$$

$$\vartheta \sim N(0, \sigma_{v,\max,\text{var}}^2) \quad (17)$$

Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Geschwindigkeitswahl einer FFE zwar die Anzeigezustände der SBA berücksichtigt, die gewählte Geschwindigkeit aber in einem ungefähr gleichbleibenden Verhältnis zum FFE-Kollektiv steht (Einfluss des im Fahrtverlauf gleichbleibenden Faktors f_v). Durch den Störeinfluss kann dem Umstand Rechnung getragen werden, dass das menschliche Fahrverhalten gewissen Variationen nicht nur zwischen den FFE, sondern auch im Verlauf einer Fahrt unterliegt.

Das zuvor beschriebene Verfahren setzt voraus, dass einer FFE beim Einsetzen in die Simulation zufällig eine initiale Höchstgeschwindigkeit zugewiesen wird. In aimsun.next ist dies unmittelbar gegeben. In SUMO kann jedoch nur der Befolgungsgrad einer streckenspezifischen Höchstgeschwindigkeit, nicht jedoch die FFE-spezifische Höchstgeschwindigkeit als normalverteilte Zufallsgröße angegeben werden. Daher wird diese Funktion durch die Schnittstellenanwendung zur Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation übernommen. Über die SUMO-eigene Schnittstelle TraCI werden alle FFE ermittelt, die zum aktuellen Zeitschritt in die Simulation eingesetzt wurden. Diesen FFE wird analog zu aimsun.next eine zufällige FFE-Höchstgeschwindigkeit aus einer Normalverteilung zugewiesen, welche die feste Vor-

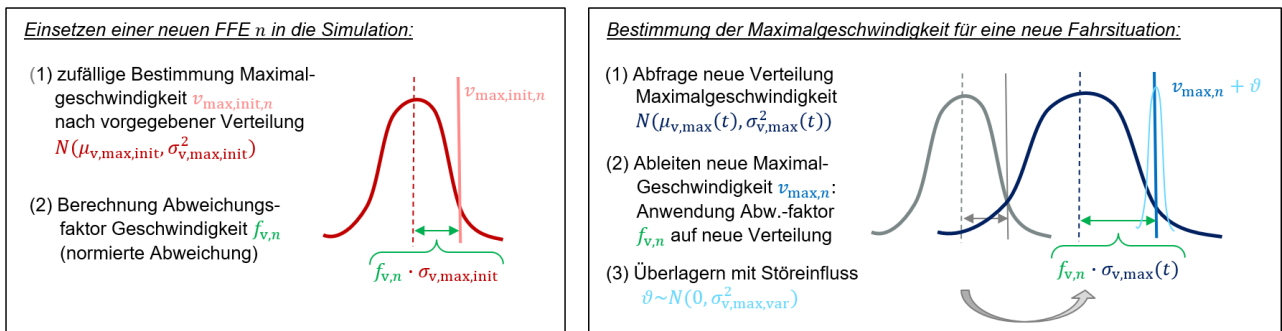


Abbildung 13: Verfahren zur Wahrung der Konsistenz der Geschwindigkeitswahl (links: Bestimmung des für eine Fahrt konstanten Abweichungsfaktors $f_{v,n}$ bei Eintritt einer FFE n in die Simulation; rechts: Anwendung des Faktors $f_{v,n}$ bei der Aktualisierung der Wunschgeschwindigkeit)

gabe aus der Konfiguration überschreibt. Auf dieser Grundlage wird unmittelbar anschließend der Faktor f_v bestimmt.

4.4.4 Implementierung der Schnittstellenanwendung

Die zuvor beschriebenen Prozesse der Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation wurden in Python umgesetzt. Die beiden verwendeten Simulationsumgebungen *aimsun.next* und SUMO unterstützen die Einbindung von in Python implementierten Funktionalitäten:

aimsun.next erlaubt die Einbettung von Python-Skripten, die beim Start und während der Simulation durch *aimsun.next* ausgeführt werden. Über eine proprietäre Programmierschnittstelle (API) besteht die Möglichkeit, Aktionen zu definieren, die vor und nach Simulationsbeginn, vor und nach einem Simulationsschritt sowie bei bestimmten weiteren Ereignissen (z. B. Eintritt oder Verlassen eines Fahrzeugs in die Simulation) ausgeführt werden sollen. Über die API kann außerdem auf Objekte wie FFE, Detektoren und AQ zugegriffen oder ihr Zustand verändert werden. Auf diese Weise können auch mehrere Python-Skripte gleichzeitig eingebunden werden, die dann nacheinander ausgeführt werden [3].

SUMO bietet mit dem Traffic Control Interface (TraCI) eine ähnliche Schnittstelle zur Interaktion äußerer Funktionsmodule an, jedoch kommunizieren hierbei die externen Funktionsmodule über eine TCP/IP-Verbindung mit SUMO. Werden mehrere externe Module (Clients) eingebunden, wartet SUMO zunächst, bis alle Clients eine Verbindung aufbauen konnten. Auch während der Simulation muss jeder Client den Eintritt in den nächsten Simulationsschritt anfordern, bevor dieser durch SUMO ausgeführt wird [42] [43].

Ein großer Teil der in Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 beschriebenen Funktionalitäten konnte einheitlich, d. h. unabhängig von der verwendeten Simulationsumgebung umgesetzt werden. Unterschiede ergeben sich insbesondere beim Zugriff auf Objekte und Zustände der Simulation, da hier die proprietären Schnittstellen zu nutzen waren. Die Prozesse der Initialisierung sowie der Durchführung eines Simulationszeitschritts sind für beide Simulationsumgebungen in Anhang C in Form von UML-Sequenzdiagrammen detailliert dargestellt.

Bei der Implementierung der einzelnen Funktionen musste sichergestellt werden, dass die Simulationsgeschwindigkeit durch die äußeren Eingriffe nicht zu stark beeinträchtigt wird. Daher wurde eine Entkopplung des Inferenzmodells von der Simulation vorgenommen. Die Abfrage der Fahrpräferenzen (Verteilungen der Fahrverhaltensparameter) für eine bestimmte Fahrsituation würde ohne diese Entkopplung folgende Schritte umfassen:

1. Abfrage der Fahrsituation (Zustände der Knoten in \mathbf{X}_s^d und \mathbf{X}_s^k),
2. Auswahl des der Zustandskombination der Knoten in \mathbf{X}_s^d zugehörigen GBN,
3. Eingabe der Evidenzen für q , q_{Lkw} und v_s (Knoten in \mathbf{X}_s^k) in dieses GBN,
4. Abfrage (Inferenz) der sich mit diesen Evidenzen ergebenden Fahrpräferenzen (Knoten in \mathbf{X}_p).

Um diesen Prozess von der Simulation loszulösen, wurden diese Schritte für 450 als praxisrelevant ausgewählte Zustandskombinationen der Knoten in \mathbf{X}_s^d (vgl. Abschnitt 7.4.1) sowie für engmaschige abgetastete Werte der Größen q , q_{Lkw} und v_s im Vorfeld durchgeführt und ihre Zuordnung zu den sich ergebenden Fahrpräferenzen in einer Datenbank (MariaDB) abgelegt (Tabelle „behavior_distributions“,

4 VERFAHREN ZUR KONTEXTSPEZIFISCHEN ANPASSUNG DES FAHRVERHALTENS

vgl. *Abbildung 14*). Hierbei wird mittels eines unique index sichergestellt, dass für jede der so gebildeten diskreten Fahrsituationen (Tabelle „driving_situations“) sowie je FFE-Typ (Pkw- oder Lkw-ähnlich) und je Strecke und Fahrtrichtung genau eine Ausprägung der Fahrpräferenzen zugewiesen ist. Das Diskretisierungsintervall für q , q_{Lkw} und v_S wurde gering gehalten, um aus Diskretisierungsfehlern resultierende Sprünge im Fahrverhalten so gering wie möglich zu halten.

Während der Simulation wird in gleichartiger Weise die Verkehrssituation diskretisiert und mit den ohnehin diskreten Zuständen aus \mathbf{X}_s^d zu einer Gesamtfahrsituation zusammengeführt. Die dieser Situation zugehörigen Fahrpräferenzen werden nunmehr aus der zuvor genannten Datenbanktabelle „behavior_distributions“ abgefragt.

Um die Simulationsgeschwindigkeit weiter zu erhöhen, wird die Fahrsituation nicht zu jedem Zeitschritt, sondern in größeren Zeitintervallen aktualisiert. Zumindest erfolgt dies jedoch, wenn sich Anzeigezustände ändern (lokal oder stromaufwärts). Erst wenn durch diese Aktualisierung eine veränderte Fahrsituation festgestellt wurde, werden auch die Fahrpräferenzen aktualisiert. Die Fahrpräferenzen werden zwischengespeichert und bis zum nächsten Aktualisierungszyklus auf alle den Beeinflussungsquerschnitt passierenden FFE angewendet.

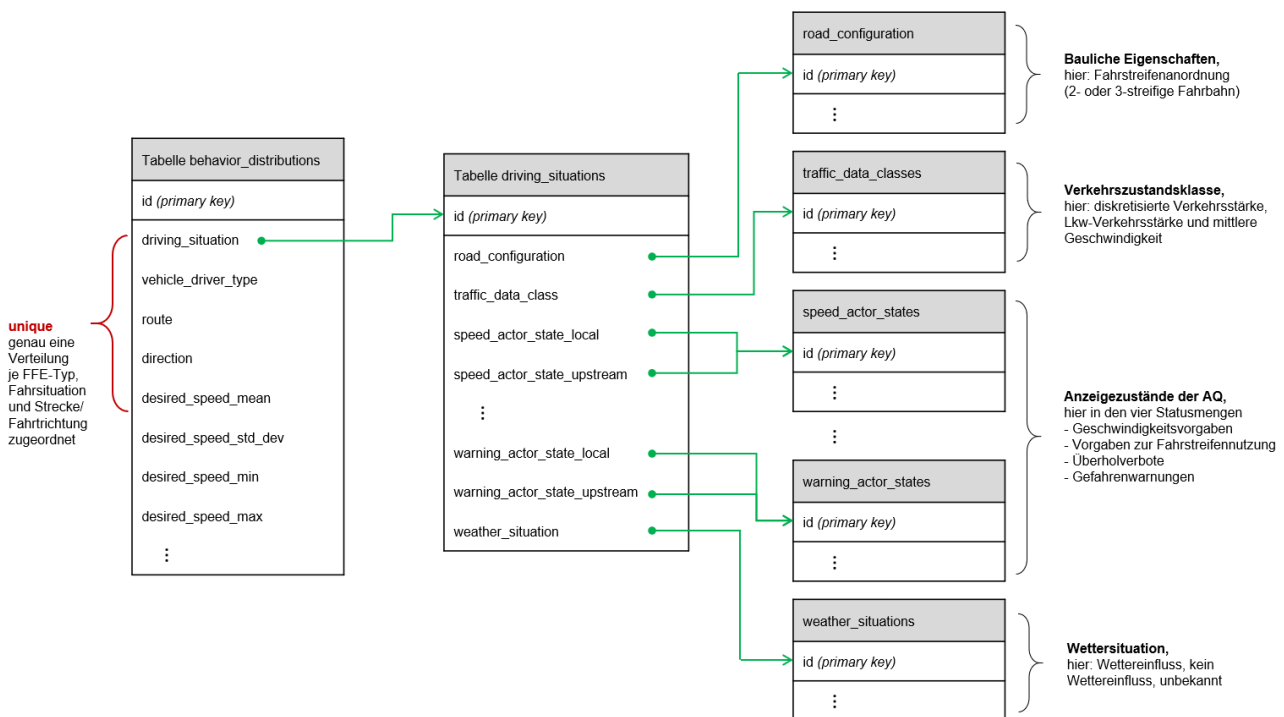


Abbildung 14: Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrpräferenzen in der Datenbank

4.5 Modellierung der Streckenbeeinflussungsanlagen

Da das in dieser Arbeit entstandene Verfahren am Beispiel von SBA erprobt und angewendet werden soll (vgl. Abschnitt 8), müssen die hierfür relevanten Prozesse und Funktionalitäten der SBA nachgebildet und für die Simulation verfügbar gemacht werden. Dies geschieht für die beiden verwendeten Simulationsumgebungen *aimsun.next* und SUMO in unterschiedlicher Weise:

aimsun.next: Im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB³⁷ wurde eine Unterzentralensoftware des Projektpartners Heusch/Boesefeldt GmbH eingesetzt, die auch in realen SBA zum Einsatz kommt und somit die volle Komplexität einer SBA unmittelbar abbilden kann. Wie in Abschnitt 3.1 geschildert, konnte diese Unterzentralensoftware jedoch nicht ohne Weiteres in Verbindung mit SUMO eingesetzt werden.

SUMO: Um die wesentlichen Funktionalitäten einer SBA auch in SUMO nutzen zu können, wurde eine eigene SBA-Simulationsumgebung konzipiert und entwickelt. Diese bildet zunächst nur die für die Erprobung des Verfahrens unmittelbar benötigten Funktionalitäten ab, ist jedoch erweiterbar gestaltet, um auch zusätzliche Anwendungsszenarien unterstützen zu können.

Nachfolgend werden zunächst übergreifende Anforderungen an die SBA-Simulation formuliert. Anschließend die Simulationmodule zur Umsetzung der SBA-Funktionalität für die beiden vorgenannten Simulationsumgebungen beschrieben.

4.5.1 Anforderungen

Ausgehend von der in Abschnitt 2.1.2 gegebenen Beschreibung der Prozesse streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung nach MARZ war im nächsten Schritt festzulegen, in welchem Umfang diese Prozesse nachgebildet werden müssen, um das zuvor beschriebene Verfahren zur kontext-differenzierten Fahrverhaltensmodellierung erproben, validieren und demonstrieren zu können. Ein Vorteil des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens soll insbesondere darin bestehen, dass bestimmte Steuerverfahren oder Maßnahmen nicht mehr nur isoliert, sondern im Zusammenspiel mit anderen Steuerverfahren und ihren verkehrlichen Wirkungen sowie auch mit Priorisierungs- und Abgleichsregeln betrachtet werden können. Somit ist zu berücksichtigen, dass einzelne Maßnahmen durch Abgleichs- und Priorisierungsregeln nicht zur Anzeige gebracht oder durch andere Maßnahmen überlagert werden könnten, was unmittelbare Auswirkungen auf das resultierende Fahrverhalten zur Folge haben kann.

Eine Voraussetzung für sämtliche Verfahren der Situationserkennung ist die Erfassung der Fahrzeuge mittels fahrstreifenbezogener Detektoren sowie die darauf aufbauende Datenaufbereitung einschließlich Berechnung zusätzlicher Kenngrößen, querschnittsbezogener Aggregation, Glättung und Trendprognose. Werden diese Prozesse zu stark vereinfacht abgebildet, können sich die dadurch entstehenden Fehler auf die anschließenden Prozesse auswirken. Daher ist es notwendig, diese Prozesse vollständig entsprechend einer realen SBA nach MARZ abzubilden. Dabei müssen die in der zu modellierenden realen SBA verwendeten Betriebsparameter (z. B. Glättungsfaktoren) genutzt werden können. Nach MARZ müssen diese Parameter je Messquerschnitt unterschiedlich eingestellt werden können; dies ist auch für das SBA-Simulationsmodell zu fordern.

Im Zuge der Situationserkennung und Maßnahmenwahl ist es ausreichend, nur die im Rahmen der Erprobung und Anwendung relevanten Verfahren im Modell zu berücksichtigen. Dies sind die auf den be-

³⁷ Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2.

troffenen SBA implementierten automatischen verkehrsabhängigen Steuerverfahren

- Stauwarnung (Kriterien Belegung und Geschwindigkeit),
- Harmonisierung der Geschwindigkeit,
- Unruhe im Verkehr sowie
- Lkw-Überholverbot aufgrund der Verkehrsbelastung.

Auch bei diesen Steuerverfahren sollen die realen Betriebsparameter (hier z. B. Schwellenwerte zur Aktivierung oder Deaktivierung) versorgt werden können. Auch hier muss eine unterschiedliche Versorgung der Betriebsparameter je Messquerschnitt ermöglicht werden. Um verschiedene Parametrierungen der SBA vergleichend bewerten zu können, sollen die Parametersätze einem bestimmten Szenario zugeordnet werden können.

Nicht berücksichtigt werden Automatikprogramme auf Grundlage der Wetter- und Umfeldbedingungen sowie manuell aktivierte Programme. Es soll aber möglich sein, diese Programme nachträglich in das Modell zu integrieren, z. B. mittels zeit- oder ereignisgesteuerter Aktivierung im Rahmen eines Szenarios. Darüber hinaus muss der Grundzustand eines jeden AQ berücksichtigt werden, d. h. der Anzeigezustand ohne Vorliegen von Schaltanforderungen der SBA-Steuerung.

Um ein realistisches Verhalten der SBA zu erreichen, muss die Priorisierung von Maßnahmen und daraus resultierender Schaltzustände wiederum vollständig entsprechend der Realität umgesetzt werden. Dies schließt Regeln des Längsabgleichs (Lücken- bzw. Trichterregeln) gemäß RWVZ [19] sowie ergänzende Vorgaben des MARZ ein.

Auf die Modellierung einzelner Wechselzeichengeber wird verzichtet, da es ausreichend ist, die Zustände eines AQ zusammengefasst zu betrachten. Hierzu dienen vier Statusmengen, die in Abschnitt 5.1.3 genannt und in Anhang D detaillierter beschrieben werden.

4.5.2 Umsetzung für aimsun.next

Zur Abbildung der SBA-Funktionalität in aimsun.next wurde eine Unterzentralensoftware des Projektpartners Heusch/Boesefeldt GmbH eingesetzt, die der in realen SBA produktiv eingesetzten Software entspricht [87]. Diese wurde durch die Heusch/Boesefeldt GmbH mit der Konfiguration und den Betriebsparametern³⁸ der zwei als Referenzstrecken ausgewählten SBA versorgt. Auf diese Weise lässt sich die gesamte Komplexität einer SBA in vielfältigen Szenarien abbilden. Die Unterzentralensoftware interagiert mit aimsun.next über eine ebenfalls durch die Heusch/Boesefeldt GmbH bereitgestellte Schnittstellensoftware (Python-Skript). Dies beinhaltet

- die Abfrage von Verkehrsdaten in aimsun.next versorgter Detektoren,
- die Datenaufbereitung, Situationserkennung und Maßnahmenwahl nach MARZ (hier: Ausgabe 1999) [17] sowie
- die Anwendung der resultierenden Anzeigezustände auf die AQ (variable message signs) durch Aktivierung entsprechender vorversorgter Maßnahmen (policies).

³⁸ Diese Daten wurden dankenswerterweise von den jeweils zuständigen Straßenbaubehörden zur Verfügung gestellt (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Die Maßnahmen (policies) können dabei so versorgt werden, dass mit ihrer Aktivierung automatisch Eigenschaften eines zugeordneten Streckenabschnitts verändert werden (z. B. Änderung zulässiger Höchstgeschwindigkeiten oder Sperrung von Fahrstreifen für bestimmte Fahrzeugarten). Es ist jedoch auch möglich, Policies ohne direkte Einflüsse auf Objekte der Simulation zu aktivieren. Dieser Aktivierungszustand kann durch die Schnittstellenanwendung des Inferenzmodells (vgl. Abschnitt 4.4) abgefragt und zur Bestimmung der Fahrsituation genutzt werden. Prinzipiell könnten so alle vier Zustandsmengen für jeden AQ abgebildet und berücksichtigt werden. Aufgrund des hiermit verbundenen Aufwandes wurden jedoch nur ausgewählte, für die vorgesehenen Untersuchungen als notwendig erachteten Zustände versorgt [87].

Zulässige Höchstgeschwindigkeiten und ausgewählte Gefahrenwarnungen wurden so eingerichtet, dass sie keinen direkten Einfluss auf Eigenschaften des Streckenabschnitts haben. Somit wird gewährleistet, dass diese Zustände nur dann Einfluss auf das Fahrverhalten haben, wenn sie für die betroffenen Fahrzeugführenden auch wahrnehmbar sind (vgl. Abschnitt 4.4.1). Bei der Umsetzung des Lkw-Überholverbots musste jedoch auf eine Sperrung der Überholfahrstreifen für Lkw zurückgegriffen werden, da in der verwendeten Version von aimsun.next keine fahrzeugspezifischen Merkmale zur Verfügung standen, mit der Überholentscheidungen während der Simulationslaufzeit hätten beeinflusst werden können. Dies wurde jedoch als hinnehmbar eingeschätzt, da Lkw-Überholverbote auf den betrachteten Referenzstrecken i. d. R. nach Aktivierung für einen hinreichend langen Zeitraum bestehen bleiben.

4.5.3 Umsetzung für SUMO

Aufgrund der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Randbedingungen wurde für die Nachbildung der wesentlichen SBA-Funktionalitäten in SUMO ein eigenes Funktionsmodul konzipiert und implementiert. Dieses wurde als Java-Anwendung realisiert, die ebenso wie die Schnittstellenanwendung des Inferenzmodells (vgl. Abschnitt 4.4) über die Schnittstelle TraCI [42] mit SUMO interagiert. Hierzu wurde die Java-Bibliothek TraaS (TraCI as a Service) [44] verwendet.

Abbildung 15 zeigt vereinfacht, wie das SBA-Simulationsmodul mit der Verkehrsflusssimulation interagiert. Hierbei wurden die in Abschnitt 4.5.1 als relevant benannten Prozesse, insbesondere die Datenaufbereitung und der Abgleich der Schaltzustände, realitätsgetreu nachgebildet. Die vier in Abschnitt 4.5.1 genannten verkehrsabhängigen Steuerverfahren wurden ebenfalls implementiert, wobei die Ergänzung weiterer Verfahren möglich ist.

Um die in Abschnitt 4.5.1 genannten Anforderungen hinsichtlich der Konfiguration und Parametrierung erfüllen zu können, wurden zunächst sämtliche relevanten Infrastrukturelemente der beiden Referenzstrecken in einer Datenbank (MariaDB) erfasst. Dies beinhaltet u. a. Detektoren (einzelne Fahrstreifen), Messquerschnitte (MQ, Zusammenfassung mehrerer Fahrstreifen einer Fahrtrichtung) und Anzeigequerschnitte (AQ). Darüber hinaus wurden Tabellen zur Erfassung von Parametersätzen für die Datenaufbereitung und Situationserkennung angelegt. In einer weiteren Tabelle werden Infrastrukturelemente und Parametersätze einander zugeordnet, wobei diese Zuordnung szenarienspezifisch unterschiedlich festgelegt werden kann. Alternativ zur herkömmlichen Versorgung von gegeneinander verschobenen Ein- und Ausschaltgrenzwerten (Hysterese) ist auch die Versorgung von Mindestaktivierungszeiten für Situationen oder Maßnahmen möglich. Auch Regeln des Längs- und Querabgleichs sowie Grundzustände der AQ können konfiguriert werden. Die Konfiguration des SBA-Simulators wird in Abschnitt 7.2 näher beschrieben.

4 VERFAHREN ZUR KONTEXTSPEZIFISCHEN ANPASSUNG DES FAHRVERHALTENS

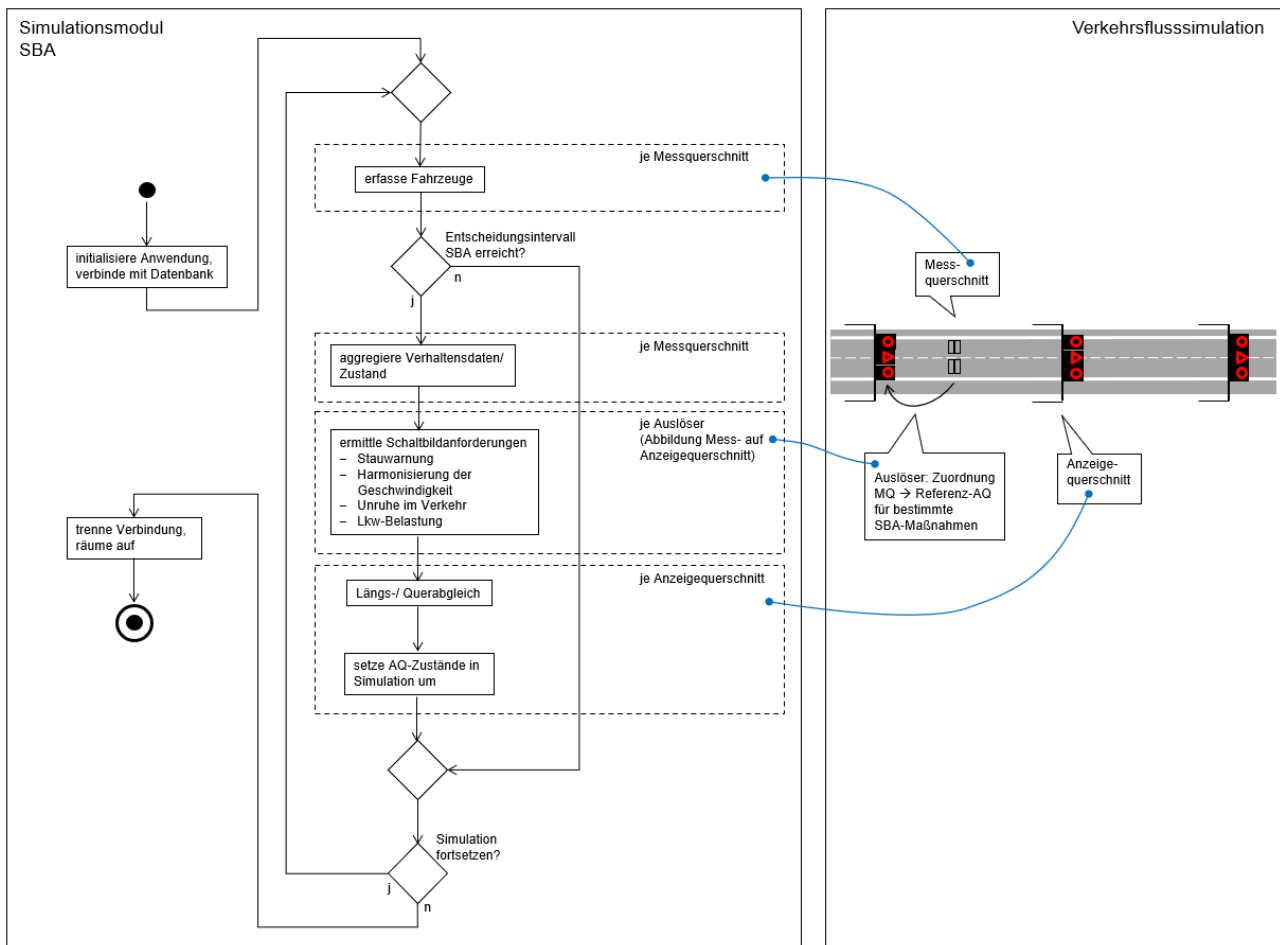


Abbildung 15: Funktionsweise der SBA-Simulation und Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation

In SUMO können AQ ähnlich wie in aimsun.next als Objekte entlang einer Strecke versorgt werden. Jedoch unterstützen diese in der genutzten Softwareversion lediglich Geschwindigkeitsvorgaben. Daher wurde entschieden, AQ als Points of Interest abzubilden. An jedem AQ-Standort wurde für jede der vier in Abschnitt 5.1.3 benannten Zustandsmengen ein Anzeigeelement als Point of Interest eingebettet (vgl. *Abbildung 16*). Der Zustand des Anzeigeelements wird als Grafik (Piktogramm als Bitmap) geladen und auf der Nutzeroberfläche visualisiert. Wird durch das SBA-Simulationsmodul ein Anzeigezustand verändert, wird über die Schnittstelle TraCI diese Grafik sowie ein internes Datenfeld („state“) als Eigenschaft des Point of Interest angepasst. Die Anpassung der Grafik dient der Visualisierung des Anzeigezustands in der Simulation, während die Anpassung des Merkmals „state“ ähnlich der Aktivierung einer Policy in aimsun.next durch die Schnittstellenanwendung des Inferenzmodells detektiert und zur Aktualisierung der Fahrsituation verwendet werden kann. Im Gegensatz zu aimsun.next kann in SUMO auch die Fahrstreifenwahl über FFE-spezifische Merkmale beeinflusst werden, sodass sowohl Geschwindigkeitsvorgaben als auch Lkw-Überholverbote ohne streckenbezogene Parameter angewendet werden können.



Abbildung 16: Beispiel der Nachbildung eines Anzeigequerschnitts in SUMO

5 Datenübernahme und -verarbeitung

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die Daten der SBA auf den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Referenzstrecken aufgenommen und Kenngrößen zur Beschreibung und Bewertung des Verkehrsprozesses berechnet wurden. Außerdem wird beschrieben, wie vergleichbare Kenngrößen im Rahmen der Simulation aufgezeichnet und aufbereitet wurden. In der Simulation wird neben einer bei SBA üblichen querschnittsbezogenen Erfassung auch eine abschnittsbezogene Erfassung von Verkehrskenngrößen ermöglicht.

5.1 Daten der Referenzstrecken

Die in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Rohdaten, die von den jeweils zuständigen Straßenbaubehörden zur Verfügung gestellt wurden, lagen als Dateien unterschiedlicher Art und Formatierung vor. Diese wurden zunächst in eine einheitliche Datenbasis überführt. Aus diesen Rohdaten wurden anschließend ergänzende Kenngrößen berechnet. Die so erweiterten Daten wurden automatisiert einem Situationskontext im Sinne einer durch Fahrzeugführende wahrnehmbaren Fahrsituation zugeordnet. Die so erzeugte Datenbasis zu den Referenzstrecken bildete eine wesentliche Grundlage für die Untersuchung von Wirkzusammenhängen im Kontext von SBA (Abschnitte 6.1 und 6.2) sowie für die Kalibrierung des Verfahrens zur kontext-spezifischen Anpassung des Fahrverhaltens (Abschnitt 7.4.1). Die Schritte der Datenverarbeitung werden nachfolgend im Detail beschrieben.

5.1.1 Datenübernahme

Die Übernahme der zur Verfügung gestellten Daten umfasste die Aufnahme der Infrastrukturdaten sowie das Einlesen der Verkehrs- und Prozessdaten der SBA. Alle Daten wurden in einer einheitlichen Datenstruktur in einer Datenbank (MariaDB) erfasst.

Zunächst wurden Infrastrukturobjekte wie Detektoren und Messquerschnitte (MQ), Straßenwetterstationen, Wechselzeichengeber (WZG) und Anzeigequerschnitte (AQ) erfasst. Jedes dieser Infrastrukturobjekte ist den Rohdatensätzen als Datenquelle zuordenbar. Zu allen Infrastrukturobjekten wurde eine Standortinformation (Geokoordinaten sowie Lage im Straßennetz) sowie die baulichen Rahmenbedingungen in ihrem Umfeld (z. B. Fahrstreifenanordnung) erfasst. Diese Informationen können somit ebenfalls einem jeden Datensatz zugeordnet werden. Zusätzlich wurden zulässige Werte diskreter SBA-Daten hinterlegt, z. B. Niederschlags-, Nässe- und Sichtweitestufen sowie Anzeigezustände der WZG und AQ.

Die Verkehrs- und Prozessdaten der SBA standen in unterschiedlichen Dateiformaten zur Verfügung, und die Daten waren darin unterschiedlich kodiert und strukturiert. Um die in dieser unterschiedlichen Form vorliegenden Daten in gleichartiger Weise verarbeiten und nutzen zu können, wurden einheitliche Datenbanktabellenstrukturen definiert, welche die Aufnahme von

- lokalen Einzelfahrzeugdaten,
- fahrstreifenbezogenen aggregierten Verkehrsdaten,
- Wetter- und Umfelddaten verschiedener Art sowie
- Zustandswechseln von WZG und AQ

jeweils mit Zeitstempel und Zuordnung des erzeugenden Infrastrukturobjekts ermöglichen. Der prinzipielle Aufbau der Datenbank wird in *Abbildung 17* dargestellt. In der linken Hälfte der Abbildung sind die auf Infrastrukturobjekte referenzierten importierten Verkehrs- und Prozessdaten dargestellt.

Zum Einlesen der Verkehrs- und Prozessdaten aus den Archivdateien wurde ein Import-Werkzeug als Java-Anwendung implementiert. Beim Import wird eine erste regelbasierte Qualitätssicherung der Daten durchgeführt. Unplausible oder unvollständige Datenstätze werden markiert und können so in späteren Verarbeitungsschritten entsprechend ausgeblendet werden.

Schaltzustandswechsel einzelner WZG werden unmittelbar mit dem Import zu einem Gesamtzustand des AQ fusioniert. Das Verfahren hierzu wird in Abschnitt 5.1.3 vorgestellt.

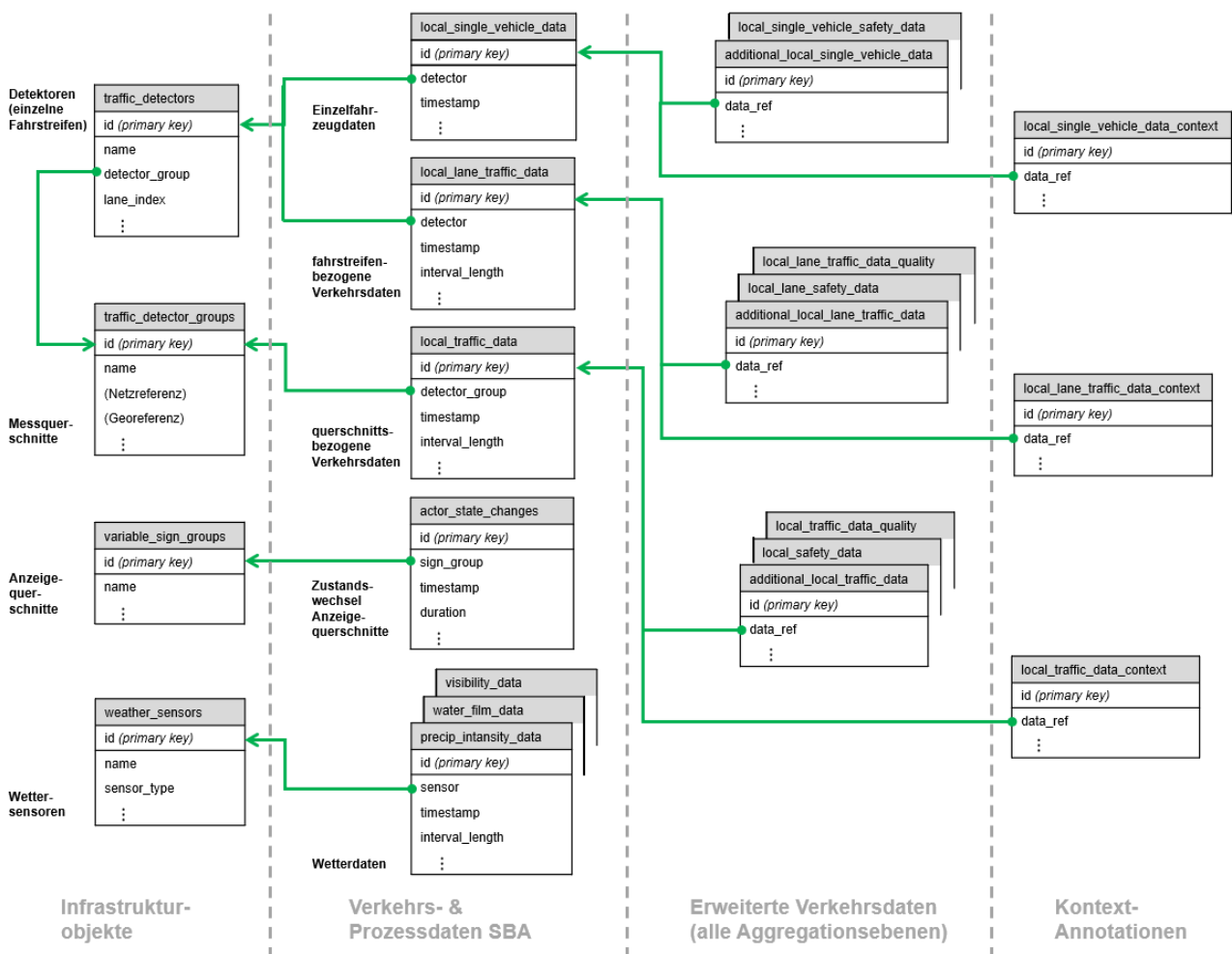


Abbildung 17: Datenstruktur für Verkehrsdaten inkl. Kontext-Annotationen

5.1.2 Aufbereitung und Erweiterung von Verkehrsdaten

Die Aufbereitung und Erweiterung der Verkehrsdaten umfasste

- die Berechnung zusätzlicher Verkehrskenngrößen (z. B. die lokale Verkehrsdichte) aus fahrstreifenbezogenen minütlich aggregierten Daten,
- die Ermittlung von Anzahl und mittlerer Geschwindigkeit unbeeinflusster Fahrzeuge (mit hinreichend großer Lücke zu Vorausfahrenden) aus Einzelfahrzeugdaten,
- die Berechnung von Ersatzkenngrößen zur Bewertung der Verkehrssicherheit (Surrogate Safety Measures, SSM) aus Einzelfahrzeugdaten,
- die zunächst fahrstreifenbezogene Aggregation der aus Einzelfahrzeugdaten berechneten Größen auf Minutenintervalle sowie
- die Aggregation aller Größen über alle Fahrstreifen einschließlich Berechnung von Größen zur Beschreibung der Fahrstreifenauslastung.

Ebenso wie für den Datenimport wurde auch für die Datenaufbereitung und -erweiterung ein Werkzeug in Java entwickelt, das je Detektor bzw. Messquerschnitt und je Zeitschritt die notwendigen Eingangsdaten aus der Datenbank abrufen, die zusätzlichen Kenngrößen berechnet und in der Datenbank ablegt. Dies erfolgt in gesonderten Tabellen innerhalb der zuvor beschriebene Datenbankstruktur (MariaDB). Hierbei referenzieren die ergänzenden Datensätze auf die ursprünglich importierten Verkehrsdaten im gleichen zeitlichen und räumlichen Kontext, damit bei einer späteren Abfrage die Daten aus beiden Tabellen zusammengeführt werden können (join). Dieses Prinzip veranschaulicht die rechte Hälfte der Abbildung 17.

Zusätzliche Verkehrskenngrößen aus zeitlich aggregierten Daten

Die zeitlich aggregierten Verkehrsdaten umfassen nach TLS [21] je Fahrstreifen u. a. die Anzahl, den (arithmetischen) Mittelwert und die Standardabweichung der Geschwindigkeiten (vgl. auch Abschnitt 3.2.4) sowie die mittlere Nettozeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die Fahrzeuganzahl bzw. die daraus abgeleitete Verkehrsstärke sowie die mittleren Geschwindigkeiten stehen in einer Form zur Verfügung, dass sich diese Größen auch differenziert für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge bestimmen lassen³⁹. Zunächst stehen somit je Fahrstreifen i u. a. folgende Größen zur Verfügung:

$q_{Kfz,i}$, $q_{Pkw,i}$, $q_{Lkw,i}$	Verkehrsstärke aller Kfz bzw. Pkw-/Lkw-ähnlicher Fahrzeuge
$v_{Kfz,i}$, $v_{Pkw,i}$, $v_{Lkw,i}$	mittlere Geschwindigkeit aller Kfz bzw. Pkw-/Lkw-ähnlicher Fahrzeuge

Hieraus wurden u. a. die folgenden weiteren Kenngrößen berechnet:

$p_{Lkw,i}$	Anteil Lkw-ähnlicher Fahrzeuge nach MARZ [18]
$q_{B,i}$	Bemessungsverkehrsstärke nach Gleichung 18 (siehe unten)
$k_{lok,i}$, $k_{lok,B,i}$	lokale Verkehrsdichte nach MARZ [18] bzw. basierend auf $q_{B,i}$

³⁹ Für die Standardabweichung der Geschwindigkeiten und die mittlere Nettozeitlücke gilt dies nicht; für eine fahrzeugklassendifferenzierte Bewertung muss hier auf Einzelfahrzeugdaten zurückgegriffen werden.

Bei der Berechnung der Bemessungsverkehrsstärke fließen Lkw-ähnliche Fahrzeuge stärker gewichtet ein als Pkw-ähnliche Fahrzeuge; sie wird daher in Pkw-Einheiten angegeben. Zudem wird der Einfluss von Geschwindigkeitsunterschieden zwischen Pkw und Lkw berücksichtigt. Die Bemessungsverkehrsstärke in Fahrstreifen i wird in Anlehnung an das MARZ [18] wie folgt berechnet⁴⁰:

$$q_{B,i} = \begin{cases} q_{Pkw,i} + (k_1 + k_2 \cdot (v_{Pkw,i} - v_{Lkw,i})) \cdot q_{Lkw,i} & \text{wenn } v_{Pkw,i} > v_{Lkw,i} \\ q_{Pkw,i} + k_1 \cdot q_{Lkw,i} & \text{sonst} \end{cases} \quad (18)$$

Die Gewichtung kann somit über die Parameter k_1 und k_2 beeinflusst werden. Für die Datenerweiterung wurde $k_1 = 1,6$ und $k_2 = 0,01$ verwendet⁴¹.

Geschwindigkeiten unbeeinflusster Fahrzeuge

Auf Basis lokaler Einzelfahrzeugdaten werden Geschwindigkeiten und Anzahl solcher FFE gesondert erfasst, die nicht durch vorausfahrende Fahrzeuge beeinflusst werden. Dies ist eine Voraussetzung zur Abschätzung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen im Rahmen der Kalibrierung der Verkehrsflusssimulation (vgl. Abschnitt 7.4.2).

Ein Fahrzeug gilt in Anlehnung an Geistefeldt (2015a) [68] als unbeeinflusst, wenn

- eine vorgegebene Mindestzeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht unterschritten wird und
- seine Fahrgeschwindigkeit eine vorgegebene Mindestgeschwindigkeit nicht unterschreitet.

Als Mindestzeitlücken wurden 3 s für Pkw- und 4 s für Lkw-ähnliche Fahrzeuge gewählt⁴². Die Mindestgeschwindigkeit wurde wie auch in Geistefeldt (2015a) mit 70 km/h festgelegt.

Surrogate Safety Measures (SSM)

Zur Bewertung der Verkehrssicherheit werden die in Tabelle 5 (Abschnitt 4.1.3) benannten Surrogate Safety Measures (SSM) berechnet. Dies sind:

- die Nettozeitlücke,
- die Auffahrzeit (Time to Collision, TTC)
- das Individual und das Platoon Braking Time Risk (IBTR bzw. PBTR) sowie
- das Compensated IBTR und PBTR (CIBTR bzw. CPBTR)

Zunächst werden diese Kenngrößen für jedes einzelne Fahrzeug bestimmt, das einen Messquerschnitt passiert hat. Die Berechnung erfolgt nach Gleichungen 1 bis 6 in Abschnitt 2.2.2. Für die Berechnung des CIBTR werden einheitlich $\gamma_{\max} = -6,87\text{m/s}^2$ und $\kappa = 2,426$ verwendet. Diese Parameter wurden

⁴⁰ Nach MARZ erfolgt die Berechnung der Bemessungsverkehrsstärke nur querschnitts- und nicht fahrstreifenbezogen.

⁴¹ Die Datenaufbereitung im SBA-Simulationsmodul wurde mit den u. U. hiervon abweichenden Parametern der jeweiligen realen SBA versorgt. ⁴² Die Mindestzeitlücken liegen jeweils um 1s höher als in Geistefeldt (2015a); es wurde vermutet, dass bei Verwendung der geringeren Grenzwerte durchaus noch Einflüsse der Vorausfahrenden auf die Geschwindigkeitswahl bestünden.

in der Untersuchung von Mouzon et al. (2008) [113] für einen schweizerischen Autobahnabschnitt bestimmt und später auch auf die Referenzstrecke A92 angewendet [107]. Es wird angenommen, dass diese Parameter auch auf die A57 anwendbar sind. Es ist zu beachten, dass die Parameter ausschließlich für einen trockenen Fahrbahnzustand gelten. Dies ist für diese Arbeit ausreichend, da Einflüsse von Fahrbahnnaße und anderen Witterungsbedingungen nicht betrachtet werden.

Die so bestimmten einzelfahrzeugbezogenen Größen werden fahrstreifenweise durch Bilden des arithmetischen Mittelwerts je Minutenintervall aggregiert. Beim IBTR, PBTR und CPBTR werden außerdem arithmetischer Mittelwert, Anteil und Anzahl aller Werte > 0 bestimmt.

Querschnittsbezogene Aggregation

Sämtliche fahrstreifenbezogenen Verkehrskenngrößen werden querschnittsbezogen, d. h. über alle Fahrstreifen eines MQ, aggregiert. Soweit anwendbar erfolgt dies nach den Berechnungsvorschriften des MARZ [18]. Dementsprechend werden z. B. mittlere Geschwindigkeiten gewichtet nach Anzahl der Fahrzeuge im jeweiligen Fahrstreifen berechnet. Je MQ werden zusätzlich die mittlere Geschwindigkeit und Standardabweichung der Geschwindigkeit des äußerst linken Fahrstreifens erfasst, da letztere in SBA-Steuerverfahren wie „Unruhe im Verkehr“ benötigt werden. Bei Kenngrößen, für die im MARZ keine Berechnungsvorschriften zur querschnittsbezogenen Aggregation gegeben werden (z. B. SSM), wird in ähnlicher Weise eine gewichtete Mittelung nach Anzahl erfasster Messwerte je Fahrstreifen vorgenommen. Da SSM nicht immer aufgezeichnet werden können (z. B. bei Fehlen eines vorausfahrenden Fahrzeugs), kann die Zahl der Messwerte u. U. unterhalb der im betroffenen Zeitintervall erfassten Fahrzeuganzahl liegen.

Ebenfalls im Zuge der querschnittsbezogenen Aggregation werden Kenngrößen zur Beschreibung der Fahrstreifenaufteilung berechnet. Dies umfasst zum einen die konventionelle prozentuale Verteilung der Gesamtverkehrsstärke bzw. -dichte über die Fahrstreifen. Zum anderen werden auch die in Abschnitt 4.1.3 eingeführte Gleichmäßigkeit und Schwerpunktlage der Fahrstreifenaufteilung berechnet (Gleichungen 8 bzw. 9), die unabhängig von der Anzahl am betrachteten Querschnitt vorhandener Fahrstreifen interpretiert werden können. Um den erhöhten Raumbedarf von Lkw gegenüber Pkw zu berücksichtigen, werden Lkw höher gewichtet, indem die Bemessungsverkehrsstärke nach MARZ [18] anstelle der Kfz-Verkehrsstärke verwendet wird.

5.1.3 Aufbereitung der Anzeigezustände

In den verfügbaren Rohdaten liegen Schaltzustandswechsel einzelner WZG vor. Diese werden unmittelbar mit dem Import zu einem Gesamtzustand des AQ fusioniert. Dies erfolgt iterativ, indem die Zustände der einzelnen WZG sequenziell von der rechten zur linken Fahrbahnseite ausgewertet werden. Der prinzipielle Prozess wird in *Abbildung 18* veranschaulicht.

Der Anzeigezustand eines AQ wird durch folgende vier Statusmengen abgebildet:

- Geschwindigkeitsvorgaben
- Vorgaben zur Fahrstreifennutzung (Dauerlichtzeichen)
- Überholverbote
- Gefahrenwarnungen

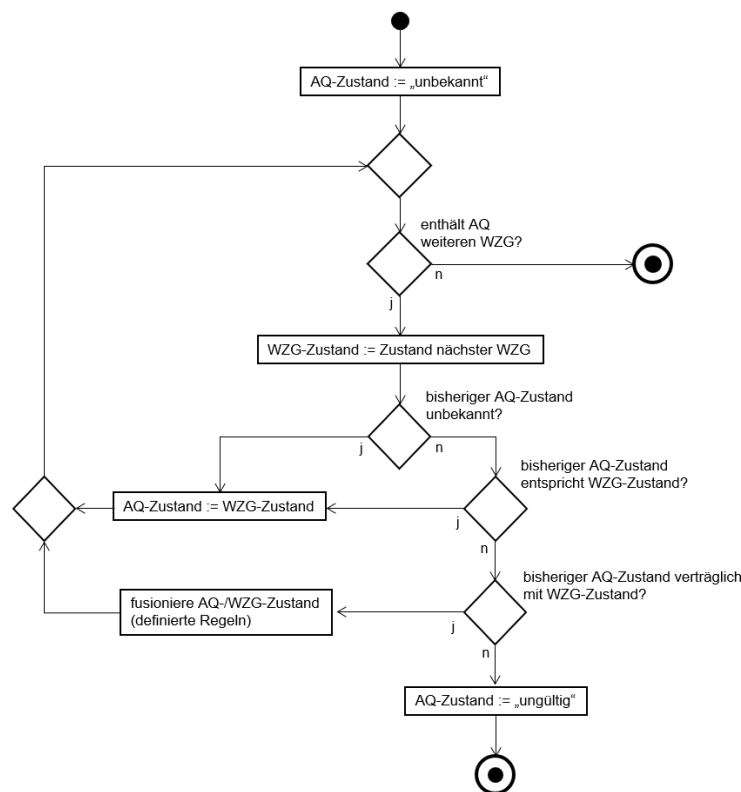


Abbildung 18: Verfahren zur Aggregation der Anzeigezustände einzelner Wechselzeichengeber

Die möglichen Zustände dieser vier Statusmengen sind in Anhang D aufgeführt. Durch diese lassen sich sämtliche möglichen Anzeigezustände einer SBA eindeutig und vollständig beschreiben.

Im Zuge der Aufbereitung der Anzeigezustände wird außerdem auch die Dauer bis zum nächsten Schaltzustandswechsel berechnet und der (zeitlich) vor dem letzten Schaltzustandswechsel vorherrschende Schaltzustand erfasst.

5.1.4 Aufbereitung der Wetter- und Umfelddaten

Archivierte Wetter- und Umfelddaten liegen in Form numerischer Messwerte sowie teils auch als diskrete Merkmale (Fahrbahnzustand, Niederschlagsart) vor [21]. Zur Aktivierung von Gefahrenwarnungen bei Nebel oder Nässe in SBA sind insbesondere die Niederschlagsintensität, die Wasserfilmdicke und die Sichtweite bedeutsam. Gemäß MARZ [18] werden diese drei Größen zunächst anhand definierter Grenzwerte in diskrete Stufen eingeordnet. Dazu werden hier die im MARZ angegebenen Standard-Grenzwerte verwendet. Die Stufen der Niederschlagsintensität und Wasserfilmdicke werden anschließend mittels einer Zuordnungsmatrix zu einer Nässestufe zusammengeführt. Da in dieser Arbeit nur Situationen betrachtet werden, in denen kein Wettereinfluss vorliegt, werden die Nässe- und Sichtweistestufe sowie zusätzlich die Niederschlagsart und der Fahrbahnzustand zu einem dreiwertigen Zustandsmerkmal zusammengeführt, das die Wettersituation insgesamt beschreibt. Dieses kann die Werte „Wettereinfluss“, „kein Wettereinfluss“ oder „unbekannt“ annehmen. Der Zustand „unbekannt“

tritt auf, wenn mindestens eine der vier Eingangsgrößen aufgrund eines Sensorausfalls nicht bestimmt werden konnten. Der Zustand „kein Wettereinfluss“ wird erreicht, wenn alle der folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Alle vier Eingangsgrößen (Nässe-/Sichtweitestufe, Niederschlagsart, Fahrbahnzustand) liegen vor und sind gültig.
- Es liegt Nässestufe 0 (trocken) vor.
- Es liegt Niederschlagsart „kein Niederschlag“ vor (Code 0 nach TLS).
- Es liegt Fahrbahnzustand „trocken“ vor (Code 0 nach TLS).
- Es liegt SW-Stufe 0 oder 1 vor (hier: Sichtweite mindestens 250 m).

5.1.5 Automatisierte Annotation des Situationskontexts

In einem weiteren automatisierten Prozess wurde allen Verkehrsdatensätzen (Einzelfahrzeugdaten sowie fahrestreifen- und querschnittsbezogen aggregierte Daten) ein Situationskontext zugeordnet. Gemäß der Festlegungen in Abschnitt 4.1.3 beinhaltet der Situationskontext die allgemeine Verkehrs- und Wettersituation sowie die Anzeigezustände am stromaufwärtigen und (wenn vorhanden) lokalen AQ.⁴³

Für diese Zuordnung wurde ebenso wie für die vorherigen Schritte der Datenaufnahme und -erweiterung eine Java-Anwendung implementiert. Diese fragt zunächst je MQ die zugeordneten Straßenwetterstationen bzw. AQ ab, deren Zustände zur Bestimmung des Situationskontextes maßgeblich sind. Auch die Erfassung von Situationskontext-Annotationen erfolgt in gesonderten Tabellen innerhalb der zuvor beschriebenen Datenbankstruktur (MariaDB). Dieses auch bei der Datenerweiterung angewandte Prinzip wird in Abbildung 17 (siehe oben) veranschaulicht.

Bei der Zuordnung der Anzeigezustände ist zu beachten, dass die archivierten Daten lediglich Schaltzustandswechsel beinhalten, die im Gegensatz zu den Verkehrs- und Wetterdaten azyklisch (im Falle einer Zustandsänderung) aufgezeichnet wurden. Für jeden Verkehrsdatensatz wird der zuletzt aktivierte Schaltzustand (bestehend aus den vier in Abschnitt 5.1.3 benannten Zustandsmengen), der zuvor vorherrschende Schaltzustand sowie die Dauer seit dem letzten Schaltzustandswechsel erfasst. Diese Erfassung erfolgt für den stromaufwärtigen und (sofern vorhanden) den lokalen AQ.

5.2 Daten aus der Simulation

Im Rahmen der bereits in Abschnitt 4.4 beschriebenen Schnittstellenanwendung zur Interaktion des Inferenzmodells mit der Verkehrsflusssimulation wurden auch Funktionen zur Datenaufzeichnung implementiert. Dabei werden während der Simulationslaufzeit

- Zustände aller FFE abgefragt, die sich in festgelegten Erfassungsbereichen befinden,
- Bewertungsgrößen berechnet und aggregiert sowie
- diese Bewertungsgrößen in einer Datenbank (MariaDB) aufgezeichnet.

⁴³ Die baulichen Eigenschaften der Strecke sind als Eigenschaften der MQ und AQ auch ohne die Annotation des Situationskontexts bereits abrufbar.

Die aufgezeichneten Bewertungsgrößen beinhalten sämtliche der Kenngrößen, die auch im Rahmen der Datenaufbereitung und -erweiterung für die Referenzstrecken berechnet wurden (vgl. Abschnitt 5.1.2). Es werden Einzelfahrzeugdaten sowie in konfigurierbaren Zeitintervallen aggregierte fahrstreifen- und querschnittsbezogene Daten berechnet. Da in der Schnittstellenanwendung die Fahrsituation für jede FFE unmittelbar zur Verfügung steht, wird diese stets mit aufgezeichnet; eine Annotation des Situationskontexts ist somit unmittelbar gegeben. Auf diese Weise soll ein Abgleich zwischen Realität und Simulation sowie eine Bewertung von Simulationsszenarien ermöglicht werden.

Die Bewertungsgrößen können in der Simulation einerseits lokal an (ggf. virtuellen) Detektoren aufgezeichnet werden. In diesem Fall erfolgt die Berechnung ebenso wie für lokale Verkehrsdaten einer realen SBA. Darüber hinaus wird auch eine *abschnittsbezogene* (momentane) Aufzeichnung von Verkehrskenngrößen unterstützt: In konfigurierbaren Erfassungsintervallen (z. B. 30 s) werden Eigenschaften aller Fahrzeuge erfasst, die sich innerhalb der Aufzeichnungsabschnitte befinden. Dies sind insbesondere Geschwindigkeiten, Abstände und genutzte Fahrstreifen. Anstelle der Verkehrsstärke wird in den Aufzeichnungsabschnitten die Verkehrsdichte berechnet (sowohl fahrstreifenbezogen als auch bezogen auf alle Fahrstreifen des Abschnitts). Die Nettozeitlücke h_n einer FFE n zur vorausfahrenden FFE wird hierbei für in Bewegung befindliche Fahrzeuge als Quotient aus Nettoabstand g_n und Fahrgeschwindigkeit v_n berechnet und steht anschließend zur Bestimmung der SSM zur Verfügung. Bei den pulkbezogenen Kenngrößen PBTR und CPBTR ist zu berücksichtigen, dass nicht nur das Verhalten eines einzelnen Fahrzeugs, sondern auch der vorausfahrenden Fahrzeuge einbezogen wird. Bei querschnittsbezogener Erfassung sind diese Eigenschaften durch das zeitlich unmittelbar zuvor erfasste Fahrzeug zu bestimmen. Analog ist es bei abschnittsbezogener Erfassung notwendig, die pulkbezogenen Kenngrößen vom Ende des Aufzeichnungsabschnitts bis zum Anfang, d. h. entgegen der Fahrtrichtung zu berechnen (siehe *Abbildung 19*). Um auch für die ersten Fahrzeuge im Betrachtungsabschnitt die pulkbezogenen Risikoindikatoren berechnen zu können, beginnt die Erfassung nicht am Ende des Aufzeichnungsabschnitts, sondern weiter stromabwärts am Ende der Kante.

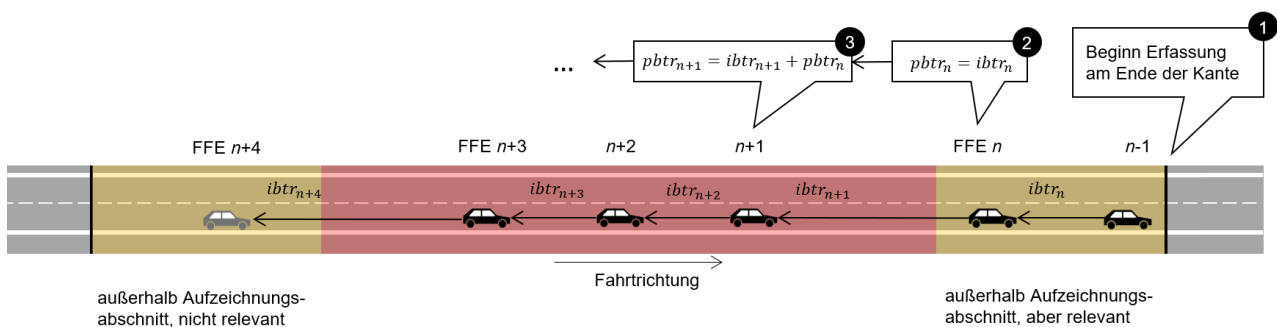


Abbildung 19: Abschnittsbezogene Berechnung pulkbezogener Kenngrößen (hier: PBTR)

6 Einflüsse von Fahrsituation und -präferenzen auf das Fahrverhalten

Das in Abschnitt 4.3 vorgestellte Inferenzmodell ermöglicht die Zuordnung von Fahrpräferenzen zu einer Fahrsituation in einer Art und Weise, dass ein für diese Situation realistisches Fahrverhalten nachgebildet wird⁴⁴. Anhand empirischer Daten der beiden Referenzstrecken wurden die Wirkungen der Verkehrsbeeinflussung und der Verkehrssituation auf Kenngrößen des Fahrverhaltens untersucht (Abschnitte 6.1 bzw. 6.2). Außerdem wurden die Einflüsse ausgewählter Fahrverhaltensparameter auf das Fahrverhalten durch Variation dieser im Rahmen der Simulation bewertet (vgl. Abschnitt 6.3). Beides bildet eine wichtige Grundlage für die Anpassung und Kalibrierung des Inferenzmodells (vgl. Abschnitte 7.3 und 7.4). Nachfolgend werden Methodik und wichtige Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

6.1 Einflüsse streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung

Wie in Abschnitt 2.1.1 herausgestellt wurde, dienen Streckenbeeinflussungsanlagen der Verbesserung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses. Diese Ziele lassen sich u. a. durch eine an die vorherrschende Situation angepasste Geschwindigkeits- und Abstandswahl, durch Verringerung der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Fahrzeugen sowie durch eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Fahrstreifen erreichen. Wirkungen von SBA wurden zwar umfassend untersucht (vgl. Abschnitt 2.1.4), jedoch wurden dabei noch nicht alle Wirkpotenziale erschöpfend analysiert.

Für die Anpassung der Topologie des Inferenzmodells soll ermittelt werden, welche Beschreibungsgrößen des Fahrverhaltens tatsächlich signifikant durch die Anzeigezustände einer SBA beeinflusst werden. Das Fahrverhalten wird hierbei jedoch nicht allein durch die Anzeigezustände, sondern auch durch die Verkehrssituation beeinflusst. Es muss daher berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Anzeigezustände oftmals in verschiedenen Verkehrssituationen anzutreffen sind (vgl. *Abbildung 20*). Im Vordergrund dieser Untersuchung stehen dabei Wirkungen von Gefahrenwarnungen sowie Wirkungen auf die Risikoindikatoren. Beides wurde bisher kaum untersucht.

Einflüsse von Geschwindigkeitsvorgaben

Bisherige Untersuchungen (vgl. Abschnitt 2.1.4) bestätigten, dass durch SBA angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeiten eine Anpassung der Fahrgeschwindigkeiten bewirken. Dies lässt sich z. B. anhand eines Referenzfalls ohne SBA zeigen (Mit-Ohne- oder Vorher-Nachher-Vergleich). Für die Referenzstrecken lagen jedoch nur in geringem Umfang Verkehrsdaten außerhalb von SBA beeinflusster Bereiche vor, die zudem eine andere verkehrliche Charakteristik aufweisen als die beeinflussten Bereiche. Deshalb wurde eine solche Untersuchung hier nicht durchgeführt.

Die Fahrgeschwindigkeiten werden nicht nur durch die SBA beeinflusst, sondern dienen auch als Eingangsgröße für die SBA-Steuerung. Daher können Ursache und Wirkung nicht immer klar unterschieden werden. Dennoch ist festzustellen, dass der Befolgungsgrad und auch die Verteilung der Geschwindigkeiten situationsabhängig unterschiedlich ausgeprägt sein können. Einen Einfluss haben sowohl die

⁴⁴ Die Begriffe Fahrpräferenzen, Fahrsituation und Fahrverhalten werden entsprechend der Definitionen aus Abschnitt 4.1.3 verwendet und quantitativ untersetzt. Dementsprechend werden z. B. Fahrpräferenzen hier durch die Parameter der Fahrverhaltensmodelle in der Verkehrsflusssimulation beschrieben.

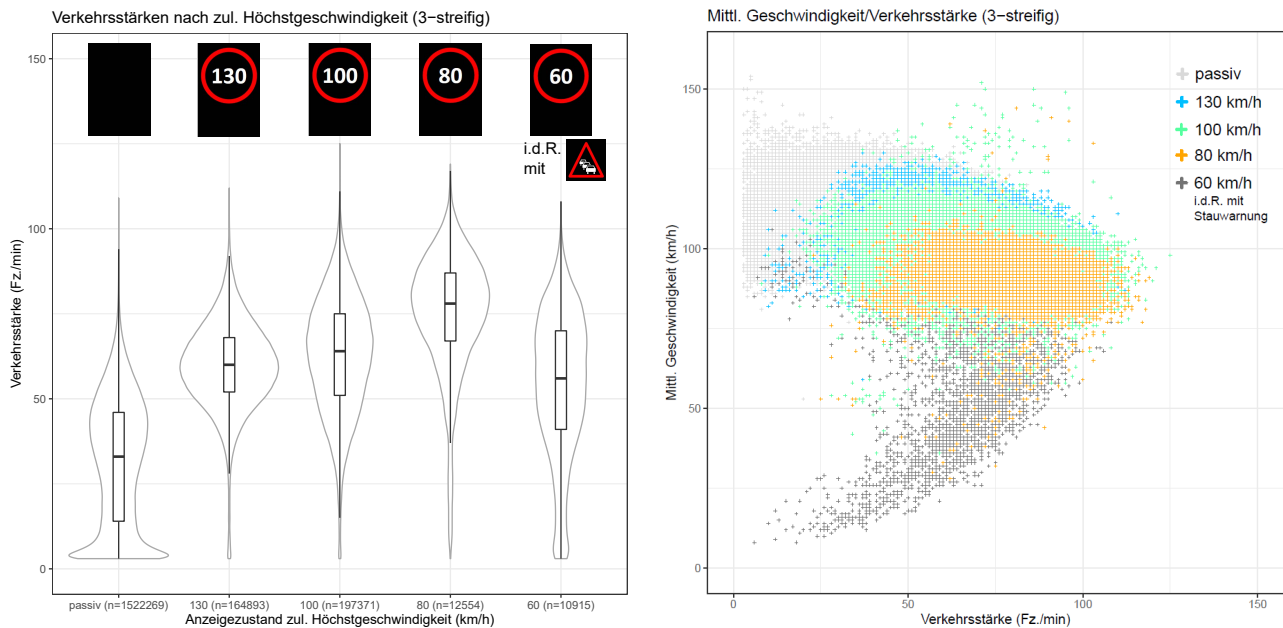


Abbildung 20: Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsvorgaben der SBA (Beispiel A92, Fahrtrichtung München, dreistreifige Fahrbahn)

Verkehrssituation (vgl. Abschnitt 6.2) als auch weitere Anzeigezustände, z. B. gleichzeitig angezeigte Gefahrenwarnungen (siehe weiter unten).

Ähnlich wie die Fahrgeschwindigkeiten wird auch das Fahrzeugfolgeverhalten nicht nur durch die Geschwindigkeitsvorgaben der SBA, sondern gleichzeitig auch durch die vorherrschende Verkehrssituation beeinflusst. Um den Einfluss der Geschwindigkeitsvorgabe auf Zeitlücken und verkehrssicherheitsbezogene Kenngrößen (SSM) beurteilen zu können, wurden ausgewählte Anzeigezustände paarweise gegenübergestellt, wobei jeweils nur Situationen innerhalb eines eng begrenzten Verkehrsstärkebereichs sowie mit mittleren Kfz-Geschwindigkeiten von mindestens 75 km/h einbezogen wurden. Durch diese Eingrenzung der Verkehrssituation wurde ihr Einfluss auf die betrachteten Kenngrößen gering gehalten. Die Verkehrsstärkebereiche wurden so gewählt, dass beide jeweils gegenübergestellten Anzeigezustände hinreichend häufig zu beobachten waren.

Abbildung 21 veranschaulicht die Ergebnisse der Untersuchung am Beispiel der Auffahrzeiten (TTC) und der CIBTR (jeweils minütlich und über einen Richtungsquerschnitt aggregiert). Es konnte festgestellt werden, dass mit restriktiveren Geschwindigkeitsvorgaben die Risikoindikatoren CIBTR, IBTR und PBTR positiv beeinflusst werden, d. h. das Risiko eines Auffahrunfalls abnimmt. Dies war zu erwarten, weil hierdurch im Mittel auch geringere Fahrgeschwindigkeiten erreicht werden. Dagegen sind kaum Einflüsse auf mittlere Nettozeitlücken oder TTC erkennbar.

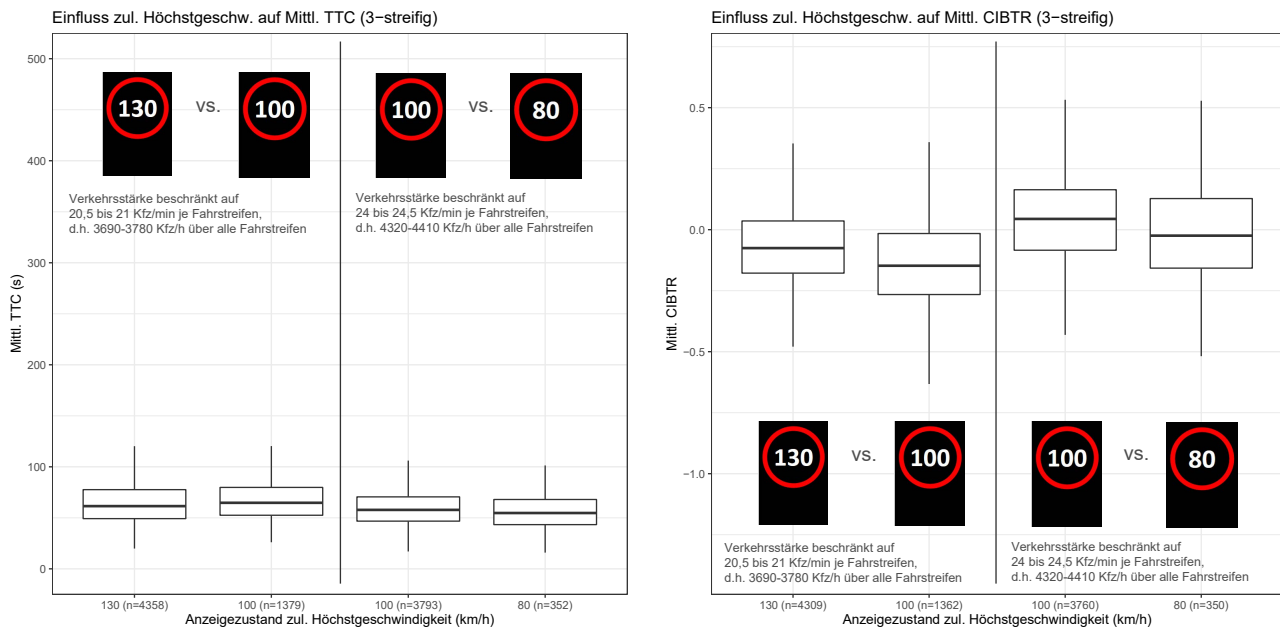


Abbildung 21: Einflüsse von Geschwindigkeitsvorgaben auf TTC und CIBTR (Beispiel A92, Fahrtrichtung München, dreistreifige Fahrbahn)

Einflüsse von Gefahrenwarnungen

Bisher wurden Einflüsse streckenbezogener Gefahrenwarnungen kaum untersucht. Das Ziel von Gefahrenwarnungen besteht darin, die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer zu erhöhen und zu einer an die Gefahrensituation angepassten Geschwindigkeits- und Abstandswahl beizutragen. Um diese Wirkungen besser beurteilen zu können, wurden Situationen mit und ohne Gefahrenwarnung unter ansonsten gleichen Randbedingungen gegenübergestellt. Dies erfolgte am Beispiel zweier Szenarien der Referenzstrecke A92:

1. zulässige Höchstgeschwindigkeit 100 km/h
Verkehrsstärke: 25,5 bis 26,5 Kfz/min je Fahrstreifen (4.590 bis 4.770 Kfz/h gesamt)
dreistreifige Richtungsfahrbahn
2. zulässige Höchstgeschwindigkeit 80 km/h
Verkehrsstärke: 27 bis 28 Kfz/min je Fahrstreifen (4.860 bis 5.040 Kfz/h gesamt)
dreistreifige Richtungsfahrbahn

Es wurden nur Datensätze in die Auswertung einbezogen, denen die angegebene Geschwindigkeitsvorgabe sowohl lokal als auch stromaufwärts zugeordnet ist. Hierdurch soll der Einfluss von Anpassungen des Fahrverhaltens aufgrund räumlicher Zustandswechsel der SBA begrenzt werden. Für die Gefahrenwarnung gilt diese Einschränkung indes nicht, da sonst trotz des verfügbaren Datenumfangs ein zu geringer Stichprobenumfang für Situationen mit Gefahrenwarnung verbleiben würde (siehe unten). Auch Einflüsse durch zeitliche Wechsel des Anzeigezustands können nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Die Verkehrsstärkebereiche wurden so gewählt, dass die jeweilige zulässige Höchstgeschwindigkeit in dieser Situation häufig zur Harmonisierung der Geschwindigkeiten aktiviert wird.

6.1 Einflüsse streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung

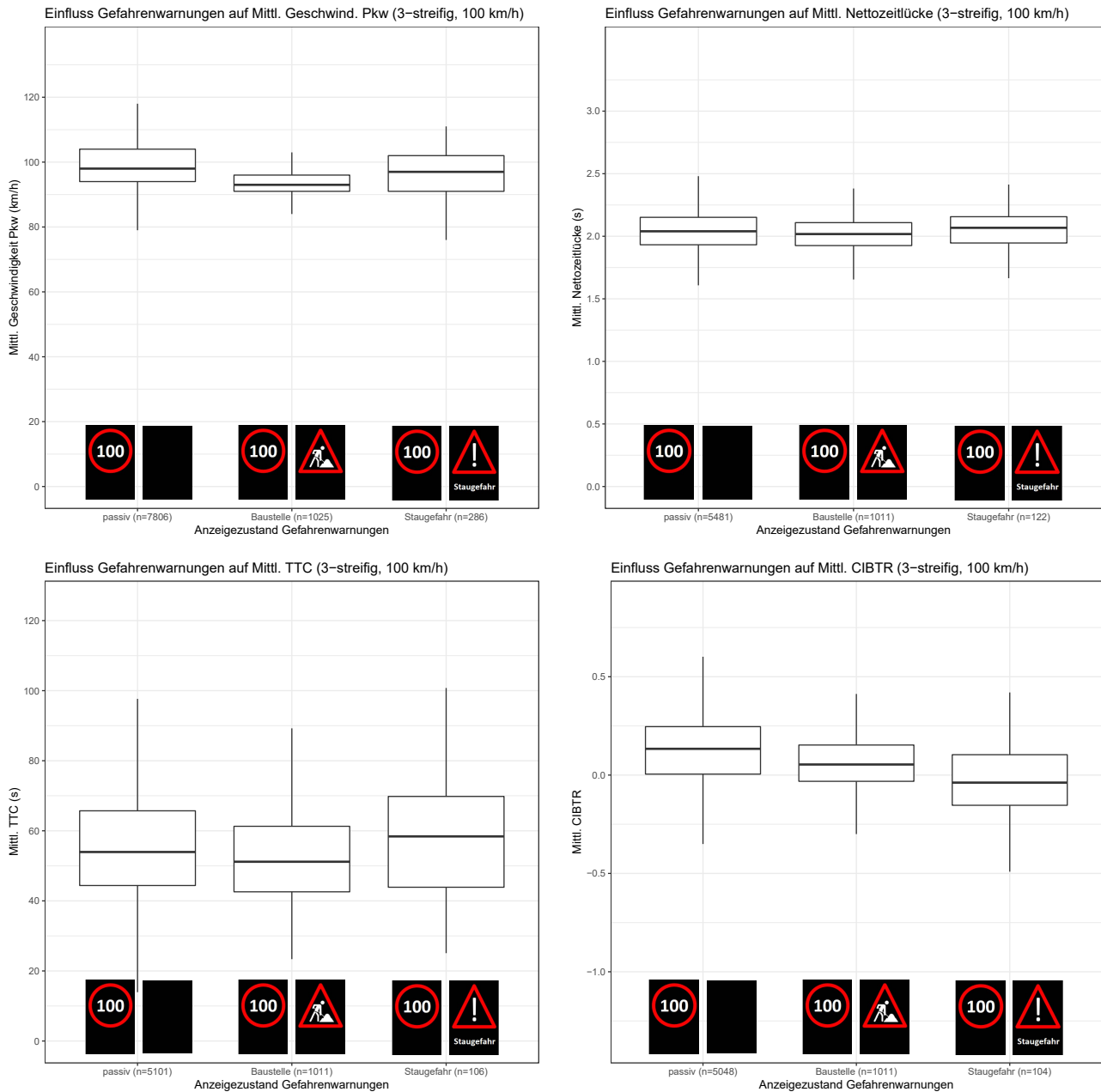


Abbildung 22: Einflüsse von Gefahrenwarnungen auf das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten (Beispiel A92, Fahrtrichtung München, dreistreifige Fahrbahn)

Die Untersuchung bestätigte, dass sich Gefahrenwarnungen auf die Fahrgeschwindigkeiten sowie auch auf die Risikoindikatoren CIBTR, IBTR und PBTR auswirken, wohingegen die Verteilungen der Nettozeitlücken insgesamt kaum beeinflusst werden. Einflüsse auf Auffahrzeiten (TTC) sind ebenfalls nur schwach ausgeprägt, und TTC unterliegen einer erheblichen Streuung. Auch bei dieser Untersuchung wurden die minütlichen querschnittsbezogenen Mittelwerte der betrachteten Kenngrößen analysiert. *Abbildung 22* veranschaulicht die vorgenannten Erkenntnisse für ausgewählte Kenngrößen am Beispiel des ersten Szenarios (100 km/h). Darüber hinaus ist teilweise auch ein Einfluss der Gefahrenwarnungen auf die Gleichmäßigkeit und Schwerpunktlage der Fahrstreifenwahl zu beobachten (in der Abbildung nicht dargestellt).

Die Kenngröße CPBTR, welche das akkumulierte Risiko eines Auffahrauffalls in einem Pulk wieder spiegelt, kann bei dichtem Verkehr sehr hohe Werte erreichen und unterliegt sehr großen Streuungen. Dadurch ist diese Kenngröße nur bedingt zur Beschreibung des Fahrverhaltens geeignet. Für den ebenfalls pulkbezogenen Risikoindikator wurde dieses Problem nicht festgestellt, was auf den Umstand zurückzuführen ist, dass das PBTR bei größeren Zeitlücken auf Null zurückgesetzt wird (vgl. Gleichung 5 auf Seite 28). Dadurch bezieht sich das PBTR ausschließlich auf einen einzelnen Pulk und damit auf einen räumlich begrenzten Bereich, was beim CPBTR nicht der Fall ist.

Nicht alle erkannten Zusammenhänge lassen sich kausal erklären. Für einige Fahrsituationen kann dies auf einen geringen Stichprobenumfang in Verbindung mit nicht erfassten äußeren Randbedingungen zurückgeführt werden. Warnungen vor allgemeinen Gefahrenstellen (nur Zeichen „Gefahrenstelle“) sind insgesamt selten, weil nach Möglichkeit per Zusatzzeichen nähere Informationen zur Art der Gefahrenstelle ausgegeben werden (z. B. „Sicht“ oder „Unfall“). Warnungen vor Arbeitsstellen kürzerer Dauer oder Unfällen sind wiederum oft mit Fahrstreifensperrungen verbunden; untersucht wurden hier jedoch nur Situationen ohne Fahrstreifensperrung. Deswegen wird eine zusammengefasste Betrachtung bestimmter Gefahrenwarnungen oder aber die Einbeziehung weiterer Daten als sinnvoll erachtet.

Einflüsse von Fahrstreifensignalisierung und Überholverböten

Überholverböte werden in der Praxis überwiegend für Lkw ab 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht angeordnet⁴⁵; dies trifft auch für die beiden Referenzstrecken zu. Sie wirken sich primär auf die Fahrstreifenwahl aus. Ähnlich wie bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten werden auch diesbezügliche Vorgaben nicht immer befolgt. Ein (ggf. situationsspezifisch variierender) Befolgungsgrad für Lkw-Überholverböte kann aus der verfügbaren Datenbasis jedoch nicht abgeleitet werden. In den zur Verfügung stehenden Verkehrsdaten wird zwischen Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen unterschieden. Die Klasse der Lkw-ähnlichen Fahrzeuge umfasst nach TLS [21] jedoch auch Busse und Pkw-Gespanne, die von einem Lkw-Überholverbot nicht betroffen sind.

Darüber hinausgehende Auswirkungen von Lkw-Überholverböten auf das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten können nicht bewertet werden. Zwar ist ein Einfluss auf die Geschwindigkeits- und Zeitlückenverteilungen durchaus gegeben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese weniger auf Verhaltensanpassungen der Verkehrsteilnehmer als vielmehr auf die nun nicht mehr durch langsamere Lkw belegten Überholfahrstreifen zurückzuführen sind. Aus ähnlichem Grund werden auch Einflüsse von Fahrstreifensperrungen nicht näher untersucht.

⁴⁵ Im MARZ [18] sind abweichend zur Praxis in vielen Bundesländern die verkehrsbedingten Überholverböte lediglich für Lkw ab 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht vorgesehen.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben die Erwartung bestätigt, dass neben einem offensichtlichen Einfluss zulässiger Höchstgeschwindigkeiten auf die Fahrgeschwindigkeiten weitere Wirkungen einer SBA beobachtet werden können. Insbesondere konnte festgestellt werden, dass Gefahrenwarnungen einen durchaus signifikanten Einfluss auf Fahrgeschwindigkeiten und riskantes Fahrzeugfolgeverhalten haben können. Unter den Kenngrößen zur Beschreibung des Abstands- und Fahrzeugfolgeverhaltens lässt sich ein Einfluss insbesondere an den CIBTR, IBTR und PBTR erkennen. Auffahrzeiten (TTC) und (minütliche) mittlere Nettozeitlücken werden dagegen kaum beeinflusst.

Für unterschiedliche Konstellationen der Anzeigezustände und eine unterschiedliche Fahrstreifenanzahl können diese Wirkungen jedoch unterschiedlich ausgeprägt sein; außerdem sind sie nicht zwangsläufig in jeder dieser Konstellationen signifikant. Diese Unterschiede werden im hier gewählten Ansatz eines hybriden BN unmittelbar berücksichtigt, indem je Zustandskombination wertdiskreter Knoten (hier: Anzeigezustände, Fahrstreifenanzahl) eine gesonderte Instanz des GBN erzeugt und separat kalibriert wird. Zu beachten ist aber, dass das beobachtete Fahrverhalten nicht nur von den Anzeigezuständen und baulichen Rahmenbedingungen, sondern in hohem Maße auch von der Verkehrsbelastung (Verkehrsstärke) und der Verkehrslage abhängt.

Da die Kenngröße CPBTR bei dichtem Verkehr extrem hohe Werte erreichen kann, erscheint diese Kenngröße zur Beschreibung des Fahrverhaltens als nur bedingt geeignet.

6.2 Einflüsse der Verkehrssituation

Bei der Untersuchung der Einflüsse der SBA (vgl. Abschnitt 6.1) hat sich bereits gezeigt, dass das beobachtbare Fahrverhalten nicht nur von den Anzeigezuständen, sondern auch von der Verkehrssituation abhängt. Als Grundlage für die Anpassung der Modelltopologie (vgl. Abschnitt 7.3) wurden daher auch Zusammenhänge zwischen Kenngrößen der Verkehrssituation (\mathbf{X}_s^k) und Kenngrößen des empirischen Fahrverhaltens (\mathbf{X}_b) untersucht. Durch die Untersuchung sollten insbesondere folgende Fragen beantwortet werden [87]:

- Entsprechen die Knoten des GBN näherungsweise normalverteilten Zufallsvariablen?
- Zwischen welchen Kenngrößen der Verkehrssituation und des Fahrverhaltens bestehen zumindest näherungsweise lineare Zusammenhänge? Sind diese Zusammenhänge aus fachlicher Sicht plausibel?
- Sind die Zusammenhänge sensitiv gegenüber Veränderungen der äußeren Rahmenbedingungen (z. B. Anzeigezustände)? Variiert z. B. die Steigung einer Regressionsgeraden sehr stark oder wechselt sie gar ihr Vorzeichen?
- Sind die Abweichungen um einen linearen Zusammenhang (Residuen der Regression) näherungsweise normalverteilt?

Die Untersuchung der Einflüsse der Verkehrssituation auf das Fahrverhalten erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB⁴⁶. Vorgehensweise und Ergebnisse sind im Projektbericht [87] detailliert beschrieben und werden nachfolgend verkürzt wiedergegeben.

⁴⁶ Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2.

Vorgehensweise

Einflüsse der Verkehrssituation auf das Fahrverhalten wurden in zwei Schritten untersucht:

Untersuchung der durch vorläufige Kalibrierung entstehenden Zusammenhänge: Zunächst wurde ein Ausschnitt des GBN erzeugt, der die Knoten der Mengen \mathbf{X}_s^k und \mathbf{X}_b des initialen Inferenzmodells (vgl. Abschnitt 4.3.4) sowie alle dazwischen liegenden Kanten umfasste. Dieses Netz wurde anhand der Zusammenhänge aus empirischen Daten der Referenzstecke A92 für vier beispielhaft ausgewählte Konstellationen der wertdiskreten Zustandsknoten (Anzeigezustände und bauliche Randbedingungen) kalibriert. Die Mittelwerte der abhängigen Verteilungen sind eine Linearkombination der zugehörigen erklärenden Größen. Wie stark eine erklärende Größe sich auf die abhängige Größe auswirkt, lässt sich anhand des Anstiegskoeffizienten der jeweiligen Komponente der Linearkombination beurteilen. Niedrige Anstiegskoeffizienten deuten auf einen geringen Einfluss hin. Auch die Streuung der abhängigen Zufallsvariablen im Verhältnis zum typischen Wertebereich wurden untersucht.

Regressions- und Korrelationsanalyse: In einem weiteren Schritt wurden Regressions- und Korrelationsanalysen für 14 Zustandskombinationen der wertdiskreten Knoten des hybriden BN sowie für jede potenzielle Kante zwischen den Mengen \mathbf{X}_s^k und \mathbf{X}_b durchgeführt. Hierzu wurden in einem automatisierten Prozess je Situation und Zusammenhang ca. 1.000 Datenpunkte (minütlich und querschnittsbezogen aggregiert) der Referenzstrecke A92 zufällig ausgewählt. Mithilfe dieser Daten wurden u. a.

- die Koeffizienten der Regressionsgeraden (Nullstelle und Anstieg der erklärenden Größe),
- Kenngrößen der Residuenverteilung um die Regressionsgerade sowie
- der Korrelationskoeffizient

bestimmt. Betrag und Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten sowie die Regressionsgerade wurden im Rahmen des automatisierten Prozesses außerdem über eine Weboberfläche visuell dargestellt und somit einer fachlichen Bewertung zugänglich gemacht. Dies wird beispielhaft in *Abbildung 23* veranschaulicht.

Es wurden Einflüsse von Kfz-Verkehrsstärke, Lkw-Anteil bzw. -verkehrsstärke⁴⁷ sowie Geschwindigkeitsniveau auf folgende Kenngrößen untersucht (jeweils minütlich und querschnittsbezogen aggregiert):

- Fahrgeschwindigkeiten (Mittelwert und Standardabweichung)
- Fahrgeschwindigkeiten unbeeinflusster Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 5.1.2, Mittelwert und Standardabweichung)
- Kenngrößen für Abstandsverhalten und Verkehrssicherheit: Nettozeitlücken, TTC, IBTR, CIBTR, PBTR und CPBTR
- Gleichmäßigkeit und Schwerpunktlage Fahrstreifenauslastung (δ_q bzw. ε_q)

⁴⁷ In dem in Abschnitt 4.3 vorgestellten Inferenzmodell wird die Verkehrssituation durch die Kfz-Verkehrsstärke q , die Lkw-Verkehrsstärke q_{Lkw} sowie das Geschwindigkeitsniveau v_s beschrieben. Diese Untersuchung erfolgte mit einer früheren Version des Inferenzmodells, bei der anstelle der Lkw-Verkehrsstärke zunächst noch der prozentuale Lkw-Anteil herangezogen wurde; ein Teil der Untersuchung wurde nachträglich für die Lkw-Verkehrsstärke wiederholt.

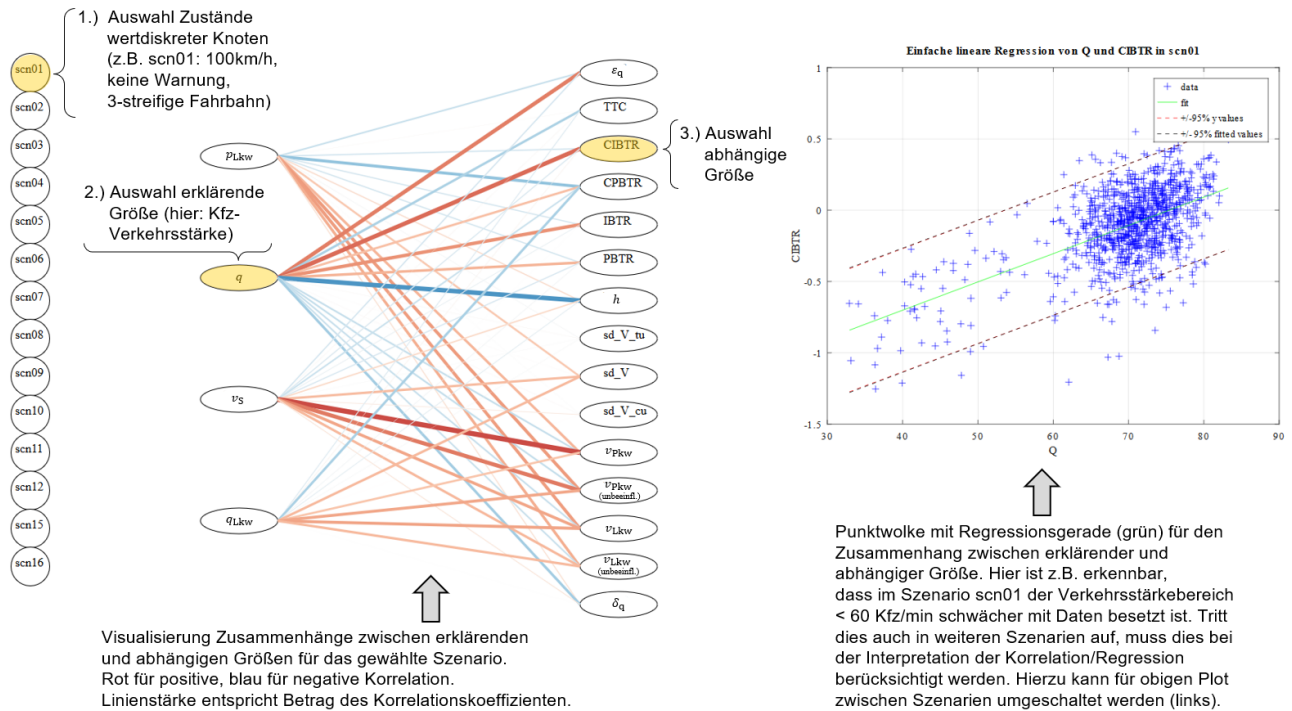


Abbildung 23: Visualisierung zur Regressions- und Korrelationsanalyse [87]

Kenngrößen, bei denen erhebliche und offensichtliche Abweichungen von einer Normalverteilung auftreten (z.B. eine deutlich erkennbare Schiefe der Verteilung), wurden als ungeeignet für den Einsatz in einem GBN identifiziert⁴⁸.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Wesentliche Ergebnisse der Untersuchung sind [87]:

- Die Verteilungen der Kenngrößen TTC, IBTR, CPBTR und PBTR weisen eine erhebliche Schiefe auf. Auch die Residuen der Regressionsgeraden sind nicht normalverteilt, sondern durch eine erhebliche Schiefe gekennzeichnet, insbesondere dort, wo die Regressionsgerade die untere Wertebereichsgrenze erreicht (die genannten Kenngrößen können keine negativen Werte annehmen). Einflüsse von Verkehrsstärke, Lkw-Anteil und Geschwindigkeitsniveau können nicht durchgehend als linear angenommen werden. Die Kenngröße TTC weist darüber hinaus eine starke Streuung (im Verhältnis zum Bereich typischer Werte) auf. Die genannten Kenngrößen sind daher für den Einsatz in einem linearen GBN nicht geeignet.
- Die Kenngröße CIBTR ist hingegen näherungsweise normalverteilt und wird näherungsweise linear durch die Verkehrsstärke beeinflusst. Dieser Zusammenhang weist über die betrachteten Fahrsituationen unterschiedlich ausgeprägte, jedoch stets positive Korrelationskoeffizienten auf. Die Kenngröße CIBTR hat außerdem den Vorteil eines unbeschränkten Wertebereichs.

⁴⁸ Auf statistische Tests zur Überprüfung der Hypothese einer Normalverteilung der Kenngrößen und auch der Residuen wurde verzichtet; die Identifikation grober Abweichungen von einer Normalverteilung wurde als ausreichend erachtet.

- Ein stark ausgeprägter Zusammenhang mit negativem Korrelationskoeffizienten ist zwischen Verkehrsstärke und Nettozeitlücken zu erkennen. Dies ist zu erwarten, da diese beiden Größen direkt miteinander verbunden sind. In einem hinreichend langen Betrachtungszeitraum nähern sich die mittleren Nettozeitlücken dem Kehrwert der Verkehrsstärke an.
- Auch zwischen Geschwindigkeitsniveau und Fahrgeschwindigkeiten bestehen erwartungsgemäß stark ausgeprägte Zusammenhänge.
- Der Lkw-Anteil erwies sich als ungeeignet zur eindeutigen Beschreibung einer Fahrsituation: Niedrige Lkw-Anteile können einerseits aufgrund einer geringen Lkw-Verkehrsstärke, andererseits aber auch infolge einer hohen Verkehrsstärke Pkw-ähnlicher Fahrzeuge auftreten. Hierdurch bedingt sind Einflüsse des Lkw-Anteils auf die Fahrverhaltensparameter überwiegend nichtlinear und zwischen den betrachteten Fahrsituationen sehr unterschiedlich ausgeprägt. Daher wurde entschieden, die Lkw-Verkehrsstärke anstelle des Lkw-Anteils zu verwenden und diese Untersuchung mit dieser Beschreibungsgröße der Verkehrssituation zu wiederholen.

Diese Erkenntnisse fließen in die Anpassung der Netztopologie (vgl. Abschnitt 7.3) ein, indem die als nicht geeignet identifizierten Kenngrößen und Zusammenhänge entfernt bzw. ersetzt werden.

6.3 Einflüsse der Parameter von Fahrverhaltensmodellen

Neben den zuvor betrachteten Zusammenhängen zwischen Fahrsituation und beobachtbarem Fahrverhalten umfasst das in Abschnitt 4.3 beschriebene hybride BN auch Zusammenhänge zwischen Fahrverhalten und Fahrpräferenzen, d. h. eine Zuordnung der Parameter der Verhaltensmodelle, mit denen ebendieses Fahrverhalten reproduziert werden kann. Der umgekehrte Zusammenhang, d. h. der Einfluss der Fahrverhaltensparameter auf das Fahrverhalten, wurde mittels Simulationsexperimenten untersucht. Ziel ist hierbei

- die Einschätzung der Signifikanz einzelner Fahrverhaltensparameter für das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten in der Simulation sowie
- die quantitative Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Fahrverhaltensparametern und Fahrverhaltenskenngrößen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung fließen in die Anpassung der Topologie des BN (vgl. Abschnitt 7.3) sowie in die Kalibrierung der Zusammenhänge zwischen Fahrverhalten und Fahrpräferenzen in den BN (vgl. Abschnitt 7.4.3) ein. Die Untersuchung beschränkt sich auf Fahrzeugfolgemodelle; Parameter der FFE zur Beeinflussung der Fahrstreifenwahl wurden nicht betrachtet.

6.3.1 Vorgehensweise

In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden Simulationsexperimente durchgeführt, in denen einzelne Parameter der Fahrzeugfolgemodelle variiert wurden. Es wurde bewertet, inwieweit hierdurch die Verteilung bestimmter Fahrverhaltenskenngrößen beeinflusst wird. Es wurde stets nur ein Parameter variiert, während die jeweils anderen unverändert blieben (*ceteris paribus*).

Da die Wunschgeschwindigkeitsverteilung unmittelbar anhand empirischer Fahrgeschwindigkeiten geschätzt wird (vgl. Abschnitt 7.4.2), wurde der entsprechende Verhaltensparameter (fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit) in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Die Untersuchung erfolgte separat für aimsun.next und SUMO. Obwohl die darin verankerten Fahrzeugfolgemodelle einander ähnlich sind, wirken die Modellparameter unterschiedlich in den Fahrprozess ein (vgl. Anhang A). Bei der Bewertung wurde jeweils zwischen zwei- und dreistreifigen Richtungsquerschnitten unterschieden. Außerdem wurden ausgewählte Verkehrsstärkebereiche betrachtet, um eine Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse zu gewährleisten.

6.3.2 Parameter in aimsun.next

Die simulative Untersuchung zu Einflüssen der Parameter in aimsun.next floss in das Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB⁴⁹ ein und wird im Projektbericht [87] eingehend beschrieben. An dieser Stelle werden Methodik und Ergebnisse verkürzt wiedergegeben.

Als Grundlage für diese Untersuchung diente ein Simulationsszenario der Referenzstrecke A92 (Fahrtrichtung München), das durch die Heusch/Boesefeldt GmbH im Rahmen des vorgenannten Forschungsprojekts vorbereitet wurde. Da dieses Simulationsszenario einen gesamten Werktag abdeckt, wurde je Parametervariation nur ein Simulationslauf durchgeführt.

Wie in Abschnitt 7.1 beschrieben, wurden die Fahrverhaltensparameter des Simulationsszenarios zunächst ohne Berücksichtigung des Einflusses der SBA kalibriert, was als Grundkalibrierung bezeichnet wird. Die in dieser Grundkalibrierung bestimmten Parameter bilden das Referenzszenario, welchem Szenarien mit veränderten Parametern gegenübergestellt werden.

In dieser Untersuchung blieben diese Parameter während des Fahrtverlaufs einer FFE unverändert, d. h. auch Wirkungen der SBA auf das Fahrverhalten wurden noch nicht differenziert berücksichtigt. Alle hier betrachteten Parameter sind je FFE-Typ (hier: Pkw- und Lkw-ähnlich) als abgeschnittene Normalverteilungen definiert. Beim Einsetzen eines Fahrzeugs in die Simulation werden die Parameter der FFE zufällig gemäß dieser Verteilung gewählt. In dieser Untersuchung wurden ausschließlich die Mittelwerte der betrachteten Parameter variiert; Standardabweichungen und Wertebereichsgrenzen wurden nicht angepasst. Eine Ausnahme bildet der Sensitivitätsfaktor α : Für diesen Parameter war gemäß Grundkalibrierung keine Streuung zugelassen. In dieser Untersuchung wurde jedoch durchgehend eine Standardabweichung von 0,05 angesetzt, da auch bei der späteren Anwendung eine gewisse Streuung dieses Parameters berücksichtigt werden soll.

Für folgende Parameter und Variationen ihrer Mittelwerte wurden Simulationsexperimente durchgeführt (Ausgangswert aus Grundkalibrierung fett hervorgehoben):

Wunschbeschleunigung Pkw ($a_{\max, \text{Pkw}}$)	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	m/s ²
Wunschverzögerung Pkw (d_{Pkw})	-3,50	-3,75	-4,00	-4,25	-4,50	m/s ²
Mindestzeitlücke Pkw ($h_{\min, \text{Pkw}}$)	0,8	1,1	1,4	1,7		s
Mindestzeitlücke Lkw ($h_{\min, \text{Lkw}}$)	0,5	0,8	1,1	1,4		s
Sensitivitätsfaktor (α)	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2

Einflüsse auf das Fahrverhalten wurden jeweils anhand der Nettozeitlücke sowie des Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR, vgl. Abschnitt 2.2.2) bewertet. Beide Kenngrößen wurden

⁴⁹ Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2.

querschnittsbezogen aufgezeichnet. Das CIBTR hat gegenüber den verwandten Kenngrößen IBTR, PBTR und CPBTR den Vorteil, dass es auch negative Werte annehmen kann, so dass Einflüsse auf diese Kenngröße auch bei insgesamt vergleichsweise sicherem Fahrzeugfolgeverhalten erkennbar sind. In der Auswertung wurden nur Situationen mit Verkehrsstärken zwischen 15 und 20 Kfz/min je Fahrstreifen einbezogen.

Im Rahmen der Untersuchung wurde folgendes festgestellt:

- Die Wunschbeschleunigung und die normale Wunschverzögerung haben keinen signifikanten Einfluss auf die mittleren Nettozeitlücken oder CIBTR.
- Keiner der untersuchten Simulationsparameter hat einen signifikanten Einfluss auf die Nettozeitlücken.
- Der Sensitivitätsfaktor hat demgegenüber einen erheblichen Einfluss auf das CIBTR. Der Zusammenhang ist näherungsweise linear (vgl. *Abbildung 24*).
- Die Mindestzeitlücke hat ebenfalls einen Einfluss auf die Kenngröße CIBTR, wenngleich dieser nicht so stark ausgeprägt ist wie der des Sensitivitätsfaktors.

Durch einen Abgleich mit empirischen Daten der Referenzstrecke A92 bei vergleichbaren Verkehrsstärken wurde festgestellt, dass sich mit einem Sensitivitätsfaktor von 0,8 realistischere CIBTR erreichen lassen. Mit dem Standardwert 1,0 aus der Nutzerdokumentation der Software aimsun.next hingegen wählen die FFE sicherere Abstände als Fahrzeugführende in der Realität. Daher wurde die Untersuchung zur Variation der minimalen Zeitlücke mit einem Sensitivitätsfaktor von 0,8 wiederholt.

Detaillierte Ergebnisse dieser Untersuchung können Anhang E.1 sowie auch dem Projektbericht des Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB [87] (dort Anhang 4) entnommen werden.

6.3.3 Parameter in SUMO

Zur Untersuchung der Einflüsse der Parameter in SUMO auf das Fahrverhalten diente ein selbst erstelltes Simulationsszenario der Referenzstrecke A92 (Fahrtrichtung München). Das zugrunde liegende Stra-

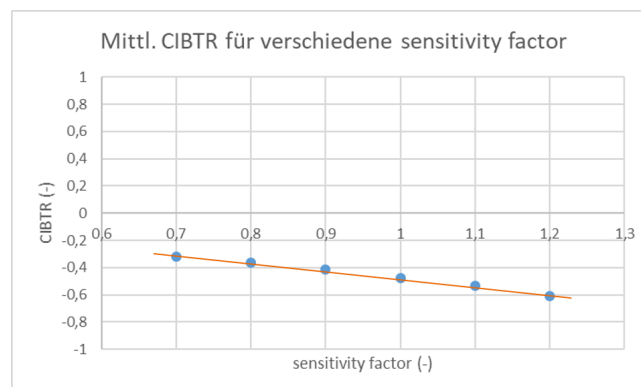


Abbildung 24: Einfluss des Sensitivitätsfaktors in aimsun.next auf das CIBTR (Beispiel A92, Fahrtrichtung München, dreistreifige Fahrbahn)

ßennetz wurde aus frei verfügbaren Kartendaten importiert und nachbearbeitet (vgl. Abschnitt 3.2.3). Die Verkehrsnachfrage und -zusammensetzung wurde in diesem Fall aus dem in aimsun.next verwendeten Szenario exportiert und mittels eines eigens entwickelten Tools in ein für SUMO geeignetes Format überführt. Das Szenario umfasst einen Zeitraum von fünf Stunden im morgendlichen Berufsverkehr (5:00 bis 10:00 Uhr). In dieser Untersuchung wurden je Simulationsexperiment (d. h. je Variante der Parameterwerte) zehn Simulationsläufe durchgeführt.

Ähnlich wie für aimsun.next wurden auch für SUMO im Rahmen einer Grundkalibrierung Parametersätze gewählt, mit denen der Verkehrsablauf ohne differenzierte Berücksichtigung des SBA-Einflusses möglichst realitätsgetreu nachgebildet werden soll (vgl. Abschnitt 7.1). Auch hier bildeten diese Parametersätze den Ausgangspunkt für die Untersuchung.

In SUMO werden im Gegensatz zu aimsun.next die meisten Parameter nicht als Verteilung, sondern als feste Werte je FFE-Typ angegeben. Dies trifft auf alle hier untersuchten Parameter zu. Beim Einsetzen in das Simulationsnetz werden daher alle Fahrzeuge eines FFE-Typs mit denselben Parameterwerten versorgt. Um zu erreichen, dass zumindest die Wunschgeschwindigkeiten einer realistischen Streuung über das FFE-Kollektiv unterliegen, wurde bereits die in Abschnitt 4.4 beschriebene Schnittstellenanwendung eingesetzt. Hierbei wird für jedes Fahrzeug, das in die Simulation eingefügt wird, zufällig eine FFE-Höchstgeschwindigkeit aus einer Normalverteilung gewählt (analog zu aimsun.next) und der zuvor vorgegebene Wert somit unmittelbar überschrieben (vgl. Abschnitt 4.4.3). Gleichzeitig wurden die Möglichkeiten der Schnittstellenanwendung zur Aufzeichnung von Simulationsdaten (vgl. Abschnitt 5.2) genutzt.

Anders als bei der Untersuchung für aimsun.next wurde hier die SBA-Simulation bereits eingesetzt. Dabei wurde lediglich der Einfluss der SBA auf die Geschwindigkeitswahl einbezogen, der unabhängig von dieser Untersuchung konfiguriert werden konnte (vgl. Abschnitt 7.4.2). Dementsprechend wurden an den Anzeigequerschnitten die FFE-Höchstgeschwindigkeiten entsprechend der wahrnehmbaren Fahrsituation angepasst. Dies erfolgte, um eine bessere Vergleichbarkeit mit Daten der realen SBA zu erreichen und somit bei Bedarf eine nochmalige Anpassung der Parameter zu ermöglichen. In der Untersuchung für aimsun.next war dies noch nicht möglich, weil diese in einer früheren Phase dieser Arbeit durchgeführt wurde.

Die Auswertung der Untersuchung erfolgte wie zuvor jeweils separat für zwei- und dreistreifige Richtungsquerschnitte sowie außerdem für Verkehrsstärken

- zwischen 15 und 20 Kfz/min je Fahrstreifen sowie
- zwischen 20 und 25 Kfz/min je Fahrstreifen.

Wunschbeschleunigungen und Wunschverzögerungen wurden nicht nur für Pkw, sondern für alle Fahrzeugarten im gleichen Verhältnis angepasst. Die Ausgangswerte beider Parameter aus der Grundkalibrierung sind für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge unterschiedlich gewählt. Die Anpassung erfolgte, indem dieser Ausgangswert gemäß eines bestimmten prozentualen Faktors verringert bzw. erhöht wurde. Die Ausgangswerte im Referenzfall (100%) betragen (vgl. auch Abschnitt 7.1):

Wunschbeschleunigung		Wunschverzögerung	
... Pkw:	2,9 m/s ²	... Pkw:	-7,5 m/s ²
... Lkw:	1,1 m/s ²	... Lkw:	-4,0 m/s ²
... Busse/Pkw-Gespanne:	2,0 m/s ²	... Busse/Pkw-Gespanne:	-4,0 m/s ²

Der Sensitivitätsfaktor steht in SUMO nicht direkt als Eigenschaft einer betrachteten FFE zur Verfügung. Es wurde daher versucht, eine ähnliche Unter- bzw. Überschätzung der Verzögerungseigenschaften vorausfahrender FFE zu erreichen, indem die von außen wahrnehmbare Wunschverzögerung $d_{\text{apparent},n-1}$ der vorausfahrenden FFE $n - 1$ angepasst wird (bei unveränderter tatsächlicher Wunschverzögerung d_{n-1}). Ein Ersatzwert des Sensitivitätsfaktors berechnet sich dann wie folgt:

$$\hat{\alpha}_n = \frac{d_{n-1}}{d_{\text{apparent},n-1}} \quad (19)$$

Der Ersatzwert $\hat{\alpha}_n$ kann somit nur aus Eigenschaften der jeweils vorausfahrenden FFE bestimmt werden. Werden diese Eigenschaften jedoch über das gesamte FFE-Kollektiv gleichermaßen variiert, kann dieser Umstand vernachlässigt werden.

Insgesamt wurden mit SUMO Simulationsexperimente für folgende Parameterwerte durchgeführt (Ausgangswert aus Grundkalibrierung fett hervorgehoben):

Wunschbeschleunigung (a_{desired})	40	60	80	100	120	140	% der Ausgangswerte
Wunschverzögerung (d)	40	60	80	100	120		% der Ausgangswerte
Mindestabstand Stillstand (g_{min})	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	m
Sensitivitätsfaktor ($\hat{\alpha}$)	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	
Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (σ)	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7		
Mindestzeitlücke (τ)		0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	s

Die Datenaufzeichnung in der Simulation erfolgte nicht querschnitts-, sondern abschnittsbezogen (zyklische momentane Erfassung innerhalb eines definierten Streckenabschnitts, vgl. Abschnitt 5.2). Es wurden die Einflüsse der vorgenannten Parametervariationen auf die Verteilungen von

- Fahrgeschwindigkeiten,
- Nettozeitlücken,
- Auffahrzeiten (TTC),
- Compensated Individual Braking Time Risks (CIBTR),
- der Gleichmäßigkeit der Fahrstreifenauslastung (bzgl. der Verkehrsdichte, δ_k) sowie
- der Schwerpunktlage der Fahrstreifenauslastung (bzgl. der Verkehrsdichte, ε_k)

analysiert. Die Analyse dieser Kenngrößen erfolgte automatisiert mittels eines Skripts (Programmiersprache R). Dabei wurden für jeden der oben aufgeführten Parameter, für jedes Szenario bzgl. Fahrstreifenanzahl und Verkehrsstärkeklasse sowie für jede Verhaltenskenngröße

- verschiedene Diagramme zu Verteilungen der Verhaltenskenngrößen erzeugt sowie
- eine lineare Regression über die Mittelwerte der Verhaltenskenngrößen in Abhängigkeit vom jeweiligen Parameterwert durchgeführt.

Die Koeffizienten (Nullstelle, Steigung) sowie Gütemaße dieser Regression (hier insbesondere R^2) wurden in einer CSV-Datei abgelegt. Mithilfe der Regressionsanalyse sollte je Simulationsexperiment eine Bewertung ermöglicht werden, ob ein signifikanter Einfluss des Parameters auf die Fahrverhaltenskenngröße besteht und inwieweit dieser tatsächlich zumindest näherungsweise als linear angenommen werden kann, sodass er sich zur Einbeziehung in das lineare GBN eignet.

Sehr geringe Wunschverzögerungen (unter 60% der Ausgangswerte), hohe Mindestzeitlücken (ab 1,1 s) sowie hohe Sensitivitätsfaktoren (ab 1,2) begünstigen das Auftreten von Verkehrszusammenbrüchen (die in der Realität unter den vorgegebenen verkehrlichen Randbedingungen nicht zu beobachten sind). Diese unrealistischen Verkehrszusammenbrüche wurden vor allem in den dreistreifigen Streckenabschnitten (Verflechtungsvorgänge) sowie in den Szenarien mit höherer Verkehrsstärke (20 bis 25 Kfz/min je Fahrstreifen) festgestellt. Die Regressionsanalyse wurde daher unter Ausschluss der Szenarien mit unrealistischem Verkehrszusammenbruch wiederholt und diese Szenarien aus der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass eine Absenkung des Sensitivitätsfaktors $\hat{\alpha}$ auf Werte < 1 keinerlei Auswirkungen auf die Simulationsergebnisse hat. Demgegenüber sind bei Werten > 1 durchaus Unterschiede zum Referenzfall ($= 1$) zu beobachten. *Abbildung 25* zeigt dies am Beispiel der Kenngröße CIBTR. Dies lässt den Schluss zu, dass die Implementierung des Fahrzeugfolgmodells in SUMO eine Modellierung riskanteren Fahrzeugfolgeverhaltens auf diese Weise nicht zulässt, sondern dass lediglich eine Einflussnahme in Richtung konservativeren Abstandsverhaltens möglich ist. Aus diesem Grunde wurden auch Szenarien mit Sensitivitätsfaktor < 1 aus der Regression und aus der Bewertung ausgeschlossen.

Durch die Entwickler-Community der Software SUMO wurde bestätigt, dass allein durch Anpassung des Sensitivitätsfaktors $\hat{\alpha}$ nach Gleichung 19 eine Nachbildung riskanteren Fahrverhaltens nicht ohne

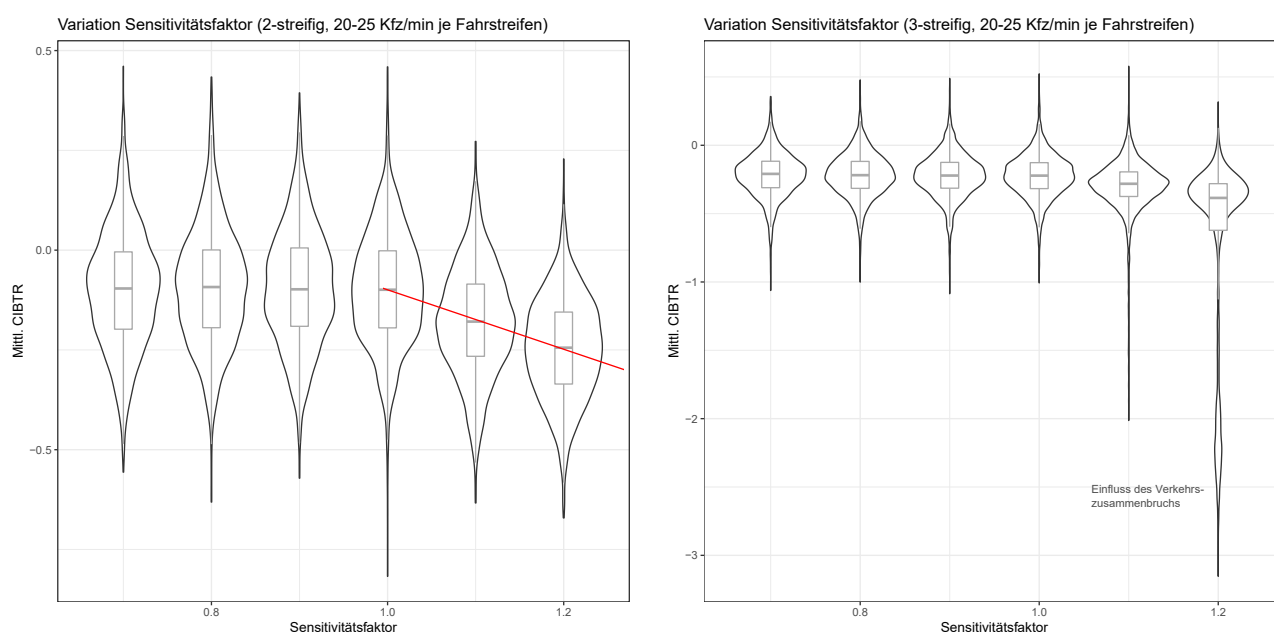


Abbildung 25: Einfluss des Sensitivitätsfaktors in SUMO auf das CIBTR

Weiteres möglich ist. Als potenzielle Alternative wurde die Einstreuung von Wahrnehmungsfehlern mittels sogenannter Driver State Devices [37] empfohlen. Auf diese Weise kann u. a. eine Über- oder Unterschätzung des tatsächlichen Fahrzeugfolgeabstands modelliert werden, die in anschließenden Prozessen des Fahrzeugfolgemodells zu einer entsprechenden Fehleinschätzung des gerade noch als sicher geltenden Fahrzeugfolgeabstands (vgl. Abschnitt A.2) führt. Diese Möglichkeit wurde in dieser Arbeit nicht näher untersucht, wird jedoch in Abschnitt 8.3 als ein Ansatzpunkt für künftige Weiterentwicklungen aufgegriffen.

Die wichtigsten Erkenntnisse der weiteren Auswertung dieser Untersuchung sind:

- Für die untersuchten Parameter ist kein erheblicher Einfluss auf die Verteilungen der Fahrgeschwindigkeiten, der Gleichmäßigkeit und Schwerpunktlage der Fahrstreifenauslastung sowie auf die Zeitlücken (insgesamt) festzustellen. Die Steigungen der Regressionsgeraden sind sehr gering, insbesondere im Verhältnis zur Größenordnung der Werte.
- Der Risikoindikator CIBTR wird durch den Sensitivitätsfaktor sowie in geringerem Maße auch durch die Mindestzeitlücke (τ) und den Einflussfaktor für Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (σ) beeinflusst (vgl. *Abbildungen 25 und 26*). In allen drei Fällen bewirkt ein höherer Parameterwert ein weniger riskantes Fahrzeugfolgeverhalten.
- Sensitivitätsfaktor, Mindestzeitlücke und der Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten haben einen Einfluss auf die Verteilung der TTC, wenngleich dieser nicht stark ausgeprägt ist.
- Wie auch bereits in Abschnitt 6.2 festgestellt wurde, weist die Verteilung der TTC eine erhebliche Schiefe auf, sodass eine deutlich erkennbare Abweichung zu einer Normalverteilung besteht.

Einzelheiten und die Ergebnisse der Regressionsanalyse werden in Anhang E.2 wiedergegeben.

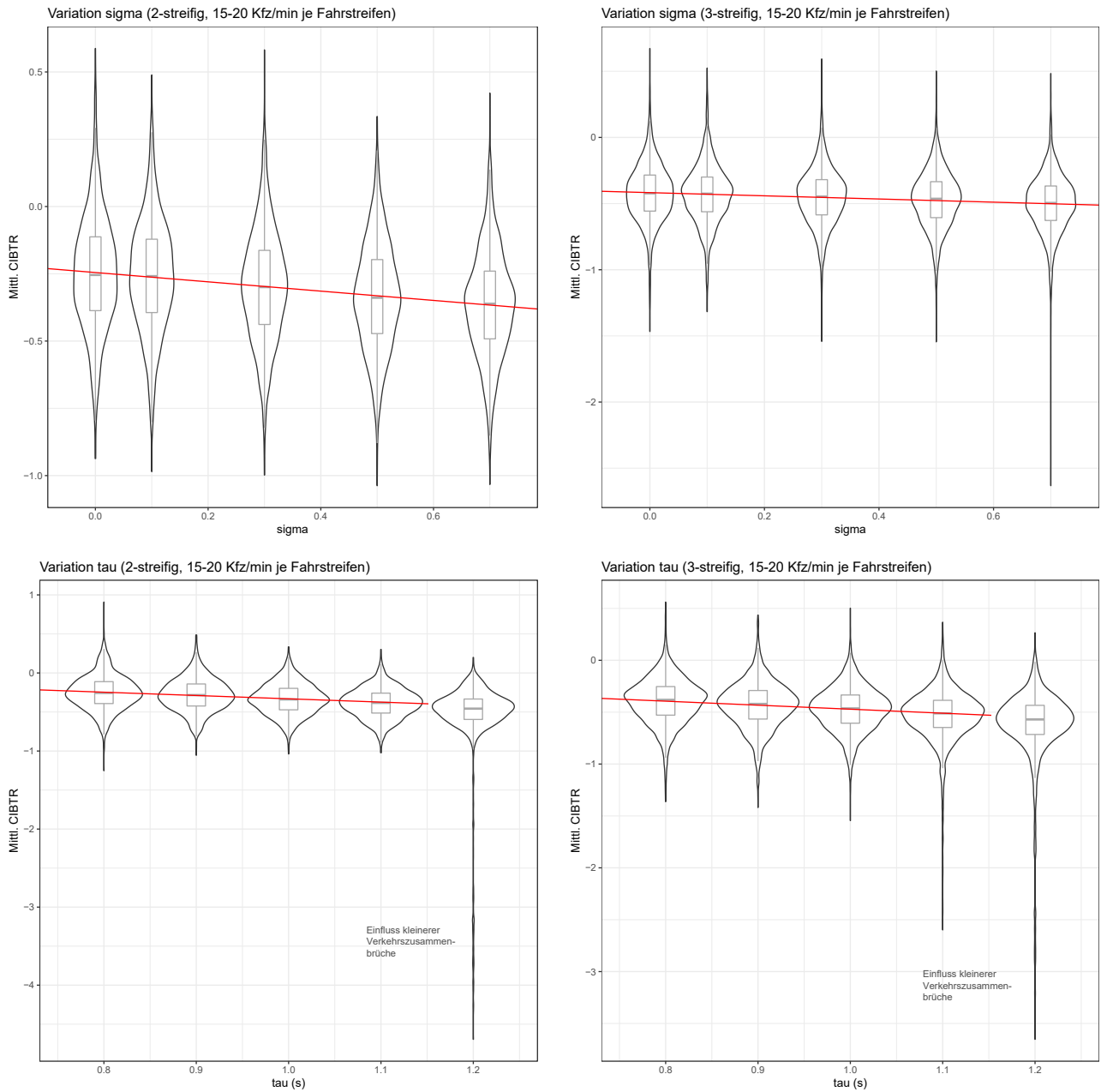


Abbildung 26: Einflüsse der Parameter σ und τ in SUMO auf das CIBTR

7 Modellkonfiguration, Kalibrierung und Validierung

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie die Verkehrsflusssimulation, das SBA-Simulationsmodul sowie das Inferenzmodell konfiguriert und kalibriert wurden. Anschließend werden Vorgehensweise und Ergebnisse einer Validierung der aus diesen drei Komponenten bestehenden Simulationsumgebung vorgestellt. *Abbildung 27* liefert eine Übersicht über die hierzu notwendigen Arbeitsschritte. Mithilfe der aufbereiteten und annotierten Verkehrs-, Prozess- und Infrastrukturdaten der SBA sowie Modellen der Verkehrsinfrastruktur wurde eine erste Konfiguration und Kalibrierung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation vorgenommen (vgl. Abschnitt 7.1). Die so vorbereiteten Simulationsszenarien sowie die Daten der realen SBA dienen als Grundlage für die Untersuchungen zu Einflüssen der Fahr situation (Abschnitt 6.1 und 6.2) sowie der Fahrverhaltensparameter (Abschnitt 6.3) auf das Fahrverhalten. Parallel wurde auch das SBA-Simulationsmodul für den Einsatz vorbereitet (vgl. Abschnitt 7.2); im Zusammenspiel mit SUMO wurde es bereits in den Untersuchungen zu Einflüssen der Fahrverhaltensparameter genutzt.

Ausgehend von der in Abschnitt 4.3.4 vorgestellten initialen Ausprägung des Inferenzmodells sowie auf Basis der Untersuchungsergebnisse aus Abschnitt 6 wurde die Topologie des hybriden Bayesschen Netzes angepasst und so die Komplexität des Modells reduziert. In Abschnitt 7.3 wird die Vorgehensweise hierzu sowie die resultierende Netztopologie vorgestellt. Abschnitt 7.4 beschreibt, wie dieses Modell in einem teils automatisierten und teils händischen Prozess kalibriert wurde. Mit der anschließenden Validierung wird für ausgewählte Situationen geprüft, ob die verschiedenen Komponenten der Simulationsumgebung im Zusammenspiel in der Lage sind, das Verkehrsgeschehen in Abschnitten mit SBA realistisch und situationsdifferenziert wiederzugeben.

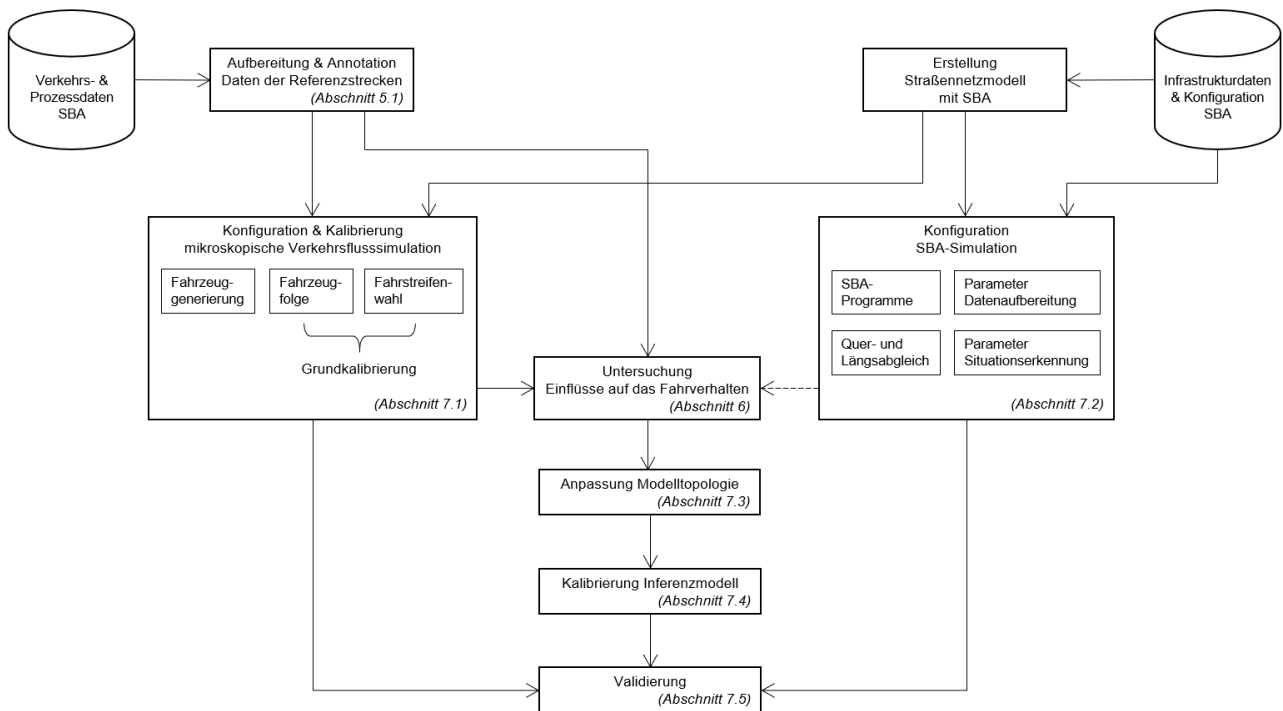


Abbildung 27: Schritte der Modellanpassung, Kalibrierung und Validierung

Der in Abbildung 27 dargestellte Ablauf wurde in grundsätzlich ähnlicher Weise für die beiden verwendeten Simulationsumgebungen

- aimsun.next mit Unterzentrale der Heusch/Boesefeldt GmbH sowie
- SUMO mit eigenem SBA-Simulationsmodul

durchgeführt. Für aimsun.next erfolgte die Vorbereitung und Kalibrierung der Verkehrsflusssimulation sowie der Unterzentralensoftware im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB⁵⁰ durch die Heusch/Boesefeldt GmbH. Hierzu wird auf den Projektbericht [87] verwiesen. An dieser Stelle wird vordergründig auf die Konfiguration und Kalibrierung der auf SUMO basierenden Simulationsumgebung eingegangen; auf Unterschiede zu aimsun.next wird jeweils hingewiesen.

7.1 Konfiguration und Kalibrierung der Verkehrsflusssimulation

Eine Voraussetzung für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation ist zunächst die Erstellung eines Straßennetzmodells, das entweder synthetisch gebildet oder einem realen Straßennetz nachempfunden wird. Im Zuge dieser Arbeit wurden Straßennetzmodelle der beiden in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Referenzstrecken genutzt. In diesen sind auch die Mess- und Anzeigequerschnitte der SBA enthalten.

Zudem müssen verschiedene FFE-Typen definiert werden; im Kontext dieser Arbeit ist mindestens die Unterscheidung zwischen Pkw- und Lkw-ähnlichen FFE erforderlich, da auch in der Verkehrsdatenerfassung zwischen diesen Fahrzeugklassen differenziert wird. Zusätzlich ist es zweckmäßig, Busse und Pkw mit Anhänger (Pkw-Gespanne) als Teilmenge Lkw-ähnlicher Fahrzeuge als gesonderten FFE-Typ zu erfassen, da diese von einem Lkw-Überholverbot nicht betroffen sind.

Für jeden definierten FFE-Typ müssen anschließend

- die (zeitlich veränderliche) Häufigkeit von Fahrten je Quelle-Ziel-Beziehung innerhalb des betrachteten Straßennetzabschnitts festgelegt sowie
- geeignete Parameter des Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwahlmodells gewählt werden.

Der letztere Schritt berücksichtigt noch nicht, dass einzelne Parameter des Fahrzeugfolgmodells dynamisch während der Simulation verändert werden können, um die Wirkungen der Anzeigezustände einer SBA differenzierter abzubilden. Es werden hier zunächst Ausgangswerte der Parameter festgelegt, mit denen die grundsätzlichen Charakteristika der betrachteten Streckenabschnitte realitätsgetreu nachgebildet werden, insbesondere Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Verkehrsstärke und -dichte (Fundamentaldiagramme), die Fahrstreifenauslastung und das Auftreten von Verkehrszusammenbrüchen. Diese Auswahl von Ausgangswerten für Parameter der Fahrverhaltensmodelle wird hier als *Grundkalibrierung* bezeichnet. Neben Parametern der FFE müssen auch globale Parameter eines Simulationsexperiments (z. B. die Simulationsschrittweite) sowie Eigenschaften der Netzelemente (Knoten und Kanten) entsprechend der Zielsetzung eines realistischen Verkehrsgeschehens angepasst werden.

⁵⁰ Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), vgl. auch Abschnitt 8.2.

aimsun.next

Für aimsun.next wurden Simulationsszenarien für die beiden Referenzstrecken im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB durch den Projektpartner Heusch/Boesefeldt GmbH vorbereitet, was die Erstellung des Straßennetzmodells, die Festlegung der Fahrten sowie die Durchführung der zuvor beschriebenen Grundkalibrierung der Fahrverhaltensparameter beinhaltete. Die Vorgehensweise ist im Projektbericht [87] (dort Abschnitt 4.2) beschrieben.

In den beiden bereitgestellten Simulationsszenarien für aimsun.next wurden je drei FFE-Typen für Pkw-ähnliche und zwei für Lkw-ähnliche Fahrzeuge definiert, die ein unterschiedliches Geschwindigkeits- und Fahrstreifenwahlverhalten aufweisen. Den Ausgangspunkt für die Festlegung der FFE-spezifischen Parameter bildete die Untersuchung FE 03.0460/2009/OGB „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [70]. Die in der Grundkalibrierung festgelegten Ausgangswerte ausgewählter Parameter des Fahrzeugfolgmodells werden in *Tabelle 7* am Beispiel der Referenzstrecke A92 wiedergegeben. Für die in dieser Arbeit relevanten Szenarien mit ausschließlich menschlichen Verkehrsteilnehmern wurde eine Simulationsschrittweite und Reaktionszeit von 0,75 s verwendet.

Parameter	Einheit	FFE-Typ	Verteilung $N(\mu, \sigma^2)$ mit ...		
			μ	σ	Min./Max.
Fahrzeughöchstgeschwindigkeit (v_{\max})	km/h	Pkw/Pkw1/Pkw2	150	50	[80, 200]
		Lkw	100	6	[83, 102]
		Lkw1	110	6	[75, 115]
Wunschbeschleunigung (a_{\max})	m/s ²	Pkw/Pkw1/Pkw2	3,0	0,2	[2,6, 3,4]
		Lkw/Lkw1	1,0	0,5	[0,6, 1,8]
Wunschverzögerung (d)	m/s ²	Pkw/Pkw1/Pkw2	-4,0	0,25	[-4,5, -3,5]
		Lkw/Lkw1	-3,5	1,0	[-4,8, -2,5]
Mindestabstand Stillstand (g_{\min})	m	Pkw/Pkw1/Pkw2	1,0	0,3	[0,5, 1,5]
		Lkw/Lkw1	1,5	0,5	[1,0, 2,5]
Sensitivitätsfaktor (α)		alle	1,0	0,0	
Mindestzeitlücke (h_{\min})	s	Pkw/Pkw1/Pkw2	1,4	0,7	[0,8, 1,7]
		Lkw/Lkw1	1,1	0,5	[0,5, 3,1]
Fahrzeuglänge (l)	m	Pkw/Pkw1/Pkw2	4,5	0,5	[3,4, 5,6]
		Lkw/Lkw1	12,0	2,0	[6, 18]

Tabelle 7: Ausgangswerte Parameter des Fahrzeugfolgmodells in aimsun.next (A92) [87] (teils übernommen aus FE 03.0460/2009/OGB „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [70])

SUMO

Das Straßennetzmodell in SUMO wurde wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben aus frei verfügbaren Kartendaten des Projekts OpenStreetMap [120] generiert und anschließend manuell überprüft und nachbearbeitet. Hierbei wurden auch die Mess- und Anzeigequerschnitte definiert und im Straßennetzmodell verortet (vgl. auch Abschnitt 4.5.3).

Die Festlegung der Fahrtenverteilung erfolgte zum einen mittels des SUMO-eigenen Werkzeugs `dfrouter` [36], welches die Anzahl der Fahrten je Quelle-Ziel-Beziehung basierend auf lokal erfassten Verkehrsstärken schätzt und in einer SUMO-spezifischen XML-Datei (SUMO-Routendatei) ablegt. Zum anderen wurden die Fahrthäufigkeiten je Quelle-Ziel-Beziehung aus den `aimsun.next`-Szenarien extrahiert und in das SUMO-Datenformat überführt, um vergleichbare Szenarien über beide Simulationsumgebungen zu erhalten. Hierzu wurde eine entsprechende Excel-Exportfunktion der Software `aimsun.next` sowie ein eigens entwickeltes Python-Skript zur Datentransformation und Erzeugung der SUMO-Routendatei genutzt. Für die Generierung der Fahrtenverteilung war es vorteilhaft, dass alle Ein- und Ausfahrten der Referenzstrecken mit Messquerschnitten ausgestattet waren.

In SUMO sind mehrere Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle implementiert. In sämtlichen Simulationsuntersuchungen in dieser Arbeit wurde ausschließlich das Fahrzeugfolgemodell nach Krauß (vgl. Anhang A.2) sowie das Fahrstreifenwechselmodell nach Erdmann [53] verwendet. Als Ausgangspunkt für die Grundkalibrierung in SUMO dienten insbesondere

- die Standard-Parameterwerte und FFE-Eigenschaften für die vordefinierten FFE-Typen „passenger“ (Pkw), „truck“ (Lkw) und „coach“ (hier: Bus oder Pkw-Gespann) aus der SUMO-Dokumentation [35] [45],
- die in der Untersuchung FE 03.0460/2009/OGB „HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen“ [70] verwendeten Parameterwerte des Fahrzeugfolgemodells (in Verbindung mit Standardwerten aus der SUMO-Dokumentation für Parameter des Fahrstreifenwechselmodells) sowie
- die im EU-Projekt TransAID⁵¹ verwendeten Mittelwerte⁵² der Parameter des Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodells für menschliche Fahrzeugführende (legacy passenger, light goods and heavy goods vehicles) [109].

Zunächst wurde für diese drei Varianten der Kalibrierung am Beispiel der A92 (Fahrtrichtung München) untersucht, wie gut die verkehrlichen Eigenschaften der realen Referenzstrecke nachgebildet werden. Die Bewertung erfolgte anhand makroskopischer Eigenschaften der Strecke (Zusammenhänge des Fundamentaldiagramms, vgl. *Abbildung 28*), anhand verschiedener Kenngrößen des Fahrverhaltens sowie auch anhand visueller Beobachtungen des Verkehrsgeschehens in der Simulation. Durch die visuelle Beobachtung konnten Probleme beim Fahrstreifenwechsel in Einfahr- und Verflechtungssituationen identifiziert werden, die sich z. B. in unplausiblen Haltevorgängen äußern können. Ebenfalls wurde das Auftreten von Fahrzeug-Teleports und Kollisionen erfasst, welche bei zu großer Häufigkeit ebenfalls auf Probleme im Fahrstreifenwechselverhalten hindeuten können.

⁵¹ Das Akronym TransAID steht für „Transition Areas for Infrastructure-Assisted Driving“. ⁵² Im Projekt TransAID wurden die Parameter durch eine Funktion außerhalb der Simulationssoftware als über das FFE-Kollektiv normalverteilte Zufallsgrößen abgebildet. In dieser vergleichenden Untersuchung erfolgte dies nur für die fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit; für andere Parameter wurden lediglich die Mittelwerte dieser Verteilungen übernommen.

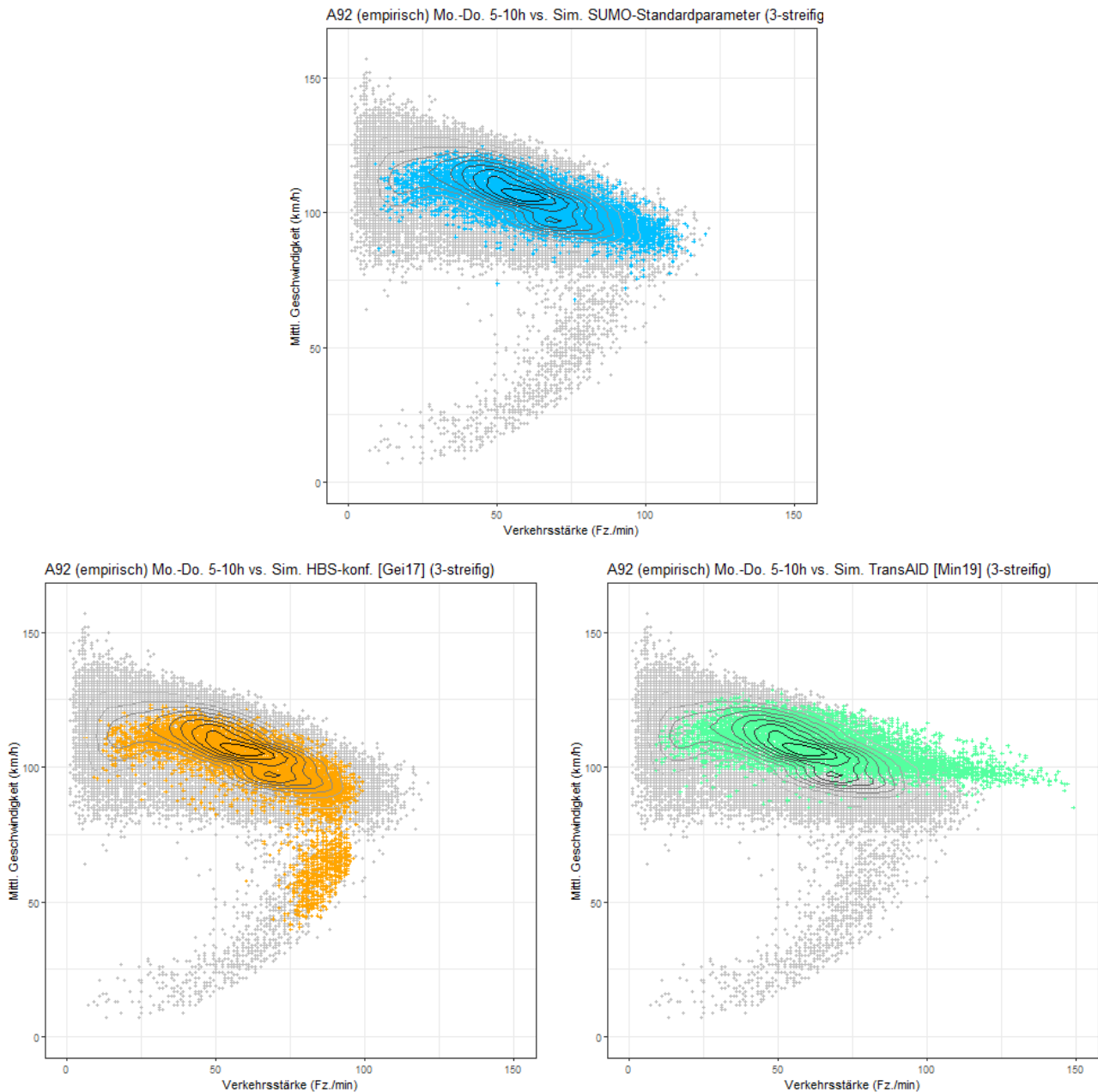


Abbildung 28: Fundamentaldiagramme für drei Parametersätze in SUMO (Beispiel A92, Fahrtrichtung München, dreistreifige Fahrbahn). Empirische Daten sind in grau, Simulationsdaten farbig dargestellt. Bei Verwendung der SUMO-Standardparameter (oben) wird eine gute Übereinstimmung mit der Realität erreicht, während die maximale empirische Verkehrsstärke mit den Parametern aus FE 03.0460/2009/OGB [70] (links) nicht erreicht bzw. mit den Parametern aus TransAID [109] (rechts) überschritten wird.

Die drei zuvor genannten Varianten der Kalibrierung wurden für unterschiedliche Simulationsschrittweiten zwischen 0,1 s (verwendet in TransAID) und 1 s (Standard in SUMO) untersucht. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass die Simulationsschrittweite einen erheblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat, da sie mit der Reaktionszeit korrespondiert. Prinzipiell kann die Aktionsschrittweite, d. h. die Frequenz, in der Fahrentscheidungen getroffen werden, abweichend von der Simulationsschrittweite festgelegt und so von dieser entkoppelt werden. Hierbei wurden jedoch erhebliche Probleme mit Lückensuche und Kooperation bei Fahrstreifenwechseln festgestellt, die zu unrealistischen Verkehrszusammenbrüchen führen (vgl. Anmerkungen zur Aktionsschrittweite in Anhang A.2).

In den weiteren Untersuchungen wurde eine Simulationsschrittweite von einheitlich 1 s verwendet, obwohl in den zuvor zitierten Untersuchungen Simulationsschrittweiten auch im Subsekundenbereich genutzt wurden. Diese Vereinheitlichung erfolgte, um eine bessere Vergleichbarkeit der Kalibrierungsvarianten zu erreichen. Der gewählte Wert von 1 s orientiert sich einerseits an typischen Reaktionszeiten menschlicher Fahrzeugführender. Andererseits sollten Simulationsschrittweiten im Subsekundenbereich vermieden werden, da sie mit deutlich verlangsamten Simulationsgeschwindigkeiten einhergehen. Die Aktionsschrittweite (action step length) wurde entsprechend der Simulationsschrittweite ebenfalls auf 1 s festgelegt. Abweichungen zwischen Realität und Simulation wurden für Fahrgeschwindigkeiten, Fahrstreifenaufteilungen, Nettozeitlücken und ausgewählte Ersatzkenngrößen zur Bewertung der Verkehrssicherheit (SSM) untersucht. Hierbei wurde jede der betrachteten Kenngrößen mit der jeweils zugehörigen Verkehrsstärke in einem Streudiagramm abgebildet. Zusätzlich wurden geeignete (teilweise nichtlineare) Regressionsfunktionen der Zusammenhänge zwischen Kenngröße und Verkehrsstärke jeweils für Realität und Simulation bestimmt und in die Streudiagramme eingezeichnet. Auf dieser Grundlage wurde je Fahrverhaltenskenngröße eine grobe Bewertung etwaiger Abweichungen mithilfe einer fünf-Punkte-Skala vorgenommen (−2 für eine schlechte bis +2 für eine gute Übereinstimmung zwischen Realität und Simulation). Die Bewertung wurde anschließend durch Bilden des gewichteten Mittelwerts zu einer Gesamtaussage (Score) für die drei Kalibrierungsvarianten verdichtet. Zusätzlich wurde bewertet, ob und wie häufig in der Simulation unrealistische Verkehrszusammenbrüche, extrem starke Bremsmanöver oder Kompensationsmaßnahmen aufgrund fehlgeschlagener Fahrstreifenwechsellvorgänge (hier: Fahrzeug-Teleports) auftraten.

Die Untersuchungen zeigten, dass mit den Standardparametern für die Fahrzeugtypen „passenger“, „truck“ und „coach“ aus der SUMO-Dokumentation [35] [45] die geringsten Abweichungen zwischen empirischen Daten der Referenzstrecken und Ausgabedaten der Simulation erreicht werden (Score: 1,3 auf einer Skala von −2 bis +2). Hierbei treten außerdem keine signifikanten Störungen oder Fahrzeug-Teleports auf. Daher wurden diese Parameterwerte als Ergebnis der Grundkalibrierung des SUMO-Fahrzeugfolgmodells festgelegt. Neben der vergleichenden Bewertung lieferte diese Untersuchung auch bereits erste Erkenntnisse zur Validierung (erste Validierungsstufe, vgl. Abschnitt 7.5). Da nur drei Varianten der Kalibrierung untersucht wurden, ist es möglich, dass Parametersätze existieren, die eine noch bessere Nachbildung der makroskopischen Charakteristika und des Fahrverhaltens ermöglichen; dies wurde jedoch nicht näher untersucht. Es sei angemerkt, dass auf Grundlage dieser Untersuchung eine Aussage zur generellen Eignung der anderen beiden Varianten der Kalibrierung nicht zulässig ist, da wie zuvor beschrieben die Simulationsschrittweiten angeglichen und im Gegensatz zum Projekt TransAID nur die Mittelwerte eigentlich zufällig verteilter Parameter berücksichtigt wurden.

Die in den vorgenannten Schritten bestimmten Parameterwerte des *Fahrzeugfolgmodells* sind in *Tabelle 8* wiedergegeben. Wie in Abschnitt 4.4.3 beschrieben, wird die vorkonfigurierte (deterministische) Fahrzeughöchstgeschwindigkeit unmittelbar beim Einsetzen der FFE in die Simulation durch einen Zufallswert aus einer Normalverteilung ersetzt. In *Tabelle 8* sind dementsprechend Mittelwert und Varianz dieser Verteilung sowie zugehörige Wertebereichsgrenzen angegeben.

Als Parameter des *Fahrstreifenwechselmodells* wurden weitestgehend die Standardwerte gemäß SUMO-Dokumentation [35] verwendet. Lediglich der Parameter `lcKeepRight` wurde für Lkw auf den Wert 2,0 erhöht (Standard: 1,0), um nach einem Überholvorgang eine raschere Rückkehr dieser Fahrzeuge auf den rechten Fahrstreifen zu gewährleisten. Durch diese Parameterwerte wird ein plausibles Einfahr- und Fahrstreifenwechselverhalten erreicht, was durch realistische Fahrstreifenauslastungen, durch eine niedrige Zahl misslungener Fahrstreifenwechsel sowie durch visuelle Beobachtung des simulierten Verkehrsablaufs bestätigt wurde. Durch die verwendeten Standardwerte wird u. a. auch sichergestellt, dass Fahrzeuge nur bei zähflüssigem Verkehr und Stau rechts überholen dürfen.

Parameter	Einheit	FFE-Typ	Wert (bzw. Verteilung)
Fahrzeughöchstgeschwindigkeit (v_{\max})	km/h	Pkw Lkw/Bus/Pkw-Gespann	$N(150, 50^2)$; $\in [80, 200]$ $N(110, 6^2)$; $\in [75, 115]$
Wunschbeschleunigung (a_{desired})	m/s ²	Pkw Lkw Bus/Pkw-Gespann	2,9 1,1 2,0
Wunschverzögerung Normalfall (d)	m/s ²	Pkw Lkw/Bus/Pkw-Gespann	-7,5 -4,0
von außen wahrnehmbare Wunschverzögerung (d_{apparent})	m/s ²	alle	= d
max. Verzögerung Gefahr ($d_{\text{emergency}}$)	m/s ²	Pkw Lkw/Bus/Pkw-Gespann	-9,0 -7,0
Mindestabstand Stillstand (g_{\min})	m	alle	2,5
Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (σ)		alle	0,5
Mindestzeitlücke (τ)	s	alle	1,0
Fahrzeuglänge (l)	m	Pkw Lkw Bus/Pkw-Gespann	4,3 16,5 14,0

Tabelle 8: Ausgangswerte Parameter der Fahrverhaltensmodelle in SUMO (A92)

7.2 Konfiguration der SBA-Simulation

Die Konfiguration der SBA-Simulationsmodule (vgl. Abschnitt 4.5) wurde weitestgehend entsprechend der realen Versorgung der SBA der beiden Referenzstrecken umgesetzt. Dies umfasst

- die Versorgung der Mess- und Anzeigequerschnitte (MQ bzw. AQ),
- die Versorgung der Parameter zur Datenaufbereitung,
- die Versorgung der Schwellenwerte für die Situationserkennung,
- die Definition von SBA-Programmen sowie
- die Definition von Auslösern zur Aktivierung der SBA-Programme.

Unter einem SBA-Programm wird hierbei eine definierte Abfolge von Anzeigezuständen über mehrere AQ verstanden. Ausgehend von einem Referenz-AQ können auch Zustände mehrerer AQ weiter stromauf- und stromabwärts vorgegeben werden (z. B. Geschwindigkeitstrichter und Gefahrenwarnungen stromaufwärts, Wiederholung oder Aufhebung stromabwärts). Als Auslöser wird eine Zuordnung eines SBA-Programms und Referenz-AQ zu einem MQ verstanden, an dem die entsprechenden verkehrlichen Situationen erkannt werden können.

Die im Zusammenhang mit aimsun.next genutzte Unterzentralensoftware wurde im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB durch die Heusch/Boesefeldt GmbH konfiguriert. Hierzu wird auf den Projektbericht [87] verwiesen. Nachfolgend wird kurz auf Besonderheiten der Konfiguration des für den Einsatz mit SUMO entwickelten SBA-Simulationsmoduls eingegangen.

Ein Merkmal des SBA-Simulationsmoduls für SUMO (vgl. Abschnitt 4.5.3) ist, dass Parameter der Datenaufbereitung sowie die Schwellenwerte der Situationserkennung zunächst als Parametersätze in entsprechenden Datenbanktabellen vordefiniert werden. Je MQ bzw. Auslöser werden unter Referenzierung auf diese Datenbanktabellen entsprechende Parametersätze zugewiesen. Auch die MQ und AQ mit ihren Eigenschaften sind in der Datenbank abgelegt und somit referenzierbar. Hierdurch ist eine Einstellung der Parameter individuell je Querschnitt möglich, gleichzeitig wird jedoch der Aufwand zur Konfiguration minimiert⁵³.

Die SBA-Programme werden ebenfalls in einer Datenbanktabelle abgelegt. Hierbei können dem Referenz-AQ und weiteren AQ im Umfeld jeweils eine Geschwindigkeitsvorgabe, ein Zustand der Fahrstreifensignalisierung, ein Überholverbotszustand sowie ein Zustand der Gefahrenwarnung zugewiesen werden (siehe *Abbildung 29*, links).

Die Definition eines Auslösers umfasst den auslösenden MQ, den Referenz-AQ, ein SBA-Programm und einen zu dessen Aktivierung oder Deaktivierung anzuwendenden Parametersatz (*Abbildung 29*, Mitte). Es können beliebig viele Auslöser je MQ definiert werden. Um die räumliche Propagierung der Anzeigezustände ausgehend vom Referenz-AQ zu ermöglichen (*Abbildung 29*, rechts), wurden den AQ ihre jeweiligen Vorgänger und Nachfolger zugewiesen. Zusätzlich kann einem AQ ein sogenannter *Master-AQ* zugeordnet werden, von welchem Geschwindigkeitsvorgaben, Überholverbote und Gefahrenwarnungen übernommen werden sollen. Dies ermöglicht die Anwendung von Querabgleichsregeln z. B. für AQ in Einfahrten, die mit denen der Hauptfahrbahn synchronisiert werden müssen. Nicht zuletzt kann je AQ ein Grundzustand vorgegeben werden, welcher aktiviert wird, wenn keine höher priorisierten Anzeigezustände angefordert wurden.

⁵³ Diese Art der Parametrierung von SBA wird z. B. auch bei der Unterzentralensoftware der Siemens AG eingesetzt, die u. a. auf der Referenzstrecke A92 im Einsatz ist.

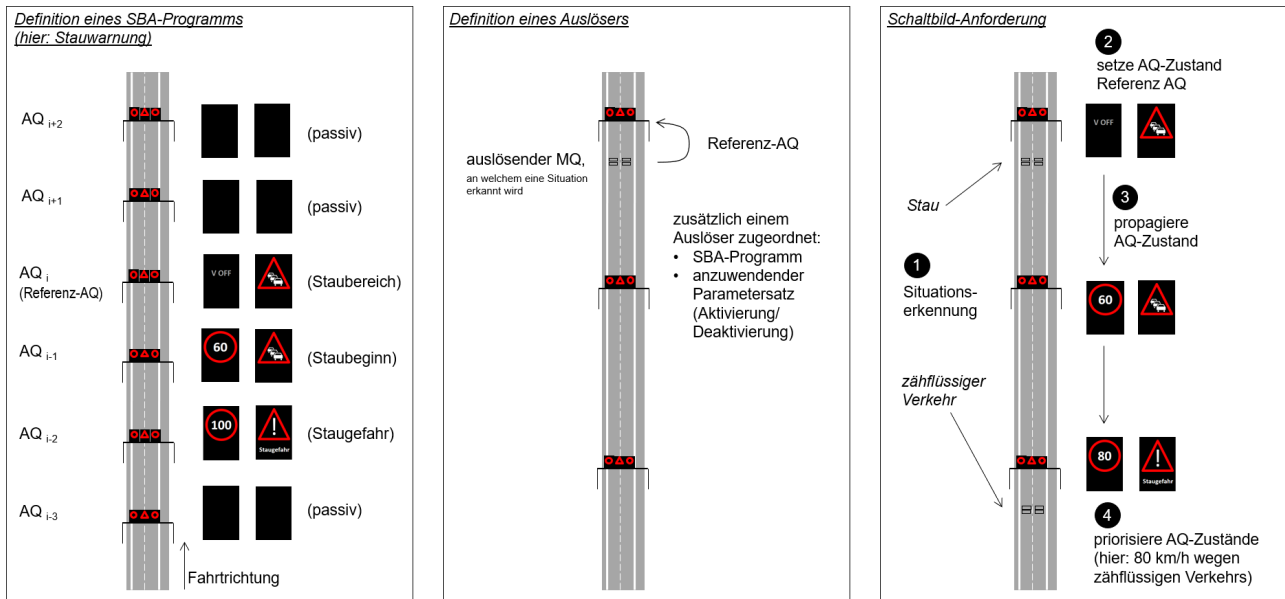


Abbildung 29: Konfiguration des SBA-Simulationsmoduls für SUMO

7.3 Anpassung der Topologie des Inferenzmodells

Ausgangspunkt für die Anpassung der Topologie des Inferenzmodells ist das in Abschnitt 4.3.4 vorgestellte initiale hybride Bayessche Netz (BN), das eine sehr umfassende Menge an Knoten und Kanten enthält. Um den Aufwand zur Kalibrierung des Modells zu begrenzen und eine effiziente Anwendung zu ermöglichen, muss die Komplexität des Modells reduziert werden, indem redundante Zustände und Zusammenhänge entfernt werden.

Das hybride BN wird durch wertdiskrete und wertkontinuierliche Zufallsvariablen (Knoten) gebildet. Es wird angenommen, dass die wertkontinuierlichen Zufallsvariablen normalverteilt sind und die dazwischen liegenden Kanten lineare Zusammenhänge abbilden. Somit werden die wertkontinuierlichen Knoten in einem linearen Gaußschen BN (GBN) zusammengefasst (vgl. Abschnitt 4.3.3). Dieses wiederum besteht aus drei Schichten, d. h. drei disjunkten Mengen an Knoten:

- $\mathbf{X}_s^k = \{q, q_{Lkw}, v_s\}$ (Verkehrssituation, Teil der Fahrsituation)
- \mathbf{X}_b (Fahrverhalten)
- \mathbf{X}_p (Fahrpräferenzen, d. h. Parameter der Fahrverhaltensmodelle)

Die in Abschnitt 6 vorgestellten Untersuchungen zeigten, dass nur ein Teil der Knoten in \mathbf{X}_b und \mathbf{X}_p sowie der Kanten des GBN tatsächlich erforderlich und geeignet ist, um die Zusammenhänge zwischen Fahrsituation, -verhalten und -präferenzen abzubilden. Daher wurden solche Knoten (Zufallsvariablen) des initialen GBN entfernt,

- die redundant zu anderen Knoten der gleichen Schicht sind,
- die insgesamt eine sehr starke Streuung (Varianz) aufweisen oder
- die insgesamt nur wenig durch vorhergehende Knoten beeinflusst werden.

Wird ein Knoten entfernt, werden auch alle ein- oder ausgehenden Kanten entfernt. Außerdem werden weitere Kanten des GBN entfernt,

- wenn kein kausaler Zusammenhang und auch keine hinreichende Korrelation zwischen den durch die Kante verbundenen Zuständen besteht,
- wenn der abgebildete Zusammenhang zu sensitiv gegenüber geringfügigen Änderungen der äußeren Randbedingungen (z. B. Zustände der diskreten Knoten) ist,
- wenn der abgebildete Zusammenhang nicht zumindest über einen im Situationskontext relevanten Wertebereich der betroffenen Zustandsmerkmale linear ist oder
- wenn bei der Ermittlung des linearen Zusammenhangs durch lineare Regression die Residuen stark von einer Normalverteilung abweichen.

Im ersten Schritt wurden auf Grundlage der Untersuchungen in Abschnitt 6.2 ausgewählte Knoten der Menge \mathbf{X}_b sowie Einflüsse der Verkehrssituation auf Knoten in \mathbf{X}_b entfernt. Im zweiten Schritt wurden mithilfe der in Abschnitt 6.3 dargestellten Erkenntnisse Knoten der Menge \mathbf{X}_p (Simulationsparameter) entfernt, die keinen signifikanten Einfluss auf das in der Simulation resultierende Fahrverhalten haben.

Abbildung 30 zeigt das als Ergebnis dieses Prozesses entstandene hybride BN. Die Mengen \mathbf{X}_b und \mathbf{X}_p umfassen nunmehr noch folgende Zustandsmerkmale (Knoten)⁵⁴:

$$\mathbf{X}_b = \{v_b, \hat{v}_{\text{desired}}, h, cibtr, \delta_q, \varepsilon_q\} \quad (20)$$

$$\mathbf{X}_p = \begin{cases} \{v_{\text{max}}, \alpha, h_{\text{min}}\} & \text{für aimsun.next} \\ \{v_{\text{max}}\} & \text{für SUMO} \end{cases} \quad (21)$$

Zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens wurde die Schätzung der Wunschgeschwindigkeit \hat{v}_{desired} als zusätzlicher Knoten in \mathbf{X}_b aufgenommen. Dieser fasst die Fahrgeschwindigkeiten und Anteile durch Vorfahrende beeinflusster und unbeeinflusster Fahrzeuge zu einer Kenngröße zusammen. Dies wird in Abschnitt 7.4.2 näher beschrieben.

Hinsichtlich des Abstandsverhaltens wurde die Auffahrzeit (TTC) entfernt, da diese Kenngröße insgesamt einer sehr starken Varianz unterliegt und hierdurch Einflüsse der SBA-Steuerung oder auch der Verkehrssituation kaum ein signifikantes Ausmaß annehmen können. Außerdem können Zusammenhänge zwischen TTC und Verkehrssituation nicht als näherungsweise linear angesehen werden. Unter den SSM eignet sich das CIBTR in besonderem Maße zur Berücksichtigung in einem GBN, weil es im Gegensatz zum IBTR, PBTR und CPBTR einen unbeschränkten Wertebereich aufweist. Einflüsse von Anzeigezustand und Verkehrssituation können somit auch im Bereich sicheren Fahrzeugfolgeverhaltens ($cibtr < 0$) erfasst werden. Die Nettozeitlücke h und die Kenngrößen der Fahrstreifenaufteilung wurden ebenfalls in der Menge \mathbf{X}_b belassen. Sie dienen der Diagnose und Validierung, haben jedoch keine Verbindung zu den Fahrpräferenzen (\mathbf{X}_p).

⁵⁴ Im Bericht des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB [87] ist die Menge der in der finalen Modelltopologie verbleibenden Knoten abweichend dargestellt. Unter anderem wurden bestimmte Merkmale für Pkw-ähnliche und Lkw-ähnliche Fahrzeuge als separate Knoten benannt; hier sind diese zu einem Knoten zusammengefasst, der jedoch von einem diskreten Zustandsmerkmal (FFE-Typ) abhängt. Dies trägt zur Erweiterbarkeit des Modells bei, da so diese Merkmale auch für zukünftig ergänzte FFE-Typen versorgt werden können.

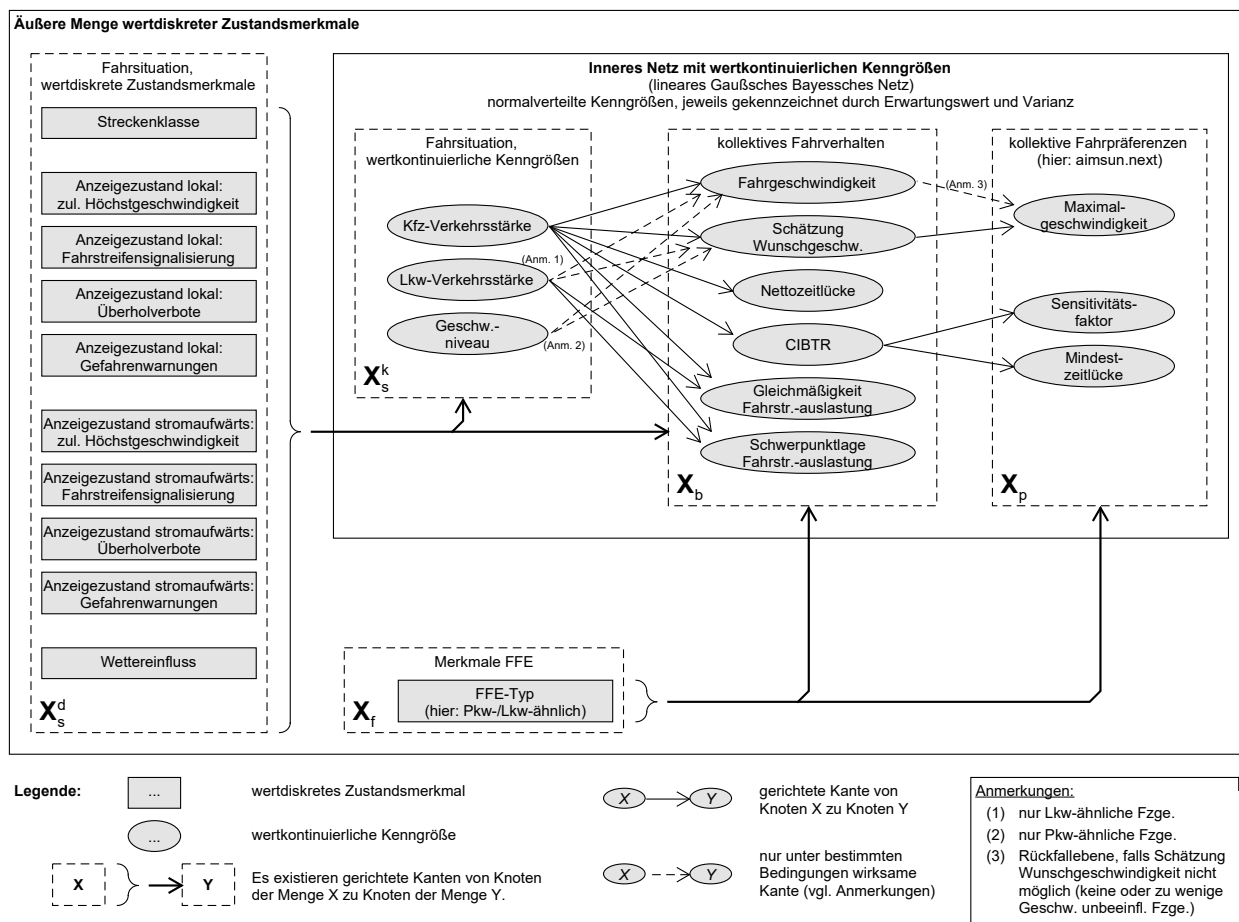


Abbildung 30: Struktur des Inferenzmodells nach Anpassung der Modelltopologie (in modifizierter Form vorab veröffentlicht im Projektbericht des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB [87])

Bei der Kenngröße CIBTR ist zu beachten, dass die zu ihrer Berechnung verwendeten Parameter stets einheitlich (situationsinvariant) gewählt werden müssen, da sonst die Fahrverhaltensparameter (Fahrpräferenzen) nicht mehr nur vom empirischen Fahrverhalten abhängen. Einer der Parameter, die angenommene Verzögerung des Vorausfahrenden, müsste jedoch an die vorherrschenden Fahrbahnverhältnisse angepasst werden [123] [113]. Hierauf konnte verzichtet werden, weil im Rahmen dieser Arbeit nur Situationen mit trockener Fahrbahn betrachtet werden. Es wurden einheitlich die in Abschnitt 5.1.2 spezifizieren Parameter verwendet.

Der Parameter f_{compl} als Befolgungsgrad der zulässigen Höchstgeschwindigkeit kann aufgrund der in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Problematik veränderlicher streckenbezogener Ge- und Verbote grundsätzlich nicht verwendet werden. Die Geschwindigkeit wird lediglich durch die fahrzeugspezifische Maximalgeschwindigkeit v_{max} beeinflusst. Diese wiederum hängt unmittelbar von der Schätzung der Wunschgeschwindigkeit \hat{v}_{desired} ab.

In aimsun.next haben die Wunschbeschleunigung und -verzögerung keinen signifikanten Einfluss auf das Fahrverhalten, sodass auch umgekehrt die Ableitung dieser Parameter aus dem Fahrverhalten nicht

sinnvoll ist. Daher wurden auch diese Knoten entfernt. Der Mindestabstand im Stillstand g_{\min} hat im fließenden Verkehr ebenfalls kaum Einfluss⁵⁵ und wurde daher ebenfalls entfernt. Da der Sensitivitätsfaktor α und in geringerem Maße auch die Mindestzeitlücke h_{\min} einen Einfluss auf die Kenngröße CIBTR haben, wurden diese Parameter als Knoten belassen.

In SUMO wurde auf eine Beeinflussung des Abstandsverhaltens in Abhängigkeit der Fahrsituation vorerst verzichtet. Zwar wurde ein erheblicher Einfluss des Sensitivitätsfaktors (hier: Ersatzwert $\hat{\alpha}$ gemäß Gleichung 19 auf Seite 114) auf die Kenngröße CIBTR festgestellt. Allerdings kann das Fahrverhalten lediglich mit $\hat{\alpha} > 1$ zugunsten größerer Abstände beeinflusst werden; $\hat{\alpha} < 1$ führen dagegen nicht zu einer riskanteren Abstandswahl. Außerdem wurde ein Einfluss der Mindestzeitlücke (τ) und des Einflussfaktors Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (σ) festgestellt, die jedoch deutlich schwächer ausgeprägt sind. Eine Anpassung des Sensitivitätsfaktors sowie der Mindestzeitlücke in Richtung defensiveren Abstandsverhaltens kann unrealistische Verkehrszusammenbrüche hervorrufen. Aus diesen Gründen wurde in SUMO lediglich eine Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl in Abhängigkeit der Fahrsituation umgesetzt. Die Beeinflussung des Abstandsverhaltens wurde somit ausschließlich mit `aimsun.next` erprobt.

7.4 Kalibrieren des Inferenzmodells

Das in Abschnitt 4.3 vorgestellte Inferenzmodell ist ein hybrides Bayessches Netz (BN), das sowohl wertdiskrete als auch wertkontinuierliche Knoten (Zufallsvariablen) enthält. Hierbei ist das BN so aufgebaut, dass wertdiskrete Knoten zwar Elternknoten wertkontinuierlicher Knoten sein können, jedoch nicht umgekehrt (vgl. Abbildung 10 auf Seite 79). Somit lässt sich das BN in ein inneres Netz wertkontinuierlicher Knoten und eine äußere Menge wertdiskreter Knoten unterteilen. Der mit dem äußeren Netz verbundene Teil des inneren Netzes muss dann separat für jede relevante Zustandskombination der äußeren Knoten betrachtet und kalibriert werden [11].

Das innere Netz mit ausschließlich wertkontinuierlichen Knoten wurde als lineares Gaußsches BN (GBN) realisiert. Parameter eines linearen GBN sind je Knoten und mit diesem jeweils verknüpfter Zufallsvariable (vgl. Anhang B.3)

- die Nullstelle und Anstiegskoeffizienten (slopes) der linearen Funktion, welche den Erwartungswert der Zufallsvariablen in Abhängigkeit von den Elternknoten beschreibt, und
- die Varianz (oder Standardabweichung) der Zufallsvariable.

Die Varianz bzw. Standardabweichung wird hierbei als feste, vom Zustand der Elternknoten unabhängige Eigenschaft der entsprechenden Zufallsvariable konfiguriert. Besitzt ein Knoten keine Elternknoten (hier: zumindest keine wertkontinuierlichen Elternknoten innerhalb des GBN), werden die Erwartungswerte der Zufallsvariablen als Randwahrscheinlichkeiten festgelegt.

Die vorgenannten Parameter können sowohl datengestützt durch ein Trainingsverfahren als auch händisch (z. B. durch Expertenschätzung) versorgt werden. Insbesondere kann ein BN auch in einem mehrstufigen Prozess kalibriert werden, in welchem in jeder Stufe nur ein Teil der Knoten berücksichtigt wird. Das hier beschriebene BN wurde in einem zweistufigen Prozess kalibriert: Zunächst wurden Zusammenhänge zwischen Fahrsituation ($\mathbf{X}_s^d, \mathbf{X}_s^k$) und Fahrverhalten (\mathbf{X}_b) auf Grundlage

⁵⁵ Vgl. Gleichung 26 in Anhang A.1: Bei im fließenden Verkehr typischen Fahrzeugfolgeabständen g wird der hiervon zu subtrahierende Mindestabstand im Stillstand g_{\min} (typischerweise 2 m) vernachlässigbar gering ($g_{\min} \ll g$).

der Daten der Referenzstrecken bestimmt (vgl. Abschnitt 7.4.1). Abschnitt 7.4.2 beschreibt ein vereinfachtes Verfahren zur Schätzung situationsspezifischer Wunschgeschwindigkeitsverteilungen als Teil dieses Kalibrierungsschrittes. Die Zusammenhänge zwischen Fahrverhalten und Fahrpräferenzen (\mathbf{X}_p) wurden auf Grundlage der in Abschnitt 6.3 vorgestellten Untersuchung in den GBN versorgt (vgl. Abschnitt 7.4.3).

7.4.1 Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten

Wie zuvor geschildert, erfolgte die Kalibrierung der inneren GBN separat für ausgewählte Zustandskombinationen der äußeren wertdiskreten Knoten in \mathbf{X}_s^d , welche die Fahrsituation beschreiben. Für jede Instanz des GBN wurden

- die Randwahrscheinlichkeitsverteilungen der Knoten in \mathbf{X}_s^k (Verkehrssituation) sowie
- die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Knoten in \mathbf{X}_b (Fahrverhalten) in Abhängigkeit von der Verkehrssituation

in einem automatisierten Prozess so bestimmt, dass eine möglichst gute Übereinstimmung mit den empirischen Daten der Referenzstrecken erreicht wird. Die Kalibrierung erfolgte ferner separat je Referenzstrecke und Fahrtrichtung, da diese unterschiedliche verkehrliche Charakteristika aufweisen. Da es sich bei dem inneren GBN um ein lineares GBN handelt, lassen sich die Erwartungswerte der abhängigen Zufallsvariablen aus \mathbf{X}_b als lineare Funktion in Abhängigkeit der Zustände der Elternknoten beschreiben. Im Rahmen der Kalibrierung sind u. a. die Nullstellen und Anstiegskoeffizienten dieser linearen Funktionen festzulegen.

Nicht alle kombinatorisch möglichen Zustandskonstellationen der Knoten in \mathbf{X}_s^d sind gleichermaßen praxisrelevant. Im Vorfeld wurden Kombinationen von Anzeigezuständen (lokal und stromaufwärts) als relevant identifiziert, die folgende Bedingungen erfüllen [87]:

- Die Kombination aus Geschwindigkeitsvorgabe und Gefahrenwarnung innerhalb eines einzelnen AQ (lokal oder stromaufwärts) muss verträglich und in der empirischen Datengrundlage hinreichend häufig vorzufinden sein. Dabei wird z. B. berücksichtigt, dass die Absicherung von Gefahrenstellen i. d. R. mit einer erheblich verringerten zulässigen Höchstgeschwindigkeit einhergeht.
- Die Kombination der Anzeigezustände zwischen stromaufwärtigem und lokalem AQ muss zulässig sein, auch unter Berücksichtigung maximaler Unterschiede der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten im Streckenverlauf (Längsabgleich: Geschwindigkeitstrichter).

Für die Anwendung im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB wurden gemäß dieser Kriterien 450 Zustandskombinationen als praxisrelevant ausgewählt, und zwar 225 Kombinationen von Anzeigezuständen jeweils für zwei- und dreistreifige Richtungsfahrbahnen. Dabei wurden nur Situationen ohne Wettereinfluss, ohne Warnung vor witterungsbedingten Gefahren und ohne Fahrstreifensperrungen einbezogen. Auf eine Differenzierung zwischen Situationen mit und ohne Lkw-Überholverbot wurde verzichtet. Es ist möglich, nachträglich zusätzliche Kombinationen von Anzeigezuständen einzubeziehen oder eine weitergehende Differenzierung der Fahrsituation vorzunehmen.

Anschließend wurde

- für jede dieser 450 Zustandskombinationen eine gesonderte Instanz des GBN erzeugt,
- der jeweiligen Zustandskombination zugeordnete Verkehrsdaten (sowohl Verkehrssituation als auch Verhalten) aus der annotierten Datenbasis (vgl. Abschnitt 5.1.5) abgerufen und
- die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Knoten in \mathbf{X}_s^k und \mathbf{X}_b mittels Maximum Likelihood Estimation bestimmt (MLE, vgl. Anhang B.3).

Die Bestimmung der Nullstelle und der Anstiegskoeffizienten für einen Knoten X_i entspricht dabei einer multiplen Regression (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.3) bezogen auf die Abbildung $(P_{i,1}, \dots, P_{i,n_{Pa,i}}) \mapsto \mu_i$ [143]. Hierbei ist μ_i der Erwartungswert der normalverteilten Zufallsvariable X_i und $(P_{i,1}, \dots, P_{i,n_{Pa,i}})$ sind die Zustände der Elternknoten von X_i .

7.4.2 Zusammenhänge mit Einfluss auf die Wunschgeschwindigkeit

Bei der im vorangegangenen Abschnitt 7.4.1 beschriebenen automatischen Kalibrierung kommt dem Zusammenhang zwischen Fahr- und Wunschgeschwindigkeiten eine besondere Bedeutung zu. Nachfolgend wird beschrieben, wie anhand individueller Fahrgeschwindigkeiten aus empirischen Einzelfahrzeugdaten eine Schätzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung vorgenommen wird. Da die Schätzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung die Verfügbarkeit lokaler Einzelfahrzeugdaten voraussetzt, wird zudem ein Ersatzverfahren als Rückfallebene vorgestellt.

Im Zuge der Anpassung der Modelltopologie (vgl. Abschnitt 7.3) wurde die Zufallsvariable \hat{v}_{desired} ergänzt, welche eine Schätzung der Wunschgeschwindigkeit auf Grundlage von Geschwindigkeiten und Anteilen durch vorausfahrende FFE beeinflusster sowie nicht beeinflusster Fahrzeuge darstellt. Diese Variable fasst verschiedene Kenngrößen des Geschwindigkeitsverhaltens zusammen und wird daher auch als Kenngröße zur Beschreibung des Fahrverhaltens angesehen. Sie wird jedoch unmittelbar auf die fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit als Merkmal der Fahrpräferenzen abgebildet.

Wie in Abschnitt 2.2.5 dargestellt, ist eine Schätzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung mit konventionellen Verfahren aufgrund der Vielzahl der zu unterscheidenden diskreten Situationen nicht mehr praktikabel. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb ein an Geistefeldt (2015a) [68] angelehntes, jedoch erheblich vereinfachtes Verfahren entwickelt, das ohne die Anwendung des Kaplan-Meier-Verfahrens auskommt. Dieses im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren wurde erstmals im Bericht des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB [87] (dort Abschnitt 4.3.3.3) beschrieben; die Beschreibung wird nachfolgend wiedergegeben.

Das Verfahren basiert ebenso wie der Ansatz nach Geistefeldt auf folgenden Annahmen:

- Durch vorausfahrende FFE unbeeinflusste Fahrzeuge fahren bereits mit ihrer Wunschgeschwindigkeit.
- Die Wunschgeschwindigkeit durch vorausfahrende FFE beeinflusster Fahrzeuge liegt oberhalb der für diese Fahrzeuge beobachteten Fahrgeschwindigkeit.

Eine FFE gilt als durch eine vorausfahrende FFE beeinflusst, wenn eine festgelegte Zeitlücke zu dieser unterschritten wird. In Abschnitt 5.1.2 werden die in dieser Arbeit verwendeten Kriterien zur Abgrenzung beeinflusster und unbeeinflusster Fahrzeuge genannt.

Die Differenz zwischen Wunsch- und Fahrgeschwindigkeiten beeinflusster Fahrzeuge wird nachfolgend mit $\Delta v_{\text{desired}}$ bezeichnet. Im Ansatz nach Geistefeldt stellt die Differenz $\Delta v_{\text{desired}}$ eine Zufallsgröße dar, deren Verteilung zu schätzen ist. An dieser Stelle wird vereinfachend unterstellt, dass diese Differenz für alle FFE eines Typs einheitlich ist.

Die geschätzte Wunschgeschwindigkeit einer individuellen FFE n ist somit

$$\hat{v}_{\text{desired},n} = \begin{cases} v_n & \text{wenn unbeeinflusst} \\ v_n + \Delta v_{\text{desired}} & \text{wenn beeinflusst} \end{cases} \quad (22)$$

Der Erwartungswert der Zufallsvariable \hat{v}_{desired} wird als arithmetisches Mittel über die individuellen $\hat{v}_{\text{desired},n}$ aller FFE berechnet, die innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls an einem Messquerschnitt erfasst wurden.

Die Differenz $\Delta v_{\text{desired}}$ ist konfigurierbar und wurde mit 15 km/h für Pkw-ähnliche bzw. 5 km/h für Lkw-ähnliche Fahrzeuge festgelegt. Bei geringen bis mittleren Verkehrsstärken hat die Wahl des festen Wertes für $\Delta v_{\text{desired}}$ nur geringe Auswirkungen auf die mittlere geschätzte Wunschgeschwindigkeit, da noch eine gewisse Anzahl unbeeinflusster Fahrzeuge vorzufinden ist. Mit wachsender Verkehrsstärke wird die Schätzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung unsicherer und stärker von der Wahl des Parameters $\Delta v_{\text{desired}}$ abhängig. Dies ist jedoch unkritisch, da in diesen Situationen FFE in der Simulation ebenfalls selten ihre Wunschgeschwindigkeit erreichen können.

Können die Wunschgeschwindigkeiten auf diese Weise geschätzt werden, so werden die Zusammenhänge zwischen der Fahr situation und den geschätzten Wunschgeschwindigkeiten wie in Abschnitt 7.4.1 beschrieben automatisiert mittels MLE für die 450 als praxisrelevant ermittelten Situationen bestimmt. Die Verteilung der fahrzeugspezifischen Maximalgeschwindigkeit v_{max} wird dann mit der geschätzten Wunschgeschwindigkeitsverteilung gleichgesetzt, d. h. $v_{\text{max}}(\hat{v}_{\text{desired}}) \equiv \hat{v}_{\text{desired}}$.

Auf der Referenzstrecke A57 standen lokale Einzelfahrzeugdaten nur in einem sehr begrenzten Umfang zur Verfügung, sodass eine Abgrenzung zwischen unbeeinflussten und beeinflussten Fahrzeugen in vielen Situationen nicht möglich war. Für die A57 wurde daher ersatzweise folgender Zusammenhang verwendet:

$$v_{\text{max}} = \begin{cases} 0,2 \cdot q \cdot \frac{\text{km} \cdot \text{min}}{\text{Kfz} \cdot \text{h}} + v_b & \text{wenn } z_{\text{FFE}} = \text{Pkw-ähnlich} \\ 5 \text{ km/h} + 0,95v_b & \text{wenn } z_{\text{FFE}} = \text{Lkw-ähnlich} \end{cases} \quad (23)$$

Hierbei beziehen sich sowohl die FFE-spezifische Maximalgeschwindigkeit v_{max} als auch die Fahrgeschwindigkeit v_b als Teil des Fahrverhaltens auf FFE des jeweiligen Typs (Pkw- oder Lkw-ähnlich). Die Gesamtverkehrsstärke q sei in Kfz/min angegeben; der Summand wird jedoch in die Einheit km/h überführt. Für Pkw lässt sich auf diese Weise nachbilden, dass bei geringen Verkehrsstärken Fahrzeuge vermehrt unbeeinflusst und damit mit ihrer jeweiligen Wunschgeschwindigkeit fahren können, während mit wachsender Verkehrsstärke die Wunschgeschwindigkeit zunehmend oberhalb der Fahrgeschwindigkeit liegt. Dieser Zusammenhang ist in der Realität nicht unbedingt linear, dies wird hier jedoch vereinfachend angenommen. Die Funktion der Lkw-Wunschgeschwindigkeiten wurde so gewählt, dass sie stets ein wenig oberhalb der situationsspezifisch beobachteten Lkw-Fahrgeschwindig-

keiten liegen, jedoch bei 100 km/h Wunschgeschwindigkeit und Fahrgeschwindigkeit einander entsprechen.

Bei der Abfrage (Inferenz) der Wunschgeschwindigkeiten wird sichergestellt, dass diese plausibel und zwischen den FFE-Typen konsistent sind. Konkret wird sichergestellt, dass der Erwartungswert einer Wunschgeschwindigkeitsverteilung stets mindestens 70 km/h beträgt sowie einen Wert von 150 km/h (Pkw) bzw. 110 km/h (Lkw) nicht übersteigt. Diese Grenzwerte sind konfigurierbar. Auch muss die Wunschgeschwindigkeit von Pkw stets mindestens so hoch sein wie die Wunschgeschwindigkeit der Lkw in der gleichen Situation, andernfalls wird sie auf diesen Wert angehoben. Diese Einschränkungen betreffen lediglich die Erwartungswerte der zufälligen Verteilungen über alle FFE eines Typs; Wunschgeschwindigkeiten individueller FFE unterliegen anderen (weiter gefassten) Wertebereichen.

7.4.3 Zusammenhänge zwischen Abstandsverhalten und Abstandspräferenzen

Die Zusammenhänge zwischen Fahrverhalten und Fahrpräferenzen wurden manuell auf Grundlage der in Abschnitt 6.3 vorgestellten Untersuchungen zu Einflüssen einzelner Parameter des Fahrzeugfolge-modells auf das Fahrverhalten festgelegt. Hierbei wurde auch mittels linearer Regression ein entsprechender funktionaler Zusammenhang bestimmt. Vorgehensweise und Ergebnisse werden bereits im Bericht des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB [87] (dort Abschnitt 4.3.3.4 sowie Anhang 5) beschrieben; die Beschreibung wird nachfolgend wiedergegeben, wobei die Vorgehensweise detaillierter begründet wird.

Im Rahmen der vorgenannten Untersuchung wurde festgestellt, dass das Abstandsverhalten in aimsun.next maßgeblich durch den Sensitivitätsfaktor α und die Mindestzeitlücke h_{\min} beeinflusst wird. Eine Variation dieser Parameter wirkt sich auf das Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR) aus. Für SUMO wurde dagegen auf eine Beeinflussung des Abstandsverhaltens vorerst verzichtet (vgl. Abschnitt 7.3). Zwar wurde ein erheblicher Einfluss des Sensitivitätsfaktors (hier: Ersatzwert $\hat{\alpha}$ gemäß Gleichung 19 auf Seite 114) auf die Kenngröße CIBTR festgestellt. Allerdings kann das Fahrverhalten lediglich mit $\hat{\alpha} > 1$ zugunsten größerer Abstände beeinflusst werden; $\hat{\alpha} < 1$ führen dagegen nicht zu einer riskanteren Abstandswahl. Eine Anpassung des Sensitivitätsfaktors sowie auch der Mindestzeitlücke (in SUMO: τ) in Richtung defensiveren Abstandsverhaltens kann zudem unrealistische Verkehrszusammenbrüche hervorrufen. Daher beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen auf die Anpassung des Abstandsverhaltens in aimsun.next und im darin verankerten Fahrzeugfolgemodell nach Gipps.

Gegenstand vorgenannter Untersuchung waren die Einflüsse der Fahrverhaltensparameter (Fahrpräferenzen) auf das Fahrverhalten. Für die Kalibrierung des GBN werden die jeweils umgekehrten Zusammenhänge benötigt, d. h. die Fahrpräferenzen in Abhängigkeit vom Fahrverhalten. Für aimsun.next sind dies die linearen Zusammenhänge

$\alpha(\text{cibtr})$ Sensitivitätsfaktor in Abhängigkeit vom CIBTR
 $h_{\min}(\text{cibtr})$ Mindestzeitlücke in Abhängigkeit vom CIBTR

Die Koeffizienten $\beta_{0,\alpha}$ (Nullstelle) und $\beta_{\text{CIBTR},\alpha}$ (Anstieg) der Funktion $\alpha(\text{cibtr}) = \beta_{0,\alpha} + \beta_{\text{CIBTR},\alpha} \cdot \text{cibtr}$ wurden durch eine erneute lineare Regression bestimmt.

Für den Zusammenhang $h_{\min}(cibtr)$ wurden Nullstelle und Anstieg dagegen händisch festgelegt, wobei

- bei den im Realverkehr typischen CIBTR näherungsweise die Mindestzeitlücke aus der Grundkalibrierung erreicht wird sowie
- ein steigendes CIBTR, d. h. ein mit einer Fahrsituation assoziiertes erhöhtes Risiko eines Aufnahmefalles, zu einer Absenkung der Mindestzeitlücke führt.

Eine Festlegung mittels linearer Regression war für die Mindestzeitlücke nicht möglich, da die Regressionsfunktion eine sehr starke Steigung aufweisen würde, sodass bereits geringfügige Änderungen des CIBTR zu sehr unterschiedliche Mindestzeitlücken führten. Dies ist dadurch bedingt, dass der umgekehrte Einfluss der Mindestzeitlücken auf das CIBTR vergleichsweise schwach ausgeprägt ist (geringe Steigung). Der Zusammenhang soll dennoch berücksichtigt werden, da das Absenken der Mindestzeitlücke flankierend zur Anpassung des Sensitivitätsfaktors notwendig ist, um riskanteres Abstandsverhalten in Situationen mit hohem CIBTR überhaupt erst zu ermöglichen (vgl. Anhang A.1, Aktualisierung der Fahrgeschwindigkeit, Kriterium „Mindestzeitlücke“).

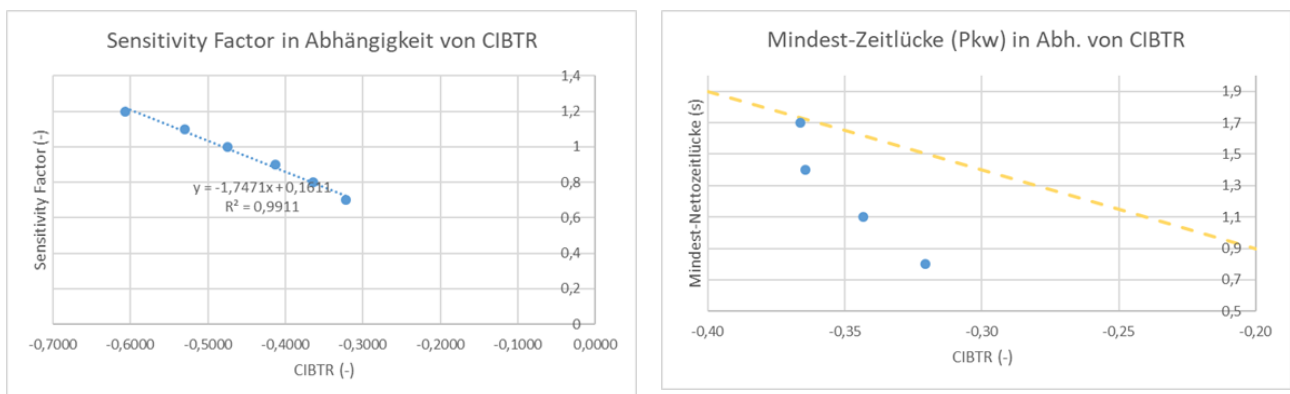
Es wird davon ausgegangen, dass die Zusammenhänge zwischen Parametern des Fahrzeugfolgmodells und dem Fahrverhalten nicht durch Anzeigezustände der SBA, sondern vielmehr durch Eigenschaften der Fahrverhaltensmodelle bestimmt werden. Die Wirkung der SBA beschränkt sich auf das Fahrverhalten sowie die Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten. Die Zusammenhänge $\alpha(cibtr)$ und $h_{\min}(cibtr)$ werden daher einheitlich für alle 225 als relevant identifizierten Kombinationen von Anzeigezuständen (vgl. Abschnitt 7.4.1) konfiguriert. Jedoch erfolgte die Konfiguration separat für zwei- und dreistreifige Richtungsquerschnitte, da in den Untersuchungen zu Einflüssen der Parameter unterschiedliche Ausprägungen dieser Zusammenhänge festgestellt wurden. Die Verteilung der Mindestzeitlücken wird in der Grundkalibrierung zudem unterschiedlich für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge angegeben. Daher wird auch der Zusammenhang $h_{\min}(cibtr)$ gesondert für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge spezifiziert.

Die Parameter Sensitivitätsfaktor und Mindestzeitlücke werden als normalverteilte Zufallsgrößen (Verteilung über das FFE-Kollektiv) angesehen. Die Funktionen $\alpha(cibtr)$ und $h_{\min}(cibtr)$ beziehen sich auf die Mittelwerte dieser Zufallsverteilungen. Die nicht vom Zustand der Elternknoten abhängigen Standardabweichungen der Mindestzeitlücken Pkw- und Lkw-ähnlicher Fahrzeuge wurden aus der Grundkalibrierung (vgl. Abschnitt 7.1 und dort Tabelle 7) übernommen. Die Standardabweichung des Sensitivitätsfaktors wurde auf 0,05 festgelegt⁵⁶. Um unplausibles Fahrverhalten und unzulässige Parameterwerte zu vermeiden, wird der Wertebereich der Zufallsgrößen (zufällig bestimmte Einzelwerte) beschränkt, sodass die Parameterwerte gemäß einer abgeschnittenen Normalverteilung gewählt werden. Auch die Wertebereichsgrenzen wurden für die Mindestzeitlücken der Grundkalibrierung übernommen. Ähnlich wie bei der fahrzeugspezifischen Höchstgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 7.4.2) wird darüber hinaus auch der Wertebereich der Mittelwerte beschränkt, wobei hier die Wertebereichsgrenzen enger gefasst sein können als die der Einzelwerte, um Häufungen extrem hoher oder niedriger Werte zu vermeiden.

Die auf die vorgenannte Weise festgelegten linearen Zusammenhänge sowie Standardabweichungen und Wertebereichsgrenzen sind in *Tabelle 9* aufgeführt. *Abbildung 31* zeigt die Zusammenhänge $\alpha(cibtr)$ und $h_{\min}(cibtr)$ beispielhaft für Pkw-ähnliche Fahrzeuge auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen.

⁵⁶ In der Grundkalibrierung war für den Sensitivitätsfaktor keine Streuung über das FFE-Kollektiv vorgesehen.

Parameter	Randbedingungen	Verteilung $N(\mu, \sigma^2)$ mit ...			
		μ	σ	Min./Max. (Mittelwert)	Min./Max. (Einzelwert)
Sensitivitätsfaktor (α)	dreistreifig	$0,1611 - 1,7471 \cdot cibtr$	0,05	[0,8, 1,0]	[0,7, 1,0]
	zweistreifig	$0,6303 - 1,1145 \cdot cibtr$	0,05	[0,8, 1,0]	[0,7, 1,0]
Mindestzeitlücke (h_{\min})	dreistreifig				
	Pkw/Pkw1/Pkw2	$-0,1 - 5 \cdot cibtr$	0,7 s	[1,10, 1,55]	[0,8, 1,7]
	Lkw/Lkw1	$-0,4 - 5 \cdot cibtr$	0,5 s	[0,9, 1,3] s	[0,5, 3,1] s
	zweistreifig				
Pkw/Pkw1/Pkw2	$-0,2 - 5 \cdot cibtr$	0,7 s	[1,10, 1,55]	[0,8, 1,7]	
Lkw/Lkw1	$-0,5 - 5 \cdot cibtr$	0,5 s	[0,9, 1,3] s	[0,5, 3,1] s	

Tabelle 9: Zusammenhänge $\alpha(cibtr)$ und $h_{\min}(cibtr)$ [87]Abbildung 31: Zusammenhänge $\alpha(cibtr)$ und $h_{\min}(cibtr)$ (Pkw, dreistreifige Fahrbahn) [87]

7.5 Validierung

Im Rahmen der Validierung ist zu untersuchen, inwieweit mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren die wesentlichen makroskopischen Charakteristika der betrachteten Referenzstrecken sowie auch mikroskopische Merkmale des Fahrverhaltens (z. B. riskantes Abstandsverhalten) realistisch nachgebildet werden können. Die Vielzahl zu berücksichtigender Situationen (hier: Kombinationen aus Anzeigezuständen und Art des Richtungsquerschnitts) stellt für die Validierung des in dieser Arbeit entstandenen Verfahrens eine Herausforderung dar. Hinzu kommt, dass das Fahrverhalten in der Simulation einerseits durch die Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwahlmodelle und andererseits auch durch das Inferenzmodell beeinflusst werden, sodass die Ursache von Abweichungen zwischen Realität und Simulation nicht immer eindeutig zuordenbar sind. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine zweistufige Validierung vorgesehen:

1. Situationsübergreifende Validierung der Grundkalibrierung (vgl. Abschnitt 7.1) der Fahrverhaltensmodelle der Verkehrsflusssimulation mit Fokus auf die Nachbildung makroskopischer Eigenschaften der Referenzstrecken (z. B. Fundamentaldiagramm, Fahrstreifenaufteilung).
2. Situationsspezifische Validierung unter Berücksichtigung der durch das Inferenzmodell induzierten Einflüsse der SBA und mit Fokus auf Verteilungen von Kenngrößen des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens über das FFE-Kollektiv.

Entsprechend der Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation der FGSV [59] wurde für die Validierung eine Auswahl an Daten der Referenzstrecken verwendet, die nicht bereits für die Kalibrierung verwendet wurde. Es wurden Daten der Referenzstrecken verwendet, die dem jeweils für die Validierung gewählten Simulationsszenario entsprechen. Das Simulationsszenario der Referenzstrecke A92 bildet z. B. einen typischen Zeitraum im morgendlichen Berufsverkehr ab. Daher wurden auch bei der Abfrage zur Validierung zu verwendender Referenzdaten ausschließlich Zeiträume von montags bis donnerstags, jeweils zwischen 5:00 und 10:00 Uhr, berücksichtigt.

Situationsübergreifende Validierung

Für die Simulationssoftware aimsun.next wurde die situationsübergreifende Validierung (erster Validierungsschritt) im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB (wie auch bereits die Grundkalibrierung) für die Referenzstrecken A92 und A57 durch die Heusch/Boesefeldt GmbH durchgeführt. Vorgehensweise und Ergebnisse können dem Projektbericht [87] (dort Abschnitt 4.2.4) entnommen werden.

Für SUMO ordnete sich dieser erste Validierungsschritt in eine vergleichende Bewertung dreier Varianten der Kalibrierung aus der Literatur ein (vgl. Abschnitt 7.1), die am Beispiel der Referenzstrecke A92 durchgeführt wurde. Im Zuge dieser vergleichenden Untersuchung konnte nicht nur die Kalibrierungsvariante mit der besten Übereinstimmung mit der Realität ermittelt, sondern auch die verbleibenden Unterschiede zwischen Simulation und Realität bewertet werden. Ergebnisse aus diesem ersten Validierungsschritt für SUMO und die A92 sind beispielhaft in *Abbildung 32* und umfassender in Anhang F.1 wiedergegeben.

Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Im betrachteten Simulationsszenario (morgendlicher Berufsverkehr) traten in der Simulation nur vereinzelte und schwach ausgeprägte Verkehrszusammenbrüche auf (vgl. Abbildung 32, links). Auch in der Realität sind Verkehrszusammenbrüche in diesem Szenario selten. Wenn sie auftreten, werden sie oftmals durch Störungen stromabwärts des betrachteten Streckenabschnitts hervorgerufen, sodass dieses Ergebnis als Übereinstimmung mit der Realität eingeschätzt wird.
- Es werden in der Simulation ähnliche maximale Verkehrsstärken erreicht wie in der Realität. Die wenigen Verkehrszusammenbrüche in der Simulation treten in ähnlichen Verkehrsstärkebereichen auf wie in der Realität (vgl. ebenfalls Abbildung 32, links).
- Insgesamt wird eine gute Übereinstimmung der Fahrgeschwindigkeiten und Nettozeitlücken (vgl. Abbildung 32, rechts) im Verhältnis zur Verkehrsstärke erreicht.
- Auch die Fahrstreifenauslastung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke, bewertet mit den in Abschnitt 4.1.3 eingeführten Indikatoren *Gleichmäßigkeit* δ_q und *Schwerpunktlage* ε_q , wird realitätsgetreu nachgebildet (vgl. Abbildung 41 in Anhang F.1).

Ein weiteres Verbesserungspotenzial könnte darin bestehen, alle Fahrverhaltensparameter (nicht nur die fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit) als zufällig über das FFE-Kollektiv verteilte Größen abzubilden (wie z. B. in aimsun.next oder im Projekt TransAID). Die Untersuchungen zum Einfluss der Parameter des SUMO-Fahrzeugfolgmodells auf das Fahrverhalten (vgl. Abschnitt 6.3.3) zeigen jedoch, dass die Variation einzelner Parameter erheblichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs sowie auch auf Fahrstreifenwechsellvorgänge haben kann. Auch Wechselwirkungen bei gleichzeitiger Veränderung mehrerer Parameter sowie Einflüsse des Fahrstreifenwechselmodells sollten näher untersucht werden. Hierauf wurde jedoch an dieser Stelle verzichtet.

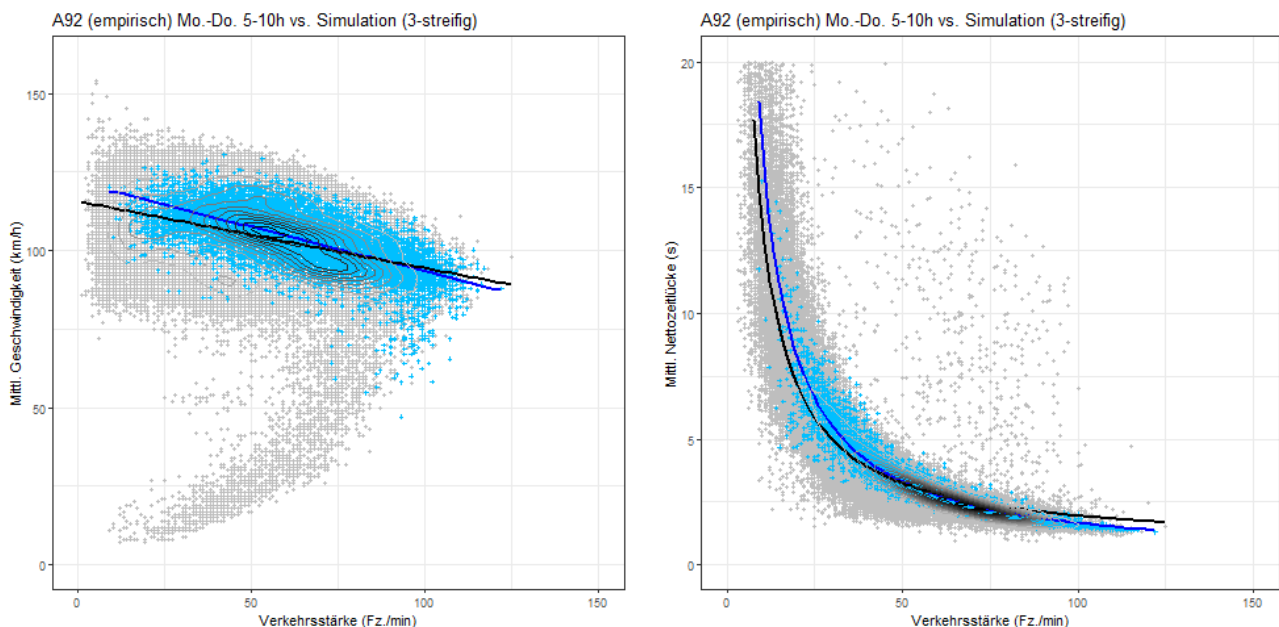


Abbildung 32: Ausgewählte Ergebnisse der situationsübergreifenden Validierung (SUMO, dreistreifige Fahrbahn). Empirische Daten sind in grau, Simulationsdaten in blau dargestellt.

Situationsspezifische Validierung

Ziel der situationsspezifischen Validierung war die Beurteilung, inwieweit mithilfe des Inferenzmodells im Zusammenspiel mit den Fahrverhaltensmodellen der Verkehrsflusssimulation ein in einer bestimmten Situation beobachtbares Fahrverhalten nachgebildet werden kann. Neben Fahrgeschwindigkeiten und der Fahrstreifenwahl wurde hierbei insbesondere auch das Abstandsverhalten und damit einhergehend die Ersatzkenngrößen zur Bewertung der Verkehrssicherheit (SSM) betrachtet. Die Bewertung erfolgt am Beispiel der Referenzstrecke A92, u. a. da nur dort Einzelfahrzeugdaten als Voraussetzung zur Berechnung bestimmter Fahrverhaltenskenngrößen in ausreichendem Umfang zur Verfügung standen. Außerdem erfolgte die Validierung aufgrund des erheblichen Aufwands zur Auswertung zunächst auf ausgewählte Fahrsituationen. Zudem werden nur Situationen mit stabilem Verkehrsfluss berücksichtigt, da im instabilen und gestauten Verkehr der Einfluss des Inferenzmodells begrenzt ist und das Fahrverhalten vielmehr unmittelbar durch die jeweils vorausfahrenden FFE bestimmt wird.

Für aimsun.next wurde eine erste Untersuchung zu Fahrverhaltenskenngrößen auf mikroskopischer Ebene im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB durchgeführt. Erkenntnisse aus dieser Untersuchung sind im Projektbericht (dort Abschnitt 4.3.4) enthalten und wurden um weitere Untersuchungen ergänzt. Eine ähnliche Bewertung wurde auch für SUMO durchgeführt, wobei u. a. die bereits in Abschnitt 7.1 beschriebene Visualisierung diverser Fahrverhaltenskenngrößen als Streudiagramme über die Verkehrsstärke herangezogen wurde (nun mit Beschränkung auf Daten des jeweils betrachteten Situationskontexts). Ergänzend hierzu wurde eine einheitliche Methodik zur Quantifizierung der systematischen und zufälligen Abweichungen zwischen Realität und Simulation entwickelt, die sowohl für aimsun.next als auch für SUMO anwendbar ist. Auf dieser Grundlage konnte differenziert bewertet werden, wie gut einzelne Kenngrößen des Fahrverhaltens nachgebildet werden können und ob diesbezüglich Unterschiede zwischen den betrachteten Fahrsituationen auftreten. Für die quantitative Erfassung der Abweichungen wurden folgende Arbeitsschritte in einem R-Skript implementiert und automatisiert für alle betrachteten Fahrsituationen und Fahrverhaltenskenngrößen ausgeführt:

1. Abfrage der zur betrachteten Fahrsituation zugehörigen Fahrverhaltenskenngrößen und zugehörigen Verkehrsstärken von der Referenzstrecke und aus der Simulation.
2. Entfernen von Datensätzen in zähflüssigem oder gestautem Verkehr (d. h. hier: mit Fahrgeschwindigkeiten unter 70 km/h).
3. Aufteilung der Datensätze auf Verkehrsstärkekassen (hier: Klassenbreite 2 Kfz/min je Fahrstreifen im Bereich von 0 bis 50 Kfz/min je Fahrstreifen).
4. Je Verkehrsstärkeklasse:
 - a) Berechnung der Anzahl der dieser Verkehrsstärkeklasse zugehörigen Datensätze der Realität und der Simulation.
 - b) Prüfung, ob diese Anzahl an Datensätzen ausreichend groß ist⁵⁷.
 - c) Wenn ja: Berechnung von Abweichung und Abweichungsbetrag zwischen Realität und Simulation (absolut und prozentual) bezogen auf Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen der betrachteten Kenngrößen.

⁵⁷ Um zu vermeiden, dass Abweichungen in für die betrachtete Fahrsituation untypischen Verkehrsstärkebereichen einfließen, wurde für solche Verkehrsstärkekassen auf eine Berechnung der Differenzen und Differenzbeträge verzichtet, die mit weniger 10% der im Mittel je Verkehrsstärkeklasse vorhandenen Datensätze besetzt sind. Mindestens jedoch müssen 30 Datensätze zur Verfügung stehen.

5. Berechnung gewichteter mittlerer Abweichungen und Abweichungsbeträge über alle Verkehrsstärkeklassen. Als Gewichte werden die Anzahlen an Datensätzen der Referenzstrecken (Realität) der einzelnen Verkehrsstärkeklassen verwendet.
6. Ausgabe der Ergebnisse als CSV-Datei bzw. als Streudiagramme je Kenngröße.

Diese Vorgehensweise ermöglicht eine differenzierte Beurteilung, wie realistisch das Fahrverhalten in einer bestimmten Fahrsituation (auch in Abhängigkeit der Verkehrsbedingungen) nachgebildet werden kann. Die Ergebnisse dieser situationsspezifischen Validierung sind beispielhaft in *Abbildung 33* sowie detailliert in Anhang F.2 wiedergegeben. Die wichtigsten Erkenntnisse sind⁵⁸:

- Fahrgeschwindigkeiten und Nettozeitlücken sowie ihre Entwicklung in Abhängigkeit zur Verkehrsstärke konnten in beiden Simulationsumgebungen (aimsun.next und SUMO) auch in den einzelnen betrachteten Fahrsituationen im Wesentlichen realitätsgetreu nachgebildet werden.
- Die Auffahrzeiten (TTC) lagen in der Simulation überwiegend über den in der Realität beobachteten Werten, d. h. das Fahrzeugfolgeverhalten in der Simulation ist tendenziell weniger riskant als in der Realität. Die Abweichungen sind in SUMO etwas stärker ausgeprägt als in aimsun.next; hierbei ist jedoch zu beachten, dass in SUMO auf Maßnahmen zur Erreichung riskanten Fahrverhaltens, etwa durch Induzieren von Wahrnehmungsfehlern, verzichtet wurde (vgl. Abschnitt 7.3).
- Die Risikoindikatoren CIBTR, IBTR und PBTR sind in der Simulation überwiegend niedriger als in der Realität, was ebenfalls auf ein in der Simulation sichereres Fahrzeugfolgeverhalten schließen lässt. Für CIBTR können jedoch in beiden Simulationsumgebungen in einzelnen Situationen gute Übereinstimmungen mit der Realität verzeichnet werden.
- Abweichungen der IBTR und PBTR zwischen Simulation und Realität wachsen zumeist mit steigender Verkehrsstärke an. Demgegenüber sind Abweichungen der Kenngröße CIBTR kaum abhängig von der Verkehrsstärke.

In einer ersten Untersuchung mit aimsun.next wurde festgestellt, dass minütlich aggregierte TTC in der Simulation deutlich über denen in der Realität liegen [87]. Dieses Problem konnte auf extrem hohe Einzelwerte in der Simulation durch sehr geringe Geschwindigkeitsdifferenzen zurückgeführt werden⁵⁹. Die Aggregation der TTC in der Simulation wurde dahingehend angepasst, dass nur noch Einzelwerte bis 200 s einbezogen werden (auch für SUMO).

Das in der Simulation weniger riskante Fahrverhalten im Vergleich zur Realität lässt sich teilweise durch das Kriterium der sicheren Fahrzeugfolge erklären, das in beiden Fahrzeugfolgmodellen zur Anwendung kommt (vgl. Anhang A). In aimsun.next konnte riskantes Fahrverhalten bis zu einem gewissen Grad durch Verringerung des Sensitivitätsfaktors (verbunden mit einer Absenkung der Mindestzeitlücke) erreicht werden; in SUMO wurde auf die Realisierung einer riskanteren Abstandwahl bislang verzichtet. Durch eine weitere Absenkung des Sensitivitätsfaktors und der Mindestzeitlücken in aimsun.next bzw. durch Induzieren von Wahrnehmungsfehlern in SUMO (Driver State Devices) könnte riskantes Abstandsverhalten noch realistischer nachgebildet werden. Jedoch müssten hierzu Wechselwirkungen mit anderen Parametern untersucht werden, um zu vermeiden, dass makroskopische Eigenschaften des Streckenabschnitts oder andere Merkmale des Fahrverhaltens hierdurch weniger realitätsgetreu nachgebildet werden.

⁵⁸ Ein Teil der Validierungsergebnisse für aimsun.next sind bereits im Bericht zum Projekt FE 03.0538/2015/IGB [87] angegeben (dort Abschnitt 4.3.4). ⁵⁹ Da Geschwindigkeiten im realen Verkehrssystem nach TLS mit einer Genauigkeit von 1 km/h angegeben werden, treten Geschwindigkeitsunterschiede von unter 1 km/h nur in der Simulation auf.

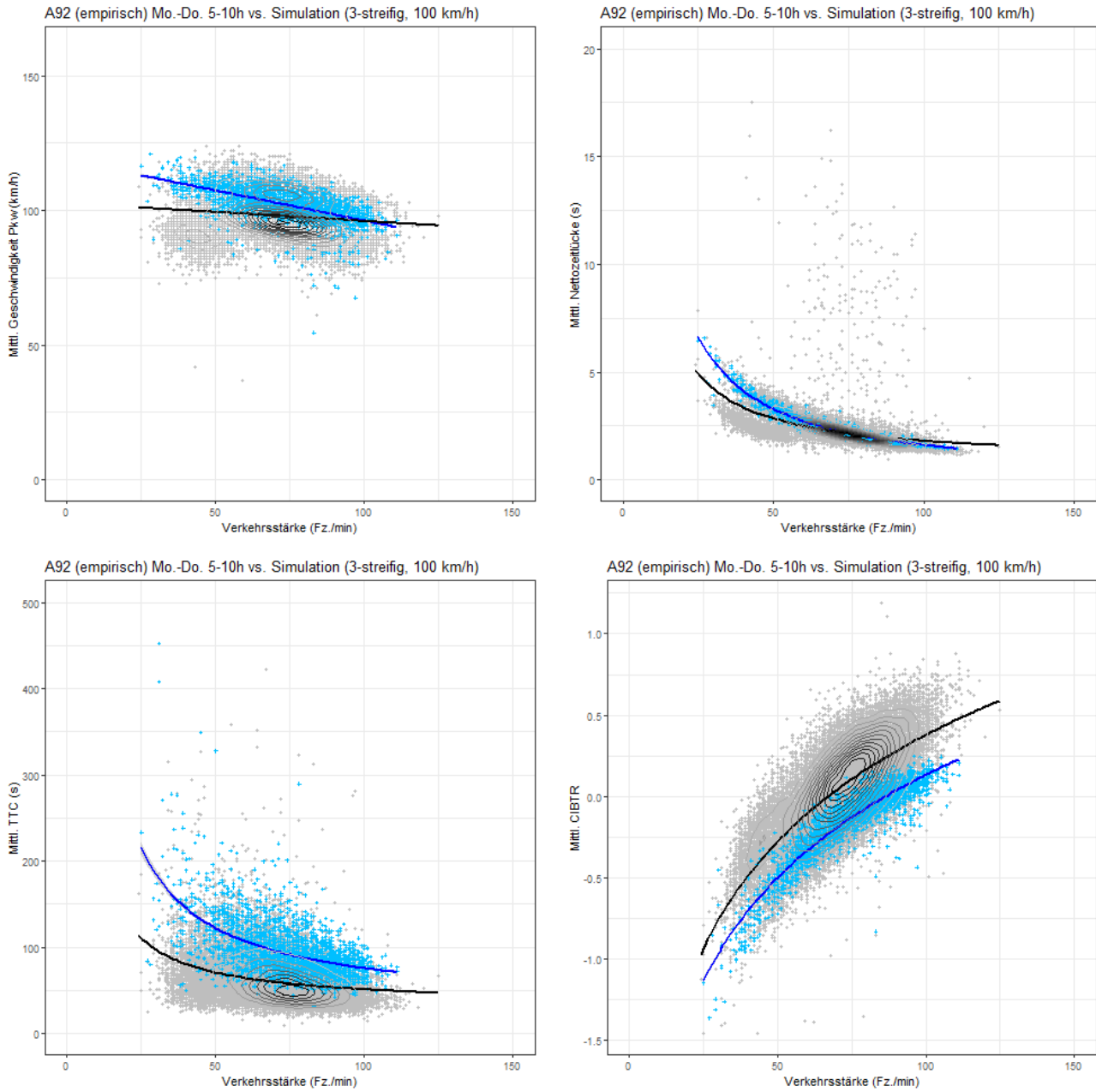


Abbildung 33: Ausgewählte Ergebnisse der situationspezifischen Validierung (SUMO, dreistreifige Fahrbahn, zulässige Höchstgeschwindigkeit 100 km/h ohne Gefahrenwarnung). Empirische Daten sind in grau, Simulationsdaten in blau dargestellt.

8 Anwendungspotenziale und -szenarien

Das in dieser Arbeit entstandene Verfahren zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation kann sowohl in wissenschaftlichen als auch in praxisbezogenen Anwendungsszenarien zum Einsatz kommen. Diese werden in Abschnitt 8.1 kurz skizziert. Im Rahmen des von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragten Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB wurde das Verfahren zur Bewertung der Einflüsse automatisierter Fahrzeuge auf Wirkung und Wirksamkeit von SBA pilothaft eingesetzt und erprobt. In Abschnitt 8.2 wird kurz auf die Ziele dieses Projekts sowie auf die Anwendung des Verfahrens eingegangen. Abschließend werden in Abschnitt 8.3 Einsatzgrenzen und Erweiterungspotenziale des Verfahrens diskutiert, die sich aus der ersten pilothaften Anwendung sowie auch im Rahmen der Untersuchungen (Abschnitt 6) und der Konfiguration, Kalibrierung und Validierung (Abschnitt 7) ergeben haben.

8.1 Anwendungsmöglichkeiten in Wissenschaft und Praxis

Das in Abschnitt 4 vorgestellte Verfahren zur situationsabhängigen Anpassung von Parametern der Verkehrsflusssimulation ermöglicht die differenzierte Nachbildung des Fahrverhaltens und Verkehrsgeschehens u. a. unter Berücksichtigung der Anzeigezustände einer SBA. Die in der Kalibrierung hergestellten Zusammenhänge zwischen Fahrsituation, Fahrverhalten und Fahrpräferenzen (hier: Parameter des Fahrzeugfolgemodells) spiegeln zunächst den Status Quo wider, d. h. die im Erfassungszeitraum der Kalibrierdaten beobachteten Wirkungen und Einflüsse auf das Fahrverhalten. Somit kann das gemäß Abschnitt 7 konfigurierte und kalibrierte Verfahren als Referenzszenario (Nullfall) für weitere simulative Untersuchungen verwendet werden. Ausgehend von diesem Referenzszenario können einzelne Randbedingungen verändert werden, um die Auswirkungen dieser Veränderungen zu analysieren. Eine Übersicht über Anwendungsszenarien des Verfahrens bietet *Abbildung 34*.

Die Anwendungsszenarien 1 und 2 sind für die *Konzeption und Planung baulicher Maßnahmen* auf Autobahnabschnitten mit SBA von Bedeutung, die der Verbesserung von Verkehrsfluss und -sicherheit dienen. Bei der A-Priori-Bewertung solcher Maßnahmen und bei der Gegenüberstellung entsprechender Realisierungsvarianten können die Einflüsse der SBA besser als in bisherigen Untersuchungen berücksichtigt werden. Zum Anwenderkreis gehören insbesondere Ingenieurbüros, die von den Straßenbau- oder -verkehrsbehörden mit der Durchführung entsprechender A-Priori-Untersuchungen beauftragt werden.

In Anwendungsszenario 3 steht die *Unterstützung des operativen Betriebs von SBA* einschließlich der Qualitätssicherung (QS) und kontinuierlichen Verbesserung der automatisierten SBA-Steuerung im Vordergrund. Für den operativen Betrieb der SBA sind die jeweils zuständigen Verkehrs- und Betriebszentralen verantwortlich. Sollen im Zuge einer QS-Maßnahme Änderungen an der SBA-Steuerung vorgenommen werden, müssen diese durch die zuständige Straßenverkehrsbehörde angeordnet werden. Änderungen an der SBA-Steuerung können auch unmittelbar von der Straßenverkehrsbehörde veranlasst werden. In jedem Falle ist es notwendig, die Auswirkungen einer QS-Maßnahme bzw. Änderung der SBA-Steuerung auf das Verkehrsgeschehen zu bewerten. Hierbei muss bestätigt werden, dass mit der Maßnahme bzw. Änderung tatsächlich die angestrebten Verbesserungen erreicht werden können und dass keine negativen Wirkungen auftreten. Ähnlich wie bei der Planung baulicher Veränderungen ist auch hier eine A-Priori-Abschätzung der Auswirkungen sinnvoll, damit etwaige negative Wirkungen erst gar nicht verkehrswirksam werden und damit die mit A-Posteriori-Bewertungen

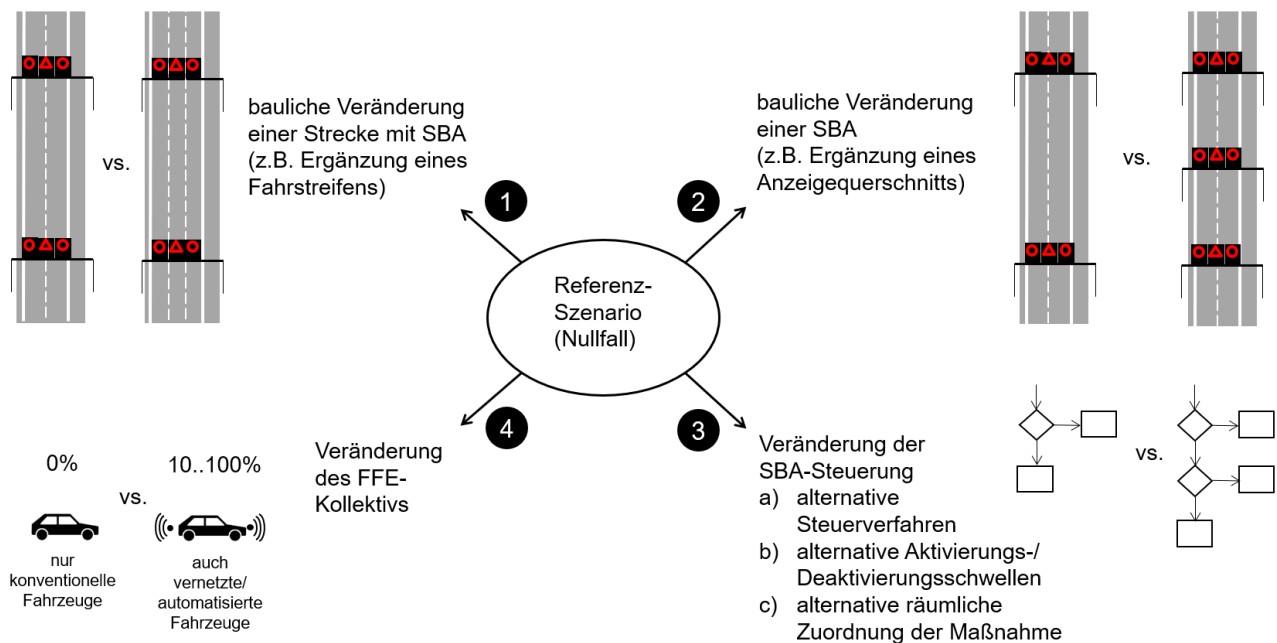


Abbildung 34: Anwendungsszenarien der kontext-differenzierten Fahrverhaltensmodellierung

verbundenen Probleme zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Vorher- und Nachher-Zeitraum vermieden werden. Hinzu kommt, dass aufgrund der Komplexität der automatisierten SBA-Steuerung (vgl. Abschnitt 2.1.6) oftmals mehrere Varianten ihrer Anpassung möglich sind. Zwischen diesen ist eine begründete Auswahl zu treffen, was nur mittels einer A-Priori-Abschätzung praktikabel ist. Das in dieser Arbeit entstandene Verfahren ermöglicht erstmals eine solche A-Priori-Abschätzung der Auswirkungen von QS-Maßnahmen unter hinreichend differenzierter Nachbildung sowohl der Prozesse der SBA-Steuerung als auch der Reaktionen der Fahrzeugführenden auf die SBA-Maßnahmen. Insbesondere wird das Zusammenwirken verschiedener SBA-Maßnahmen und die dadurch mögliche Überlagerung verschiedener Anzeigezustände berücksichtigt. Das Verfahren ermöglicht den Vergleich der implementierten SBA-Steuerung (Referenzfall) mit einer Ausprägung der SBA-Steuerung, in der z. B.

- Schwellenwerte für Situationserkennung und Maßnahmenauswahl angepasst wurden (z. B. Anpassung der Aktivierungsschwellenwerte so, dass eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h zur Harmonisierung der Geschwindigkeiten bereits bei geringeren Verkehrsstärken gilt),
- eine Mindestaktivierungsdauer anstelle einer Aktivierungs-/Deaktivierungshysterese (Differenz zwischen Aktivierungs- und Deaktivierungsschwellenwerten) verwendet wird,
- eine SBA-Maßnahme räumlich verschoben wurde (veränderte Zuordnung zwischen auslösendem Messquerschnitt und Referenz-Anzeigequerschnitt) oder
- ein einzelnes Verfahren der Situationserkennung und/oder Maßnahmenauswahl ergänzt, entfernt oder durch ein neues Verfahren ersetzt wurde.

Das vierte der vorgenannten Anwendungsszenarien ist vor allem für die Verkehrswissenschaft von Bedeutung. Für die Erprobung einzelner neuartiger Fahrfunktionen oder Assistenzsysteme mittels Simu-

lation im Rahmen der industriellen Forschung ist eine Beschränkung auf wenige ausgewählte Szenarien aus der Perspektive eines Ego-Fahrzeugs zweckmäßig und ausreichend. Um jedoch die Auswirkungen der Einführung neuer Fahrfunktionen in einer gesamtverkehrlichen Perspektive vornehmen und Handlungsbedarfe für Anpassungen des Verkehrssystems ableiten zu können, muss das Verkehrssystem in einem größeren räumlichen Kontext modelliert werden, wobei die Prozesse der Verkehrsbeeinflussung und das Verhalten konventioneller Verkehrsteilnehmer detailliert und realistisch nachgebildet werden muss. Ein solches wissenschaftliches Anwendungsszenario war Grundlage des ersten pilothaften Einsatzes des in dieser Arbeit entstandenen Verfahrens, auf den im nachfolgenden Abschnitt detaillierter eingegangen wird.

8.2 Anwendungsszenario „Einflüsse automatisierter Fahrzeuge“

Das Verfahren zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation wurde im Rahmen des durch die BAST beauftragten Projekts FE 03.0538/2015/IGB „Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen“ erstmals pilothaft eingesetzt und erprobt. Hauptauftragnehmer dieses Projekts war die Heusch/Boesefeldt GmbH aus Aachen. Als weitere Projektpartner waren das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (Fraunhofer IVI) in Dresden, der Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik an der Technischen Universität Dresden, das Ingenieurbüro Schwietering aus Aachen sowie die Firma Aimsun SLU aus Barcelona eingebunden. Ein Ziel des Projekts bestand darin, die Auswirkungen eines künftig zunehmenden Anteils automatisierter Fahrzeuge auf die Wirkungsweise von SBA auf Autobahnen zu untersuchen und Handlungsbedarfe abzuleiten [87]. Ausgehend vom Referenzfall des heute vorherrschenden Verkehrs mit ausschließlich konventionellen, von Menschen geführten Fahrzeugen⁶⁰ wurden Szenarien mit unterschiedlicher Durchdringung hochautomatisierter Fahrzeuge konstruiert. Als Extremfall wurde auch ein Szenario mit ausschließlich hochautomatisierten Fahrzeugen einbezogen. Für diese Untersuchung war eine Modellierung des Fahrverhaltens auf mikroskopischer Ebene notwendig, einerseits um die Wirkungen der SBA hinreichend differenziert abbilden zu können (vgl. Abschnitt 4.1.1) und andererseits um Interaktionen und individuell unterschiedliche Verhaltensweisen automatisierter und nicht automatisierter Fahrzeuge in den Mischverkehrsszenarien abbilden zu können. Im Rahmen des Projekts wurde das Verfahren in Verbindung mit der Simulationssoftware aimsun.next und der Unterzentralensoftware der Heusch/Boesefeldt GmbH eingesetzt.

Das in dieser Arbeit entwickelte und gemäß Abschnitt 7 konfigurierte und kalibrierte Verfahren diente im vorgenannten Projekt der Nachbildung des Verhaltens konventioneller, von Menschen geführter Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Einflüsse der SBA. Es wurde einerseits im Referenzszenario ohne automatisierte Fahrzeuge eingesetzt, das die Vergleichsbasis zur Bewertung der Auswirkungen automatisierten Fahrens bildete. Andererseits wurde das Verfahren auch in den Mischverkehrsszenarien mit sowohl automatisierten als auch nicht automatisierten Fahrzeugen benötigt, um auch hier das Verhalten der menschlichen Fahrzeugführenden abzubilden.

Das Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge basiert ebenso wie das der konventionellen Fahrzeuge auf den in aimsun.next implementierten Fahrverhaltensmodellen, deren Parameter jedoch abwei-

⁶⁰ Es sei angemerkt, dass das heute vorherrschende Fahrzeugkollektiv bereits Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen umfasst, z. B. die automatisierte Längsführung im Stau. Jedoch ist derzeit noch eine dauerhafte Überwachung der Fahrfunktionen durch einen Menschen erforderlich. Daher ist u. a. auch noch eine auf menschliche Reaktionszeiten abgestellte Abstandswahl erforderlich [87].

chend gewählt wurden, um Unterschiede zu menschlichen Verhaltensweisen abbilden zu können. Die Schnittstellenanwendung zur Beeinflussung der Fahrer-Fahrzeug-Einheiten beim Passieren eines Anzeigequerschnitts wurde so erweitert, dass dort dargebotene zulässige Höchstgeschwindigkeiten auch auf automatisierte Fahrzeuge angewendet werden, jedoch in anderer Weise. Eine der Annahmen für automatisierte Fahrzeuge bestand darin, dass diese zulässige Höchstgeschwindigkeiten im Gegensatz zu menschlichen Fahrzeugführenden unbedingt einhalten. Daher wurden diese unmittelbar als fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit übernommen. Darüber hinaus wurden Mechanismen zur Berücksichtigung der Verkehrssituation im automatisierten Fahrverhalten ergänzt. Die Modellierung des Fahrverhaltens automatisierter Fahrzeuge war jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit und ist detaillierter im Projektbericht [87] (dort Abschnitt 6) beschrieben.

Ergebnisse der Simulationsstudie werden hier nicht wiedergegeben. Auch diese sind dem Projektbericht [87] zu entnehmen (dort Diskussion der Ergebnisse in Abschnitt 8). Im nachfolgenden Abschnitt werden jedoch einige Erkenntnisse aus der erstmaligen praktischen Anwendung des Verfahrens beschrieben und hieraus resultierende Potenziale und Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung benannt.

8.3 Diskussion: Anwendungs- und Entwicklungspotenziale

Im Rahmen der Validierung (vgl. Abschnitt 7.5) sowie auch der ersten Anwendung konnte die grundsätzliche Eignung und Einsatztauglichkeit des in dieser Arbeit entstandenen Verfahrens bestätigt werden. Soll das Verfahren auf andere Streckenabschnitte mit SBA übertragen werden, sollte die Kalibrierung für diese Abschnitte wiederholt werden oder zumindest eine Überprüfung vorgenommen werden. Dies gilt insbesondere für Streckenabschnitte mit anderen baulichen Eigenschaften (z. B. mit Einfluss von Steigungen) sowie bei Szenarien mit anderer Verkehrszusammensetzung (z. B. Ferienreiseverkehr). Eine Voraussetzung für die Kalibrierung und Konfiguration des Verfahrens ist jedoch, dass einzelfahrzeugbezogene Daten zum Fahrverhalten in ausreichendem Umfang vorhanden sind. Die hier verwendeten lokal erfassten Einzelfahrzeugdaten stehen in vielen SBA nicht zur Verfügung und müssten gesondert erhoben werden. Hierbei muss sichergestellt werden, dass die Erfassungszeiträume und -standorte repräsentativ für die zu untersuchenden Szenarien sind. Heutige Systeme der Fernmeldetechnik (i. d. R. Lichtwellenleiter) ermöglichen die Übertragung größerer Datenmengen, sodass in zukünftigen SBA die Aufzeichnung von Einzelfahrzeugdaten grundsätzlich vorgesehen werden könnte. Derartige Daten wären auch für andere Fragestellungen der Verkehrsforschung von großem Interesse. Unabhängig davon werden große Potenziale in der Verwendung fahrzeuggenerierter Daten zur Erweiterung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens gesehen, die z. B. durch vernetzte Fahrzeuge erzeugt und an die Infrastruktur oder ein Hintergrundsystem weitergegeben werden. Solche Daten ermöglichen auch eine räumlich durchgehende Bewertung und Kalibrierung des Fahrverhaltens.

Bestimmte Fahrsituationen, z. B. Warnungen vor Unfallstellen ohne Fahrstreifensperrungen, treten in der Praxis nur sehr selten auf, selbst wenn ein sehr langer Untersuchungszeitraum verwendet wird (hier: zwei Jahre). Hinzu kommt, dass zwischen manchen Fahrsituationen nur marginale Unterschiede im Fahrverhalten zu beobachten sind (vgl. Abschnitt 6.1). Deshalb kann die Zusammenfassung von Fahrsituationen mit ähnlichen Rahmenbedingungen und ähnlichem Fahrverhalten sinnvoll sein. In vereinzelt Fahrsituationen konnten demgegenüber auch bimodale Verteilungen von Fahrverhaltenskenngrößen festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass hier eine differenziertere Abgrenzung der Fahrsituationen sinnvoll ist. Um zu bewerten, welche Fahrsituationen zusammengeführt oder weiter

differenziert werden sollten, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Können Daten zur Kalibrierung nicht nur im Rahmen einer projektbezogenen Untersuchung, sondern zeitlich und räumlich durchgehend erhoben werden (so wie z. B. auf der Referenzstrecke A92), kann eine automatisierte Nachführung des Modells an sich verändernde Charakteristika des betrachteten Verkehrssystems realisiert werden. Hierzu müsste die Bewertung von Abweichungen zwischen Realität und Simulation regelmäßig mit neu aufgezeichneten Daten wiederholt werden. Eine solche Funktionalität wäre vor allem für den Einsatz des Verfahrens in der fortlaufenden Qualitätssicherung (QS) von SBA wünschenswert. Nach Umsetzung einer QS-Maßnahme und einer gewissen Eingewöhnung können sich trotz ansonsten identischer Rahmenbedingungen Änderungen im Fahrverhalten ergeben, z. B. eine verbesserte Befolgung zulässiger Höchstgeschwindigkeiten, nachdem diese infolge der QS-Maßnahme plausibler erscheinen. Durch die Nachführung des Verfahrens kann der Status Quo als Referenz für eine Ex-Ante-Bewertung zukünftiger QS-Maßnahmen an diese neuen Verhältnisse angepasst werden.

Unterschiede zwischen Simulation und Realität wurden für die Ersatzkenngrößen der Verkehrssicherheit festgestellt: Das Fahrverhalten in der Simulation ist in den meisten in der Validierung betrachteten Fahrsituationen weniger riskant als in der Realität. Jedoch ist diese Abweichung zumindest für Auffahrzeiten (TTC) und den Risikoindikator CIBTR systematisch und weitgehend unabhängig von der Verkehrsstärke, sodass Veränderungen dieser Kenngrößen zumindestens als Indiz für eine Auswirkung auf die Verkehrssicherheit herangezogen werden können. Die Unterschiede sind teilweise auf die in beiden verwendeten Fahrzeugfolgmodellen verankerte Forderung einer sicheren Zeitlücke zu Vorausfahrenden begründbar. In aimsun.next konnte unsicheres Fahrzeugfolgeverhalten bis zu einem gewissen Grad durch simultane Anpassung zweier Modellparameter (Sensitivitätsfaktor und Mindestzeitlücke) erreicht werden. Da diese Vorgehensweise nicht unmittelbar auf SUMO übertragbar war (vgl. Abschnitt 6.3.3), wurde in SUMO zunächst auf die Umsetzung riskanteren Fahrverhaltens verzichtet. Im Zuge der abschließenden Diskussion der Validierungsergebnisse wurden in Abschnitt 7.5 für beide Simulationsumgebungen Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen hierzu benannt.

Eine situationsspezifische Anpassung des Fahrstreifenwahlverhaltens wurde bislang lediglich im Zusammenhang mit Lkw-Überholverböten berücksichtigt. Um Einflüsse auch anderer Anzeigezustände der SBA auf die Fahrstreifenwahl berücksichtigen zu können, sind Untersuchungen zu Einflüssen der Parameter des Fahrstreifenwahlmodells auf das Fahrverhalten notwendig. Hierbei sollten nicht nur Einflüsse dieser Parameter auf die Fahrstreifenauslastung selbst (z. B. mithilfe der in Abschnitt 4.1.3 definierten Indikatoren *Gleichmäßigkeit* und *Schwerpunktlage*), sondern auch Auswirkungen auf Geschwindigkeiten und Zeitlücken näher untersucht werden. Nicht zuletzt muss berücksichtigt werden, dass auch Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeuge einen Einfluss auf die Fahrstreifenwahl haben, die sich auf Überholentscheidungen auswirken.

Bei der Entwicklung und Erprobung des Verfahrens stand zwar zunächst die Anwendung auf Autobahnabschnitte mit SBA im Vordergrund, jedoch ist eine Ausdehnung auf weitere Anwendungen möglich, in denen die differenzierte Abbildung der Reaktionen von Fahrzeugführenden auf für sie wahrnehmbare Situationen erforderlich ist (z. B. Wetterbedingungen, im Fahrzeug dargebotene Informationen aus empfangenen V2X-Nachrichten oder ähnliches). Ein Ausblick auf diesbezügliche wissenschaftliche Anschlusspotenziale wird in Abschnitt 9 gegeben.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, das es erstmals ermöglicht, die Einflüsse streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung und weiterer Randbedingungen auf das Fahrverhalten differenziert in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation abzubilden. Hierbei werden in Abhängigkeit des wahrnehmbaren Situationskontexts bestimmte Parameter der in der Simulationsumgebung verankerten Fahrverhaltensmodelle dynamisch derart angepasst, dass das speziell in dieser Situation typischerweise zu beobachtende Fahrverhalten reproduziert wird. Die Fähigkeit des Verfahrens zur situationsdifferenzierten Anpassung des Fahrverhaltens ist insbesondere in solchen Anwendungsszenarien von Bedeutung, in denen komplexe Wechselwirkungen zwischen Fahrverhalten und automatisierter Verkehrssteuerung bestehen und in denen Fahrverhaltensunterschiede zwischen den individuellen Verkehrsteilnehmern berücksichtigt werden müssen. Dies ist z. B. gegeben, wenn die Auswirkungen neuer Steuerungsverfahren oder auch eines veränderten Fahrer-Fahrzeug-Kollektivs auf die Wirkungsweise von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) auf Autobahnen untersucht werden sollen.

Zentraler Bestandteil des Verfahrens ist ein hybrides Bayessches Netz, das die Zusammenhänge zwischen wahrnehmbarer Situation, Fahrverhalten und entsprechenden Parametern der Fahrverhaltensmodelle abbildet und das als Inferenzmodell bezeichnet wird (vgl. Abschnitt 4.3). Über eine entsprechende Schnittstellenanwendung interagiert das Inferenzmodell mit Softwareumgebungen der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (vgl. Abschnitt 4.4). Hierbei kam einerseits das kommerzielle Produkt `aimsun.next` des spanischen Herstellers AIMSUN SLU und andererseits die u. a. durch das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt entwickelte Open-Source-Software „Simulation of Urban Mobility“ (SUMO) zum Einsatz. Somit konnte gezeigt werden, dass das Verfahren auf verschiedene Simulationsumgebungen anwendbar ist. Da eine Anwendung des Verfahrens zunächst am Beispiel von SBA vorgesehen war, wurden auch die wesentlichen Funktionen und Prozesse der Datenerfassung und der automatisierten Steuerung dieser Anlagen modellhaft nachgebildet (vgl. Abschnitt 4.5).

Das Verfahren wurde in einem mehrstufigen Prozess unter Verwendung umfassender Daten realer Autobahnabschnitte mit SBA kalibriert und validiert (vgl. Abschnitte 6 und 7). Diese Daten wurden dankenswerterweise von den zuständigen Straßenbaubehörden zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Validierung konnte die Eignung des Verfahrens zur realitätsgetreuen Nachbildung des Fahrverhaltens in Abhängigkeit von Anzeigezuständen der SBA und weiteren Randbedingungen grundsätzlich bestätigt werden, wenngleich in der Simulation riskantes Fahrzeugfolgeverhalten in etwas geringerem Maße auftritt als in der Realität. Das Verfahren wurde anschließend im Rahmen des von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragten Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB pilothaft eingesetzt und erprobt (vgl. Abschnitt 8.2). Hierbei wurden die Einflüsse hochautomatisierter Fahrzeuge auf die Wirkungsweise einer SBA in unterschiedlichen Ausprägungen der Fahrzeugsteuerung sowie in unterschiedlichen Durchdringungsszenarien untersucht. Auf Grundlage der Validierungsergebnisse und der ersten Anwendung wurden Potenziale des Verfahrens diskutiert und Ansatzpunkte für die weitere Forschung und Entwicklung skizziert (vgl. Abschnitt 8.3). Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung bestehen einerseits in einer weitergehenden Automatisierung des Kalibrierungs- und Validierungsprozesses, um eine regelmäßige Nachführung des Modells an veränderte Eigenschaften des Verkehrssystems (z. B. Gewöhnungseffekte nach Anpassung der SBA-Steuerung) mit vertretbarem Aufwand ermöglichen zu können. Darüber hinaus können durch weitergehende Untersuchungen noch bestehende Potenziale zur besseren Nachbildung riskanten Abstandsverhaltens sowie auch zur Nachbildung situationspezifischer Unterschiede im Fahrstreifenwahlverhalten erschlossen werden.

Das vorgestellte Verfahren kann prinzipiell nicht nur in Verbindung mit konventioneller kollektiver Verkehrsbeeinflussung, sondern auch mit zukünftigen bzw. in Einführung befindlichen Anwendungen vernetzten Fahrens genutzt werden. Hierzu zählen z. B. Anwendungen zur Gefahrenwarnung, zur Dämpfung von Stauwellen oder auch zur Unterstützung der Annäherung an eine Lichtsignalanlage mittels Geschwindigkeitsempfehlungen. Ähnlich wie Anzeigezustände einer SBA können von außen empfangene Nachrichten (z. B. Gefahrenwarnungen) über eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle an die Fahrzeugführenden ausgegeben werden, sodass sie in das Fahrverhalten einbezogen werden können. Das Verfahren und speziell auch das Inferenzmodell sind in dieser Hinsicht erweiterbar gestaltet (vgl. Abschnitt 4.1.1). Bei Anwendungen vernetzten Fahrens erfolgt die Informationsverbreitung an die Verkehrsteilnehmer jedoch nicht querschnittsbezogen, sondern innerhalb definierter geografischer Gebiete bzw. Streckenabschnitte. Diese Gebiete sind nicht notwendigerweise auf den Empfangsbereich einer streckenseitigen Roadside Unit beschränkt, sondern können durch Hopping (Weiterverbreitung über andere vernetzte Fahrzeuge) oder auch bei Verwendung von Rundfunk- oder Mobilfunktechnologien erweitert werden. Die Wirkungsweise der Dienste vernetzten Fahrens kann durch den Anteil vernetzter Fahrzeuge erheblich beeinflusst werden (z. B. Überlastungen des Kommunikationssystems, geringer Einfluss des Hoppings bei nur wenigen vernetzten Fahrzeugen im Kollektiv). Um den Einsatz des in dieser Arbeit entstandenen Verfahrens auch für Untersuchungen zu vernetztem Fahren zu ermöglichen, sollten daher auch die Prozesse der geografischen Adressierung und Weiterleitung von Nachrichten (Geo-Messaging, Hopping) sowie der drahtlosen Datenübertragung hinreichend detailliert nachgebildet werden.

Anhang

Inhaltsangabe

A	Ausgewählte Fahrzeugfolgemodelle	149
A.1	Modell nach Gipps (1981)	149
A.2	Modell nach Krauß (1998)	153
B	Bayessche Netze	157
B.1	Aufbau und Eigenschaften	157
B.2	Ausprägungen Bayesscher Netze	159
B.3	Erlernen von Struktur und Parametern	162
B.4	Anwendung Bayesscher Netze: Inferenz	163
C	Interaktionen zwischen Simulationsmodulen	164
C.1	aimsun.next	164
C.2	SUMO	166
D	Zustände von Anzeigequerschnitten	167
E	Einflüsse der Parameter der Fahrverhaltensmodelle	171
E.1	aimsun.next	171
E.2	SUMO	172
F	Ergebnisse der Validierung	177
F.1	Situationsübergreifende Validierung	177
F.2	Situationsspezifische Validierung	180
	Abbildungsverzeichnis	190
	Tabellenverzeichnis	192
	Abkürzungsverzeichnis	193
	Symbolverzeichnis	194
	Literatur	197

A Ausgewählte Fahrzeugfolgemodelle

An dieser Stelle werden zwei für diese Arbeit relevante Fahrzeugfolgemodelle sowie ihre Parameter im Detail vorgestellt. Fahrzeugfolgemodelle bestimmen, wie sich eine Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE) entlang eines Fahrstreifens bewegt, welche Geschwindigkeit sie wählt und wie sie auf vorausfahrende FFE reagiert. Für einen Überblick über Fahrverhaltensmodelle sei auf Abschnitt 2.2.3 verwiesen.

Nachfolgend werden einheitlich folgende Symbole verwendet:

t	(diskreter) Zeitschritt
Δt	zeitliches Diskretisierungsintervall
$x_n(t)$	Position FFE n (Front) entlang des Fahrstreifens zum Zeitschritt t
$x_{n-1}(t)$	Position vorausfahrende FFE $n - 1$ (Front) zum Zeitschritt t
$g_n(t)$	Nettoabstand FFE n zu vorausfahrender FFE (Front zu Heck) zum Zeitschritt t
$v_n(t)$	Fahrgeschwindigkeit der FFE n zum Zeitschritt t
$v_{n-1}(t)$	Fahrgeschwindigkeit der vorausfahrenden FFE $n - 1$ zum Zeitschritt t

In allen Berechnungsvorschriften sei unterstellt, dass Entfernungen und Positionen in Metern (m), Zeitschritte und Zeitdifferenzen in Sekunden (s), Geschwindigkeiten in m/s sowie Beschleunigungen in m/s² angegeben werden; Faktoren zur Umrechnung in andere Einheiten, etwa km/h, sind nicht berücksichtigt.

Die beiden hier vorgestellten Fahrzeugfolgemodelle gehören der Kategorie der Safety-Distance-Modelle an und sind daher in ihrer Funktionsweise einander ähnlich. Außerdem sind beide Modelle zeitdiskret, d. h. Geschwindigkeit, Position und ggf. weitere Eigenschaften der FFE werden in diskreten Zeitschritten aktualisiert. Die Position einer FFE entlang eines Fahrstreifens sowie die Geschwindigkeit sind hingegen reellwertig. Es sei unterstellt, dass die Position stets in Fahrtrichtung ansteigt.

A.1 Modell nach Gipps (1981)

Das Fahrzeugfolgmodell nach Gipps wurde 1981 veröffentlicht [71] und kommt in weiterentwickelter Form in der Simulationssoftware aimsun.next zum Einsatz. Die folgende Beschreibung stützt sich auf die ursprüngliche Veröffentlichung sowie auf die Nutzerdokumentation der in dieser Arbeit verwendeten Version 8.4 der Software aimsun.next [3]. Aus Gründen der Einheitlichkeit werden teils abweichende Symbole verwendet.

Zu jedem diskreten Zeitschritt t der Simulation und für jede FFE werden folgende Schritte der Zustandsaktualisierung durchlaufen:

- Berechnung der Fahrgeschwindigkeit im nachfolgenden Zeitschritt $v_n(t + \Delta t)$
- Berechnung der Fahrzeugposition im nachfolgenden Zeitschritt $x_n(t + \Delta t)$

Aktualisierung der Fahrgeschwindigkeit

Die Fahrgeschwindigkeit ergibt sich vereinfacht dargestellt als Minimum aus drei nach unterschiedlichen Kriterien bestimmten Geschwindigkeiten:

- $v_{acc,n}(t + \Delta t)$ (Kriterium „Beschleunigung“): maximal durch Beschleunigung im nächsten Zeitschritt erreichbare Geschwindigkeit (ohne Einfluss vorausfahrender FFE)
- $v_{safe,n}(t + \Delta t)$ (Kriterium „sichere Fahrzeugfolge“): Geschwindigkeit, mit der ein gerade noch sicherer Abstand zur vorausfahrenden FFE eingehalten wird
- $v_{gap,n}(t + \Delta t)$ (Kriterium „Mindestzeitlücke“): Geschwindigkeit, mit der gerade noch eine definierte Mindestzeitlücke zur vorausfahrenden FFE eingehalten wird

Nachfolgend werden die Berechnungsvorschriften für diese drei Geschwindigkeiten angegeben. Weitere Einflüsse auf die Berechnung der Fahrgeschwindigkeit bestehen außerdem durch das Fahrstreifenwechselmodell (Zielen auf eine Lücke), durch kooperatives Fahrverhalten sowie durch die zusätzliche Randbedingung maximaler Geschwindigkeitsunterschiede zu angrenzenden Fahrstreifen (multilane model). Hierauf wird jedoch an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

Kriterium „Beschleunigung“

Durch das Kriterium „Beschleunigung“ wird sichergestellt, dass eine FFE ihre Geschwindigkeit bis zu einer angestrebten Wunschgeschwindigkeit $v_{desired,n}$ erhöhen kann, sofern nicht durch vorausfahrende FFE eine geringere Geschwindigkeit eingehalten werden muss. Damit eine FFE hierbei nicht unrealistisch stark beschleunigen kann, ist die Beschleunigung durch eine fahrzeugspezifische maximale Wunschbeschleunigung $a_{max,n}$ begrenzt. Die maximal durch Beschleunigung erreichbare Geschwindigkeit wird wie folgt berechnet [71]⁶¹:

$$v_{acc,n}(t + \Delta t) = v_n(t) + 2,5 \cdot a_{max,n} \cdot \Delta t \left(1 - \frac{v_n(t)}{v_{desired,n}} \right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{v_{desired,n}}} \quad (24)$$

Die angestrebte Wunschgeschwindigkeit $v_{desired,n}$ ist das Minimum aus fahrzeug- und streckenspezifisch zulässiger Höchstgeschwindigkeit ($v_{max,n}$ bzw. $v_{max,lane}$). Um entsprechend der Realität Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und diesbezüglich unterschiedliche Fahrstile berücksichtigen zu können, wird ein wiederum fahrzeugspezifischer Befolgungsfaktor $f_{compl,n}$ auf die streckenspezifische zulässige Höchstgeschwindigkeit angewandt (nicht jedoch auf die fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit). Somit wird die Wunschgeschwindigkeit wie folgt berechnet:

$$v_{desired,n} = \min(v_{max,n}, v_{max,lane} \cdot f_{compl,n}) \quad (25)$$

Es ist zu beachten, dass die maximale Beschleunigung $a_{max,n}$ nur in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich erreicht wird. Beim Anfahren aus dem Stand und ebenso auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten treten durch Anwendung von Gleichung 24 deutlich geringere Beschleunigungen auf.

⁶¹ Die Konstanten in Gleichung 24 wurden auf Grundlage aufgezeichneter Fahrtdaten bestimmt [71].

Kriterium „sichere Fahrzeugfolge“

Fährt eine FFE (Ego-FFE n) hinter einer vorausfahrenden FFE $n - 1$ auf demselben Fahrstreifen, muss die Ego-FFE einen sicheren Abstand zu dieser vorausfahrenden FFE einhalten. Nach Gipps (1981) gilt ein Fahrzeugfolgeabstand als sicher, wenn ein Auffahrunfall auch dann nicht eintritt, wenn die vorausfahrende FFE unvermittelt mit der stärksten im Normalfall (außerhalb einer Gefahrensituation) erwarteten Verzögerung \hat{d}_{n-1} bis zum Stillstand abbremst und dabei selbst eine fahrzeugspezifische Wunschverzögerung d_n einhält.

Die Geschwindigkeit, mit der ein sicherer Fahrzeugfolgeabstand eingehalten wird, berechnet sich wie folgt:

$$v_{\text{safe},n}(t + \Delta t) = d_n T_n + \sqrt{d_n^2 T_n^2 - d_n \left(2(g_n(t) - g_{\min,n}) - v_n(t) T_n - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{d}_{n-1}} \right)} \quad (26)$$

Hierbei sind T_n die Reaktionszeit und $g_{\min,n}$ der Mindestnettoabstand, den die Ego-FFE n auch im Stillstand zu FFE $n - 1$ einhält⁶².

Gemäß Gleichung 26 bezieht die Ego-FFE die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit der vorausfahrenden FFE $v_{n-1}(t)$ ein, d. h. es kann diese fehlerfrei und unverzerrt wahrnehmen. Dies stellt eine Vereinfachung gegenüber der Realität dar, wo Geschwindigkeitsunterschiede zum vorausfahrenden Fahrzeug nur geschätzt werden können. Die stärkste im Normalfall erwartete Verzögerung der vorausfahrenden FFE \hat{d}_{n-1} stellt dagegen eine Schätzung dar, die gegenüber der tatsächlichen Wunschverzögerung d_{n-1} um einen fahrzeugspezifischen Faktor α_n verzerrt sein kann [3]:

$$\hat{d}_{n-1} = d_{n-1} \cdot \alpha_n \quad (27)$$

Der Faktor α_n wird auch Sensitivitätsfaktor (sensitivity factor) genannt [3], da er die Empfindlichkeit bestimmt, mit der eine FFE auf die vorausfahrende FFE reagiert. Ist $\alpha_n = 1$, so nimmt die Ego-FFE die Wunschverzögerung der vorausfahrenden FFE unverzerrt wahr. Ist $\alpha_n < 1$, wird die zu erwartende Verzögerung unterschätzt, sodass riskantere Zeitlücken gewählt werden; mit $\alpha_n > 1$ stellt sich dagegen ein konservativeres Fahrzeugfolgeverhalten ein. Es ist zu berücksichtigen, dass die Wunschverzögerung der vorausfahrenden FFE in der Realität von außen nicht wahrnehmbar ist, auch nicht mit einer um einen festen Faktor gegebenen Verzerrung. Somit ist auch an dieser Stelle eine Vereinfachung gegenüber dem realen Fahrverhalten festzustellen⁶³.

Es ist zu beachten, dass aufgrund der Reaktionszeit T_n die Ego-FFE auf Geschwindigkeitsänderungen der vorausfahrenden FFE verzögert reagiert. Während die Reaktionszeit T_n im ursprünglichen Modell nach Gipps für alle Fahrzeuge einheitlich ist und der Simulationsschrittweite Δt entspricht, lässt aimsun.next auch unterschiedliche Reaktionszeiten zwischen FFE zu. Dabei gilt jedoch die Einschränkung, dass T_n ein mit ganzzahligem Faktor gebildetes Vielfaches der Simulationsschrittweite sein muss.

⁶² Nach Gipps (1981) [71] berechnet sich der Nettoabstand als Differenz der Fahrzeugfrontpositionen abzüglich einer effektiven Fahrzeuglänge („effective size of vehicle“). Die effektive Fahrzeuglänge wird wiederum beschrieben als tatsächliche Fahrzeuglänge zuzüglich eines Abstands, in den das Folgefahrzeug auch im Stillstand nicht eindringt. ⁶³ Näher am realen Fahrverhalten wäre die Einbeziehung der Wunschverzögerung des Vorausfahrenden mit einem zufälligen Schätzfehler; hierauf wird jedoch in aimsun.next verzichtet.

Kriterium „Mindestzeitlücke“

Droht trotz des vorgenannten Kriteriums „sichere Fahrzeugfolge“ die Unterschreitung einer fahrzeugspezifischen Mindestzeitlücke (hier: Bruttozeitlücke) $h_{\min,n}$, wird die Geschwindigkeit im nachfolgenden Zeitschritt so angepasst, dass diese Mindestzeitlücke noch eingehalten werden kann. Bei Bedarf werden hierbei auch stärkere Verzögerungen als die Wunschverzögerung d_n angewandt. In aimsun.next wird die Geschwindigkeit zur Einhaltung der Mindestzeitlücke wie folgt berechnet [3]:

$$v_{\text{gap},n}(t + \Delta t) = \frac{x_{n-1}(t + \Delta t) - x_n(t)}{h_{\min,n} + \Delta t} \quad (28)$$

Aktualisierung der Fahrzeugposition

Die Positionen der Fahrzeuge im nächsten Zeitschritt werden mit der gemäß der vorgenannten Kriterien aktualisierten Fahrgeschwindigkeit $v_n(t + \Delta t)$ asymmetrisch berechnet, d. h. die Aktualisierung der Position erfolgt unterschiedlich für Beschleunigung und Verzögerung:

$$x_n(t + \Delta t) = \begin{cases} x_n(t) + 0,5 \cdot (v_n(t) + v_n(t + \Delta t)) \cdot \Delta t & \text{beim Verzögern: } v_n(t + \Delta t) < v_n(t) \\ x_n(t) + v_n(t + \Delta t) \cdot \Delta t & \text{sonst} \end{cases} \quad (29)$$

Parameter des Fahrzeugfolgemodells

An dieser Stelle seien die zuvor eingeführten Parameter des Fahrzeugfolgemodells nach Gipps (1981) in seiner Implementierung in aimsun.next (Version 8.4) zusammengefasst. Es werden hier nur solche Parameter angegeben, die Eigenschaften einer FFE sind und zumindest je FFE-Typ differenziert festgelegt werden können (nicht jedoch z. B. Eigenschaften von Streckenabschnitten oder globale Parameter eines Simulationsexperiments). Die Auflistung ist nicht abschließend, sondern berücksichtigt nur die für das Fahrzeugfolgeverhalten auf kreuzungsfreien Streckenabschnitten relevanten Parameter. Alle Parameter beziehen sich auf eine FFE n .

T_n	Reaktionszeit
$v_{\max,n}$	fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit
$f_{\text{compl},n}$	Befolgungsfaktor zul. Höchstgeschwindigkeit Strecke
$a_{\max,n}$	maximale Wunschbeschleunigung
d_n	Wunschverzögerung im Normalfall
$g_{\min,n}$	Mindestnettoabstand im Stillstand
α_n	Sensitivitätsfaktor
$h_{\min,n}$	Mindestzeitlücke

Die Reaktionszeit T_n muss ein mit ganzzahligem Faktor gebildetes Vielfaches der Simulationsschrittweite Δt sein.

Mit Ausnahme der Reaktionszeit T_n werden die genannten Parameter als abgeschnittene Normalverteilung über das FFE-Kollektiv angegeben (jeweils gekennzeichnet durch Erwartungswert, Standardabweichung sowie obere und untere Wertebereichsgrenze). Wird eine FFE in die Simulation eingesetzt, werden die Verhaltensparameter der FFE zufällig gemäß dieser Verteilung bestimmt.

A.2 Modell nach Krauß (1998)

Das Fahrzeugfolgemodell nach Krauß (1998) [100] wird in modifizierter und weiterentwickelter Form in der Open-Source-Simulationssoftware SUMO eingesetzt. Ebenso wie im zuvor vorgestellten Modell nach Gipps (1981) werden je Zeitschritt und FFE zunächst die Geschwindigkeiten $v_n(t + \Delta t)$ und anschließend die Positionen $x_n(t + \Delta t)$ der FFE für den nachfolgenden Zeitschritt berechnet.

Nachfolgend wird das erweiterte Modell beschrieben, das in SUMO standardmäßig verwendet wird⁶⁴. Die Beschreibung basiert auf einer Analyse des Quellcodes von Version 1.6.0 der Software SUMO. An dieser Stelle wird jedoch lediglich der Prozess der Aktualisierung von Fahrgeschwindigkeiten und Fahrzeugpositionen wiedergegeben, ohne dass auf Details der Implementierung eingegangen wird.

Aktualisierung der Fahrgeschwindigkeit

Das Modell nach Krauß ist ebenso wie das nach Gipps (1981) ein Safety-Distance-Modell. Dementsprechend basiert das Modell auf der Annahme, dass eine FFE einen sicheren Abstand zur vorausfahrenden FFE einhält, sodass auch dann keine Kollision eintritt, wenn die vorausfahrende FFE unvermittelt mit ihrer im Normalfall zu erwartenden Verzögerung abbremst. In Fällen, in denen die Bedingungen einer sicheren Fahrzeugfolge verletzt werden, z. B. bei vorübergehender Akzeptanz kürzerer Zeitlücken beim Fahrstreifenwechsel, kann stärker als mit der Wunschverzögerung reagiert werden. Im Gegensatz zum Modell nach Gipps wird hierbei jedoch eine gesondert definierte Notfallverzögerung eingehalten. Hierdurch können Kollisionen im Modell nach Krauß nicht gänzlich ausgeschlossen werden⁶⁵.

Es sei angemerkt, dass die Frequenz, in der Fahrentscheidungen getroffen werden, von der Simulationsschrittweite Δt entkoppelt werden kann. Wird diese als Aktionsschrittweite (action step length) bezeichnete Entscheidungsfrequenz auf Werte $> \Delta t$ gesetzt, können u. a. höhere Reaktionszeiten abgebildet werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die FFE dann zwar nicht mehr in jedem Zeitschritt ihr Verhalten anpasst, jedoch dennoch bei Erreichen des Aktionsschritts die Umgebungszustände des unmittelbar vorangegangenen Zeitschritts berücksichtigt [34]. Wird die Aktionsschrittweite abweichend zur Simulationsschrittweite festgelegt, können in der verwendeten Version 1.6.0 außerdem Probleme bei der Lückensuche und Kooperation im Rahmen des Fahrstreifenwechselverhaltens auftreten [55]. In der nachfolgenden Beschreibung wird unterstellt, dass die Aktionsschrittweite der Simulationsschrittweite entspricht.

Einflüsse auf die Berechnung der Fahrgeschwindigkeit bestehen auch durch das Fahrstreifenwechselmodell, das zum Anstreben einer Lücke im Zielfahrstreifen sowie im Rahmen kooperativen Fahrens zusätzliche Randbedingungen für die Fahrgeschwindigkeit setzt. Hierauf wird jedoch an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

⁶⁴ Daneben sind in SUMO eine frühere Version des Modells nach Krauß sowie einige weitere Fahrzeugfolgemodelle implementiert (vgl. Abschnitt 2.2.3); auf diese wird hier jedoch nicht näher eingegangen. ⁶⁵ In SUMO werden bei Unfällen die jeweils betroffenen Fahrzeuge aus der Simulation entfernt.

Untere und obere Grenzen der Fahrgeschwindigkeit

Zunächst werden in Abhängigkeit von der aktuellen Fahrgeschwindigkeit obere und untere Grenzen für die Fahrgeschwindigkeit $v_n(t + \Delta t)$ im nächsten Zeitschritt bestimmt. Die untere Grenze entspricht der Geschwindigkeit, die bei Anwendung der maximalen Notfallverzögerung $d_{\text{emergency},n}$ erreicht werden kann:

$$v_{\min,n}(t + \Delta t) = \max(0, v_n(t) + d_{\text{emergency},n} \cdot \Delta t) \quad (30)$$

Es ist zu beachten, dass $d_{\text{emergency},n}$ negativ sein muss.

Die obere Grenze bildet analog zum Kriterium „Beschleunigung“ des Gipps-Modells die Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit $v_{\text{desired},n}$, welche mit der Wunschbeschleunigung $a_{\text{desired},n}$ erfolgt. Im Gegensatz zum Modell nach Gipps entspricht diese Wunschbeschleunigung nicht einem Maximum, das nur in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich tatsächlich erreicht wird, sondern wird grundsätzlich gleichermaßen über alle Fahrgeschwindigkeiten angewandt, bis die Wunschgeschwindigkeit erreicht wird:

$$v_{\max,n}(t + \Delta t) = \min(v_{\text{desired},n}, v_n(t) + a_{\text{desired},n} \cdot \Delta t) \quad (31)$$

Die Wunschgeschwindigkeit $v_{\text{desired},n}$ wird nach Gleichung 25, d. h. ebenso wie in aimsun.next unter Berücksichtigung einer fahrzeug- und streckenspezifischen zulässigen Höchstgeschwindigkeit berechnet, wobei ein fahrzeugspezifischer Befolungsgrad auf die streckenspezifische Höchstgeschwindigkeit angewendet wird.

Kriterium „sichere Fahrzeugfolge“

Eine sichere Geschwindigkeit wird nach folgender Vorschrift bestimmt:

$$v_{\text{safe},n}(t + \Delta t) = v_{n-1}(t) + \frac{g_n(t) - g_{\min,n} - v_{n-1}(t) \cdot \tau_n}{\tau_{B,n}(t) + \tau_n} \quad (32)$$

Hierbei ist $g_{\min,n}$ der Mindestnettoabstand im Stillstand, τ_n die Mindestzeitlücke, die Fahrzeug n zum vorausfahrenden Fahrzeug anstrebt sowie $\tau_{B,n}(t)$ eine zusätzliche zeitliche Komponente unter Berücksichtigung der Wunschverzögerung, die wie folgt berechnet wird:

$$\tau_{B,n}(t) = \frac{v_{n-1}(t) + v_n(t)}{-2 \cdot \min(d_n, d_{\text{apparent},n-1})} \quad (33)$$

Hierbei ist d_n die Wunschverzögerung der Ego-FFE n und $d_{\text{apparent},n-1}$ die durch andere FFE wahrgenommene Wunschverzögerung der vorausfahrenden FFE $n - 1$. Maßgeblich ist die stärkere dieser beiden Verzögerungen. Es ist zu beachten, dass auch diese beiden Verzögerungen negativ sind. Standardmäßig entspricht $d_{\text{apparent},n-1}$ der Wunschverzögerung d_{n-1} der vorausfahrenden FFE, jedoch kann auch ein abweichender Wert festgelegt werden. Das Verhältnis zwischen $d_{\text{apparent},n-1}$ und d_{n-1} ist mit

dem Sensitivitätsfaktor in `aimsun.next` vergleichbar, jedoch kann in SUMO auf diese Weise kein riskanteres, sondern lediglich konservativeres Abstandsverhalten hervorgerufen werden. Dies wurde in Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit festgestellt (vgl. Abschnitt 6.3.3) und durch die Entwickler-Community der Software SUMO bestätigt. Als potenzielle Alternative wurde hierbei die Einstreuung von Wahrnehmungsfehlern mittels sogenannter Driver State Devices [37] empfohlen (vgl. ebenfalls Abschnitt 6.3.3).

Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (zufälliges Trödeln)

Die gewünschte und dabei noch sichere Geschwindigkeit wird zunächst als Minimum aus $v_{\max,n}(t + \Delta t)$ und $v_{\text{safe},n}(t + \Delta t)$ bestimmt. Das Modell nach Krauß unterstellt jedoch, dass menschliche Fahrer diese mögliche Geschwindigkeit aufgrund von Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (driver imperfection) nicht vollumfänglich ausnutzen, sondern diese um eine zufällige Störung η nach unten abweicht. Durch einen fahrzeugspezifischen Parameter $\sigma_n \in [0, 1]$ kann beeinflusst werden, wie stark sich diese zufällige Störung auswirkt. Bei $\sigma_n = 0$ treten keine zufälligen Störungen auf (ideales Fahrverhalten), bei $\sigma_n = 1$ sind die Störungen stark ausgeprägt.

Aktualisierung der Fahrzeugposition

Nach dem ursprünglichen Modell nach Krauß (1998) erfolgt die Aktualisierung der Fahrzeugpositionen so, dass die Fahrgeschwindigkeit während eines Zeitschritts konstant bleibt (semi-implicit Euler update):

$$x_n(t + \Delta t) = x_n(t) + v_n(t + \Delta t) \cdot \Delta t \quad (34)$$

In SUMO steht diese Form der Aktualisierung von Fahrzeugpositionen ebenfalls zur Verfügung, alternativ kann jedoch auch eine Positionsaktualisierung verwendet werden, bei der die Beschleunigung während eines Zeitschritts konstant gehalten wird (ballistic update):

$$x_n(t + \Delta t) = x_n(t) + 0,5 \cdot (v_n(t) + v_n(t + \Delta t)) \cdot \Delta t \quad (35)$$

Gleichung 34 entspricht der Aktualisierung der Fahrzeugpositionen in `aimsun.next` beim Beschleunigen, während Gleichung 35 in `aimsun.next` beim Verzögern zur Anwendung kommt. Anders als in `aimsun.next` kann in SUMO nur eine der beiden Formen der Positionsaktualisierung gewählt werden, die sowohl beim Beschleunigen als auch beim Verzögern zur Anwendung kommt.

Parameter des Fahrzeugfolgmodells

An dieser Stelle seien die zuvor eingeführten Parameter des Fahrzeugfolgmodells nach Krauß (1998) in seiner Implementierung in SUMO (Version 1.6.0) [35] zusammengefasst. Es werden hier nur solche Parameter angegeben, die Eigenschaften einer FFE sind und zumindest je FFE-Typ differenziert festgelegt werden können. Eigenschaften von Streckenabschnitten oder globale Parameter der Simulationsumgebung werden dagegen nicht berücksichtigt. Die Auflistung ist nicht abschließend, sondern

beinhaltet nur die für das Fahrzeugfolgeverhalten auf kreuzungsfreien Streckenabschnitten relevanten Parameter. Alle Parameter beziehen sich auf eine FFE n .

$v_{\max,n}$	<code>maxSpeed</code>	fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit
$f_{\text{compl},n}$	<code>speedFactor</code>	Befolgungsfaktor zul. Höchstgeschwindigkeit Strecke
$a_{\text{desired},n}$	<code>accel</code>	Wunschbeschleunigung
d_n	<code>decel</code>	Wunschverzögerung im Normalfall
$d_{\text{emergency},n}$	<code>emergencyDecel</code>	max. Verzögerung (Gefahr)
$d_{\text{apparent},n}$	<code>apparentDecel</code>	nach außen wahrnehmbare Wunschverzögerung
$g_{\min,n}$	<code>minGap</code>	Mindestnettoabstand im Stillstand
τ_n	<code>tau</code>	Mindestzeitlücke
σ_n	<code>sigma</code>	Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten

Der Befolgungsfaktor bzgl. zulässiger Höchstgeschwindigkeiten kann als (abgeschnittene) Normalverteilung über das FFE-Kollektiv angegeben werden, d. h. als Erwartungswert, Standardabweichung sowie optional auch eine obere und untere Wertebereichsgrenze. Wird eine FFE in die Simulation eingesetzt, wird der Befolgungsfaktor der FFE zufällig gemäß dieser Verteilung bestimmt. Alle anderen Parameter werden je FFE-Typ statisch belegt. Sollen diese Parameter ebenfalls je FFE zufällig aus einer Verteilung bestimmt werden, muss dies durch SUMO-externe Funktionalitäten erreicht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine solche externe Funktionalität zur Variation der fahrzeugspezifischen Höchstgeschwindigkeit geschaffen (vgl. Abschnitt 4.4.3).

B Bayessche Netze

Das im Rahmen dieser Arbeit entstandene und in Abschnitt 4 vorgestellte Verfahren zur Modellierung kontextspezifisch angepassten Fahrverhaltens beinhaltet eine Abbildung von Wirkzusammenhängen mittels Bayesscher Netze (BN). Zum besseren Verständnis werden nachfolgend die Eigenschaften von BN und die ihnen zugrunde liegende Annahmen detaillierter beschrieben. Dabei werden auch verschiedene Erscheinungsformen von BN vorgestellt. Die Beschreibung erfolgt im Wesentlichen in Anlehnung an Al-Hames (2008) [5], Murphy (2002) [114] (dort Anhänge A.2 und A.3) sowie Scutari und Denis (2015) [143], soweit nicht andere Quellen zitiert werden. Die teils unterschiedlichen Bezeichnungen von Mengen, Variablen und Funktionen wurden dabei vereinheitlicht.

B.1 Aufbau und Eigenschaften

BN sind eine bestimmte Ausprägung *probabilistischer grafischer Modelle*⁶⁶. Probabilistische grafische Modelle bilden Zufallsvariablen als Knoten sowie unmittelbare Abhängigkeiten zwischen diesen als Kanten ab. Mithilfe der Annahme, dass Abhängigkeiten nur zwischen ausgewählten Zufallsvariablen bestehen, kann die Anzahl der Kanten auf ein Mindestmaß begrenzt werden. Komplexe, hochdimensionale Zusammenhänge lassen sich auf diese Weise in Teilmodelle niedrigerer Dimension zerlegen [14], weil die durch einen bestimmten Knoten repräsentierte Zufallsvariable nur von einer Teilmenge aller anderen Knoten des Netzes abhängig ist, die sich in der Umgebung des betrachteten Knotens befindet. Diese Teilmenge wird auch *minimales Markov Blanket* genannt.

BN sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Knoten und Kanten einen *gerichteten azyklischen Graphen* bilden⁶⁷. Eine gerichtete Kante von einem Knoten X_1 zu einem anderen Knoten X_2 lässt sich somit interpretieren als „ X_1 bewirkt X_2 “. Ein einfaches Beispiel eines gerichteten azyklischen Graphen zeigt *Abbildung 35*.

In dieser Arbeit werden die nachfolgenden Bezeichnungen im Zusammenhang mit BN verwendet:

- Es sei $\mathcal{B} = (\mathcal{G}, \mathbf{X})$ ein BN, das durch den Graphen $\mathcal{G} = (\mathbf{X}, \mathbf{A})$ gebildet wird.
- Hierbei sei $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_{n_X}\}$ die Menge aller Knoten des BN und somit aller Zufallsvariablen, die sie repräsentieren⁶⁸. $n_X = |\mathbf{X}|$ sei die Anzahl der Knoten des BN.
- Analog sei $\mathbf{A} \subset \{(X_i, X_j) \mid X_i, X_j \in \mathbf{X}\}$ die Menge und n_A die Anzahl aller Kanten des BN.
- Die Menge aller Elternknoten eines Knotens X_i , d. h. die Menge aller Knoten, von denen aus unmittelbar eine Kante zu X_i führt, sei als $\mathbf{Pa}(X_i) = \{P_{i,1}, \dots, P_{i,n_{\mathbf{Pa},i}}\}$ bezeichnet. Hierbei ist $n_{\mathbf{Pa},i} = |\mathbf{Pa}(X_i)|$ die Anzahl der Elternknoten von X_i .

Da \mathcal{G} ein gerichteter Graph ist, enthält die Menge der Kanten \mathbf{A} ausschließlich gerichtete Kanten, d. h. es gilt $(X_i, X_j) \in \mathbf{A} \Rightarrow (X_j, X_i) \notin \mathbf{A}, \forall X_i, X_j \in \mathbf{X}$. Auch enthält \mathcal{G} keine Kanten von einem Knoten zu sich selbst, d. h. es gilt außerdem $(X_i, X_i) \notin \mathbf{A}, \forall X_i \in \mathbf{X}$. Weiterhin sei \mathcal{G} *schlicht*, d. h. eine Kante zwischen zwei Knoten darf höchstens einmal vorkommen (keine Parallelkanten) [5].

⁶⁶ Neben probabilistischen gibt es auch weitere Arten grafischer Modelle, z. B. die in Borgelt et al. (2009) [14] sowie Gebhardt und Kruse (1997) [66] vorgestellten possibilistischen Modelle. Diese werden jedoch hier nicht näher betrachtet.

⁶⁷ Für eine formale Definition von BN sei z. B. auf Murphy (2002) [114] oder Scutari und Denis (2015) [143] verwiesen.

⁶⁸ Die Begriffe *Knoten* und *Zufallsvariable* werden hier synonym verwendet, da jedem Knoten eines BN stets genau eine Zufallsvariable zugeordnet ist [5]. Dementsprechend wird die Bezeichnung \mathbf{X} vereinfachend sowohl für die Menge der Knoten als auch der Zufallsvariablen verwendet.

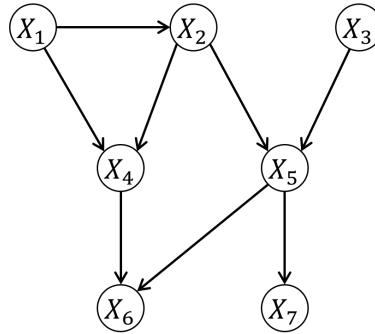


Abbildung 35: Beispiel eines gerichteten azyklischen Graphen (aus [14], S. 119)

Ordnet man die Zufallsvariablen $X_i \in \mathbf{X}$ entsprechend der Netztopologie, d. h. so, dass alle sie repräsentierenden Knoten stets vor ihren jeweiligen Nachfahren angeordnet sind, dann lässt sich die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung durch Anwendung der Produktregel formulieren als

$$p(X_1, \dots, X_{n_X}) = \prod_{i=1}^{n_X} p(X_i \mid X_1, \dots, X_{i-1}) \quad (36)$$

Aufgrund der *gerichteten lokalen Markov-Eigenschaft*, die alle Knoten eines gerichteten azyklischen Graphen besitzen, sind die Zufallsvariablen X_i bedingt unabhängig von allen ihren jeweiligen Vorfahren X_1, \dots, X_{i-1} gegeben $\mathbf{Pa}(X_i)$ [5] [114]. Daraus folgt

$$p(X_1, \dots, X_{n_X}) = \prod_{i=1}^{n_X} p(X_i \mid \mathbf{Pa}(X_i)) \quad (37)$$

Knoten ohne Elternknoten ($\mathbf{Pa}(X_i) = \emptyset$) ist eine unbedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(X_i)$ zugeordnet, die auch Randverteilung (marginal distribution) genannt wird [143]. Alle anderen Knoten sind gemäß Gleichung 37 durch eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(X_i \mid \mathbf{Pa}(X_i))$ charakterisiert, die ausschließlich durch die Zustände der Elternknoten beeinflusst wird⁶⁹. Im Rahmen der Kalibrierung eines BN sind die Parameter dieser bedingten und unbedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu bestimmen (vgl. Abschnitt B.3).

Betrachtet man die gesamte Umgebung eines Knotens $X_i \in \mathbf{X}$, d. h. sowohl in Richtung der Vorgänger als auch der Nachfolger, so gilt, dass X_i bedingt unabhängig von allen anderen Knoten des Netzes gegeben das Markov-Blanket von X_i ist. Das Markov Blanket eines BN umfasst die Elternknoten, die direkten Nachfahren sowie auch die Eltern der direkten Nachfahren [114] (vgl. *Abbildung 36*). Wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Knoten innerhalb des Markov Blanket von X_i verändert, hat dies einen Einfluss auf die Verteilung von X_i ; Veränderungen an Knoten außerhalb des Markov Blanket haben hingegen keinen Einfluss. Die Knoten jenseits des Markov Blanket von X_i sind somit *d-separiert*⁷⁰ von X_i . Diese Eigenschaft ermöglicht effizientere Berechnungen sowohl beim Erlernen der Netzstruktur und -parameter aus Daten (vgl. Abschnitt B.3) als auch bei der Anwendung des BN (Inferenz, vgl. Abschnitt B.4).

⁶⁹ Es sei angemerkt, dass neben einer bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung prinzipiell auch andere Funktionen in Abhängigkeit der Elternknoten mit Eigenschaften einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (u. a. Werte $\in [0, 1]$) eingesetzt werden können [5]. ⁷⁰ Das „d“ steht hierbei für *directed*, also gerichtet.

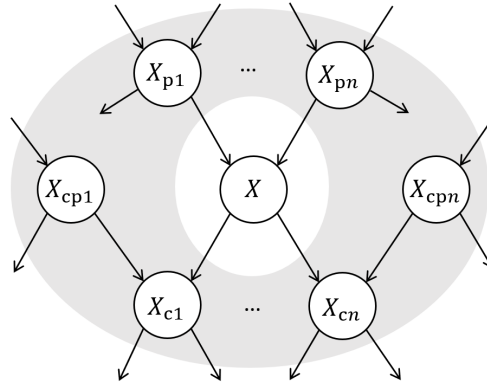


Abbildung 36: Markov-Blanket (grau) eines Knotens X in einem Bayesschen Netz (aus [114], S. 124). Knoten mit Index p sind Elternknoten (parents), solche mit Index c Nachfahren (children) und solche mit Index cp andere Elternknoten der Nachfahren (children's parents).

B.2 Ausprägungen Bayesscher Netze

Die Knoten eines BN, genauer die durch diese Knoten repräsentierten Zufallsvariablen, können wertdiskret (auch quantisiert oder kategorisiert), wertkontinuierlich oder beides in Kombination sein. Zur Beschreibung diskreter Zufallsvariablen eignet sich z. B. die Multinomialverteilung. BN mit ausschließlich diskreten und multinomialverteilten Zufallsgrößen werden *multinomiale BN* genannt. Wertkontinuierliche Zufallsvariablen genügen häufig zumindest näherungsweise einer Normalverteilung. BN mit ausschließlich wertkontinuierlichen und normalverteilten Zufallsgrößen heißen *Gaußsche Bayessche Netze (GBN)*. Werden in einem BN verschiedenartige, auch z. B. diskrete und kontinuierliche Zufallsgrößen kombiniert, spricht man von *hybriden BN*. Nachfolgend werden diese drei Ausprägungen von BN näher beschrieben. Zuletzt wird außerdem kurz auf *dynamische BN* eingegangen, die aus einer beliebigen Zahl gleichartiger BN generiert werden und die vor allem zur Modellierung über die Zeit veränderlicher Systeme geeignet sind.

Multinomiale Bayessche Netze

Sind ein Knoten $X_i \in \mathbf{X}$ und alle seine Elternknoten $P_{i,j} \in \mathbf{Pa}(X_i)$ diskrete und multinomial verteilte Zufallsvariablen, so entspricht $p(X_i | \mathbf{Pa}(X_i))$ der Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Zustand vorliegt unter der Bedingung einer bestimmten Zustandskombination der Elternknoten. Ergänzend zu den in Abschnitt B.1 eingeführten Bezeichnungen sei $z_i \in \mathbf{Z}_i$ ein bestimmter diskreter Zustand des Knotens X_i und \mathbf{Z}_i die Menge aller Zustände, die Knoten X_i annehmen kann. Der gegebene Zustand eines Elternknotens $P_{i,j}$ sei $z_{\mathbf{Pa},i,j} \in \mathbf{Z}_{\mathbf{Pa},i,j}$, wobei $\mathbf{Z}_{\mathbf{Pa},i,j}$ die Menge aller zulässigen Zustände des Elternknotens $P_{i,j}$ bezeichnet. Schließlich sei das Ereignis, dass die Elternknoten des Knoten X_i eine bestimmte Kombination an Zuständen annehmen, definiert als

$$Z_{\mathbf{Pa},i} = \bigwedge_{j=1}^{n_{\mathbf{Pa},i}} (P_{i,j} = z_{\mathbf{Pa},i,j}) \quad (38)$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines bestimmten Zustands z_i ist dann

$$p(X_i = z_i | Z_{\text{Pa},i}) = \frac{p(X_i = z_i \wedge Z_{\text{Pa},i})}{p(Z_{\text{Pa},i})} \quad (39)$$

Diese bedingten Wahrscheinlichkeiten werden i. d. R. je Knoten $X_i \in \mathbf{X}$ in einer Tabelle zusammengefasst, deren Spalten die zulässigen Zustände $z_i \in \mathbf{Z}_i$ und deren Zeilen alle möglichen Zustandskombinationen der Eltern, d. h. alle kombinatorisch möglichen Ereignisse $Z_{\text{Pa},i}$ abbilden. Diese Tabellen werden auch bedingte Wahrscheinlichkeitstabellen genannt. Bei Knoten ohne Elternknoten wird lediglich eine a-priori-Wahrscheinlichkeit $p(X_i = z_i)$ für das Vorliegen jeden zulässigen Zustands $z_i \in \mathbf{Z}_i$ angegeben.

Gaußsche Bayessche Netze

Ein BN wird als Gaußsches Bayessches Netz (GBN) bezeichnet, wenn alle Knoten des Netzes reellwertige, normalverteilte Zufallsvariablen abbilden. Trifft diese Annahme auf einen Knoten $X_i \in \mathbf{X}$ und alle seine Elternknoten zu, so gilt

$$X_i | \mathbf{Pa}(X_i) \sim N(\mu_i(P_{i,1}, \dots, P_{i,n_{\text{Pa},i}}), \sigma_i^2) \quad (40)$$

Hierbei ist μ_i der Erwartungswert und σ_i^2 die Varianz der Zufallsvariable X_i . Nach Scutari und Denis (2015) [143] ist lediglich μ_i vom Zustand der Elternknoten abhängig, während σ_i^2 eine feste, von den Elternknoten unabhängige Eigenschaft des Knoten X_i ist.

Können die Zusammenhänge zwischen Knoten X_i und allen seinen Elternknoten als zumindest näherungsweise linear angenommen werden, lässt sich μ_i als Linearkombination der Elternzustände ausdrücken [143]:

$$\mu_i(P_{i,1}, \dots, P_{i,n_{\text{Pa},i}}) = \beta_{i,0} + \sum_{j=1}^{n_{\text{Pa},i}} P_{i,j} \beta_{i,j} \quad (41)$$

Gilt diese Annahme für alle Knoten eines GBN, so wird es als *lineares GBN* bezeichnet. Die Nullstelle dieser linearen Funktion ist durch den Parameter $\beta_{i,0}$ (intercept), der Einfluss der Elternknoten durch die Anstiegskoeffizienten $\beta_{i,j}$ (slopes) bestimmt; dies sind neben der Varianz σ^2 die im Rahmen der Kalibrierung zu bestimmenden Parameter eines linearen GBN. Die Randverteilungen von Knoten ohne Elternknoten werden jeweils durch einen festen, von anderen Knoten unabhängigen Erwartungswert bestimmt.

Sind die Zusammenhänge zwischen Knoten und ihren Eltern nicht linear, stehen analog zur multiplen Regression (vgl. Abschnitt 2.3.3) verschiedene Herangehensweisen zur Verfügung, etwa die Transformation der Zufallsvariablen der Elternknoten oder die Spezifikation eines nichtlinearen funktionalen Zusammenhangs.

Hybride Bayessche Netze

BN, die sowohl wertdiskrete als auch wertkontinuierliche Zufallsvariablen oder generell Zufallsvariablen mit verschiedenartigen Verteilungsfunktionen enthalten, werden als *hybride Bayessche Netze* bezeichnet. Nachfolgend wird speziell der Fall betrachtet, dass wertdiskrete und wertkontinuierliche Zufallsvariablen in einem BN enthalten sind. Zusätzlich zum bisher betrachteten Fall, dass zwei mit einer Kante verbundene Knoten gleichartig sind, können dann folgende Fälle auftreten:

1. Ein wertdiskreter Knoten . . .
 - a) hat ausschließlich wertkontinuierliche Elternknoten.
 - b) hat sowohl wertdiskrete als auch wertkontinuierliche Elternknoten.
2. Ein wertkontinuierlicher Knoten . . .
 - a) hat ausschließlich wertdiskrete Elternknoten.
 - b) hat sowohl wertdiskrete als auch wertkontinuierliche Elternknoten.

Im Falle 1.a können die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen durch die Softmax-Funktion und im Falle 1.b durch die bedingte Softmax-Funktion gegeben werden (vgl. hierzu z. B. Murphy (2002) [114]). Treten im Falle 1.b mehrere diskrete Elternknoten auf, müssen alle ihre möglichen Zustandskombinationen in einem Knoten zusammengefasst werden [114].

Im Falle 2.a und 2.b sind die Parameter der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen separat für jede mögliche Zustandskombination der diskreten Elternknoten anzugeben. Normalverteilte Zustandsknoten mit ausschließlich diskreten Eltern (Fall 2.a) besitzen somit je einen Erwartungswert und eine Varianz für jede Zustandskombination der Eltern. Im Fall 2.b, also z. B. bei normalverteilten Zustandsknoten mit sowohl wertdiskreten als auch normalverteilten Eltern, wird wie im Falle eines GBN ein Funktionsprototyp für den Einfluss der wertkontinuierlichen Eltern definiert, dessen Parameter separat für jede Zustandskombination der diskreten Eltern angegeben werden müssen [114].

Kommen in einem hybriden BN diskrete Zustandsvariablen als Elternknoten kontinuierlicher Zustände vor, jedoch nicht umgekehrt, lassen sich die wertkontinuierlichen Knoten herauslösen und als eigenständiges BN betrachten, welches hier als *inneres BN* bezeichnet wird. Für jede Zustandskombination der diskreten Zustandsvariablen können die Parameter des inneren BN (oder eines von den diskreten Knoten abhängigen Teils davon) separat bestimmt werden. Dieser Ansatz wird z. B. im Nutzerhandbuch der Software GeNIe der BayesFusion, LLC [11] beschrieben.

Dynamische Bayessche Netze

Die bisher beschriebenen Formen Bayesscher Netze besitzen eine feststehende Anzahl an Knoten und Kanten. Sie eignen sich zur Beschreibung des Zustands eines modellierten Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt (statisch). Soll die Entwicklung eines Systemzustands über die Zeit berücksichtigt werden, können mehrere BN miteinander verknüpft werden, die diesen Zustand zu jeweils einem bestimmten Zeitschritt repräsentieren. In einem Dynamischen Bayesschen Netz geschieht dies, ohne dass die Anzahl der einzubeziehenden Zeitschritte a priori bekannt sein muss: Das DBN wird dynamisch aus einer beliebigen Anzahl gleichartiger statischer BN (sogenannten Chunks) zusammengesetzt. Es ist möglich, gesonderte Teilnetze für Beginn und Ende des DBN zu definieren (Prolog bzw. Epilog).

B.3 Erlernen von Struktur und Parametern

Grafische Modelle und insbesondere auch BN wurden anfangs genutzt, um Zusammenhänge einer betrachteten Fachdomäne händisch (durch Experteneinschätzung) zu spezifizieren. Mit der Verfügbarkeit von Daten und von geeigneten Mitteln zu ihrer Verarbeitung trat jedoch das datengestützte Erlernen grafischer Modelle in den Vordergrund [14]. Dieses Erlernen beschränkt sich dabei nicht allein auf die Modellparameter, d. h. die Wahrscheinlichkeitsverteilungen eines gegebenen Netzes, sondern auch der Aufbau eines Netzes kann aus Daten abgeleitet werden (Strukturlernen). In beiden Fällen können Zusammenhänge, die aus Daten erkannt wurden, durch Experten plausibilisiert oder auch durch eine fachliche Einschätzung ergänzt oder korrigiert werden.

Erlernen der Netzstruktur

Beim Erlernen der Netzstruktur aus Daten wird derjenige Graph gesucht, der Zusammenhänge in den zur Verfügung stehenden Daten bestmöglich erklärt. Hierfür kann ein auf den gesamten Graphen bezogenes Gütemaß verwendet werden, z. B. das Bayesian Information Criterion (BIC) [143]. Der Graph wird dann durch Ergänzen oder Entfernen von Kanten modifiziert, um dieses Gütemaß zu maximieren. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die bedingte Unabhängigkeit einzelner potenzieller Kanten des Netzes zu prüfen, um diese entsprechend im Netz zu belassen oder gegebenenfalls aus diesem zu entfernen. Auch Kombinationen sind möglich [143]. Auf das Erlernen der Netzstruktur wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

Erlernen der Parameter

Wurde die Netzstruktur des BN durch Erlernen, durch Experteneinschätzung oder durch eine Kombination aus Beidem festgelegt, gilt es, diejenigen Parameter des BN zu bestimmen, welche die abgebildeten Zusammenhänge zwischen den Zufallsvariablen (Knoten) bestmöglich quantitativ abbilden.

Parameter eines multinomialen BN sind die jeweiligen bedingten Wahrscheinlichkeiten, dass ein Knoten einen bestimmten Zustand annimmt unter der Bedingung einer bestimmten Zustandskombination der Elternknoten (vgl. Gleichung 39 in Abschnitt B.2). Die Bestimmung dieser bedingten Wahrscheinlichkeiten kann z. B. mittels *Maximum Likelihood Estimate (MLE)* erfolgen⁷¹. Die geschätzte bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein Knoten X_i einen bestimmten Zustand z_i annimmt gegeben die Elternzustände (Ereignis $Z_{Pa,i}$), ist dann [143]

$$\hat{p}(X_i = z_i | Z_{Pa,i}) = \frac{\hat{p}(X_i = z_i \wedge Z_{Pa,i})}{\hat{p}(Z_{Pa,i})} = \frac{n_{\text{Obs}}(X_i = z_i \wedge Z_{Pa,i})}{n_{\text{Obs}}(Z_{Pa,i})} \quad (42)$$

Hierbei ist $n_{\text{Obs}}(Z)$ die Häufigkeit aller Beobachtungen eines diskreten Ereignisses Z , d. h. die Anzahl der Datensätze, die den mit Z gegebenen Bedingungen genügen.

⁷¹ Neben dem MLE existieren weitere Verfahren zur Parameterschätzung von multinomialen BN (vgl. z. B. Scutari und Denis (2015) [143]), auf die an dieser Stelle jedoch nicht detaillierter eingegangen wird.

Parameter eines linearen GBN sind je Knoten X_i des Netzes (vgl. Gleichung 41 in Abschnitt B.2)

- die Nullstelle $\beta_{i,0}$ sowie die Anstiegskoeffizienten (slopes) $\beta_{i,j}$ (mit $j \in [1, n_{\text{Pa},i}]$) der linearen Funktion zur Bestimmung des Erwartungswerts μ_i der Zufallsvariable X_i in Abhängigkeit von den Elternknoten, und
- die Varianz σ_i^2 der Zufallsvariable X_i .

Auch diese Parameter eines linearen GBN können mittels MLE ermittelt werden. Die Bestimmung der Nullstelle und der Anstiegskoeffizienten für einen Knoten X_i entspricht dabei einer multiplen Regression (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.3) bezogen auf die Abbildung $(P_{i,1}, \dots, P_{i,n_{\text{Pa},i}}) \mapsto \mu_i$ [143].

B.4 Anwendung Bayesscher Netze: Inferenz

Mit einem BN können bereits auf vielfältige Art und Weise Zusammenhänge innerhalb des modellierten Systems untersucht werden. Diese sind jedoch mit Unsicherheiten behaftet, die durch die (bedingten) Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zufallsvariablen spezifiziert sind. Sind nun jedoch Zustände bestimmter Knoten eines BN z. B. aus Messungen oder Erhebungen bekannt, d. h. liegen für diese Knoten *Evidenzen* vor, können die Wahrscheinlichkeitsverteilungen unter Berücksichtigung dieser bekannten Zustände angepasst werden. Dieser Vorgang wird als *Inferenz* bezeichnet.

Evidenzen können für eine beliebige Teilmenge an Knoten $\mathbf{E} \subset \mathbf{X}$ eines BN vorliegen und ersetzen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen dieser Knoten. Sie können als deterministische Werte (hard evidence) oder als abweichende Wahrscheinlichkeitsverteilungen (soft evidence) vorgegeben sein [143], wobei hier jedoch ausschließlich der Fall deterministischer Evidenzen betrachtet wird.

Mittels Inferenz können unterschiedliche Arten von Fragestellungen (queries) beantwortet werden. Hierzu gehören die sogenannten *maximum a posteriori queries*. Ziel ist hierbei die Bestimmung der wahrscheinlichsten Zustände einer von \mathbf{E} disjunkten Teilmenge an Knoten $\mathbf{Q} \subset \mathbf{X}$. Für multinomiale BN ist diejenige Zustandskombination der Zufallsvariablen in \mathbf{Q} mit größter A-posteriori-Wahrscheinlichkeit zu identifizieren. Für GBN gilt es, die Werte für \mathbf{Q} zu ermitteln, für welche die A-posteriori-Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ihr Maximum erreicht. Durch die bedingte Unabhängigkeit der Knoten eines BN von anderen Knoten außerhalb der durch das Markov Blanket gegebenen Umgebung lässt sich die Bestimmung der wahrscheinlichsten Zustände für \mathbf{Q} vereinfachen. Für BN mit vergleichsweise geringer Komplexität kann eine exakte Inferenz, d. h. eine exakte Bestimmung der wahrscheinlichsten Zustände, zweckmäßig sein. Für komplexere Netze stehen hingegen verschiedene approximative Verfahren zur Verfügung. Für eine Beschreibung einiger wichtiger Verfahren der exakten und approximativen Inferenz sei z. B. auf Scutari und Denis (2015) [143] verwiesen.

C Interaktionen zwischen Simulationsmodulen

An dieser Stelle werden die Prozesse der Initialisierung sowie der Durchführung eines Simulationsschritts einschließlich der dabei auftretenden Interaktionen zwischen den Simulationsmodulen in Form von UML-Sequenzdiagrammen dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit kamen als Software zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation sowohl aimsun.next als auch SUMO zum Einsatz. Die Art der Einbindung externer Funktionsmodule unterscheidet sich zwischen diesen Simulationsumgebungen, sodass hier beide Umsetzungen beschrieben werden.

C.1 aimsun.next

Abbildungen 37 und 38 zeigen die Prozesse und Interaktionen eines Simulationsexperiments für den Fall, dass die Simulationssoftware aimsun.next sowie die Unterzentralensoftware der Heusch/Boesefeldt GmbH als SBA-Funktionalität eingesetzt werden. Diese Konstellation wurde im Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) verwendet; die Abbildungen sind daher auch im Projektbericht [87] enthalten.

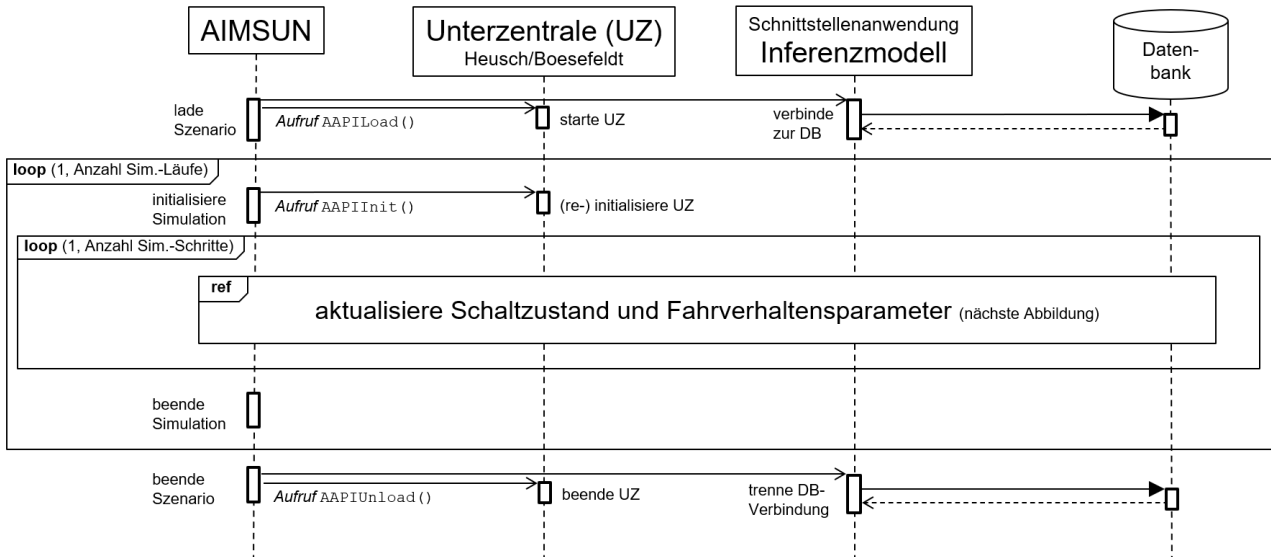


Abbildung 37: Prozesse und Interaktionen der Simulation mit aimsun.next (insgesamt) [87]

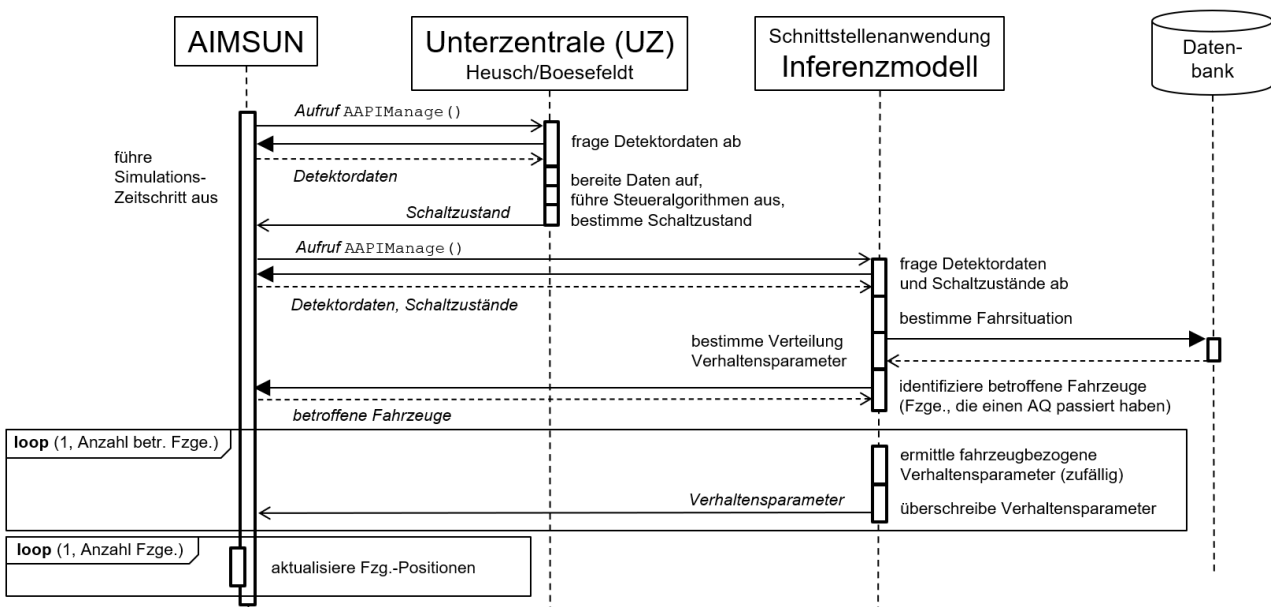


Abbildung 38: Prozesse und Interaktionen während eines Simulationsschritts mit aimsun.next [87]

C.2 SUMO

Abbildung 39 zeigt die Prozesse und Interaktionen während eines Simulationszeitschritts bei Verwendung der Simulationssoftware SUMO und einer eigenen Implementierung der Funktionalitäten einer SBA. Die Interaktion erfolgt über die SUMO-eigene TCP/IP-Schnittstelle Traffic Control Interface (TraCI) [42]. Der Kommunikationsauf- und -abbau der externen Simulationsmodule erfolgt gemäß der Dokumentation des TraCI-Kommunikationsprotokolls [43] und wird in Abbildung 39 nicht wiedergegeben.

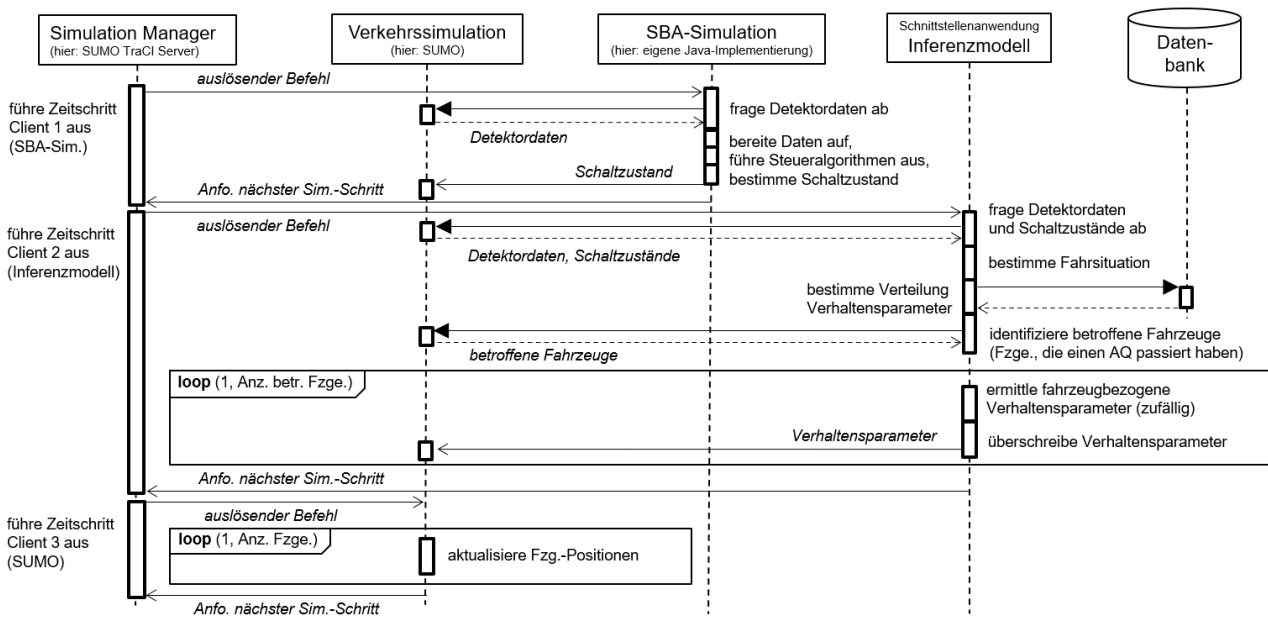


Abbildung 39: Prozesse und Interaktionen während eines Simulationsschritts mit SUMO

D Zustände von Anzeigequerschnitten

Der Zustand eines Anzeigequerschnitts (AQ) wird durch vier Statusmengen abgebildet (vgl. Abschnitt 5.1.3):

- Geschwindigkeitsvorgaben (speed actor states),
- Vorgaben zur Fahrstreifenutzung, Dauerlichtzeichen (lane actor states),
- Überholverbote (passing actor states) sowie
- Gefahrenwarnungen (warning actor states).

Nachfolgend werden die möglichen Zustände wiedergegeben, die ein AQ bezogen auf diese vier Statusmengen einnehmen kann.

Geschwindigkeitsvorgaben

In *Tabelle 10* sind Geschwindigkeitsvorgaben aufgeführt, die an einem AQ dargeboten werden können. Hierbei werden nur solche Anzeigezustände berücksichtigt, die auf den betrachteten Referenzstrecken A92 und A57 auftreten können. Grundsätzlich sind weitere Geschwindigkeitsvorgaben möglich, z. B. unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten je Fahrstreifen (BAB A5 in Hessen), fahrstreifenbezogene Mindestgeschwindigkeiten (BAB A9 in Nordbayern) oder Richtgeschwindigkeiten anstelle zulässiger Höchstgeschwindigkeiten (SBA in den Niederlanden).

Code	Bedeutung	Erläuterung
V_OFF	aus	Geschwindigkeitsbeschränkungen/-empfehlungen unterdrückt
V_60	60 km/h	zulässige Höchstgeschwindigkeit: 60 km/h
V_80	80 km/h	zulässige Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h
V_100	100 km/h	zulässige Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h
V_120	120 km/h	zulässige Höchstgeschwindigkeit: 120 km/h
V_130	130 km/h	zulässige Höchstgeschwindigkeit: 130 km/h
V_60_END	Ende 60 km/h	Aufhebung zul. Höchstgeschwindigkeit 60 km/h
V_80_END	Ende 80 km/h	Aufhebung zul. Höchstgeschwindigkeit 80 km/h
V_100_END	Ende 100 km/h	Aufhebung zul. Höchstgeschwindigkeit 100 km/h
V_120_END	Ende 120 km/h	Aufhebung zul. Höchstgeschwindigkeit 120 km/h
V_130_END	Ende 130 km/h	Aufhebung zul. Höchstgeschwindigkeit 130 km/h
V_END	Aufhebung	Aufhebung einer evtl. zuvor bestehenden zul. Höchstgeschwindigkeit
passive	passiv	keine Geschwindigkeitsbeschränkung oder -empfehlung
unknown	unbekannt	
invalid	ungültig	ungültige Kombination von Geschwindigkeitsanzeigen an einem Anzeigequerschnitt
OFF	außer Betrieb	Geschwindigkeitsbeschränkungen/-empfehlungen unterdrückt/ außer Betrieb

Tabelle 10: Menge der Geschwindigkeitsvorgaben

Vorgaben zur Fahrstreifennutzung

In *Tabelle 11* sind die für diese Arbeit relevanten Vorgaben zur Fahrstreifennutzung aufgeführt, die an einem AQ dargeboten werden können. Hierbei wurden nur solche Zustände berücksichtigt, die auf den Referenzstrecken A92 und A57 auftreten können. Für Richtungsfahrbahnen mit mehr als drei Fahrstreifen sowie bei temporärer Seitenstreifenfreigabe sind weitere Zustände zu ergänzen.

Code	Bedeutung	Erläuterung
V	alle frei (1)	alle Fahrstreifen freigegeben (einstreifiger Querschnitt)
V_V	alle frei (2)	alle Fahrstreifen freigegeben (zweistreifiger Querschnitt)
R_V	links räumen (2)	linker Fahrstreifen zu räumen (zweistreifiger Querschnitt)
X_V	links gesperrt (2)	linker Fahrstreifen gesperrt (zweistreifiger Querschnitt)
V_L	rechts räumen (2)	rechter Fahrstreifen zu räumen (zweistreifiger Querschnitt)
V_X	rechts gesperrt (2)	rechter Fahrstreifen gesperrt (zweistreifiger Querschnitt)
V_V_V	alle frei (3)	alle Fahrstreifen freigegeben (dreistreifiger Querschnitt)
R_V_V	links räumen (3)	linker Fahrstreifen zu räumen (dreistreifiger Querschnitt)
R_R_V	linke 2 räumen (3)	linke beiden Fahrstreifen zu räumen (dreistreifiger Querschnitt)
X_V_V	links gesperrt (3)	linker Fahrstreifen gesperrt (dreistreifiger Querschnitt)
X_R_V	links gesperrt/räumen (3)	linker Fahrstreifen gesperrt; Fahrstreifen daneben zu räumen (dreistreifiger Querschnitt)
X_X_V	linke 2 gesperrt (3)	linke beiden Fahrstreifen gesperrt (dreistreifiger Querschnitt)
V_V_L	rechts räumen (3)	rechter Fahrstreifen zu räumen (dreistreifiger Querschnitt)
V_L_L	rechte 2 räumen (3)	rechte beiden Fahrstreifen zu räumen (dreistreifiger Querschnitt)
V_V_X	rechts gesperrt (3)	rechter Fahrstreifen gesperrt (dreistreifiger Querschnitt)
V_L_X	rechts gesperrt/räumen (3)	rechter Fahrstreifen gesperrt; Fahrstreifen daneben zu räumen (dreistreifiger Querschnitt)
V_X_X	rechte 2 gesperrt (3)	rechte beiden Fahrstreifen gesperrt (dreistreifiger Querschnitt)
passive	passiv	alle Fahrstreifen freigegeben (Anzahl unbekannt)
unknown	unbekannt	
invalid	ungültig	ungültige Kombination von Fahrstreifensignalen an einem Anzei- gequerschnitt
OFF	außer Betrieb	Fahrstreifensignalisierung/-empfehlungen unterdrückt/ außer Betrieb

Tabelle 11: Menge der Vorgaben zur Fahrstreifennutzung

Überholverbote

In *Tabelle 12* sind Überholverbote aufgeführt, die an einem AQ dargeboten werden können. Hierbei werden nur solche Anzeigestände berücksichtigt, die auf den betrachteten Referenzstrecken A92 und A57 auftreten können. Einige SBA unterstützen weitere Arten von Überholverboten, z. B. auch für Busse und Pkw-Gespanne (BAB A61 in Rheinland-Pfalz).

Code	Bedeutung	Erläuterung
NO_PASSING	Überholverbot	allgemeines Überholverbot
NO_PASSING_TRUCKS	Lkw-Überholverbot	Lkw-Überholverbot
NO_PASSING_TRUCKS_7P5T	Lkw-Überholverbot (7,5t)	Überholverbot für Lkw über 7,5 t zul. Gesamtgewicht
NO_PASSING_END	Ende Überholverbot	Ende eines evtl. bestehenden Überholverbots (allgemein oder für Lkw)
NO_PASSING_TRUCKS_END	Ende Lkw-Überholverbot	Ende eines Lkw-Überholverbots
passive	passiv	keine Überholeinschränkung oder -empfehlung
unknown	unbekannt	
invalid	ungültig	ungültige Kombination von Überholvorgaben an einem Anzeigequerschnitt
OFF	außer Betrieb	Überholeinschränkungen/ -empfehlungen unterdrückt/ außer Betrieb

Tabelle 12: Menge der Überholverbote

Gefahrenwarnungen

In *Tabelle 13* sind Gefahrenwarnungen aufgeführt, die an einem AQ dargeboten werden können. Hierbei werden nur solche Anzeigezustände berücksichtigt, die auf den betrachteten Referenzstrecken A92 und A57 auftreten können. Einige SBA unterstützen weitere Arten von Gefahrenwarnungen, z. B. im Vorfeld von Tunneln.

Code	Bedeutung	Erläuterung
W_DANGER	Gefahr	nicht näher spezifizierte Gefahrenwarnung
W_SLIP	Glättegefahr	
W_SKID	Schleudergefahr	
W_CONS	Baustelle	
W_CONG	Stau	
W_RSKCO	Staugefahr	
W_VISIB	Sicht	geringe Sichtweite, z. B. durch Nebel
W_ACC	Unfall	
W_SMOG	Smog	
W_RSPLIT	Rollsplitt	
W_CUT	Mäharbeiten	
W_OZON	Ozon	
W_NOISE	Lärmschutz	
W_OIL	Ölspur	
W_WWD	Falschfahrer	
passive	passiv	keine Warnung
unknown	unbekannt	
invalid	ungültig	ungültige Kombination von Warnungen an einem Anzeigequerschnitt
OFF	außer Betrieb	Warnungen unterdrückt/ außer Betrieb

Tabelle 13: Menge der Gefahrenwarnungen

E Einflüsse der Parameter der Fahrverhaltensmodelle

Nachfolgend werden die Ergebnisse zweier Untersuchungen zu Einflüssen von Parametern der Fahrzeugfolgemodelle (vgl. Abschnitt 6.3) im Detail vorgestellt. Eine Untersuchung bezog sich auf Parameter der Software aimsun.next, die andere auf solche der Software SUMO.

E.1 aimsun.next

Tabelle 14 zeigt die mittels Simulation ermittelten Einflüsse ausgewählter Parameter des Fahrzeugfolgmodells in aimsun.next auf Kenngrößen, die das Abstandsverhalten beschreiben (vgl. Abschnitt 6.3.2). Die Standardparameter gemäß der Grundkalibrierung (vgl. Abschnitt 7.1) sind jeweils fett hervorgehoben. Die Ergebnisse sind auch im Projektbericht des Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB [87] (dort Anhang 4) enthalten und werden hier wiedergegeben.

Parameter			Einfluss auf Fahrverhalten (Mittelwerte)			
Verteilung $N(\mu, \sigma^2)$ mit ...			zweistreifig		dreistreifig	
μ	σ	Min./Max.	h (in s)	$cibtr$	h (in s)	$cibtr$
Wunschbeschleunigung a_{\max} für Pkw (m/s^2)						
2,6	0,2	[2,4, 3,4]	3,3522	-0,3014	3,2948	-0,4688
2,8	0,2	[2,6, 3,4]	3,3479	-0,3134	3,3063	-0,4706
3,0	0,2	[2,6, 3,4]	3,3584	-0,3050	3,3179	-0,4744
3,2	0,2	[2,6, 3,4]	3,3431	-0,3093	3,3243	-0,4758
3,4	0,2	[2,6, 3,6]	3,3303	-0,3028	3,3061	-0,4556
Wunschverzögerung im Normalfall d für Pkw (m/s^2)						
-4,50	0,25	[-4,7, -3,5]	3,3598	-0,2804	3,2956	-0,4589
-4,25	0,25	[-4,5, -3,5]	3,3142	-0,2892	3,3262	-0,4721
-4,00	0,25	[-4,5, -3,5]	3,3584	-0,3050	3,3179	-0,4744
-3,75	0,25	[-4,5, -3,5]	3,3656	-0,3145	3,3098	-0,4775
-3,50	0,25	[-4,5, -3,3]	3,3323	-0,3089	3,2962	-0,4786
Mindestzeitlücke h_{\min} für Pkw (s)						
(mit Sensitivitätsfaktor $\alpha = 1,0$)						
0,8	0,7	[0,5, 1,7]	3,3606	-0,2537	3,2943	-0,4459
1,1	0,7	[0,8, 1,7]	3,3466	-0,2900	3,3116	-0,4513
1,4	0,7	[0,8, 1,7]	3,3584	-0,3050	3,3179	-0,4744
1,7	0,7	[0,8, 2,0]	3,3227	-0,3282	3,3096	-0,4873
Mindestzeitlücke h_{\min} für Pkw (s)						
(Wiederholung mit Sensitivitätsfaktor $\alpha \sim N(0,8, 0,05^2)$, $\alpha \in [0,7, 1,0]$)						
0,8	0,7	[0,5, 1,7]	3,3719	-0,0780	3,3453	-0,3205
1,1	0,7	[0,8, 1,7]	3,3552	-0,0967	3,3522	-0,3434
1,4	0,7	[0,8, 1,7]	3,3605	-0,1670	3,3369	-0,3644
1,7	0,7	[0,8, 2,0]	3,3530	-0,1671	3,3085	-0,3663
Mindestzeitlücke h_{\min} für Lkw (s)						
0,5	0,5	[0,4, 3,1]	3,3800	-0,2902		
0,8	0,5	[0,5, 3,1]	3,3674	-0,3020		
1,1	0,5	[0,5, 3,1]	3,3584	-0,3050		
1,4	0,5	[0,5, 3,1]	3,3499	-0,3368		
Sensitivitätsfaktor α						
0,7	0,05	[0,6, 1,0]	3,3621	-0,0860	3,3395	-0,3214
0,8	0,05	[0,7, 1,0]	3,3605	-0,1670	3,3369	-0,3644
0,9	0,05	[0,8, 1,0]	3,3261	-0,2234	3,3238	-0,4124
1,0	0,00		3,3584	-0,3050	3,3179	-0,4744
1,1	0,05	[1,0, 1,2]	3,3450	-0,3946	3,3120	-0,5302
1,2	0,05	[1,0, 1,3]	3,3388	-0,5448	3,3082	-0,6066

Tabelle 14: Einflüsse der Parameter in aimsun.next auf das Fahrverhalten

E.2 SUMO

Mittels einer Regressionsanalyse (lineare Regression) sollte festgestellt werden, ob signifikante Einflüsse ausgewählter Parameter des Fahrzeugfolgmodells nach Krauß (Standardmodell in SUMO) auf das Fahrverhalten bestehen und ob diese zumindest näherungsweise als lineare Zusammenhänge abgebildet werden können (vgl. Abschnitt 6.3.3). *Tabelle 15* zeigt zunächst überblicksartig die Erkenntnisse aus dieser Regressionsanalyse. Die in der Tabelle verwendeten Symbole haben folgende Bedeutung:

- kein oder uneinheitlich ausgeprägter Einfluss
- ↗ positiver Einfluss (Parameterwert ↗ ⇒ Fahrverhaltenskenngröße ↗)
- (↗) schwacher positiver Einfluss
- ↘ negativer Einfluss (Parameterwert ↗ ⇒ Fahrverhaltenskenngröße ↘)
- (↘) schwacher negativer Einfluss

Die Einteilung in vorgenannte Kategorien erfolgt unter Berücksichtigung der Güte der Regression (R^2) und der normierten Steigung der Regressionsgeraden. Die diesbezüglichen Kriterien sind weiter unten angegeben.

Parameter	Symbol	Einfluss auf Fahrverhalten					
		v	h	ttc	$cibtr$	δ_k	ε_k
Wunschbeschleunigung	$a_{desired}$	○	○	○	○	○	○
Wunschverzögerung	d	○	○	○	○	○	○
Mindestabstand (Stillstand)	g_{min}	○	○	○	(↘)	○	○
Sensitivitätsfaktor	$\hat{\alpha}$	○	○	(↗)	↘	○	(↘)
Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten	σ	○	○	(↘)	(↘)	○	○
Mindestzeitlücke	τ	(↘)	○	(↗)	↘	(↘)	○

Tabelle 15: Einflüsse der Parameter in SUMO auf das Fahrverhalten: Übersicht

In *Tabellen 16 bis 21* sind die ermittelten Regressionsgeraden $x_b(x_p) = \beta_0 + \beta_p \cdot x_p$ für die Zusammenhänge zwischen Parametern x_p des Modells nach Krauß und den Mittelwerten der betrachteten Fahrverhaltenskenngrößen x_b im Detail angegeben. Hierbei seien β_0 die Nullstelle und β_p der Anstieg der zweidimensionalen linearen Regressionsfunktion. Der betrachtete Parameter x_p wurde in der Umgebung des Ausgangswerts $x_{p, default}$ gemäß Grundkalibrierung (vgl. Abschnitt 7.1) variiert, der ebenfalls in *Tabellen 16 bis 21* angegeben ist. Darüber hinaus ist in diesen Tabellen jeweils das Gütemaß R^2 angegeben, das den Grad der Anpassung der Regressionsgerade an die Simulationsergebnisse widerspiegelt. Zur Bewertung der Signifikanz eines Zusammenhangs zwischen einem Parameter und einer Fahrverhaltenskenngröße wurde außerdem die Steigung der Regressionsgeraden ins Verhältnis zu typischen Werten der betrachteten Fahrverhaltenskenngröße gesetzt. Hierzu wurde zunächst der Wert der Regressionsfunktion für den Ausgangsparameterwert, d. h. $x_b(x_p = x_{p, default})$ ermittelt. Anschließend wurde die Steigung der Regressionsgeraden durch den Betrag dieses Wertes dividiert, um die normierte Steigung β'_p zu erhalten:

$$\beta'_p = \frac{\beta_p}{|x_b(x_p = x_{p, default})|} \quad (43)$$

Ist dieser Wert nahe Null, wird die Signifikanz des Zusammenhangs als gering eingeschätzt (\circ in Tabelle 15). Ähnliches gilt, wenn die Anpassungsgüte der Regression gering ($R^2 < 0,8$) oder die Ausprägung des Zusammenhangs über die betrachteten Verkehrsstärkekassen uneinheitlich ist (insbesondere uneinheitliche Vorzeichen der Steigung). Bei positiven und negativen β'_p , die sich deutlich von Null unterscheiden (überwiegend $|\beta'_p| \geq 1$), wird ein erheblicher positiver bzw. negativer Einfluss des Parameters auf die betrachtete Kenngröße unterstellt (\nearrow bzw. \searrow in Tabelle 15). Bei überwiegend $1 > |\beta'_p| \geq 0,1$ wird von einem entsprechenden schwachen Einfluss ausgegangen.

Für folgende Parameterwerte wurden Verkehrszusammenbrüche festgestellt, die im realen Verkehrsgeschehen unter der gegebenen Verkehrsbelastung nicht auftreten, also unrealistisch sind:

- Wunschverzögerung: 40% der Ausgangswerte
- Mindestzeitlücken: 1,1 s und höher
- Sensitivitätsfaktor 1,2

Diese unrealistischen Verkehrszusammenbrüche treten vor allem in den dreistreifigen Streckenabschnitten (Verflechtungsvorgänge) sowie in den Szenarien mit höherer Verkehrsstärke (20 bis 25 Kfz/min je Fahrstreifen) auf. Sie wirken sich direkt auf Fahrgeschwindigkeiten und Zeitlücken sowie auf alle hieraus berechneten Verhaltenskenngrößen aus, so dass diese Parameterkonstellationen aus der Regressionsanalyse ausgeschlossen wurden und nicht in Tabellen 16 bis 21 enthalten sind. Ebenfalls ausgeschlossen wurden Werte des Sensitivitätsfaktors unterhalb von 1, da diese bedingt durch die Implementierung des Fahrzeugfolgmodells in SUMO keine Auswirkungen auf das Fahrverhalten haben (verglichen mit einem Szenario, in dem der Sensitivitätsfaktor = 1 ist, für eine Erläuterung vgl. Abschnitt 6.3.3).

ANHANG E EINFLÜSSE DER PARAMETER DER FAHRVERHALTENSMODELLE

Anzahl Fahrstreifen	Verkehrsstärke (Kfz/min)	Kenngröße Fahrverhalten	Ergebnisse Regression				
			β_0	β_p	R^2	β'_p	
Wunschbeschleunigung $a_{desired}$ (in % von Ausgangswert)							
2	[40, 50]	v (km/h)	106,34	-0,0134	0,91	-0,0001	
		h (s)	2,47	-0,0002	0,38	-0,0001	
		ttc (s)	121,10	-0,3061	0,99	-0,0034	
		$cibtr$	-0,05	-0,0005	0,94	-0,0047	
		δ_k	0,12	-0,0001	0,74	-0,0007	
		ε_k	0,53	0,0000	0,23	0,0000	
	[30, 40]	v (km/h)	108,23	-0,0068	0,68	-0,0001	
		h (s)	3,18	-0,0002	0,25	-0,0001	
		ttc (s)	136,68	-0,2905	0,97	-0,0027	
		$cibtr$	-0,31	-0,0002	0,34	-0,0007	
		δ_k	0,13	-0,0001	0,73	-0,0008	
		ε_k	0,51	0,0000	0,02	0,0000	
	3	[60, 75]	v (km/h)	99,73	0,0048	0,05	0,0000
			h (s)	2,48	0,0001	0,33	0,0000
			ttc (s)	108,56	-0,2098	0,99	-0,0024
$cibtr$			-0,26	0,0002	0,08	0,0007	
δ_k			0,16	-0,0001	0,99	-0,0008	
ε_k			0,54	0,0000	0,11	0,0000	
[45, 60]		v (km/h)	105,25	-0,0043	0,06	0,0000	
		h (s)	3,22	0,0003	0,24	0,0001	
		ttc (s)	119,42	-0,1636	0,98	-0,0016	
		$cibtr$	-0,46	-0,0001	0,35	-0,0003	
		δ_k	0,18	0,0000	0,77	-0,0002	
		ε_k	0,51	0,0001	0,98	0,0002	

Tabelle 16: Einflüsse der Wunschbeschleunigung in SUMO auf das Fahrverhalten

Anzahl Fahrstreifen	Verkehrsstärke (Kfz/min)	Kenngröße Fahrverhalten	Ergebnisse Regression				
			β_0	β_p	R^2	β'_p	
Wunschverzögerung im Normalfall d (in % von Ausgangswert)							
2	[40, 50]	v (km/h)	98,79	0,0599	0,90	0,0006	
		h (s)	2,45	0,0000	0,01	0,0000	
		ttc (s)	99,95	-0,1051	0,87	-0,0012	
		$cibtr$	-0,23	0,0012	0,91	0,0118	
		δ_k	0,10	0,0001	0,46	0,0005	
		ε_k	0,53	0,0000	0,05	0,0000	
	[30, 40]	v (km/h)	104,98	0,0276	0,91	0,0003	
		h (s)	3,18	-0,0001	0,01	0,0000	
		ttc (s)	111,19	-0,0407	0,24	-0,0004	
		$cibtr$	-0,40	0,0006	0,80	0,0019	
		δ_k	0,11	0,0001	0,57	0,0005	
		ε_k	0,53	-0,0002	0,81	-0,0005	
	3	[60, 75]	v (km/h)	94,93	0,0563	0,79	0,0006
			h (s)	2,43	0,0006	0,69	0,0003
			ttc (s)	96,64	-0,1033	0,83	-0,0012
$cibtr$			-0,32	0,0009	0,73	0,0039	
δ_k			0,14	0,0000	0,00	0,0000	
ε_k			0,55	-0,0001	0,78	-0,0002	
[45, 60]		v (km/h)	101,07	0,0393	0,98	0,0004	
		h (s)	3,20	0,0005	0,98	0,0002	
		ttc (s)	114,75	-0,1177	0,92	-0,0011	
		$cibtr$	-0,51	0,0004	0,92	0,0008	
		δ_k	0,16	0,0001	0,89	0,0005	
		ε_k	0,53	-0,0001	0,93	-0,0003	

Tabelle 17: Einflüsse der Wunschverzögerung in SUMO auf das Fahrverhalten

Anzahl Fahrstreifen	Verkehrsstärke (Kfz/min)	Kenngröße Fahrverhalten	Ergebnisse Regression				
			β_0	β_p	R^2	β'_p	
Mindestabstand (Stillstand) g_{\min} (in m, Ausgangswert: 2,5 m)							
2	[40, 50]	v (km/h)	107,46	-0,9535	0,94	-0,0091	
		h (s)	2,46	0,0000	0,00	0,0000	
		ttc (s)	88,44	0,6945	0,14	0,0077	
		$cibtr$	-0,03	-0,0283	0,98	-0,2857	
		δ_k	0,11	-0,0018	0,54	-0,0168	
		ε_k	0,53	-0,0008	0,12	-0,0014	
		[30, 40]	v (km/h)	108,31	-0,0978	0,06	-0,0009
	h (s)		3,16	0,0024	0,07	0,0008	
	ttc (s)		106,44	-0,1020	0,01	-0,0010	
	$cibtr$		-0,28	-0,0203	0,91	-0,0619	
	δ_k		0,12	-0,0021	0,31	-0,0179	
	ε_k		0,51	-0,0012	0,20	-0,0024	
	3		[60, 75]	v (km/h)	104,25	-1,7801	0,69
		h (s)		2,52	-0,0110	0,57	-0,0044
ttc (s)		90,18		-1,4809	0,44	-0,0171	
$cibtr$		-0,12		-0,0547	0,73	-0,2167	
δ_k		0,15		-0,0012	0,27	-0,0083	
ε_k		0,54		-0,0006	0,18	-0,0011	
[45, 60]		v (km/h)		106,12	-0,4891	0,86	-0,0047
		h (s)	3,26	-0,0079	0,73	-0,0024	
		ttc (s)	102,10	0,0911	0,01	0,0009	
		$cibtr$	-0,43	-0,0163	0,93	-0,0346	
		δ_k	0,17	-0,0010	0,50	-0,0058	
		ε_k	0,52	0,0008	0,38	0,0015	

Tabelle 18: Einflüsse des Mindestabstands in SUMO auf das Fahrverhalten

Anzahl Fahrstreifen	Verkehrsstärke (Kfz/min)	Kenngröße Fahrverhalten	Ergebnisse Regression				
			β_0	β_p	R^2	β'_p	
Sensitivitätsfaktor $\hat{\alpha}$ (Ausgangswert: 1,0)							
2	[40, 50]	v (km/h)	112,72	-7,5141	0,92	-0,0714	
		h (s)	2,42	0,0414	0,84	0,0168	
		ttc (s)	36,89	53,5386	0,98	0,5920	
		$cibtr$	0,65	-0,7445	1,00	-7,4897	
		δ_k	0,19	-0,0829	0,99	-0,7552	
		ε_k	0,64	-0,1134	1,00	-0,2135	
		[30, 40]	v (km/h)	99,40	8,6352	0,68	0,0799
	h (s)		2,96	0,2094	0,41	0,0660	
	ttc (s)		46,61	59,0784	0,90	0,5590	
	$cibtr$		0,20	-0,5382	0,99	-1,5892	
	δ_k		0,06	0,0530	0,98	0,4503	
	ε_k		0,57	-0,0611	0,90	-0,1211	
	3		[60, 75]	v (km/h)	187,37	-84,4441	0,86
		h (s)		3,32	-0,8075	0,94	-0,3211
		ttc (s)		123,63	-34,7057	0,50	-0,3903
		$cibtr$		2,24	-2,4063	0,86	-14,2321
		δ_k		0,14	0,0056	0,01	0,0397
		ε_k		0,56	-0,0299	0,59	-0,0561
		[45, 60]		v (km/h)	114,49	-9,3160	1,00
			h (s)	3,40	-0,1507	0,89	-0,0464
			ttc (s)	61,28	40,4395	1,00	0,3976
$cibtr$			-0,02	-0,4545	1,00	-0,9647	
δ_k			0,14	0,0319	1,00	0,1872	
ε_k			0,59	-0,0684	1,00	-0,1311	

Tabelle 19: Einflüsse des Sensitivitätsfaktors in SUMO auf das Fahrverhalten

ANHANG E EINFLÜSSE DER PARAMETER DER FAHRVERHALTENSMODELLE

Anzahl Fahrstreifen	Verkehrsstärke (Kfz/min)	Kenngröße Fahrverhalten	Ergebnisse Regression				
			β_0	β_p	R^2	β'_p	
Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten σ (Ausgangswert: 0,5)							
2	[40, 50]	v (km/h)	107,80	-5,5201	0,93	-0,0526	
		h (s)	2,44	0,0278	0,26	0,0113	
		ttc (s)	138,59	-91,2690	0,86	-0,9818	
		$cibtr$	0,00	-0,1943	0,98	-1,9568	
		δ_k	0,11	0,0024	0,07	0,0221	
		ε_k	0,52	0,0181	0,98	0,0341	
		[30, 40]	v (km/h)	109,79	-3,8964	0,98	-0,0361
	h (s)		3,14	0,0597	0,79	0,0188	
	ttc (s)		150,47	-80,8032	0,89	-0,7341	
	$cibtr$		-0,25	-0,1727	1,00	-0,5205	
	δ_k		0,12	-0,0094	0,88	-0,0804	
	ε_k		0,50	0,0188	0,70	0,0370	
	3		[60, 75]	v (km/h)	103,89	-7,0201	0,96
		h (s)		2,51	-0,0290	0,74	-0,0116
ttc (s)		114,20		-52,1563	0,99	-0,5918	
$cibtr$		-0,15		-0,1741	0,96	-0,7406	
δ_k		0,14		0,0076	0,84	0,0530	
ε_k		0,52		0,0221	0,97	0,0413	
[45, 60]		v (km/h)		107,72	-5,3298	1,00	-0,0507
		h (s)	3,25	-0,0080	0,26	-0,0025	
		ttc (s)	124,17	-43,6194	1,00	-0,4261	
		$cibtr$	-0,42	-0,1199	0,98	-0,2512	
		δ_k	0,17	-0,0005	0,02	-0,0027	
		ε_k	0,50	0,0357	0,97	0,0688	

Tabelle 20: Einflüsse von Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (σ) auf das Fahrverhalten

Anzahl Fahrstreifen	Verkehrsstärke (Kfz/min)	Kenngröße Fahrverhalten	Ergebnisse Regression				
			β_0	β_p	R^2	β'_p	
Mindestzeitlücke τ (in s, Ausgangswert: 1,0 s)							
2	[40, 50]	v (km/h)	118,63	-13,5287	1,00	-0,1287	
		h (s)	2,49	-0,0339	0,33	-0,0138	
		ttc (s)	35,99	54,1277	0,94	0,6006	
		$cibtr$	0,43	-0,5198	0,99	-5,5435	
		δ_k	0,16	-0,0467	0,97	-0,4252	
		ε_k	0,55	-0,0225	0,92	-0,0423	
		[30, 40]	v (km/h)	114,53	-6,6451	0,80	-0,0616
	h (s)		3,21	-0,0510	0,88	-0,0161	
	ttc (s)		84,85	18,7338	0,57	0,1809	
	$cibtr$		0,09	-0,4230	0,97	-1,2774	
	δ_k		0,16	-0,0466	0,94	-0,3957	
	ε_k		0,51	-0,0007	0,03	-0,0014	
	3		[60, 75]	v (km/h)	111,94	-10,9899	1,00
		h (s)		2,60	-0,0973	0,99	-0,0389
ttc (s)		49,66		37,7280	0,96	0,4317	
$cibtr$		0,26		-0,4814	1,00	-2,1523	
δ_k		0,22		-0,0728	1,00	-0,5055	
ε_k		0,55		-0,0139	0,95	-0,0259	
[45, 60]		v (km/h)		113,32	-8,1435	1,00	-0,0774
		h (s)	3,19	0,0552	0,73	0,0170	
		ttc (s)	74,56	27,0611	0,99	0,2663	
		$cibtr$	-0,09	-0,3859	1,00	-0,8189	
		δ_k	0,23	-0,0603	0,95	-0,3524	
		ε_k	0,49	0,0308	0,95	0,0591	

Tabelle 21: Einflüsse der Mindestzeitlücke in SUMO (τ) auf das Fahrverhalten

F Ergebnisse der Validierung

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der situationsübergreifenden und der situationsspezifischen Validierung (vgl. Abschnitt 7.5) des in dieser Arbeit entstandenen Verfahrens zur kontextdifferenzierten Anpassung des Fahrverhaltens in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation wiedergegeben.

F.1 Situationsübergreifende Validierung

Abbildungen 40 und 41 stellen Geschwindigkeiten, Nettozeitlücken sowie Gleichmäßigkeit und Schwerpunktlage der Fahrstreifenauslastung aus einer Simulation mit SUMO den entsprechenden Kenngrößen der Referenzstrecke A92 gegenüber. Hierbei wurde zunächst nur zwischen zwei- und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen unterschieden; eine weitergehende Differenzierung auch nach Anzeigezuständen der SBA erfolgte erst im zweiten Validierungsschritt (siehe unten). Referenzdaten der A92 sind in grau, Daten aus der Simulation in blau dargestellt. Eine Diskussion der Ergebnisse wird in Abschnitt 7.5 gegeben.

Eine ähnliche situationsübergreifende Validierung für aimsun.next wurde im Rahmen des Forschungsprojekts FE 03.0538/2015/IGB durch die Heusch/Boesefeldt GmbH durchgeführt. Diesbezügliche Ergebnisse können dem Projektbericht [87] (dort Abschnitt 4.2.4) entnommen werden.

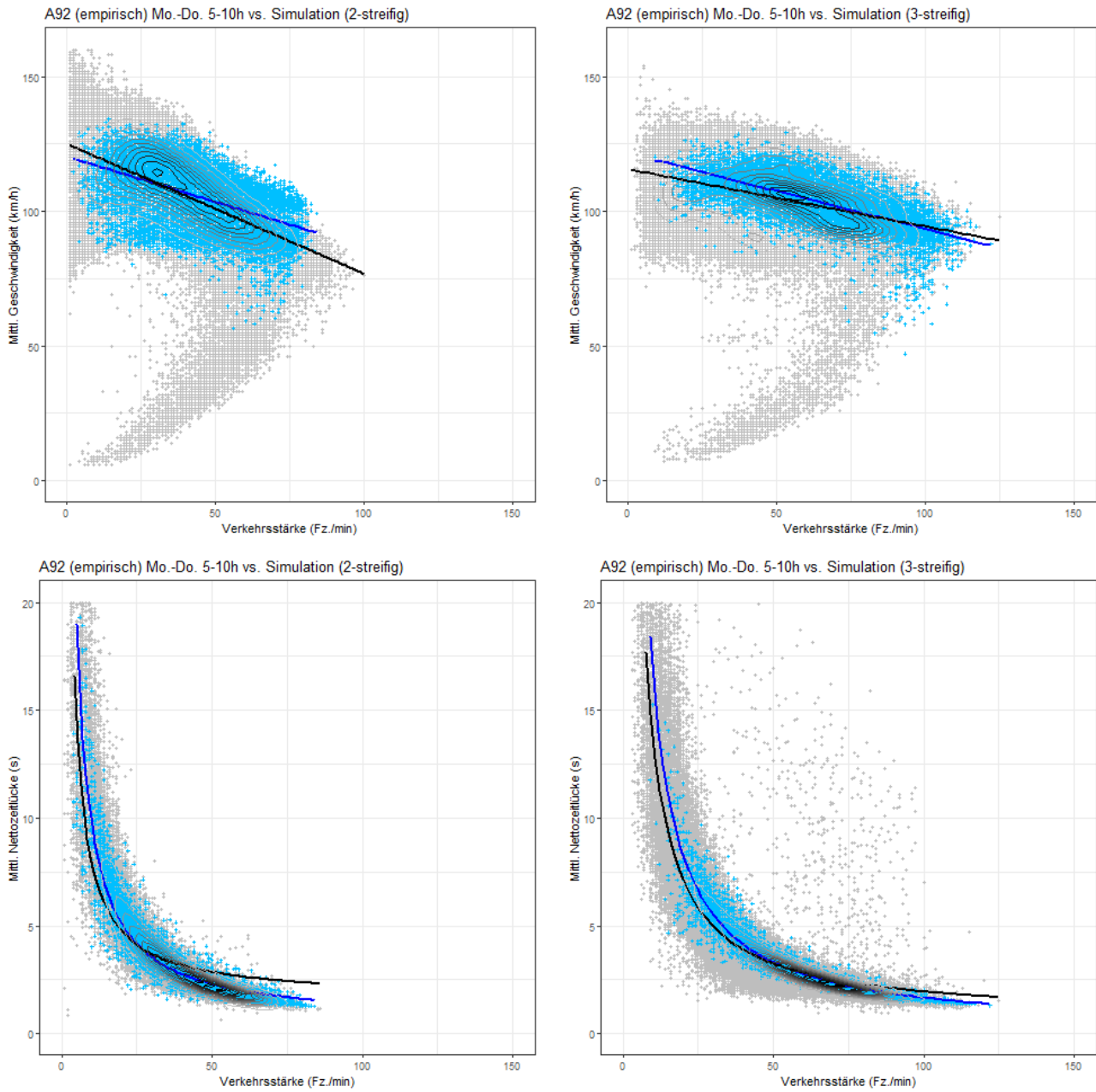


Abbildung 40: Geschwindigkeiten und Nettozeitlücken: Realität (grau) vs. Simulation (SUMO, blau)

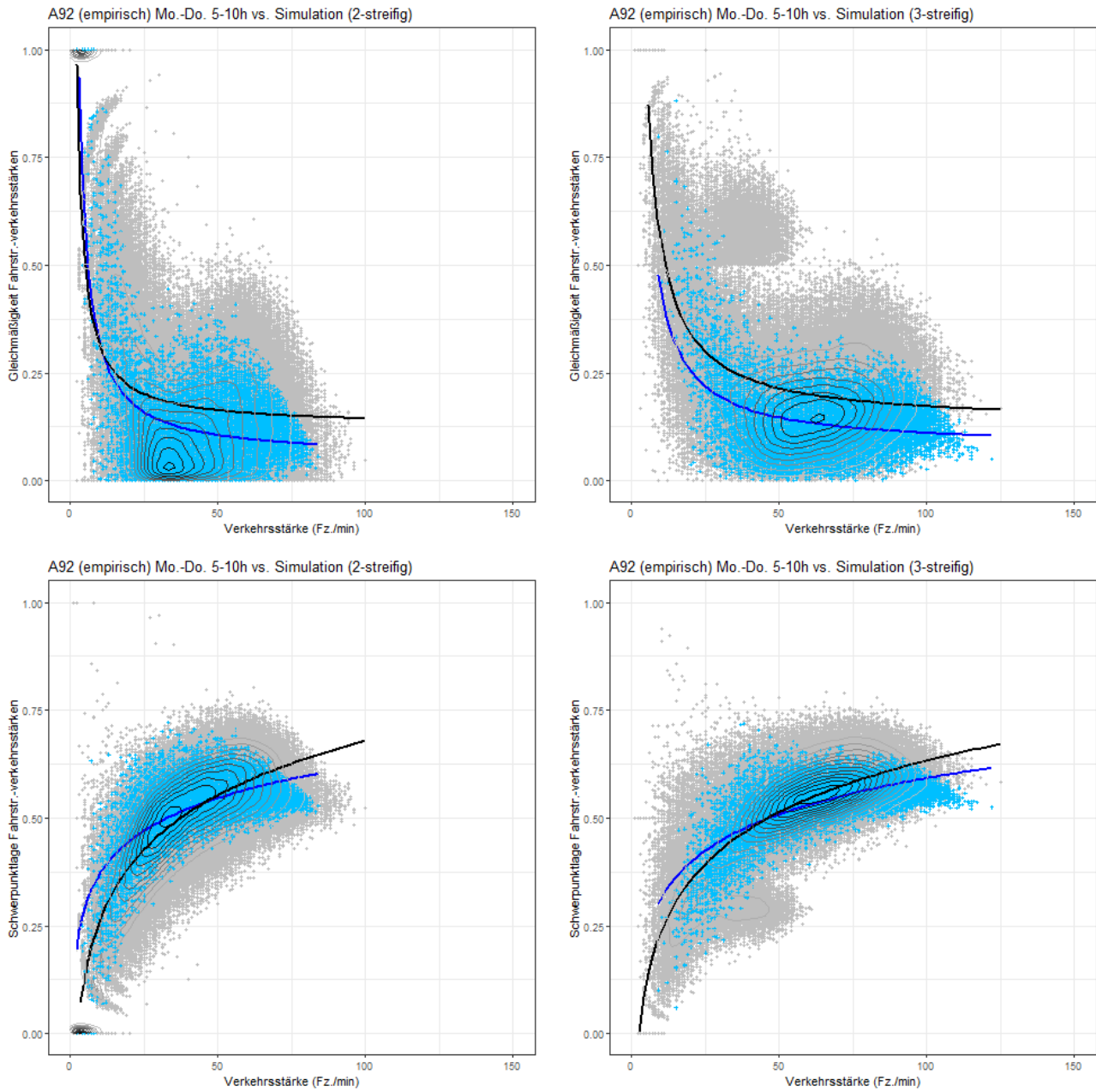


Abbildung 41: Fahrstreifenwahl: Realität (grau) vs. Simulation (SUMO, blau)

F.2 Situationsspezifische Validierung

Tabelle 22 liefert zunächst eine Übersicht über wesentliche Ergebnisse der situationsspezifischen Validierung. Ein Teil der Validierungsergebnisse zu aimsun.next sind bereits im Bericht zum Projekt FE 03.0538/2015/IGB [87] angegeben (dort Abschnitt 4.3.4). Die in der Tabelle verwendeten Symbole haben folgende Bedeutung:

- ✓ gute oder ausreichende Übereinstimmung:
 - Geschwindigkeiten: max. ± 5 km/h
 - Nettozeitlücken: max. $\pm 0,25$ s
 - TTC: max. ± 5 s
 - CIBTR, IBTR: max. $\pm 0,1$
 - PBTR: max. $\pm 0,25$
- + in Simulation höher
- in Simulation niedriger
- ± uneinheitlich gerichtete Abweichungen
- ✓/+ in einzelnen Szenarien in Simulation höher
- ✓/– in einzelnen Szenarien in Simulation niedriger
- * in Simulation höher bei niedrigen Verkehrsstärken und umgekehrt
- ** Abweichung wächst mit zunehmender Verkehrsstärke

Kenngröße Fahrverhalten	Ergebnisse der Validierung			
	aimsun.next		SUMO	
	2-streifig	3-streifig	2-streifig	3-streifig
Fahrgeschwindigkeiten (v)	✓	✓	✓/+	✓
Nettozeitlücken (h)	✓	✓	✓	✓
Auffahrzeiten (t_{tc})	±*	✓/+	+	+
$cibtr$	✓/–	–	✓/–	–
$ibtr$	–	–**	–**	–**
$pbtr$	–**	–**	✓/+**	✓

Tabelle 22: Ergebnisse der situationsspezifischen Validierung: Übersicht

Abbildungen 42 bis 47 zeigen Ergebnisse der situationsspezifischen Validierung für ausgewählte Kenngrößen am Beispiel dreistreifiger Querschnitte und Geschwindigkeitsvorgaben von 130 bzw. 100 km/h (jeweils lokal und stromaufwärts, keine Gefahrenwarnungen oder Fahrstreifensperrungen). Referenzdaten der A92 sind in grau, Daten aus der Simulation in blau dargestellt.

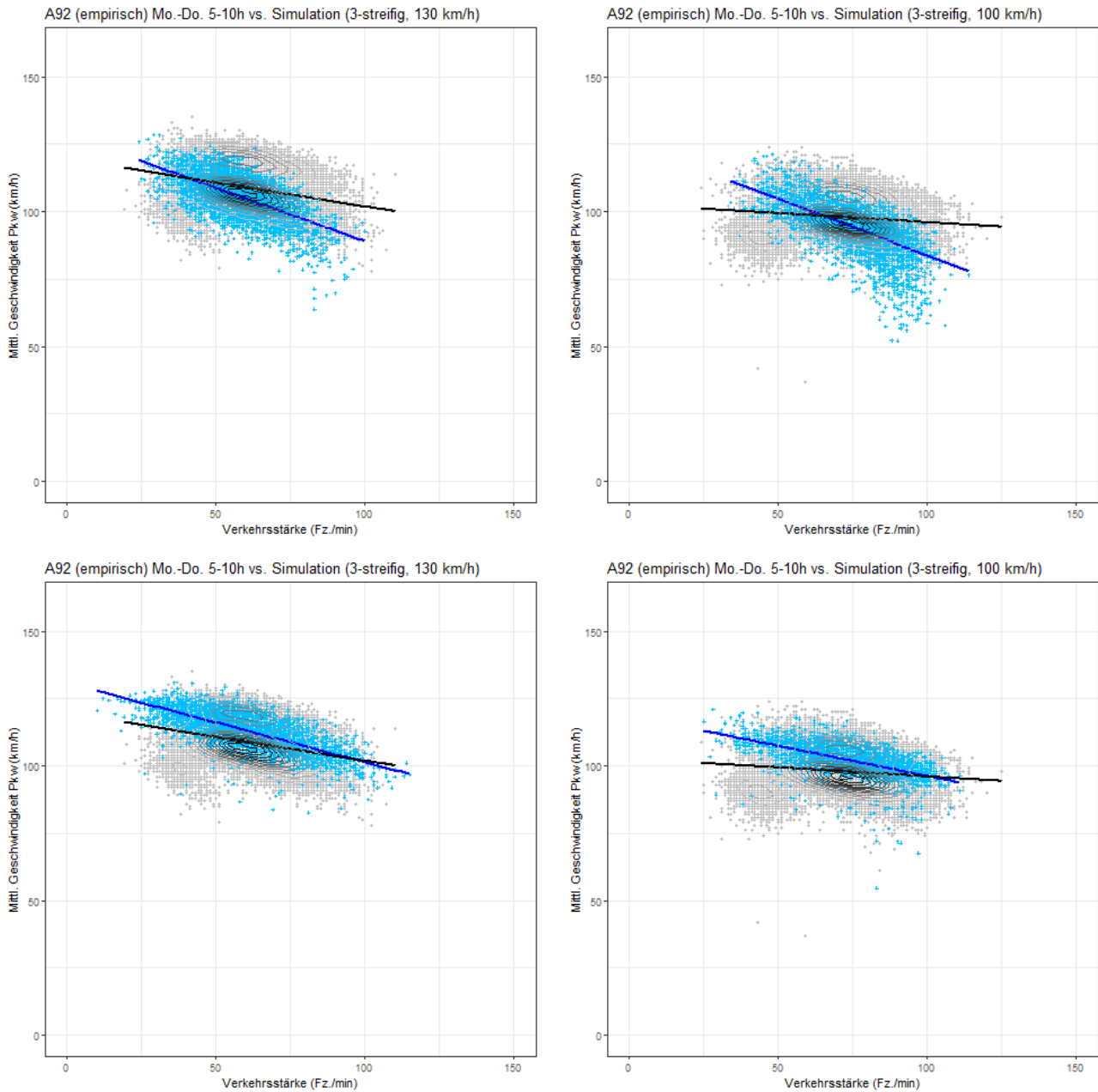


Abbildung 42: Pkw-Geschwindigkeiten: Realität (grau) vs. Simulation (blau); oben: aimsun.next, unten: SUMO

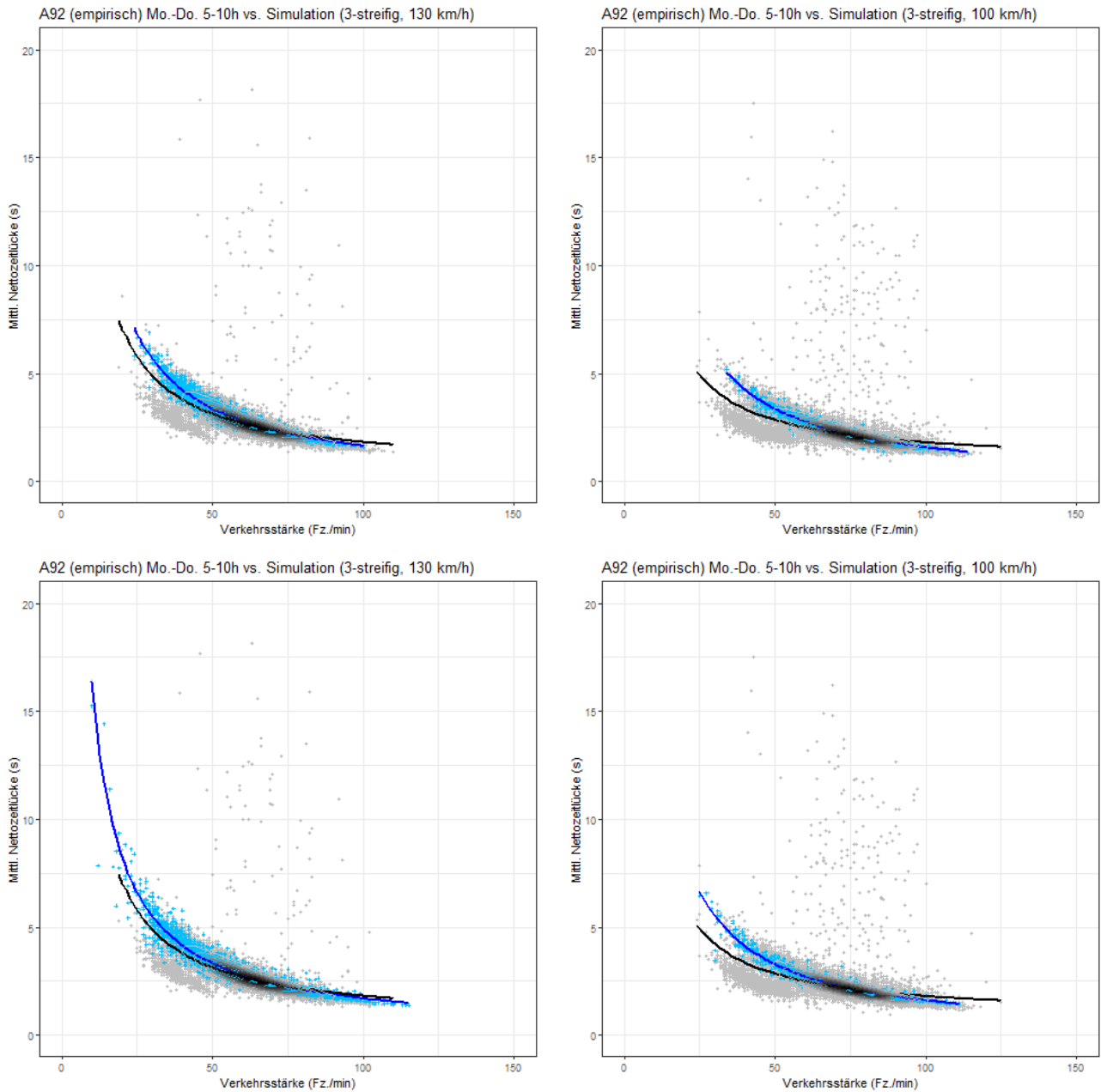


Abbildung 43: Nettozeitlücken: Realität (grau) vs. Simulation (blau); oben: aimsun.next, unten: SUMO

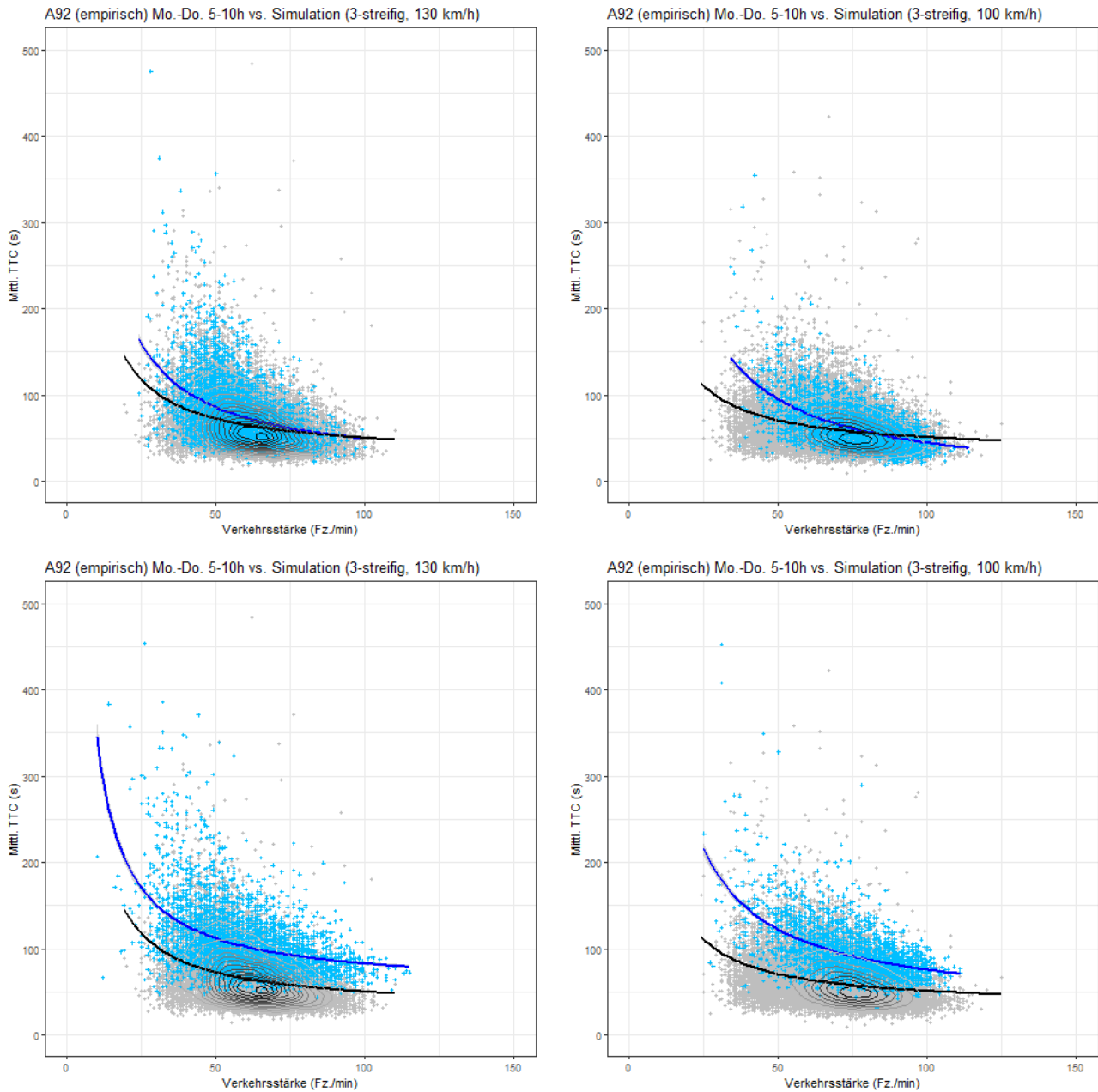


Abbildung 44: Auffahrzeiten (TTC): Realität (grau) vs. Simulation (blau); oben: aimsun.next, unten: SUMO

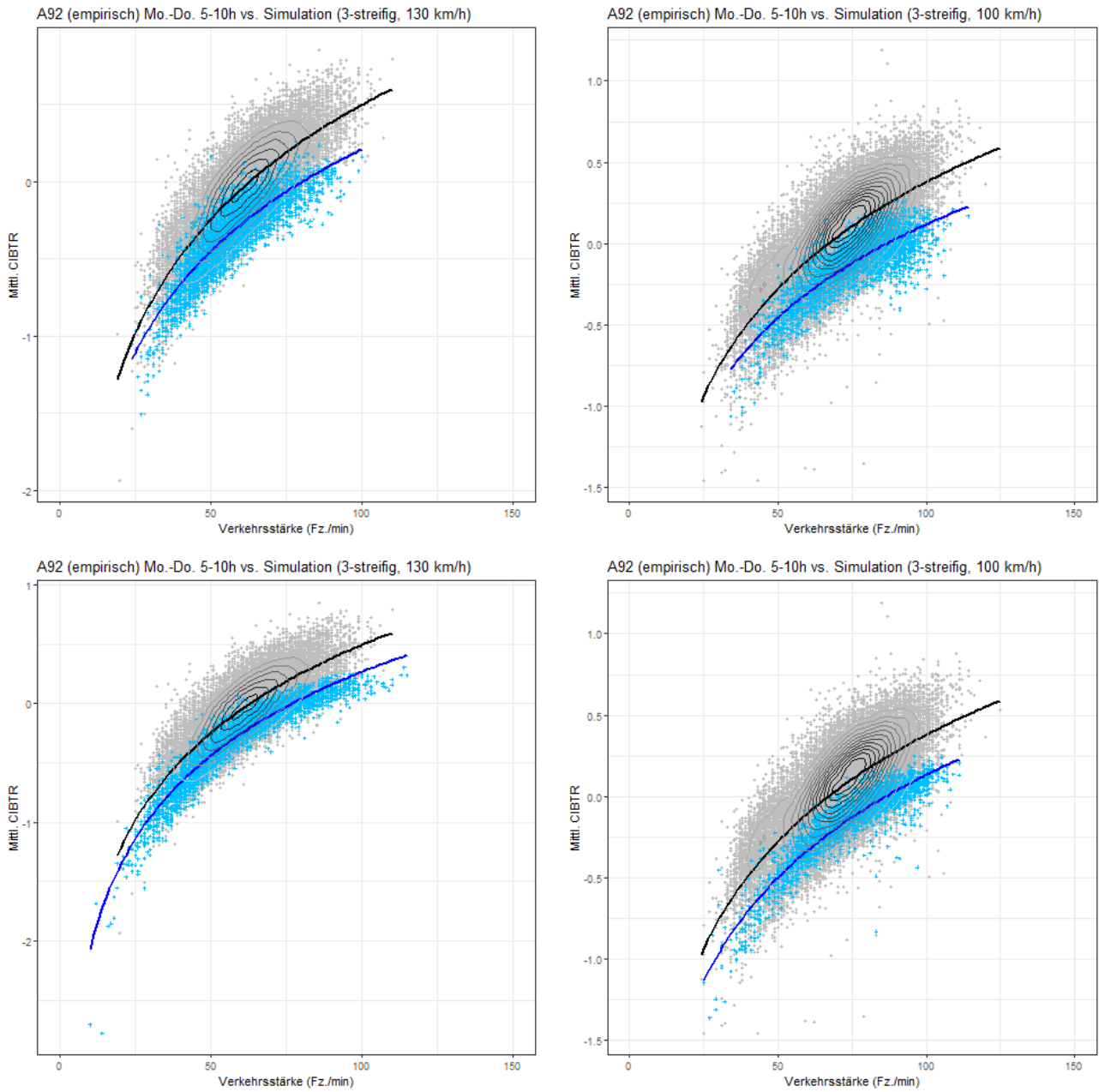


Abbildung 45: CIBTR: Realität (grau) vs. Simulation (blau); oben: aimsun.next, unten: SUMO

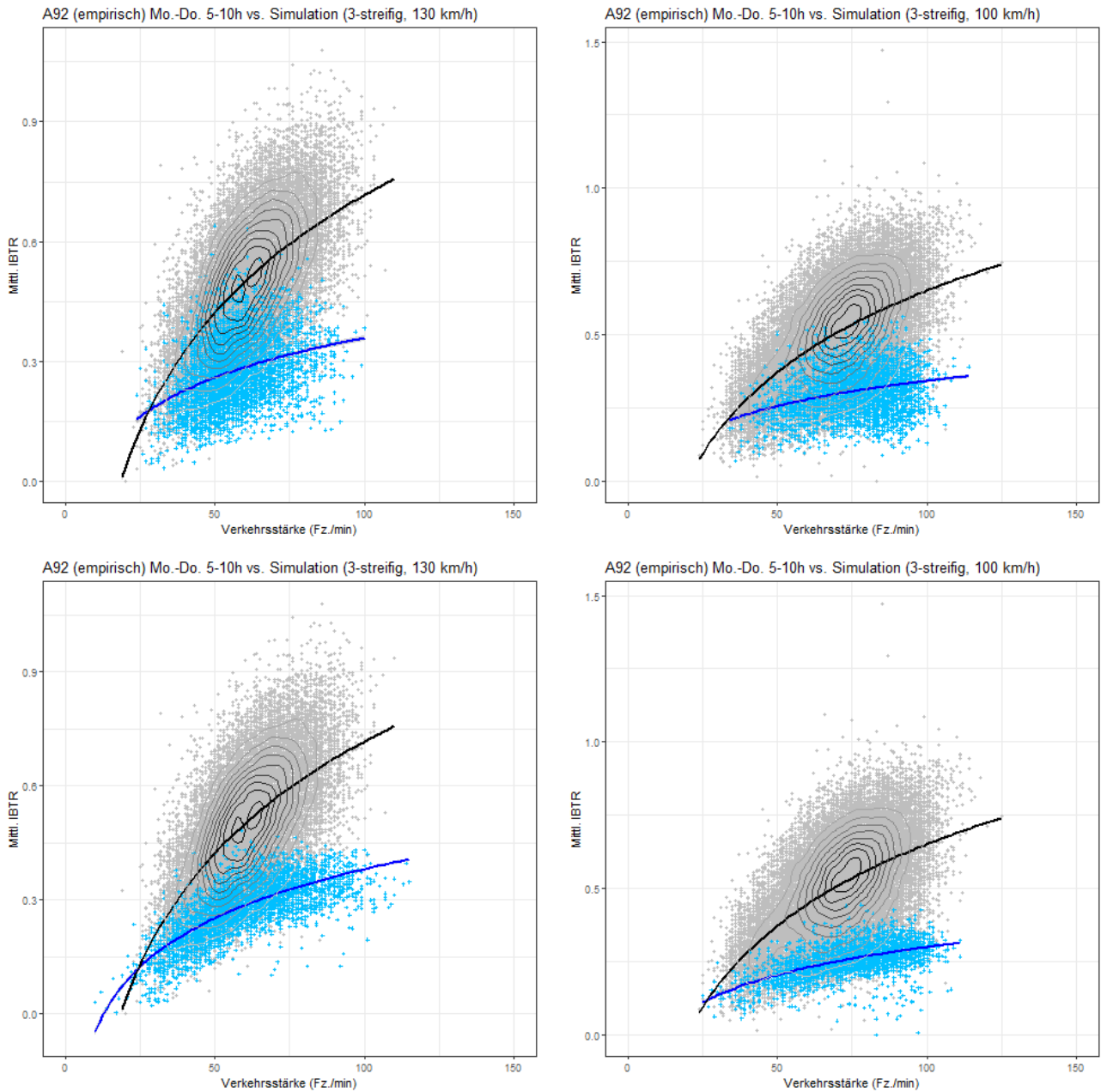


Abbildung 46: IBTR: Realität (grau) vs. Simulation (blau); oben: aimsun.next, unten: SUMO

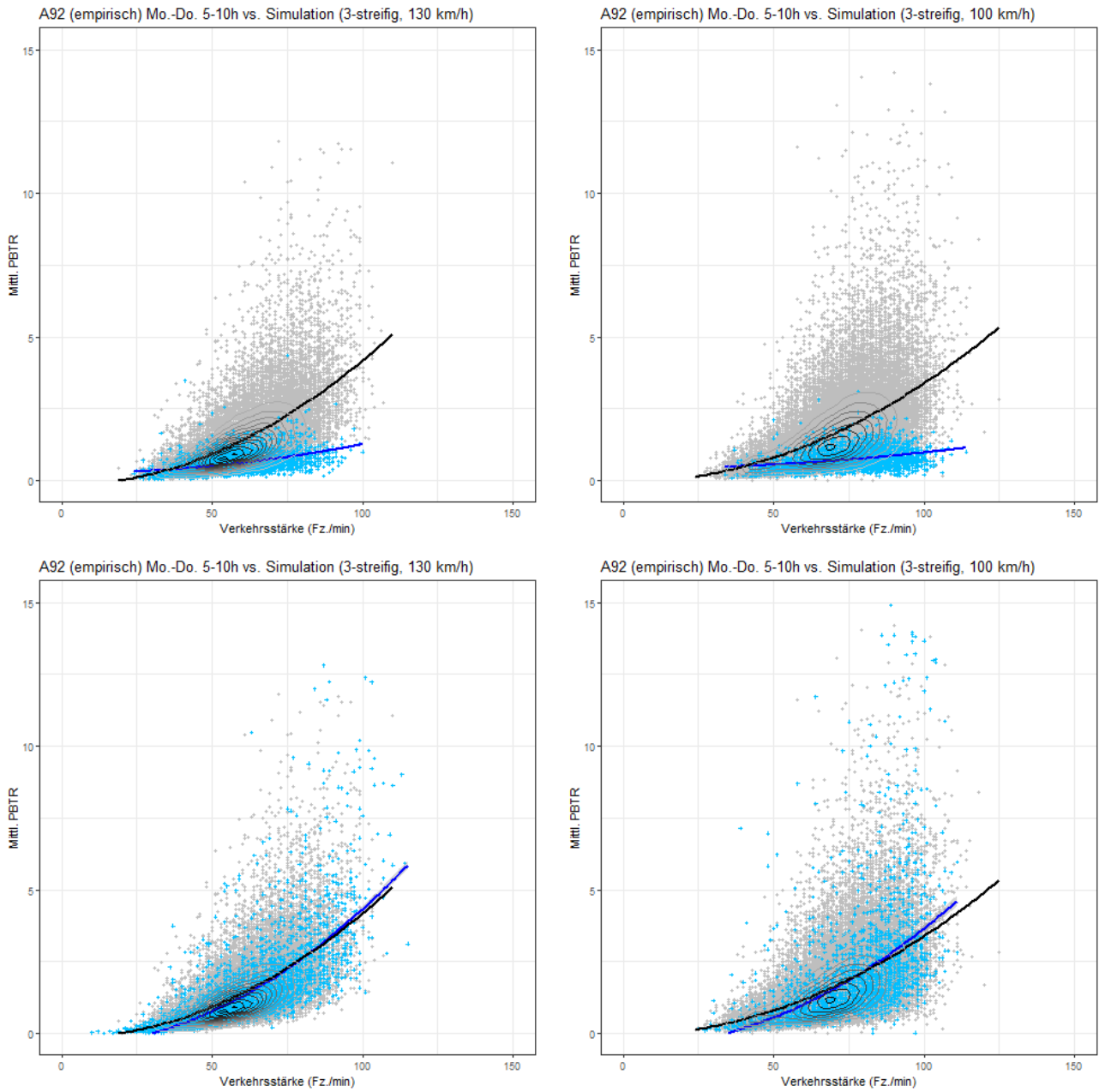


Abbildung 47: PBTR: Realität (grau) vs. Simulation (blau); oben: aimsun.next, unten: SUMO

Tabellen 23 und 24 geben die mittleren prozentualen Abweichungen und Abweichungsbeträge zwischen Realität und Simulation für ausgewählte Kenngrößen und Fahrsituationen für die Simulationsumgebungen aimsun.next bzw. SUMO wieder. Die Fahrsituationen werden durch die jeweils angegebene Anzahl an Fahrstreifen und die Geschwindigkeitsvorgabe gebildet, wobei die Geschwindigkeitsvorgabe sowohl lokal als auch stromaufwärts angezeigt wurde. In allen Fahrsituationen werden keine Gefahrenwarnungen oder Fahrstreifensperrungen angezeigt. Zu beachten ist, dass in SUMO auf eine Umsetzung riskanteren Fahrverhaltens verzichtet wurde (vgl. Abschnitt 7.3). Eine Diskussion der Ergebnisse wird in Abschnitt 7.5 gegeben.

Die in Tabellen 23 und 24 angegebene mittlere Abweichung bezieht sich auf Differenzen zwischen Mittelwerten bzw. Medianen der jeweils angegebenen Kenngröße in Realität und Simulation. Über alle Verkehrsstärkeklassen, in denen eine hinreichende Zahl an Datensätzen vorliegt, wurde ein gewichteter Mittelwert gebildet. Als Gewicht wurde hierbei die Anzahl der Datensätze zur jeweiligen Verkehrsstärkeklasse der Referenzstrecke (Realität) herangezogen. Das Vorgehen wird in Abschnitt 7.5 ausführlicher beschrieben.

ANHANG F ERGEBNISSE DER VALIDIERUNG

Anzahl Fahrstreifen	Geschw.- vorgabe	Kenngröße Fahrverhalten	Anz. Datensätze		Mittlere Abweichung		Mittl. Betrag Abweichung	
			Realität	Simulation	Mittelwerte	Mediane	Mittelwerte	Mediane
2	passiv	<i>v</i> (km/h)	99673	3609	-4,3928	-3,7223	4,3928	3,7223
2	passiv	<i>h</i> (s)	99673	3609	-0,2072	-0,1387	0,3243	0,2551
2	passiv	<i>ttc</i> (s)	99673	3609	19,2214	12,8065	19,2540	15,3014
2	passiv	<i>cibtr</i>	99673	3609	-0,0984	-0,0984	0,1256	0,1230
2	passiv	<i>ibtr</i>	99673	3609	-0,1004	-0,0975	0,1054	0,1089
2	passiv	<i>pbtr</i>	99673	3609	-0,3133	-0,2348	0,3198	0,2503
2	130 km/h	<i>v</i> (km/h)	19604	1949	-3,9615	-3,1938	3,9615	3,1938
2	130 km/h	<i>h</i> (s)	19604	1949	0,0403	0,0309	0,0403	0,0309
2	130 km/h	<i>ttc</i> (s)	19604	1949	2,6591	0,0444	4,1801	2,8150
2	130 km/h	<i>cibtr</i>	19604	1949	-0,1163	-0,1132	0,1163	0,1132
2	130 km/h	<i>ibtr</i>	19604	1949	-0,1249	-0,1245	0,1249	0,1245
2	130 km/h	<i>pbtr</i>	19604	1949	-0,6229	-0,4564	0,6229	0,4569
2	100 km/h	<i>v</i> (km/h)	41223	2662	1,0281	1,2427	1,0711	1,3013
2	100 km/h	<i>h</i> (s)	41223	2662	0,0204	0,0311	0,0224	0,0326
2	100 km/h	<i>ttc</i> (s)	41223	2662	-8,6023	-9,5498	8,8477	9,9200
2	100 km/h	<i>cibtr</i>	41223	2662	-0,0616	-0,0613	0,0616	0,0613
2	100 km/h	<i>ibtr</i>	41223	2662	-0,1013	-0,1026	0,1013	0,1026
2	100 km/h	<i>pbtr</i>	41223	2662	-0,8494	-0,6315	0,8494	0,6315
2	80 km/h	<i>v</i> (km/h)	11147	1070	3,4265	3,1024	3,5070	3,2483
2	80 km/h	<i>h</i> (s)	11147	1070	0,0403	0,0531	0,0451	0,0531
2	80 km/h	<i>ttc</i> (s)	11147	1070	-9,5986	-10,4381	9,9415	10,4381
2	80 km/h	<i>cibtr</i>	11147	1070	-0,0619	-0,0601	0,0619	0,0601
2	80 km/h	<i>ibtr</i>	11147	1070	-0,1088	-0,1062	0,1088	0,1062
2	80 km/h	<i>pbtr</i>	11147	1070	-0,9474	-0,7104	0,9474	0,7104
3	passiv	<i>v</i> (km/h)	52730	1252	-4,4159	-3,6207	4,4159	3,6207
3	passiv	<i>h</i> (s)	52730	1252	0,1779	0,1959	0,2215	0,1984
3	passiv	<i>ttc</i> (s)	52730	1252	20,1475	18,3351	20,1475	18,3351
3	passiv	<i>cibtr</i>	52730	1252	-0,2076	-0,2072	0,2076	0,2072
3	passiv	<i>ibtr</i>	52730	1252	-0,1633	-0,1634	0,1633	0,1634
3	passiv	<i>pbtr</i>	52730	1252	-0,4078	-0,3532	0,4078	0,3532
3	130 km/h	<i>v</i> (km/h)	24725	4013	-5,4532	-3,9247	5,6999	4,2012
3	130 km/h	<i>h</i> (s)	24725	4013	0,1181	0,1265	0,1208	0,1265
3	130 km/h	<i>ttc</i> (s)	24725	4013	8,7977	8,0046	8,8304	8,0046
3	130 km/h	<i>cibtr</i>	24725	4013	-0,2306	-0,2310	0,2306	0,2310
3	130 km/h	<i>ibtr</i>	24725	4013	-0,2133	-0,2174	0,2133	0,2174
3	130 km/h	<i>pbtr</i>	24725	4013	-0,8715	-0,7382	0,8715	0,7382
3	100 km/h	<i>v</i> (km/h)	38475	2965	-3,6490	-2,1197	4,6824	3,1973
3	100 km/h	<i>h</i> (s)	38475	2965	0,0848	0,1157	0,0883	0,1157
3	100 km/h	<i>ttc</i> (s)	38475	2965	6,3359	7,0426	6,4346	7,0426
3	100 km/h	<i>cibtr</i>	38475	2965	-0,2127	-0,2215	0,2127	0,2215
3	100 km/h	<i>ibtr</i>	38475	2965	-0,2111	-0,2159	0,2111	0,2159
3	100 km/h	<i>pbtr</i>	38475	2965	-1,0633	-0,8886	1,0633	0,8886
3	80 km/h	<i>v</i> (km/h)	3657	825	-2,7166	-1,0127	3,1323	2,3478
3	80 km/h	<i>h</i> (s)	3657	825	0,0477	0,0947	0,0740	0,0947
3	80 km/h	<i>ttc</i> (s)	3657	825	3,4667	3,2146	4,0194	3,5972
3	80 km/h	<i>cibtr</i>	3657	825	-0,2140	-0,2253	0,2140	0,2253
3	80 km/h	<i>ibtr</i>	3657	825	-0,2472	-0,2568	0,2472	0,2568
3	80 km/h	<i>pbtr</i>	3657	825	-1,2148	-1,0308	1,2148	1,0308

Tabelle 23: Situationsspezifische Abweichungen: Realität vs. Simulation (aimsun.next)

Anzahl Fahrstreifen	Geschw.- vorgabe	Kenngröße Fahrverhalten	Anz. Datensätze		Mittlere Abweichung		Mittl. Betrag Abweichung	
			Realität	Simulation	Mittelwerte	Mediane	Mittelwerte	Mediane
2	passiv	<i>v</i> (km/h)	107194	2002	-2,3327	-0,0452	2,4328	1,0802
2	passiv	<i>h</i> (s)	107194	2002	-0,2285	-0,1297	0,2537	0,1458
2	passiv	<i>ttc</i> (s)	107194	2002	43,9420	37,1991	43,9420	37,1991
2	passiv	<i>cibtr</i>	107194	2002	-0,1002	-0,0960	0,1103	0,1116
2	passiv	<i>ibtr</i>	107194	2002	-0,1308	-0,1215	0,1308	0,1217
2	passiv	<i>pbtr</i>	107194	2002	-0,1476	-0,1281	0,1488	0,1286
2	130 km/h	<i>v</i> (km/h)	23048	2829	0,4896	3,3479	1,2268	3,8070
2	130 km/h	<i>h</i> (s)	23048	2829	0,0337	0,0115	0,0361	0,0185
2	130 km/h	<i>ttc</i> (s)	23048	2829	30,4028	28,0943	30,4028	28,0943
2	130 km/h	<i>cibtr</i>	23048	2829	-0,1276	-0,1150	0,1276	0,1150
2	130 km/h	<i>ibtr</i>	23048	2829	-0,1795	-0,1610	0,1795	0,1610
2	130 km/h	<i>pbtr</i>	23048	2829	0,0895	0,0259	0,1856	0,1084
2	100 km/h	<i>v</i> (km/h)	35547	620	7,2765	9,0747	7,2765	9,0747
2	100 km/h	<i>h</i> (s)	35547	620	0,0117	0,0237	0,0187	0,0237
2	100 km/h	<i>ttc</i> (s)	35547	620	21,6690	20,7284	21,6690	20,7284
2	100 km/h	<i>cibtr</i>	35547	620	-0,0730	-0,0634	0,0730	0,0634
2	100 km/h	<i>ibtr</i>	35547	620	-0,1622	-0,1481	0,1622	0,1481
2	100 km/h	<i>pbtr</i>	35547	620	0,6350	0,4523	0,6395	0,4532
2	80 km/h	<i>v</i> (km/h)	11383	4967	10,5834	11,5772	10,5834	11,5772
2	80 km/h	<i>h</i> (s)	11383	4967	0,0395	0,0588	0,0410	0,0588
2	80 km/h	<i>ttc</i> (s)	11383	4967	19,5408	18,5443	19,5408	18,5443
2	80 km/h	<i>cibtr</i>	11383	4967	-0,0733	-0,0510	0,0733	0,0510
2	80 km/h	<i>ibtr</i>	11383	4967	-0,1706	-0,1492	0,1706	0,1492
2	80 km/h	<i>pbtr</i>	11383	4967	2,1013	1,1765	2,1013	1,1765
3	passiv	<i>v</i> (km/h)	54595	1660	-2,1691	-1,4042	2,3230	1,5628
3	passiv	<i>h</i> (s)	54595	1660	0,0965	0,0870	0,2419	0,1770
3	passiv	<i>ttc</i> (s)	54595	1660	44,4107	41,4328	44,4107	41,4328
3	passiv	<i>cibtr</i>	54595	1660	-0,1837	-0,1819	0,1837	0,1820
3	passiv	<i>ibtr</i>	54595	1660	-0,1689	-0,1638	0,1689	0,1638
3	passiv	<i>pbtr</i>	54595	1660	-0,2020	-0,2081	0,2020	0,2081
3	130 km/h	<i>v</i> (km/h)	25008	3375	2,7354	3,9740	2,7354	3,9740
3	130 km/h	<i>h</i> (s)	25008	3375	0,1089	0,1195	0,1111	0,1195
3	130 km/h	<i>ttc</i> (s)	25008	3375	37,1509	36,2892	37,1509	36,2892
3	130 km/h	<i>cibtr</i>	25008	3375	-0,1894	-0,1883	0,1894	0,1883
3	130 km/h	<i>ibtr</i>	25008	3375	-0,2107	-0,2107	0,2107	0,2107
3	130 km/h	<i>pbtr</i>	25008	3375	-0,1544	-0,1769	0,1636	0,1769
3	100 km/h	<i>v</i> (km/h)	39389	2482	3,0561	3,9170	3,0561	3,9170
3	100 km/h	<i>h</i> (s)	39389	2482	0,0976	0,1251	0,0994	0,1251
3	100 km/h	<i>ttc</i> (s)	39389	2482	36,7918	36,5915	36,7918	36,5915
3	100 km/h	<i>cibtr</i>	39389	2482	-0,2271	-0,2363	0,2271	0,2363
3	100 km/h	<i>ibtr</i>	39389	2482	-0,2564	-0,2617	0,2564	0,2617
3	100 km/h	<i>pbtr</i>	39389	2482	-0,0600	-0,2554	0,1867	0,2610
3	80 km/h	<i>v</i> (km/h)	3905	3059	5,0492	6,1231	5,0492	6,1231
3	80 km/h	<i>h</i> (s)	3905	3059	0,0746	0,1218	0,0940	0,1218
3	80 km/h	<i>ttc</i> (s)	3905	3059	30,5030	30,9276	30,5030	30,9276
3	80 km/h	<i>cibtr</i>	3905	3059	-0,2433	-0,2468	0,2433	0,2468
3	80 km/h	<i>ibtr</i>	3905	3059	-0,3028	-0,3070	0,3028	0,3070
3	80 km/h	<i>pbtr</i>	3905	3059	0,1574	-0,3458	0,4073	0,4120

Tabelle 24: Situationspezifische Abweichungen: Realität vs. Simulation (SUMO)

Abbildungsverzeichnis

1	Systemaufbau einer Streckenbeeinflussungsanlage	14
2	Prozesse der streckenbezogenen Verkehrsbeeinflussung	15
3	Räumlich-zeitliche Fahrentscheidungs Ebenen in Anlehnung an Janssen (1979)	25
4	Prozesse der Wissensextraktion aus Daten	39
5	Lage der Referenzstrecken A92 und A57	53
6	Entitäten eines Autobahnabschnitts mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung	61
7	Prozesse des Autobahnverkehrs mit streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung	64
8	Merkmale zur Beschreibung einer Fahrsituation	66
9	Architektur des Verfahrens zur kontextspezifischen Anpassung des Fahrverhaltens	73
10	Struktur des als hybrides Bayessches Netz realisierten Inferenzmodells	79
11	Varianten der Anwendung von Streckenver- und -geboten in der Simulation	82
12	Interaktionen zwischen Inferenzmodell und Verkehrsflusssimulation	83
13	Verfahren zur Wahrung der Konsistenz der Geschwindigkeitswahl	86
14	Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrpräferenzen in der Datenbank	88
15	Funktionsweise der SBA-Simulation und Interaktion mit der Verkehrsflusssimulation	92
16	Beispiel der Nachbildung eines Anzeigequerschnitts in SUMO	93
17	Datenstruktur für Verkehrsdaten inkl. Kontext-Annotationen	95
18	Verfahren zur Aggregation der Anzeigezustände einzelner Wechselzeichengeber	99
19	Abschnittsbezogene Berechnung pulkbezogener Kenngrößen (hier: PBTR)	101
20	Verkehrssituationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsvorgaben der SBA	103
21	Einflüsse von Geschwindigkeitsvorgaben auf TTC und CIBTR	104
22	Einflüsse von Gefahrenwarnungen auf das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten	105
23	Visualisierung zur Regressions- und Korrelationsanalyse	109
24	Einfluss des Sensitivitätsfaktors in SUMO auf das CIBTR	112
25	Einfluss des Sensitivitätsfaktors in SUMO auf das CIBTR	115
26	Einflüsse der Parameter σ und τ in SUMO auf das CIBTR	117
27	Schritte der Modellanpassung, Kalibrierung und Validierung	118
28	Fundamentaldiagramme für drei Parametersätze in SUMO	122
29	Konfiguration des SBA-Simulationsmoduls für SUMO	126
30	Struktur des Inferenzmodells nach Anpassung der Modelltopologie	128
31	Zusammenhänge $\alpha(cibtr)$ und $h_{\min}(cibtr)$ (Pkw, dreistreifige Fahrbahn)	135
32	Ausgewählte Ergebnisse der situationsübergreifenden Validierung (SUMO)	137
33	Ausgewählte Ergebnisse der situationsspezifischen Validierung (SUMO)	140
34	Anwendungsszenarien der kontext-differenzierten Fahrverhaltensmodellierung	142
35	Beispiel eines gerichteten azyklischen Graphen	158
36	Markov-Blanket eines Knotens X in einem Bayesschen Netz	159
37	Prozesse und Interaktionen der Simulation mit aimsun.next (insgesamt)	165
38	Prozesse und Interaktionen während eines Simulationsschritts mit aimsun.next	165
39	Prozesse und Interaktionen während eines Simulationsschritts mit SUMO	166
40	Geschwindigkeiten und Nettozeitlücken: Realität vs. Simulation (SUMO)	178
41	Fahrstreifenwahl: Realität vs. Simulation (SUMO)	179
42	Pkw-Geschwindigkeiten: Realität vs. Simulation	181
43	Nettozeitlücken: Realität vs. Simulation	182

44	Auffahrzeiten (TTC): Realität vs. Simulation	183
45	CIBTR: Realität vs. Simulation	184
46	IBTR: Realität vs. Simulation	185
47	PBTR: Realität vs. Simulation	186

Tabellenverzeichnis

1	Wichtige automatisiert erkennbare Situationen und zugehörige Maßnahmen	17
2	Kenngößen zur Beschreibung des Fahrverhaltens	26
3	Ausgewählte Software zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation	34
4	Kenngößen zur Beschreibung einer Fahrsituation mit Wertebereichen	66
5	Ausgewählte Kenngößen zur Beschreibung des Fahrverhaltens	68
6	Ausgewählte Parameter der Fahrzeugfolgemodelle in aimsun.next und SUMO	72
7	Ausgangswerte Parameter des Fahrzeugfolgmodells in aimsun.next (A92)	120
8	Ausgangswerte Parameter der Fahrverhaltensmodelle in SUMO (A92)	124
9	Zusammenhänge $\alpha(cibtr)$ und $h_{\min}(cibtr)$	135
10	Menge der Geschwindigkeitsvorgaben	167
11	Menge der Vorgaben zur Fahrstreifennutzung	168
12	Menge der Überholverbote	169
13	Menge der Gefahrenwarnungen	170
14	Einflüsse der Parameter in aimsun.next auf das Fahrverhalten	171
15	Einflüsse der Parameter in SUMO auf das Fahrverhalten: Übersicht	172
16	Einflüsse der Wunschbeschleunigung in SUMO auf das Fahrverhalten	174
17	Einflüsse der Wunschverzögerung in SUMO auf das Fahrverhalten	174
18	Einflüsse des Mindestabstands in SUMO auf das Fahrverhalten	175
19	Einflüsse des Sensitivitätsfaktors in SUMO auf das Fahrverhalten	175
20	Einflüsse von Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (σ) auf das Fahrverhalten	176
21	Einflüsse der Mindestzeitlücke in SUMO (τ) auf das Fahrverhalten	176
22	Ergebnisse der situationsspezifischen Validierung: Übersicht	180
23	Situationsspezifische Abweichungen: Realität vs. Simulation (aimsun.next)	188
24	Situationsspezifische Abweichungen: Realität vs. Simulation (SUMO)	189

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
AQ	Anzeigequerschnitt
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BN	Bayessches Netz
CIBTR	Compensated Individual Braking Time Risk
CPBTR	Compensated Platoon Braking Time Risk
C-ITS	Cooperative Intelligent Transportation Systems
CSV	Comma-separated Values
FFE	Fahrer-Fahrzeug-Einheit
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GBN	Gaußsches Bayessches Netz
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
IBTR	Individual Braking Time Risk
Kfz	Kraftfahrzeug
KNN	Künstliches neuronales Netz
Lkw	Lastkraftwagen
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen
MLE	Maximum Likelihood Estimate
MQ	Messquerschnitt
PBTR	Platoon Braking Time Risk
Pkw	Personenkraftwagen
QS	Qualitätssicherung
RSU	Roadside Unit
RWVA	Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen
RWVZ	Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen
SBA	Streckenbeeinflussungsanlage
SSM	Surrogate Safety Measures
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
TraCI	Traffic Control Interface
TTC	Time to Collision (Auffahrzeit)
UML	Unified Modeling Language
WZG	Wechselzeichengeber
XML	Extended Markup Language

Symbolverzeichnis

Bayessche Netze

\mathcal{B}	Bayessches Netz
\mathcal{G}	gerichteter azyklischer Graph, der ein Bayessches Netz bildet
$\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_{n_X}\}$	Menge aller Zufallsvariablen (Knoten) in einem Bayesschen Netz
n_X	Anzahl der Zufallsvariablen (Knoten) in einem Bayesschen Netz
\mathbf{A}	Menge aller Kanten in einem Bayesschen Netz
n_A	Anzahl der Kanten in einem Bayesschen Netz
$\mathbf{Pa}(X_i) = \{P_{i,1}, \dots, P_{n_{\mathbf{Pa},i}}\}$	Menge der Elternknoten eines Knotens X_i
$n_{\mathbf{Pa},i}$	Anzahl der Elternknoten eines Knotens X_i
\mathbf{Z}_i	Menge aller zulässigen Zustände eines wertdiskreten Knotens X_i
$p(X)$	Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariable X
$p(X Y)$	bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariable X gegeben Y
μ_i	Erwartungswert einer normalverteilten Zufallsvariable X_i
σ_i^2	Varianz einer normalverteilten Zufallsvariable X_i
$\beta_{i,0}$	Nullstelle der linearen Funktion $\mu_i = f(P_{i,1}, \dots, P_{n_{\mathbf{Pa},i}})$ zu Zufallsvariable X_i in einem linearen Gaußschen Bayesschen Netz
$\beta_{i,j}$	Anstiegskoeffizient der linearen Funktion $\mu_i = f(P_{i,1}, \dots, P_{n_{\mathbf{Pa},i}})$ zu Zufallsvariable X_i , der den Einfluss des Elternknotens $P_{i,j}$ beschreibt
\mathbf{E}	Teilmenge der Knoten eines BN, für die Evidenzen vorliegen
\mathbf{Q}	Teilmenge der Knoten eines BN, deren wahrscheinlichster Zustand durch Inferenz bestimmt werden soll

Fahrverhalten und Verkehrsdaten

Hinweis: Kenngrößen mit Index n beziehen sich auf eine individuelle Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE) n , während Kenngrößen ohne diesen Index eine Aggregation über mehrere FFE darstellen. Symbole, die nur einem einzelnen Abschnitt verwendet werden, sind hier nicht aufgeführt.

q	Gesamtverkehrsstärke (Kfz-Verkehrsstärke)
q_{Pkw}	Verkehrsstärke Pkw-ähnlicher Fahrzeuge
q_{Lkw}	Verkehrsstärke Lkw-ähnlicher Fahrzeuge
p_{Lkw}	prozentualer Anteil Lkw-ähnlicher Fahrzeuge
q_{B}	Bemessungsverkehrsstärke
k_{lok}	lokale Verkehrsdichte
n_{FS}	Anzahl Fahrstreifen
δ_q, δ_k	Gleichmäßigkeit Fahrstreifenauslastung (bezogen auf die Verkehrsstärke bzw. -dichte, vgl. Gleichung 8 auf Seite 70)
$\varepsilon_q, \varepsilon_k$	Schwerpunktlage Fahrstreifenauslastung (bezogen auf die Verkehrsstärke bzw. -dichte, vgl. Gleichung 9 auf Seite 70)
v_n, v	individuelle Fahrgeschwindigkeit der FFE n bzw. mittlere Geschwindigkeit
v_s	Geschwindigkeitsniveau als Teil der wahrnehmbaren Fahrsituation
v_b	mittlere Fahrgeschwindigkeit als Teil des Fahrverhaltens (in Abgrenzung zu v_s)
v_{Pkw}	mittlere Geschwindigkeit Pkw-ähnlicher Fahrzeuge
v_{Lkw}	mittlere Geschwindigkeit Lkw-ähnlicher Fahrzeuge
$v_{\text{unbeeinfl}}$	mittlere Geschwindigkeit nicht durch Vorausfahrende beeinflusster Fahrzeuge
$p_{\text{unbeeinfl}}$	prozentualer Anteil nicht durch Vorausfahrende beeinflusster Fahrzeuge
h_n, h	individuelle bzw. mittlere Nettozeitlücke zu vorausfahrender FFE (vgl. Gleichung 1 auf Seite 27, von engl. <i>headway</i>)
g_n, g	individueller bzw. mittlerer Nettoabstand zu vorausfahrender FFE (von engl. <i>gap</i>)
t_{tc_n}, t_{tc}	individuelle bzw. mittlere Auffahrzeit (Time to Collision, TTC) bezogen auf die vorausfahrende FFE (vgl. Gleichung 2 auf Seite 27)
$cibtr_n, cibtr$	einzelfahrzeugbezogenes bzw. mittleres Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR, vgl. Gleichung 3 auf Seite 28)
$ibtr_n, ibtr$	einzelfahrzeugbezogenes bzw. mittleres Individual Braking Time Risk (IBTR, vgl. Gleichung 4 auf Seite 28)
$cpbtr_n, cpbtr$	einzelfahrzeugbezogenes bzw. mittleres Compensated Platoon Braking Time Risk (CPBTR, Gleichung 6 auf Seite 29)
$pbtr_n, pbtr$	einzelfahrzeugbezogenes bzw. mittleres Platoon Braking Time Risk (PBTR, Gleichung 5 auf Seite 28)

Fahrzeugspezifische Eigenschaften und Parameter in der Simulation

Hinweis: Parameter mit Index n beziehen sich auf eine individuelle Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE) n , während Parameter ohne diesen Index sich auf ein FFE-Kollektiv beziehen und teils als zufällig über dieses Kollektiv verteilte Größen zu verstehen sind.

$v_{\max,n}, v_{\max}$	fahrzeugspezifische Höchstgeschwindigkeit
$f_{\text{compl},n}, f_{\text{compl}}$	Befolgungsfaktor steckenspezifische zulässige Höchstgeschwindigkeit
$f_{v,n}$	Abweichungsfaktor der Geschwindigkeit (vgl. Gleichung 15 auf Seite 86)
$a_{\max,n}, a_{\max}$	maximale Beschleunigung (Gipps/aimsun.next, von engl. <i>acceleration</i>)
$a_{\text{desired},n}, a_{\text{desired}}$	Wunschbeschleunigung (Krauß/SUMO)
d_n, d	Wunschverzögerung im Normalfall (von engl. <i>deceleration</i>)
$d_{\text{apparent},n}, d_{\text{apparent}}$	von außen wahrnehmbare Wunschverzögerung (Krauß/SUMO)
$d_{\text{emergency},n}, d_{\text{emergency}}$	maximale Verzögerung im Gefahrenfall (Krauß/SUMO)
α_n, α	Sensitivitätsfaktor (Gipps/aimsun.next)
$\hat{\alpha}_n, \hat{\alpha}$	Ersatzwert Sensitivitätsfaktor (Krauß/SUMO, vgl. Gleichung 19 auf Seite 114)
$g_{\min,n}, g_{\min}$	Mindestnettoabstand im Stillstand
$h_{\min,n}, h_{\min}$	Mindestzeitlücke (Gipps/aimsun.next)
τ_n, τ	Mindestzeitlücke (Krauß/SUMO)
σ_n, σ	Einflussfaktor Ungenauigkeiten im Fahrverhalten (Krauß/SUMO)

Literatur

- [1] 3rd Generation Partnership Project (3GPP): *Initial Cellular V2X standard completed*. https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1798-v2x_r14, Mitteilung vom September 2016, zuletzt besucht am 07.02.2021.
- [2] Abdel-Aty, M. et al.: *Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 38, S. 335-345, 2006.
- [3] Aimsun SLU: *Aimsun Next 8.4 user's manual*. 2019.
- [4] Aimsun SLU: *Aimsun Next: Ihr Labor für Verkehrsplanung und Simulation*. <https://www.aimsun.com/de/aimsun-next/>, zuletzt besucht am 21.03.2021.
- [5] Al-Hames, M.A.: *Graphische Modelle in der Mustererkennung*. Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [6] Al-Sultan, S.J.: *Context aware drivers' behaviour detection system for VANET*. PhD Thesis, Software Technology Research Laboratory, De Montfort University, Leicester, Vereinigtes Königreich, 2013.
- [7] Alvarez Lopez, P. et al.: *Microscopic traffic simulation using SUMO*. Konferenzband der 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), S. 2575-2582, 2018.
- [8] Amata, H. et al.: *Prediction model of driving behavior based on traffic conditions and driver types*. Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, S. 747-752, 2009.
- [9] Anacleto, O. et al.: *Forecasting multivariate road traffic flows using Bayesian dynamic graphical models, splines and other traffic variables*. Australian and New Zealand Journal of Statistics, Vol. 55, Nr. 2, S. 69-86, 2013.
- [10] Bando, M. et al.: *Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation*. Physical Review E, Vol. 51, S. 1035-1042, 1995.
- [11] BayesFusion, LLC: *GeNIe Modeler user manual*. <https://support.bayesfusion.com/docs/GeNIe.pdf>, Version 2.2.4, März 2018.
- [12] Bergner, R. M.: *What is behavior? And so what?* New Ideas in Psychology, Vol. 29, S. 147-155, 2011.
- [13] Bevrani, K. und Chung, E.: *An examination of the microscopic simulation models to identify traffic safety indicators*. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Vol. 10, S. 66-81, 2011.
- [14] Borgelt, C., Steinbrecher, M., Kruse, R.: *Graphical models – Representations for learning, reasoning and data mining*. 2. Auflage, Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [15] Bouslimi, W. et al.: *Augmented naive Bayesian network for driver behavior modeling*. IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium 2005, Las Vegas, Nevada, S. 236-242, 2005.
- [16] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *BABSIM 2010*. https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-BABSIM/Unterordner/v1-BABSIM-Infos.html, zuletzt besucht am 19.03.2021.

- [17] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ)*. Ausgabe 1999.
- [18] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ)*. Ausgabe 2018.
- [19] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ)*. Ausgabe 1997.
- [20] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA)*. Ausgabe 1997.
- [21] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS)*. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Ausgabe 2012.
- [22] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): *KI-Projekte des BMVI*. <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Aktionsplan-Digitalisierung-und-Kuenstliche-Intelligenz/KI-Projekte-in-der-Mobilitaet/aktionsplan.html>, zuletzt besucht am 25.02.2021.
- [23] Bungartz, H.-J. et al.: *Modellbildung und Simulation*. eXamen.press, Springer-Verlag, 2013.
- [24] Busch, F.: *Spurbelastungen und Häufigkeit von Spurwechseln auf einer dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahn*. Straßenverkehrstechnik, Heft 6/1984, S. 228-231, 1984.
- [25] Carlson, R. et al.: *Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 12, Nr. 4, S. 1261-1276, 2011.
- [26] Castillo, E. et al.: *Predicting traffic flow using Bayesian networks*. Transportation Research Part B, Vol. 42, S. 482-509, 2008.
- [27] Ciuffo, B. und Azevedo, C.L.: *A sensitivity-analysis-based approach for the calibration of traffic simulation models*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 15, Nr. 3, S. 1298-1309, 2014.
- [28] C-Roads Platform: *Common C-ITS service and use case definitions*. Version 1.7.0 vom 24.06.2020.
- [29] C-Roads Platform: *C-Roads pilots*. <https://www.c-roads.eu/pilots.html>, zuletzt besucht am 07.02.2021.
- [30] Denaes, S. et al.: *Neue Methoden zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen – Teil 1: Zielfunktion zur Wirkungsmodellierung von Harmonisierungssteuerprogrammen und Stauwarnungen*. Straßenverkehrstechnik, Heft 3/2009, S. 133-140, 2009.
- [31] Denaes, S. et al.: *Neue Methoden zur Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen – Teil 2: Das neue Steuerungsverfahren INCA*. Straßenverkehrstechnik, Heft 4/2009, S. 233-240, 2009.
- [32] Detering, S.: *Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2011.
- [33] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): *DIN EN 12966:2019-02 Vertikale Verkehrszeichen – Wechselverkehrszeichen*. Deutsche Fassung der EN 12966:2014+A1:2018, 2019.

-
- [34] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Car-following models – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/Car-Following-Models.html>, Version vom 11.02.2021.
- [35] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Definition of vehicles, vehicle types, and routes – SUMO Documentation*. https://sumo.dlr.de/docs/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes.html, Version vom 06.11.2020.
- [36] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *dfrouter – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/dfrouter.html>, Version vom 12.04.2021.
- [37] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Driver State – SUMO Documentation*. https://sumo.dlr.de/docs/Driver_State.html, Version vom 15.02.2021.
- [38] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *netconvert – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/netconvert.html>, Version vom 07.09.2020.
- [39] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *netedit – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/netedit.html>, Version vom 07.09.2020.
- [40] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Networks/Import/OpenStreetMap – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/Networks/Import/OpenStreetMap.html>, Version vom 08.07.2020.
- [41] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Sublane Model – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/SublaneModel.html>, Version vom 11.02.2021.
- [42] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *TraCI – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/TraCI.html>, Version vom 28.04.2021.
- [43] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *TraCI/Protocol – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/TraCI/Protocol.html>, Version vom 11.02.2021.
- [44] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *TraCI/TraaS – SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/TraCI/TraaS.html>, Version vom 11.02.2021.
- [45] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: *Vehicle type parameter defaults – SUMO Documentation*. https://sumo.dlr.de/docs/Vehicle_Type_Parameter_Defaults.html, Version vom 11.02.2021.
- [46] de Oña, J., Garrido, C.: *Extracting the contribution of independent variables in neural network models: A new approach to handle instability*. Neural Computing and Applications, Vol. 25, S. 859-869, 2014.
- [47] Donges, E.: *Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. Automobil-Industrie, Vol. 27, Nr. 2, S. 183-190, 1982.
- [48] Dowling, R. et al.: *Performance benefits of connected vehicles for implementing speed harmonization*. Transportation Research Procedia, Vol. 15, S. 459-470, 2016.
- [49] Dreier, J.: *Verkehrsmanagementzentrale der Schweiz*. In: Riegelhuth, G. und Sandrock, M. (Hrsg.): Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen – Aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz, S. 73-105, Springer Vieweg, 2018.

- [50] Europäische Kommission: *Hours spent in road congestion annually*. https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/energy-union-innovation/road-congestion_en, Quelle: JRC, TomTom 2017, zuletzt besucht am 20.09.2020.
- [51] Europäische Kommission: *Artificial Intelligence (AI) – Research, funding, policy and related publications*. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/key-enabling-technologies/artificial-intelligence-ai_en, zuletzt besucht am 25.02.2021.
- [52] Ehmanns, D.: *Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselforgängen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Hochschule Aachen, 2003.
- [53] Erdmann, J.: *Lane-changing model in SUMO*. Proceedings der SUMO-Nutzerkonferenz 2014, S. 77-88, Berlin, 2014.
- [54] Erdmann, J. et al.: *SUMO and the German Handbook for the Dimensioning of Highways (HBS)*. Proceedings der SUMO-Nutzerkonferenz 2017, S. 163-170, Berlin, 2017.
- [55] Erdmann, J.: *Lane-changing often fails when using action-step-length*. Problemmeldung zur Software Simulation of Urban Mobility, <https://github.com/eclipse/sumo/issues/4457>, 25.08.2018.
- [56] Ferrari, P.: *The reliability of the motorway transport system*. Transportation Research Part B, Vol. 22, Nr. 4, S. 291-310, 1988.
- [57] Ferrari, P.: *The control of motorway reliability*. Transportation Research Part A, Vol. 25, Nr. 6, S. 419-427, 1991.
- [58] Festag, A.: *Cooperative Intelligent Transport Systems standards in Europe*. IEEE Communications Magazine, S. 166-172, Dezember 2014.
- [59] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung*. Heft 388, 2006.
- [60] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): *Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung*. Heft 304/1, 2012.
- [61] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): *Data Mining im Verkehrsmanagement und in der Verkehrsplanung: Anwendungen und Verfahren*. Heft 382/2, 2019.
- [62] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): *Hinweise für das Qualitätsmanagement in der Verkehrsbeeinflussung*. Heft 386/1, 2019.
- [63] Fritzsche, H.T.: *A model for traffic simulation*. Traffic Engineering and Control, S. 317-321, 1994.
- [64] Gazis, D. et al.: *Nonlinear follow the leader models of traffic flow*. Operations Research, Vol. 9, S. 545-567, 1961.
- [65] Ge, Q. und Menendez, M.: *An efficient sensitivity analysis approach for computationally expensive microscopic traffic simulation models*. International Journal of Transportation, Vol. 2, Nr. 2, S. 49-64, 2014.

-
- [66] Gebhardt, J. und Kruse, R.: *Possibilistische graphische Modelle*. In: Grützner R. (Hrsg.): Modellierung und Simulation im Umweltbereich – Fortschritte in der Simulationstechnik, im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), Vieweg+Teubner Verlag, 1997.
- [67] Gerdes, A.: *From data to information: Probabilistic methods for dealing with sensor inaccuracy*. VDI-Berichte, Band 1960, S. 543-552, 2006.
- [68] Geistefeldt, J.: *Empirical estimation of desired speed distributions for microscopic traffic simulation*. Transportation Research Record, Nr. 2490, S. 41-46, 2015.
- [69] Geistefeldt, J. und Waleczek, H.: *Ausbau der Autobahn A7 in Hamburg – Simulationsstudie zur Wirksamkeitsanalyse einer Zuflussregelung am AD Hamburg-Nordwest in Fahrtrichtung Nord*. Projektbericht, 2015.
- [70] Geistefeldt, J. et al.: *HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen*. Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 03.0460/2009/OGB, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V279, 2016.
- [71] Gipps, P.: *A behavioral car-following model for computer simulation*. Transportation Research B, Vol. 15, S. 105-111, 1981.
- [72] Gipps, P.: *A model for the structure of lane-changing decisions*. Transportation Research B, Vol. 20, Nr. 5, S. 403-414, 1986.
- [73] Gokasar, I. und Aytakin, K.: *Accident lane prediction using probabilistic inference*. Proceedings of the 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2019.
- [74] Gorban, A.N. et al.: *High-dimensional brain in a high-dimensional world: Blessing of dimensionality*. Entropy 22, Nr. 82, 2020.
- [75] Grimm, J.: *Untersuchung zum Einsatzbereich von Steuerverfahren für Streckenbeeinflussungsanlagen*. Diplomarbeit, 2009.
- [76] Grimm, J.: *Modeling the effects of motorway traffic control on driving behavior in a microscopic traffic simulation*. Proceedings of the 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), Krakau, Polen, 2019.
- [77] Grumert, E. und Tapani, A.: *Evaluation of four control algorithms used in variable speed limit systems*. Transportation Research Board 95th annual meeting compendium of papers, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016.
- [78] Grumert, E. et al.: *Characteristics of variable speed limit systems*. European Transport Research Review, Vol. 10, Nr. 21, 2018.
- [79] Haak, W.P. et al.: *Modeling traffic information using Bayesian networks*. Transactions on Transport Sciences, Vol. 3, 2010.
- [80] Hadiuzzaman, M. et al.: *Evaluating performance of a proactive optimal variable speed limit control using different objective functions*. Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 96, S. 2895-2906, 2013.
- [81] Han, Y. et al.: *Variable speed limit control at fixed freeway bottlenecks using connected vehicles*. Transportation Research Part B, Vol. 98, S. 113-134, 2017.

- [82] Harding, J.: *Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2007.
- [83] Harrer, M. et al.: *Das Verkehrsmanagementsystem und die Verkehrsinformationsdienste der ASFINAG*. In: Riegelhuth, G. und Sandrock, M. (Hrsg.): *Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen – Aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz*. S. 11-71, Springer Vieweg, 2018.
- [84] Hasan, M. et al.: *Evaluation of ramp control algorithms using microscopic traffic simulation*. Transportation Research Part C, Vol. 10, S. 229-256, 2002.
- [85] Hastie, T. et al.: *The elements of statistical learning – Data mining, inference, and prediction*. 2. Auflage, Springer Series in Statistics, 2008.
- [86] Hayward, J.C.: *Near-miss determination through use of a scale of danger*. Highway Research Record, Vol. 384, S. 24-34, 1972.
- [87] Hilgers, T. et al.: *Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen*. Entwurf des Schlussberichts zum Forschungsauftrag FE 03.0538/2015/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht), Oktober 2020.
- [88] Hegyi, A. et al.: *SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory*. 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Peking, S. 827-832, 2008.
- [89] Hegyi, A. und Hoogendoorn, S.P.: *Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways – Field test results of the SPECIALIST algorithm*. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Funchal, S. 519-524, 2010.
- [90] Hoffmann, S.: *Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen am Beispiel kommunikationsbasierter Fahrerwarnungen auf Autobahnen*. Dissertation, Technische Universität München, 2013.
- [91] Janssen, W.H.: *Routeplanning en geleiding: Een literatuurstudie*. Bericht IZF 1979 C-13, Institute for Perception, the Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), Soesterberg, Niederlande, 1979.
- [92] Jonkers, E. et al.: *Results of field trials with dynamic speed limits in the Netherlands: Improving throughput and safety on the A12 freeway*. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Washington, D.C., 2011.
- [93] Junghans, M. und Jentschel, H.J.: *Correction of selection bias in traffic data by Bayesian network data fusion*. Journal of Advances in Information Fusion, Vol. 3, Nr. 1, S. 50-62, 2008.
- [94] Kappich, G. et al.: *Echtzeitbeurteilung und -optimierung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen*. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 1040, 2010.
- [95] Kasper, D. et al.: *Object-oriented Bayesian networks for detection of lane change maneuvers*. Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 4, Nr. 1, 2012.

-
- [96] Kirschfink, H. und Aretz, C.: *Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes*. Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 03.0426/2007/IRB, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V187, 2009.
- [97] Kishimoto, Y. et al.: *Modeling driving behavior with dynamic Bayesian networks and estimate of mental state*. 2008.
- [98] Klöppel, M. et al.: *Performance evaluation of GLOSA algorithms under realistic traffic conditions using C2I communication*. 4th Conference on Sustainable Urban Mobility 2018, Skiathos, Griechenland, 2018.
- [99] Knoop, V.L. et al.: *Quantifying the number of lane changes in traffic – An empirical analysis*. Transportation Research Record, Vol. 2278, Nr. 1, S. 31-41, 2012.
- [100] Krauß, S.: *Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics*. Dissertation, Universität zu Köln, 1998.
- [101] Krajzewicz, D.: *Traffic simulation with SUMO – Simulation of Urban Mobility*. In: Barceló, J. (Hrsg.): Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 145, Springer, New York, 2010.
- [102] Kruse, R. und Borgelt, C.: *Neue Entwicklungen im Data Mining mit Bayesschen Netzen*. Seminar zu Anwendungen von Fuzzy-Technologien und Neuronalen Netzen, Wernigerode, 1998.
- [103] Lämmel, U.: *Data Mining mittels künstlicher neuronaler Netze*. Wismarer Diskussionspapiere, Heft 07/2003, Hrsg.: Kramer, J.W., Fachbereich Wirtschaft, Hochschule Wismar, 2003.
- [104] Lee, C. et al.: *Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety*. Transportation Research Part C, Vol. 14, S. 213-228, 2006.
- [105] Lee, H.H.: *Real-time stochastic optimum control of traffic signals*. Journal of Information and Communication Convergence Engineering, Vol. 11, Nr. 1, S. 30-44, 2013.
- [106] Liang, Y. et al.: *Nonintrusive detection of driver cognitive distraction in real time using Bayesian networks*. Transportation Research Record, Vol. 2018, S. 1-8, 2007.
- [107] Maget, C.: *Untersuchung des Wettereinflusses auf den Verkehr*. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2010.
- [108] Michon, J.A.: *A critical view of driver behaviour models: What do we know, what should we do?* In: Evans, L. und Schwing, R.C. (Hrsg.): Human Behaviour and Traffic Safety. Plenum Press, New York, S. 485-520, 1985.
- [109] Mintsis, E. et al.: *Modelling, simulation and assessment of vehicle automations and automated vehicles' driver behaviour in mixed traffic*. Deliverable 3.1 des Horizon-2020-Projekts TransAID (Transition Areas for Infrastructure-Assisted Driving), Version 2.0, September 2019.
- [110] Miska, M.: *Microscopic online simulation for real time traffic management*. Dissertation, Technische Universität Delft, 2007.
- [111] Möbus, C. und Eilers, M.: *Mixture-of-behaviors and levels-of-expertise in a Bayesian autonomous driver model*. International Conference on Applied Digital Human Modeling, Miami, Florida, 2010.

- [112] Monteil, J.G.: *Investigating the effects of cooperative vehicles on highway traffic flow homogenization: Analytical and simulation studies*. Dissertation, Université de Lyon, 2013.
- [113] de Mouzon, O. et al.: *An effective real-time proactive road traffic risk indicator based on traffic data: Compensated platoon braking time risk (CPBTR)*. 2008.
- [114] Murphy, K.P.: *Dynamic Bayesian networks: Representation, inference and learning*. Dissertation, University of California, Berkeley, 2002.
- [115] Nagel, K. und Schreckenberg, M.: *A cellular automaton model for freeway traffic*. Journal de Physique I, EDP Sciences, Vol. 2, Nr. 12, S. 2221-2229, 1992.
- [116] Neumann, T. et al.: *Dynamic representation of the fundamental diagram via Bayesian networks for estimating traffic flows from probe vehicle data*. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Den Haag, Niederlande, 2013.
- [117] Neumann, T. et al.: *Probabilistische Modellierung der Fehlerfortpflanzung im Lebenszyklus von Streckenbeeinflussungsanlagen*. Langfassungsveröffentlichung im Rahmen der Heureka 2017, Stuttgart, 2017.
- [118] Nissan, A. und Koutsopoulos, H.N.: *Evaluation of the impact of advisory variable speed limits on motorway capacity and level of service*. Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 16, S. 100-109, 2011.
- [119] Olstam, J.J. und Tapani, A.: *Comparison of car-following models*. VTI meddelande 960A, Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Schweden, 2004.
- [120] OpenStreetMap Foundation: *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/>, zuletzt besucht am 24.01.2021.
- [121] Panou, M. et al.: *Modelling driver behaviour in EU and international projects*. In: Cacciabue, P.C. (Hrsg.): *Modelling driver behaviour in automotive environments*. Springer-Verlag, London, 2007.
- [122] Pascale, A. und Nicoli, M.: *Adaptive Bayesian network for traffic flow prediction*. 2011 IEEE Statistical Signal Processing Workshop, S. 177-180, 2011.
- [123] Pham, M.-H. et al.: *Applicability of road safety indicators to assess driving risks under Swiss road conditions*. 7th Swiss Transport Research Conference, Monte Verità/ Ascona, 2007.
- [124] Pischner, T. et al.: *Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf*. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 866, 2003.
- [125] Punzo, V. et al.: *Do we really need to calibrate all the parameters? – Variance-based sensitivity analysis to simplify microscopic traffic flow models*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 16, S. 184-193, 2015.
- [126] PTV Planung Transport Verkehr AG: *PTV Vissim – Leistungsstarke Verkehrssimulationssoftware*. <https://www.ptvgroup.com/de/loesungen/produkte/ptv-vissim/>, zuletzt besucht am 21.03.2021.
- [127] Queen, C. und Albers, C.: *Intervention and causality: Forecasting traffic flows using a dynamic Bayesian network*. Journal of the American Statistical Association, Vol. 104, Nr. 486, S. 669-681, 2009.

-
- [128] Radke, S.: *Verkehr in Zahlen – 2017/2018*. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, September 2017.
- [129] Rasmussen, J.: *Skills, rules, and knowledges; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Volume SMC-13, Nr. 3, 1983.
- [130] R Core Team: *R: A language and environment for statistical computing*. Hrsg.: R Foundation for Statistical Computing, Wien, Österreich. <https://www.R-project.org/>, zuletzt besucht am 18.01.2021.
- [131] Riegelhuth, G. und Glatz, M.: *Zuverlässiger Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Basis einer antizipierenden, regelbasierten Steuerung*. Straßenverkehrstechnik, Heft 4/2015, S. 245-258, 2015.
- [132] Rose, M.: *Modellbildung und Simulation von Autobahnverkehr*. Dissertation, Universität Hannover, 2003.
- [133] Rummel, J.: *Replication of the HBS Autobahn with SUMO*. Proceedings der SUMO-Nutzerkonferenz 2017, Berlin, S. 171-178, 2017.
- [134] Runkler, A.T.: *Data Mining – Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. 1. Auflage, Vieweg+Teubner, 2010.
- [135] Saifuzzaman, M. und Zheng, Z.: *Incorporating human-factors in car-following models: A review of recent developments and research needs*. Transportation Research Part C, Vol. 48, S. 379-403, 2014.
- [136] Schimandl, F. et al.: *Ermittlung von Wirkungen kooperativer Assistenzsysteme im motorisierten Individualverkehr mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation – Methodik und Ergebnisse aus dem Projekt simTD*. Straßenverkehrstechnik, Heft 6/2014, S. 359-368, 2014.
- [137] Schubert, M. et al.: *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Zusammenfassung der Ergebnisse*. Bericht zum Forschungsauftrag 96.0981/2011 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Juni 2014.
- [138] Schwietering, C.: *Verfahren zur Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und Anwendung in der Verkehrssteuerung*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2010.
- [139] Schwietering, C. et al.: *Optimierung der Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen durch Einsatz von Einzelfahrzeugdaten*. Langfassungsveröffentlichung im Rahmen der Heureka 2017, Stuttgart, 2017.
- [140] Schwietering, C. et al.: *Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen*. Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 03.0464/2010/IGB, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V299, 2017.
- [141] Schwietering, C. et al.: *Steuerungsstrategien für VBA im Kontext von C2I-Kommunikation*. Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 03.0522/2014/IRB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht), Dezember 2018.

- [142] Schwietering, C. et al.: *Ermittlung von Optimierungspotenzialen bestehender und zukünftiger Streckenbeeinflussungsanlagen*. Entwurf Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 03.0523/2014/IGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht), Januar 2019.
- [143] Scutari, M. und Denis, J.B.: *Bayesian networks with examples in R*. CRC Press, 2015.
- [144] Scutari, M.: *bnlearn – An R package for Bayesian network learning and inference*. <https://www.bnlearn.com/>, zuletzt besucht am 18.01.2021.
- [145] Semrau, M.: *Untersuchung zur Modellierung von chinesischem Fahrverhalten auf Autobahnen für den Test pilotierter Fahrfunktionen*. Dissertation, AutoUni-Schriftenreihe, Band 130, Springer, 2018.
- [146] Siegner, W. et al.: *Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung*. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 787, 2000.
- [147] Smulders, S.: *Control of freeway traffic flow by variable speed signs*. Transportation Research B, Vol. 24, Nr. 2, S. 111-132, 1990.
- [148] Sparmann, U.: *Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263, 1978.
- [149] Steinhoff, C. et al.: *Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen*. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 853, 2002.
- [150] Steinhoff, C.: *Online Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen*. Dissertation, Technische Universität München, 2003.
- [151] Strömngren, P. und Lind, G.: *Harmonization with variable speed limits on motorways*. Transportation Research Procedia, Vol. 15, S. 664-675, 2016.
- [152] SYSTRA, Ltd.: *Paramics microsimulation – 3D traffic simulation*. <https://www.paramics.co.uk/>, zuletzt besucht am 21.03.2021.
- [153] Taylor, J.; Einbeck, J.: *Challenging the curse of dimensionality in multivariate local linear regression*. Computational Statistics, Vol. 28, S. 955-976, 2013.
- [154] Theis, C.: *Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlussstellen*. Dissertation Universität Karlsruhe, 1997.
- [155] Treiber, M. et al.: *Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations*. Physical Review E, Vol. 62, S. 1805-1824, 2000.
- [156] Treiber, M. und Kesting, A.: *Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Verlag, 2010.
- [157] TRANSVER GmbH: *Ergebnisse Clusteranalyse CONSYST*. Ergebnisbericht (unveröffentlicht), 2010.
- [158] Uno, N. et al.: *A microscopic analysis of traffic conflict caused by lane-changing vehicle at weaving section*. 13th Mini-EURO Conference Handling Uncertainty in the Analysis of traffic and Transportation Systems, 2005.

-
- [159] Verband der Automobilindustrie (VDA): *Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur*. FAT-Schriftenreihe, Vol. 296, 2017.
- [160] van den Hoogen, E. und Smulders, S.: *Control by variable speed signs – Results of the Dutch experiment*. In: 7th International Conference on Road Transport Information and Control, S. 145-149, 1994.
- [161] Wagner, P. et al.: *Challenges in applying calibration methods to traffic models*. Transportation Research Board 95th annual meeting, Washington, D.C., Vol. 2560, Nr. 1, S. 10-16, 2016.
- [162] Weyland, M.C. et al.: *The potential for traffic emission reduction on freeways with dynamic line control system analyzed with PTV Vissim*. Proceedings of the 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), Krakau, Polen, 2019.
- [163] Wheeler, T.: *Probabilistic driving models and lane change prediction*. 2014.
- [164] Wiedemann, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974.
- [165] Xu, G. et al.: *Driver behavior analysis based on Bayesian network and multiple classifiers*. 2010 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Xiamen, China, S. 663-668, 2010.
- [166] Yang, X. et al.: *Optimal variable speed limit control for real-time freeway congestions*. Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 96, S. 2362-2372, 2013.
- [167] Zhang, K. und Taylor, M.: *Towards transferable incident detection algorithms*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, S. 2263-2274, 2005.
- [168] Zhang, K. und Taylor, M.: *Effective arterial road incident detection: A Bayesian network based algorithm*. Transportation Research Part C, Vol. 14, S. 403-417, 2006.

Erklärung

Hierdurch erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne die Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe. Fremde Quellen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht worden. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Ich habe bislang keine Versuche einer Promotion unternommen, auch nicht zu einem anderen Thema.

Diese Arbeit entstand unter Betreuung von Herrn Prof. Krimmling, der ehemals die Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung an der Technischen Universität Dresden innehatte. Er führte die Betreuung meiner Promotion auch nach seiner Emeritierung weiter. Wesentliche Teile der Arbeit entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme in Dresden.

Diese Arbeit steht teilweise in Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt FE 03.0538/2015/IGB „Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen“, das im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), durchgeführt wurde. Hauptauftragnehmer dieses Projekts war die Heusch/Boesefeldt GmbH aus Aachen. Als weitere Projektpartner waren das Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme in Dresden, der Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik an der Technischen Universität Dresden, das Ingenieurbüro Schwietering aus Aachen sowie die Firma Aimsun SLU aus Barcelona eingebunden. Für den Inhalt dieser Dissertationsschrift ist allein der Autor verantwortlich.

Ich erkenne die aktuell gültige Promotionsordnung der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden an.

Dresden, den 23. Juli 2021

Jan Grimm