

Verkehrsdynamik unter dem Einfluss automatisierter Fahrzeuge

Der Fakultät für Physik der
Universität Duisburg-Essen
vorgelegte Dissertation zum
Erwerb des Doktorgrades

Dr. rer. nat.

von
Tim Vranken
aus
Tönisvorst

Datum der Disputation: 20.06.2022

1. Gutachter: Prof. Dr. Michael Schreckenber
2. Gutachter: Prof. Dr. Andreas Schadschneider

Abstract

The number of traffic jams in Germany nearly quadrupled to 745,000 traffic jams per year in the seven years from 2011 to 2018 [1]. Traffic road capacity cannot be increased further due to limited space at different areas of the Autobahn [18]. Therefore, alternative solutions to the increasing number of traffic jams are highly sought after. One of the most quoted solutions is the introduction of automated vehicles, which can steer without the need of a human driver. Nearly all scientists predict an increased road capacity in homogeneous automated traffic but the situation is less clear in heterogeneous traffic where they are mixed with human-driven vehicles. Because there is no empirical data about mixed traffic, most scientists base their assumptions on a multitude of different traffic simulations.

A new cellular automata model is introduced in this work with that heterogeneous traffic can be simulated more realistically than with historical models. This model is based upon the one created by Lee et al. [2] which already reproduces all important characteristics of homogeneous human-driven traffic. The new model is created with a reduced time step length through which one is able to simulate the different reaction times of not only human-driven vehicles but also of automated and communicating automated vehicles. Through that one can simulate not only homogeneous human driven or automated vehicle traffic but also heterogeneous traffic where these types of vehicles are mixed.

Compared to other heterogeneous traffic models, the one presented in this work is not only able to simulate the different vehicle types with their different reaction times but can also model different behaviour characteristics. For example, it is taken into account that automated vehicles are not allowed to purposely ignore the minimum safety distance, something human drivers tend to do. Due to the reproduction of these different behaviours, a better prediction of problems with the human-machine-interaction than with historical models is possible. All in all, the model allows for more realistic prediction of heterogeneous vehicle traffic than before.

Zusammenfassung

In den sieben Jahren von 2011 bis 2018 hat sich die Stauanzahl auf deutschen Autobahnen auf 745.000 Staus pro Jahr fast vervierfacht [1]. Eine beliebige Erweiterung der Straßenkapazität durch Hinzufügen weiterer Spuren ist dabei, unter anderem aufgrund des teilweise beschränkten Platzes, nicht möglich [18]. Daher sind alternative Lösungen notwendig, um dem Phänomen entgegenzuwirken. Eine Möglichkeit wird oft in der Einführung von automatisierten beziehungsweise nicht von Menschen gesteuerten Fahrzeugen gesehen. Während sich nahezu alle Wissenschaftler einig sind, dass homogener beziehungsweise ausschließlich automatisierter Verkehr die Straßenkapazitäten erhöhen wird, gehen die Meinungen über heterogenen, also aus menschlich gesteuerten und automatisierten Fahrzeugen gemischter, Verkehr auseinander. Da es zurzeit noch keine empirischen Daten zu solch gemischtem Verkehr gibt, basieren diese Diskussionen auf Simulationsdaten unterschiedlicher Verkehrsmodelle.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neues Zellularautomatenmodell vorgestellt, welches den heterogenen Verkehr realistischer abbildet als bereits existierende Modelle. Aufbauend auf dem bereits von Lee et al. [2] entwickelten Modell, welches nur homogenen, menschlich gesteuerten Verkehr simulieren kann, wurde ein leicht verändertes Modell erstellt, welches immer noch homogenen, menschlich gesteuerten Verkehr realistisch reproduzieren kann, jedoch eine geringere Zeitschrittlänge als bisherige Modelle verwendet. Diese reduzierte Zeitschrittlänge erlaubt die Modellierung und Simulation von automatisierten und kommunizierenden, automatisierten Fahrzeugen.

Im Vergleich zu anderen Modellen hat das in dieser Arbeit vorgestellte Modell nicht nur den Vorteil, die Reaktionszeiten der automatisierten Fahrzeuge besser abzubilden, sondern es kann auch bisher unbetrachtetes, abweichendes Fahrverhalten von automatisierten und menschlich gesteuerten Fahrzeugen simulieren. So kann im Modell zum Beispiel berücksichtigt werden, dass autonome Fahrzeuge nicht den Sicherheitsabstand gezielt missachten sollten, während menschliche Fahrer dies oft machen. Diese Unterschiede im Verhalten erlauben die problematische Mensch-Maschine-Interaktion genauer zu betrachten als bei vergleichbaren Modellen, wodurch Prognosen von heterogenem Straßenverkehr realistischer als bisher möglich sind.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei all den Menschen bedanken, welche mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen und diese erst ermöglicht haben.

Mein erster Dank gilt Prof. Michael Schreckenberg, für seine Betreuung und die große Freiheit, welche er mir in meiner Forschung und Forschungsweise einräumte. Diese Freiheit erlaubte mir nicht nur, meine Arbeit so zu verwirklichen wie ich es wollte, sondern auch das Vertrauen in meine eigenen Fähigkeiten zu vertiefen.

Prof. Andreas Schadschneider möchte ich herzlich für die Übernahme der Zweitkorrektur danken.

Meine aktiven und ehemaligen Arbeitskollegen Kilian Bartsch, Dr. Merlin Becker, Sebastian Gartzke, Maximilian Kumm, Dr. Florian Mazur, Dr. Petros Polichronidis, Dr. Dominik Wegerle, und Vincent Wiering erzeugten nicht nur ein produktives und entspanntes Arbeitsumfeld, sondern halfen mir auch oft durch Diskussionen, Beratungen, und Korrekturen. Danke dafür.

Danken möchte ich auch meinen Freunden und ehemaligen Kommilitonen Henrik Bette und Tobias Braun. Ihr Rat und ihre Korrekturen waren für mich unverzichtbar während meiner Forschungen und auch bei der Erstellung dieser Arbeit. Darüber hinaus halfen mir die wöchentlichen Video-Kaffeepausen, während der Corona-Pandemie, dabei, wichtige Abwechslung zu finden.

Karin und Peter, meinen Eltern, sowie Lisa und Marie, meinen Schwestern, gilt ein besonderer Dank dafür, dass sie mich während meines Studiums stets unterstützt und meinen Weg haben gehen lassen.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Freundin Sarah bedanken. Ihre stete Hilfe und Unterstützung haben mir besonders bei der Vollendung dieser Arbeit geholfen.

Zusätzlich zu diesen namentlich erwähnten Personen gibt es immer weitere wichtige Personen, die mich in den unterschiedlichsten Formen bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Auch diesen möchte ich meinen Dank aussprechen.

Inhaltsverzeichnis

Titelblatt	i
Abstract	iii
Zusammenfassung	v
1 Einführung	1
1.1 Gliederung der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Größen in der Verkehrsphysik	5
2.1.1 Zeitlicher Abstand	5
2.1.2 Bremsweg	6
2.1.3 Verkehrsfluss	6
2.1.4 Verkehrsdichte	6
2.1.5 Kapazität	7
2.2 Datenerfassung	7
2.2.1 Stationäre Datenerfassung	7
2.2.2 Floating Car Data	8
2.3 Datenauswertung	8
2.3.1 Das Fundamentaldiagramm	9
2.3.2 Die Drei-Phasen-Verkehrstheorie	11

3	Simulationsmodelle	13
3.1	Modellierungsvorbereitungen	13
3.1.1	Makroskopische Modelle	13
3.1.2	Mikroskopische Modelle	14
3.1.3	Submikroskopische Modelle	14
3.1.4	Mesoskopische Modelle	14
3.1.5	Mikroskopische Zellularautomatenmodelle	14
3.1.6	Diskretisierung und Dimensionslosigkeit	15
3.1.7	Update-Methode und Nachbarschaften bei Zellularautomatenmodellen	16
3.2	Simulationsmodelle	18
3.2.1	Nagel-Schreckenberg-Modell	18
3.2.2	Bremslicht-Modell	20
3.2.3	Modell von Lee et al.	21
3.2.4	Modell von Pottmeier et al.	23
3.2.5	Andere Modelle mit automatisierten Fahrzeugen	23
4	Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge	27
4.1	Anpassung der Zellengröße	27
4.2	Regeln des Modells	29
4.3	Modellvalidierung	33
4.3.1	Vergleichsgrundlagen	33
4.3.2	Mittlerer Ausfluss aus einem Stau	35
4.3.3	Mittlere Staugeschwindigkeit	36
4.3.4	Fahrzeugfolgezeiten	39
4.3.5	Optimismusparameter der Agenten	41
4.3.6	Verkehrsfluss	43

5	Automatisierte Fahrzeuge	47
5.1	Einführung automatisierter Fahrzeug Agenten	47
5.1.1	Datengrundlage für automatisierte Fahrzeuge	47
5.1.1.1	Sicherheitsabstand	48
5.1.1.2	Trödelwahrscheinlichkeit	48
5.1.1.3	Reaktions- und Fahrzeugfolgezeit	49
5.1.2	Implementierung automatisierter Fahrzeuge	50
5.1.2.1	Sicherheitsabstand	50
5.1.2.2	Trödelwahrscheinlichkeit	51
5.1.2.3	Reaktions- und Fahrzeugfolgezeit	51
5.2	Einfluss automatisierter Fahrzeug Agenten auf den Verkehr	52
5.2.1	Homogener Verkehr	52
5.2.2	Einfluss der Änderungen	54
5.2.2.1	Sicherheitsabstand	54
5.2.2.2	Trödeln	55
5.2.2.3	Reaktionszeit	56
5.3	Heterogener Verkehr	57
5.3.1	Simulationsergebnisse	58
5.3.2	Fundamentaldiagramm heterogenen Verkehrs	59
5.3.2.1	Heterogene Straßenkapazität	59
5.3.3	Passives Verhalten automatisierter Fahrzeug-Agenten auf menschlich gesteuerte Fahrzeuge	62
5.3.3.1	Definition des passiven Verhaltens	63
5.3.3.2	Einfluss des passiven Verhaltens	64
6	Kommunizierende, automatisierte Agenten	67
6.1	Kommunikationsarten	67
6.2	Einführung von kommunizierenden, automatisierten Fahrzeugen	69

6.2.1	Mensch-Maschine-Interaktion	70
6.3	Einfluss von kommunizierenden automatisierten Fahrzeugen	71
6.3.1	Erzeugung von Fahrzeugplatoons	74
7	Mehrspuriger Verkehr	77
7.1	Spurwechselregeln	78
7.1.1	Nomenklatur für zweispurige Systeme	78
7.1.2	Änderung der als sicher geschätzten Geschwindigkeit	79
7.1.3	Grundlagen für Spurwechsel	80
7.1.4	Spurwechselregeln für menschlich gesteuerte Fahrzeuge	81
7.1.5	Spurwechselregeln für automatisierte Fahrzeuge	82
7.1.6	Änderungen für heterogenen Verkehr	83
7.2	Simulation von zweispurigem Verkehr	84
7.2.1	Homogener, menschlich gesteuerter Fahrzeugverkehr	84
7.2.2	Verkehrsfluss im heterogenen, zweispurigen Verkehr	88
7.2.3	Spurwechselzahlen in heterogenem, zweispurigen Verkehr	91
7.2.4	Straßenkapazitäten von heterogenem, zweispurigen Verkehr	93
7.2.5	Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf weitere Verkehrscharakteristiken	93
7.2.5.1	Stauausfluss	94
7.2.5.2	Staugeschwindigkeit	96
7.2.5.3	Fahrzeugfolgezeiten	97
8	Zusammenfassung und Ausblick	101
8.1	Zusammenfassung und Fazit	101
8.1.1	Modifizierung des Modells	101
8.1.2	Einführung automatisierter Fahrzeuge	102
8.1.3	Erweiterung zu kommunizierenden automatisierten Fahrzeuge	102

8.1.4	Zweispuriger Verkehr	103
8.1.5	Fazit	103
8.2	Ausblick	104
	Abkürzungsverzeichnis	107
	Literaturverzeichnis	109
	Abbildungsverzeichnis	117
	Publikationen	120
	Lebenslauf	122

1

Einführung

Im Jahr 2018 wurden in Deutschland zirka 745.000 Staus mit einer Gesamtlänge von ungefähr 1.528.000 Kilometern registriert. Diese hatten einen Reisezeitverlust von insgesamt 459.000 Stunden zur Folge. Dies entspricht fast einer Vervierfachung innerhalb von nur sieben Jahren [1].

Ein wesentlicher Grund dafür ist die zunehmende Anzahl an Baustellen [1], die mittlerweile im Jahresmittel 10 % der gesamten Autobahnstrecke beanspruchen [17]. Des Weiteren ist vielerorts zu beobachten, dass insbesondere zu Stoßzeiten die Verkehrsnachfrage die Kapazität der Straßen überschreitet und so das Verkehrsaufkommen selbst ein weiterer Grund der vielen Staus ist [1]. Dabei ist aufgrund von begrenztem Platz um Autobahnen eine Erweiterung der Straßenkapazität nicht möglich [18].

Die Automatisierung von Fahrzeugen wird oft als eine Möglichkeit der Reduzierung von Staus und Steigerung der Straßenkapazität betrachtet [3–6]. Es wird erwartet, dass automatisierte Fahrzeuge, die ohne die Steuerung eines Menschen fahren können, den Verkehrsfluss und die Straßenkapazität erhöhen. Ihre Reaktionszeit auf unerwartete Änderungen der Verkehrssituation ist geringer, sie vermeiden typisches Fehlverhalten menschlicher Fahrer, wie zum Beispiel das Trödeln [13], oder Solches, das rund 94 % aller Unfälle verursacht [19].

Dieser Effekt wird voraussichtlich durch Kommunikationssysteme gesteigert [7]. Automatisierte Fahrzeuge müssen Daten über die aktuelle Verkehrssituation durch verschiedene Messmethoden wie Kameras, Radar, oder Lidar erfassen [20]. Diese Erfassung dauert einige Zeit, da mehrere Systeme für einen gewissen Zeitraum redundante Ergebnisse liefern müssen, um die Gefahr von Fehlinterpretationen zu minimieren. Dies dauert in etwa 0,5 s [20]. Durch moderne Kommunikationssysteme teilen Fahrzeuge den

nachfolgenden Verkehrsteilnehmern die aktuelle Verkehrssituation mit. Aufgrund von Sicherheitsprotokollen und der Zeit, die für die Datenübertragung selbst nötig ist, dauert eine solche Kommunikation in etwa 0,1 s [21]. Dies geht direkt mit einer Verringerung der effektiven Reaktionszeit und einer damit verbundenen Erhöhung der Straßenkapazität einher.

Während die meisten Wissenschaftler davon ausgehen, dass in homogenem, automatisierten Fahrzeugverkehr keine oder nur sehr wenige Staus entstehen, wird die Situation in heterogenem Verkehr, in dem automatisierte und von Menschen gesteuerte Fahrzeuge gleichzeitig auftreten, stark diskutiert. Einige Wissenschaftler prognostizieren eine signifikante Steigerung der Straßenkapazität und Reduzierung von Staus bei bereits geringen Durchdringungsraten von automatisierten Fahrzeugen, während andere Modelle keinen positiven oder sogar einen negativen Effekt vorhersagen [8–11].

Zurzeit gibt es noch sehr wenige automatisierte Fahrzeuge im Straßenverkehr und daher wenige oder keine entsprechenden Daten [22]. Da Prognosen bezüglich heterogenem Verkehr nur anhand technischer Daten der Konfigurationen automatisierter Fahrzeuge erfolgen können, basieren Wissenschaftler ihre Aussagen bisher nur auf Daten, die aus unterschiedlichen Modellen erzeugt werden [10–13, 23–30]. Durch Analyse der Unterschiede und Gemeinsamkeiten dieser Modelle ist es möglich, die Prognosegenauigkeit zu erhöhen.

Die bisher dazu entwickelten Zellularautomatenmodelle sind jedoch in ihrer Fähigkeit limitiert, die Unterschiede zwischen automatisierten und menschlich gesteuerten Fahrzeugen zu reproduzieren. Sie berücksichtigen zwar, dass automatisierte Agenten nicht trödeln, jedoch berücksichtigen die meisten die reduzierte Reaktionszeit nicht, da die ursprünglichen Modelle, welche für homogenen menschlich gesteuerten Verkehr entwickelt wurden, mit einer Zeitschrittlänge von 1 s kalibriert wurden [11–13, 30]. Einige Modelle versuchen dieses Problem zwar zu beheben [13, 23], müssen dazu jedoch unterschiedliche Regelwerke für automatisierte und menschlich gesteuerte Fahrzeuge definieren, was eine Vergleichbarkeit schwierig macht [23]. Auch werden andere Unterschiede, wie ein reduziertes Überreagieren oder das striktere Einhalten von Regeln, nicht in diesen Modellen berücksichtigt.

In dieser Arbeit wird daher ein neues Zellularautomatenmodell vorgestellt, das sowohl die reduzierte Reaktionszeit, als auch von automatisierten Fahrzeugen abweichendes Verhalten simulieren und somit realistischere Prognosen produzieren kann.

1.1 Gliederung der Arbeit

Die Darstellung und das Verständnis einer solchen Modellierung bedarf einiger grundlegender Informationen über den empirischen Straßenverkehr. In Kapitel 2 werden daher zunächst einige Größen der Verkehrsphysik definiert. Anschließend wird erläutert, wie die wichtigsten Größen (Fluss, Dichte, Geschwindigkeit) empirisch gemessen werden. Zum Ende des Kapitels werden dann kurz zwei Theorien zur Beschreibung dieser Größen und ihrer Beziehung untereinander vorgestellt.

Anschließend werden in Kapitel 3 verschiedene Varianten der Modellierung und der Simulation von Straßenverkehr vorgestellt. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei auf bereits existierende Zellularautomatenmodelle gelegt, mit denen homogener menschlich gesteuerter Verkehr simuliert werden kann. Zum Abschluss des Kapitels werden kurz einige historische Modelle betrachtet, mit denen bereits heterogener Verkehr, in dem menschlich gesteuerte und automatisierte Fahrzeuge gemischt auftreten, simuliert wurde. Das Ziel hierbei ist zu analysieren, welche Aspekte des heterogenen Verkehrs gut modelliert werden können und welche im Rahmen des in dieser Arbeit vorgestellten Modells näher betrachtet werden sollen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird in Kapitel 4 das von Pottmeier et al. [31] überarbeitete Modell von Lee et al. [2] modifiziert und validiert, sodass es empirischen homogenen, menschlich gesteuerten Verkehr realistisch reproduzieren kann. Die Hauptänderung ist eine Zeitschrittlängenreduzierung auf 0,1 s pro Zeitschritt.

Im Kapitel 5 werden dann automatisierte Fahrzeuge implementiert und anschließend betrachtet, wie homogen automatisierter Verkehr und heterogener Verkehr sich von homogen, menschlich gesteuertem Verkehr unterscheidet. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Mensch-Maschine-Interaktion gelegt, die durch das Folgen automatisierter Fahrzeuge von menschlich gesteuerten Fahrzeugen und umgekehrt gekennzeichnet ist.

Nachdem die Fähigkeit des Modells zur Reproduktion bisheriger Erkenntnisse diskutiert wurde, wird in Kapitel 6 die Kommunikation zwischen automatisierten Fahrzeugen modelliert, simuliert und analysiert.

In Kapitel 7 wird das Regelwerk für menschlich gesteuerte und für automatisierte Fahrzeuge im Mehrspurverkehr definiert, welches die Simulation von zweisepurigem Straßenverkehr ermöglicht. In den anschließenden Simulationen wird betrachtet, wie automatisierte und kommunizierende, automatisierte Fahrzeuge, welche in [32] als wichtig benannten Größen (Fluss, Fahrzeugfolgezeit, Stauausfluss, Spurwechselzahl, und Staugeschwindigkeit) zur Simulation von empirischem Straßenverkehr mit Zellularautomatenmodellen beeinflussen und welchen Einfluss Spurwechsel auf heterogenen Verkehr haben.

1. Einführung

Im abschließenden Kapitel 8 werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit noch einmal zusammengefasst, ein Fazit zu heterogenem Fahrzeugverkehr gezogen und ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen der hier vorgestellten Analysen gegeben.

2

Grundlagen

Das Kapitel 2.1 dieser Arbeit behandelt zunächst einige grundlegende Begriffe, die im Folgenden verwendet werden, bevor die wichtigsten Größen der Verkehrsphysik eingeführt und definiert werden. Anschließend wird in Kapitel 2.2 erörtert, welche Messmethoden existieren und welche Observablen sich damit bestimmen lassen. In Kapitel 2.3 werden dann zwei Theorien zur Beschreibung von Verkehr kurz erläutert.

2.1 Größen in der Verkehrsphysik

Zusätzlich zu Größen wie dem Abstand zum vorausfahrendem Fahrzeug $d_n(t)$, der Geschwindigkeit $v_n(t)$ und der Position $x_n(t)$ des Fahrzeuges n , gibt es noch weitere wichtige Verkehrsgrößen, welche für eine vollständige Beschreibung und Analyse des Verkehrs relevant sind. Diese werden im Folgenden beschrieben.

2.1.1 Zeitlicher Abstand

Der zeitliche Abstand $\tau_n(t)$, auch Fahrzeugfolgezeit genannt, gibt die zeitliche Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen n und $n + 1$, in Bezug auf einen festen Ort x , an. Dabei ist die verstrichene Zeit von der erstmaligen Erfassung des Fahrzeuges n bis zur erstmaligen Erfassung des Fahrzeuges $n+1$ ausschlaggebend. Die Messung dieser Größe kann sich im fließenden Verkehr als schwierig erweisen, da Fahrzeuge während einer laufenden Messung die Spur wechseln können oder sich die Verkehrssituation ändern kann. Stattdessen kann der zeitliche Abstand aus den Messwerten eines einzelnen Messzeitpunktes, durch das Verhältnis von räumlichem Abstand und Geschwindigkeit

2. Grundlagen

nach

$$\tau_n(t) = \frac{d_n(t)}{v_n(t)} \quad (2.1)$$

bestimmt werden. Da sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs n im fließenden Verkehr oft ändert, stimmt diese Gleichung nicht exakt mit der tatsächlichen Fahrzeugfolgezeit überein, gilt jedoch als gute Näherung.

2.1.2 Bremsweg

Der Bremsweg $B(v)$ gibt die Strecke an, welche ein Fahrer vom Beginn des Bremsvorgangs bis zum Stillstand zurücklegt. Im kontinuierlichen Fall und bei konstanter Beschleunigung gilt

$$B(v_0) = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2. \quad (2.2)$$

Unter der Bedingung, dass $v(t) = 0$ wird, lässt sich Gleichung (2.2) zu

$$B(v_0) = \frac{v_0^2}{2a} \quad (2.3)$$

vereinfachen.

2.1.3 Verkehrsfluss

Der Verkehrsfluss J , im Folgenden kurz Fluss genannt, ist eine lokalisierte Größe, die punktuell gemessen wird, indem gezählt wird, wie viele Fahrzeuge N die Position x im Zeitintervall Δt (in der Regel 1 Minute) passierten (siehe Kapitel 2.2.1). Der Fluss ergibt sich daraus gemäß

$$J = \frac{N}{\Delta t} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}, \quad (2.4)$$

wobei der Wert mit 60 multipliziert werden muss, um ihn in der üblichen Einheit von Fahrzeugen pro Stunde, statt pro Minute anzugeben.

2.1.4 Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte ρ , kurz Dichte, gibt an, wie viele Fahrzeuge sich auf einem definierten Teilstück der Strecke befinden. In den meisten Fällen wird dabei eine Länge von einem Kilometer zugrunde gelegt. Da Messungen in diesem Zusammenhang in der Regel stationär erfolgen, wird die Dichte aus dem mittleren Fluss J und der mittleren Geschwindigkeit $v(t)$ an einem gegebenem Ort durch

$$\rho = \frac{J}{v} \quad (2.5)$$

ermittelt. Sie wird in der Regel in $\frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ angegeben. Alternativ ist es möglich, die mittlere Belegungszeit $\tilde{\rho}$ eines stationär messenden Detektors heranzuziehen. Dabei bildet die mittlere Länge $\bar{l} = 7,5 \text{ m}$, die ein KFZ in einem dichten Stau durchschnittlich einnimmt [33], die nötige Grundlage für eine Umrechnung. Somit lässt sich die Dichte auch gemäß

$$\rho = \tilde{\rho} \cdot \bar{l} \quad (2.6)$$

bestimmen. Wie sich leicht aus der mittleren Fahrzeuglänge \bar{l} berechnen lässt, liegen maximale Dichten bei zirka $\rho_{\max} = 140 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$.

2.1.5 Kapazität

Die letzte zu definierende Größe ist die Straßenkapazität C . Diese gibt die maximale Anzahl von Fahrzeuge an, die eine ausgewählte Position x pro Stunde passieren können. Entsprechend

$$C = J^{\max} \quad (2.7)$$

gibt die Straßenkapazität den maximal gemessenen Fluss wieder. Im Gegensatz zur Verkehrsdichte ist mit der Kapazität kein physikalisches Maximum gegeben. Vielmehr ist diese stark von dem Verhalten der Autofahrer auf dem betreffenden Streckenabschnitt abhängig, wie später gezeigt wird.

2.2 Datenerfassung

Die Aufnahme von Messwerten in der Verkehrsphysik wird zumeist durch zwei verschiedene Methoden realisiert. Zum einen gibt es die stationäre Datenerfassung und zum anderen die sogenannten Floating Car Data (FCD). Beide Methoden werden im Folgenden vorgestellt und deren jeweilige Vor- und Nachteile aufgeführt.

2.2.1 Stationäre Datenerfassung

Die stationäre Datenerfassung ist die ältere der beiden Methoden. Zur Messung werden meist Induktionsschleifen verwendet [34]. Diese erzeugen ein Magnetfeld, das in den metallischen Unterböden der passierenden Fahrzeuge Gegenfelder induziert. Die Veränderung des Feldes kann anschließend in der Messschleife gemessen werden, was eine valide Fahrzeugdetektion auslöst. Eine zweite Schleife, wenige Zentimeter hinter der Ersten, registriert das Fahrzeug kurze Zeit später auf dieselbe Weise. Aus der zeitlichen Differenz kann somit die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bestimmt werden. Außerdem kann aus der Stärke des induzierten Feldes und der Dauer der Veränderung die Klasse

des Fahrzeuges (zum Beispiel KFZ, LKW, Fahrzeug mit Anhänger oder Motorrad) ermittelt werden. Die gemessenen Daten werden eine Minute lokal gesammelt und anschließend gemittelt ausgegeben. Eine weiterführende Beschreibung des Vorgangs ist in [35] zu finden. Alternativ zu Induktionsschleifen können auch Videokameras bei der Aufnahme von Verkehrsdaten eingesetzt und anschließend entweder automatisiert oder manuell ausgewertet werden [36]. In selteneren Fällen werden Messungen außerdem durch Infrarot, Radar oder Ultraschall durchgeführt [34]. Auch dabei werden die Daten häufig über einen gewissen Zeitraum (in der Regel eine oder fünf Minuten) aufgrund von Datenschutzbestimmungen gemittelt.

2.2.2 Floating Car Data

Die zweite Möglichkeit zur Datenerhebung setzt auf Methoden, die durch modernere Fahrzeuge ermöglicht werden. Viele Fahrzeuge sind heutzutage mit GPS- und Navigationsgeräten ausgerüstet, die ihre aktuelle Position in Echtzeit an Server übertragen. Abhängig vom Fahrzeugtyp und Baujahr können hier verschiedene Daten verwendet werden - vom reinen GPS Signal, bis hin zu dem aktuellen Reifendruck [37]. Diese zusätzlichen Informationen können in Modelle aufgenommen werden, um die aktuelle Verkehrssituation realistischer reproduzieren zu können. So wird zum Beispiel der aktuelle Stand der Scheibenwischer [38] verwendet, um Rückschlüsse auf die aktuelle Wasserfilmdichte auf der Fahrbahn zu ziehen. Mit Hilfe dieser Information konnte der Einfluss von Regen auf die Straßenkapazität analysiert und anschließend in einem Simulationsmodell berücksichtigt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind jedoch nur die aktuellen Positionen und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge von Interesse.

Durch einen längeren Beobachtungszeitraum der Position eines Fahrzeuges ist es möglich, Rückschlüsse auf personenbezogene Daten zu ziehen. Da sich Floating-Car-Daten nur sehr schlecht über einen Zeitraum mitteln lassen, muss die Anonymisierung zur Gewährleistung des Datenschutzes auf andere Weise sichergestellt werden. Entsprechende Methoden sind in [39] aufgeführt und werden an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

2.3 Datenauswertung

Der Verkehrsfluss hängt von vielen Einflüssen wie zum Beispiel dem Wetter, der Nähe zu Engstellen oder auch der Zusammensetzung des Verkehrs (Verhältnis aus LKW und PKW) ab. Die für die Verkehrsanalyse wichtigste Abhängigkeit ist jedoch das Verhältnis des Flusses zur Dichte, weswegen die entsprechende Auftragung als „Fundamentaldiagramm“ bezeichnet wird [34].

2.3.1 Das Fundamentaldiagramm

Zur Erstellung eines Fundamentaldiagramms wird der gemessene Verkehrsfluss gegen die nach Gleichung (2.5) berechnete Dichte aufgetragen. Ein Beispiel solcher Messungen ist in Abbildung 2.1 (a) für einen Abschnitt der A3 zwischen Dinslaken-Süd und dem Autobahnkreuz Oberhausen, für den Juni des Jahres 2017 aufgetragen. Jeder Punkt entspricht einem über eine Minute gemittelten Messpunkt. Anhand dieser Abbildung lässt sich die Abhängigkeit zwischen Fluss und Dichte sehr gut ablesen. Dabei lässt sich das Fundamentaldiagramm außerdem in zwei Bereiche aufteilen, den „Freifluss-Ast“ und den „gestauten Ast“. Zur einfacheren Beschreibung des Diagramms ist der typische Verlauf in Abbildung 2.1 (b) skizziert.

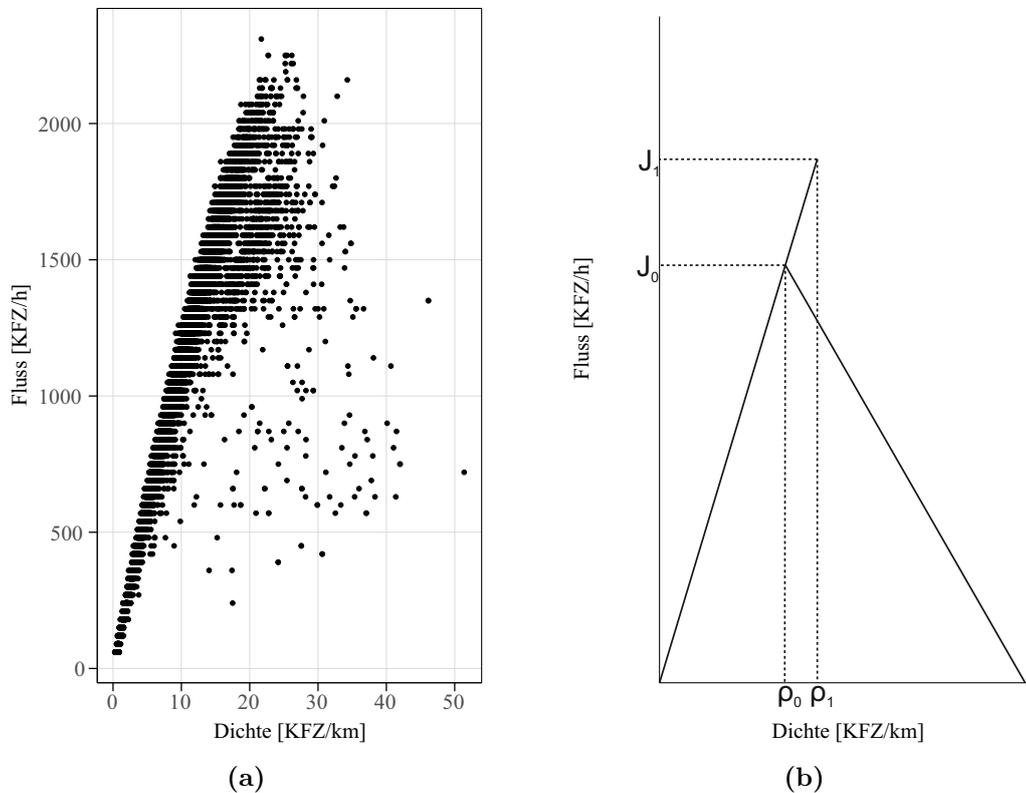


Abbildung 2.1: Verkehrsfluss aufgetragen gegen die Dichte. (a) zeigt empirische Werte der A3 zwischen Dinslaken-Süd und dem Autobahnkreuz Oberhausen des Monats Juni im Jahr 2017 über beide Spuren. Die Daten wurden bereitgestellt von Straßen NRW im Rahmen des Sonderforschungsbereich (SFB) 876. (b) Skizze eines typischen Verlaufs des Fundamentaldiagramms aufgeteilt in den Freifluss-Ast, der von 0 bis ρ_1 geht und den gestauten Ast, der von ρ_0 bis ρ_{\max} geht.

Der Freifluss-Ast ist für den Bereich geringer Dichten ausschlaggebend und weist eine nahezu konstante Steigung auf. Auf dem untersuchten Streckenabschnitt befinden sich nur wenige Fahrzeuge, weswegen der mittlere Abstand zwischen ihnen groß genug ist, um starke Wechselwirkungen zu vermeiden. Alle Fahrzeuge können folglich mit ihrer Wunschgeschwindigkeit bzw. der erlaubten Maximalgeschwindigkeit $\frac{dJ}{d\rho} \approx v_{\max}$ fahren.

2. Grundlagen

Sobald die Dichte jedoch einen bestimmten Wert überschreitet, wird der gestaute Ast relevant. Hier dominieren die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fahrzeugen. Aufgrund der höheren Dichte sind die mittleren Abstände zwischen den Fahrzeugen hier so verkürzt, dass diese nicht mehr mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren können und teilweise abbremsen müssen. Die damit einhergehende Staubildung hat zur Folge, dass der Fluss abnimmt.

In Abbildung 2.1 (b) gibt es einen Bereich zwischen ρ_0 und ρ_1 , in dem beide Äste gleichzeitig existieren. Dieser Bereich spiegelt sich auch in den empirischen Daten in Abbildung 2.1 (a) in Form einer hohen Punktdichte wider. Der Überlapp zwischen den beiden Ästen ist erkennbar. Der Grund für diesen Überlapp ist, dass der Freifluss-Ast in diesem Bereich nur metastabil ist. Der Fluss am Schnittpunkt der beiden Äste entspricht gerade dem Ausfluss aus einem Stau J_{out} . Letztere ist eine empirische Größe, die für die Kalibrierung später vorgestellter Modelle verwendet wird und bei etwa $J_{\text{out}} \approx 1800 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ liegt [40]. Dieser Wert wird davon dominiert, dass zum Stillstand gekommene Fahrer durchschnittlich über 1 s brauchen, um erneut anzufahren. Es hat sich herausgestellt, dass Fahrer beim Anfahren deutlich mehr trödeln als während der Fahrt. Dies wird später in Kapitel 3 unter dem Begriff „slow-to-start“ in den dort vorgestellten Modellen noch näher erläutert.

Das Fahrverhalten weniger Fahrzeuge kann dabei den Verlauf des Graphen verändern und das System vom Freifluss-Ast, auf den gestauten Ast überführen. Dies geht mit einer deutlichen Reduktion des Flusses einher, was in der Fachliteratur „capacity-drop“ genannt wird. Empirisch hat sich gezeigt, dass das Verhältnis aus dem maximalen Fluss J_{max} und dem Stauausfluss J_{out} in etwa

$$\frac{J_{\text{max}}}{J_{\text{out}}} \approx 1,5 \quad (2.8)$$

beträgt [31]. Des Weiteren konnte empirisch gezeigt werden, dass die Steigung des gestauten Astes $\frac{dJ}{d\rho}|_{\text{Stau}} \approx -15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ der Geschwindigkeit, mit der sich eine Stauwelle entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet, entspricht [41, 42]. Die stromabwärts laufende Stauwelle entsteht, weil neue Fahrzeuge von hinten in den Stau einfahren und diesen somit um etwa ihre Fahrzeuglänge verlängern. Gleichzeitig fahren Fahrzeuge an der Staufront aus dem Stau hinaus. Dadurch kommt es zu der aus einer Verdichtung von Fahrzeugen bestehenden Stauwelle. Wie bereits in Unterkapitel 2.1.4 erwähnt, verlängert jedes Fahrzeug den Stau im Mittel um zirka 7,5 m.

Wenn die Dichte hinreichend groß ist, fahren mehr Fahrzeuge von hinten in einen Stau hinein als vorne heraus. Da diese Staus zeitlich relativ stabil sind, lässt sich der Verkehr in zwei Bereiche aufteilen. Zum einen Verkehr innerhalb des Staus, wo die lokale Dichte gegen ρ_{max} geht und die Geschwindigkeiten dementsprechend gering sind, und zum anderen in Bereiche außerhalb des Staus, wo die lokale Dichte sehr viel geringer ist.

Dadurch, dass viele Fahrzeuge im Stau stehen, ist die lokale Dichte außerhalb des Staus so gering, dass Fahrzeuge dort im Freifluss fahren. Da Staus eine lange Lebenszeit haben und mit der Zeit immer weiter nach hinten durch das System wandern, wird dieser Bereich „wide moving jams“ genannt [43].

Das Fundamentaldiagramm ist also in der Lage, das System in zwei Bereiche zu unterteilen. Untersuchungen [44] haben jedoch gezeigt, dass die Struktur im gestauten Ast besser durch eine Punktwolke und nicht durch einen funktionalen Zusammenhang $J = J(\rho)$ dargestellt werden sollte. Die Zustände, welche innerhalb dieser Punktwolke möglich sind, werden als „synchronisierter Verkehr“ [45] bezeichnet.

2.3.2 Die Drei-Phasen-Verkehrstheorie

Durch die Einführung des synchronisierten Verkehrs lässt sich der Fluss nun, entsprechend der „Drei-Phasen-Verkehrstheorie“ [46], in die drei Phasen Freifluss-Phase, synchronisierte Phase und gestaute Phase unterteilen. Eine angepasste Skizze eines Fundamentaldiagramms nach der Drei-Phasen-Theorie ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Da der synchronisierte Verkehr nicht durch eine funktionale Abhängigkeit beschrieben werden kann, wird er stattdessen durch eine Reihe von Eigenschaften charakterisiert [47]:

- Bei einer gegebenen Verkehrssituation sind die Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge auf allen Spuren stark korreliert (daher 'synchronisiert').
- Eine Erhöhung der Dichte kann sowohl zu einer Steigerung, als auch zu einer Verringerung des Flusses führen. Die Zeitreihe ist daher „irregulär“.
- Die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist deutlich geringer als im Freifluss, aber der Fluss selber kann ähnlich große Werte annehmen.
- Die Varianz und der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung ist geringer als im Freifluss, jedoch bremsen Fahrzeuge nicht bis zum Stillstand, das heißt $v_n(t) = 0$, ab.
- Bereiche des synchronisierten Verkehrs sind lokal beschränkt und breiten sich, entgegen dem Verhalten der wide moving jams, nicht entgegen der Fahrriichtung aus.

Die Phasenübergänge sind dabei Übergänge 1. Ordnung [48, 49], was bedeutet, dass keine Stetigkeit im Hinblick auf die Geschwindigkeit vorliegt. Die Übergänge von der Freifluss- zur synchronisierten Phase und von dort zur gestauten Phase werden als Verkehrszusammenbrüche bezeichnet. Das Ziel der in den nachfolgenden Kapiteln

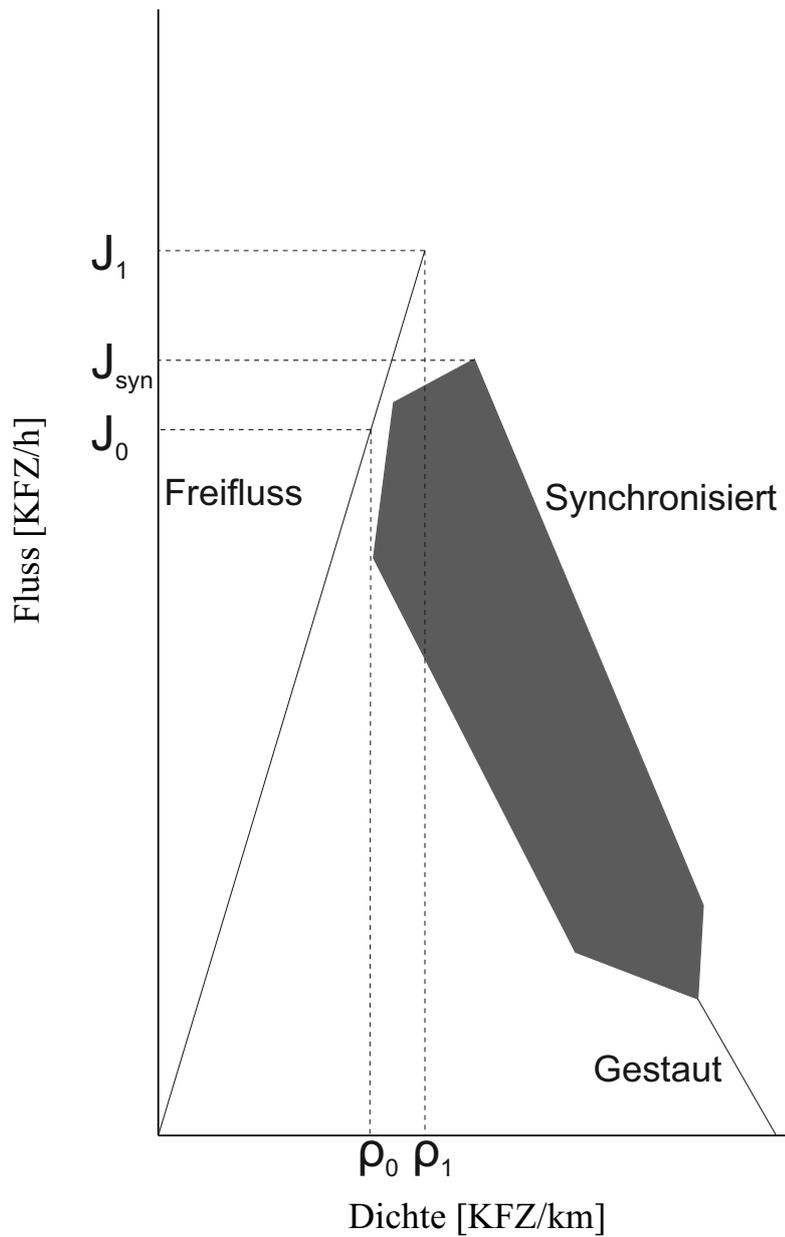


Abbildung 2.2: Angepasste Skizze des Fundamentaldiagramms entsprechend der Drei-Phasen-Theorie.

präsentierten Modelle ist es also, ein Fundamentaldiagramm zu erzeugen, welches sich eindeutig in diese drei Verkehrsphasen aufteilen lässt. Des Weiteren sollten die Modelle dazu in der Lage sein, auch weitere Messgrößen zu reproduzieren. Dazu zählen unter anderem der Stauausfluss J_{out} und die sich gegen die Fahrtrichtung ausbreitende Geschwindigkeit v_{jam} der Stauwelle.

3

Simulationsmodelle

3.1 Modellierungsvorbereitungen

Die Analyse von Verkehr ist ein weites Feld, in dem es viele unterschiedliche Herangehensweisen gibt. So lässt sich zwischen makroskopischen, mesoskopischen, mikroskopischen und submikroskopischen Modellen unterscheiden.

3.1.1 Makroskopische Modelle

Für makroskopische Modelle [50–52] wird versucht Gleichungen aufzustellen, die den Verkehrsfluss beschreiben, ohne einzelne Fahrzeuge und deren Eigenschaften zu betrachten. Sie verwenden dabei Erkenntnisse aus der Hydrodynamik, um den Fluss als Ganzes zu beschreiben. Diese Theorien sind in der Lage, die dynamischen Eigenschaften des Verkehrs zu erfassen und den Verkehr kontinuierlich zu beschreiben. Sie eignen sich daher gut für große Simulationen auf Autobahnen, jedoch eignen sie sich nicht zur Analyse von Mischverkehr von autonomen und menschlich gesteuerten Fahrzeugen, da dort die mikroskopische Fahrzeug-Fahrzeug Interaktion von besonderer Bedeutung ist [53–55]. Dabei handelt es sich um eine mikroskopische Interaktion zwischen zwei Fahrzeugen, welche folglich nicht in einem solchen makroskopischen Modell berücksichtigt werden kann.

3.1.2 Mikroskopische Modelle

Bei mikroskopischen Modellen, wird jedes Fahrzeugs einzeln simuliert und die Wechselwirkung mit anderen Verkehrsteilnehmern mit einbezogen. Hierdurch können reale Verkehrssituationen sehr gut reproduziert werden, weswegen im Folgenden einige ältere mikroskopische Modelle vorgestellt werden.

3.1.3 Submikroskopische Modelle

In submikroskopischen Modellen, wie zum Beispiel [56], werden nicht nur verkehrsrelevante Eigenschaften, sondern auch einzelne Fahrzeugbauteile, wie z.B. Bremsklötze oder die Reifen mit variablem Druck, und deren Zusammenspiel so genau wie möglich simuliert. Diese Simulationen finden jedoch hauptsächlich in der Fahrzeugproduktion Anwendung, da der nötige Rechen- und Kalibrierungsaufwand sehr hoch ist und die zusätzlich gewonnenen Informationen für Verkehrsanalysen wenig bis gar nicht relevant sind.

3.1.4 Mesoskopische Modelle

Mesoskopische Modelle [57–59] verbinden makroskopische und mikroskopische Modelle, indem zum Beispiel freie Straßenabschnitte ohne Bottlenecks makroskopisch simuliert werden und nur interessante Bereiche, wie zum Beispiel Kreuzungen oder Auf- und Abfahrten von Autobahnen, mikroskopisch simuliert werden. Diese Modelle liefern einen höheren Detaillierungsgrad als makroskopische Modelle und sind gleichzeitig effizienter als vergleichbare mikroskopische Modelle.

3.1.5 Mikroskopische Zellularautomatenmodelle

Zellularautomatenmodelle [60] nehmen eine Diskretisierung von Raum und Zeit vor. Eine räumlich diskretisierte Einheit entspricht dann einer Zelle, die einen von verschiedenen Zuständen einnehmen kann. Im Rahmen von Zellularautomatenmodellen für Verkehrssimulationen sind diese Zustände zum Beispiel von einem Fahrzeug „belegt“ oder „nicht belegt“. Der Übergang von einem Zeitschritt zum nächsten geschieht dann durch einen Satz vordefinierter Regeln. Ein besonders bekanntes Beispiel solcher Zellularautomatenmodelle ist das 'Game of Life' [61]. Diese Modelle eignen sich besonders gut für die Anwendung bei Verkehrssimulationen, da Rechner in diskreten Zuständen rechnen. Außerdem vereinfacht es der feste Satz an Regeln, die Entwicklung des Verkehrs nachzuvollziehen und zu analysieren. Da eine Zelle das Vorhandensein eines

Fahrzeugs beschreibt, können in diesen Modellen nicht einzelne Personen innerhalb eines Fahrzeugs modelliert werden. Zellularautomatenmodelle für Verkehrssimulationen (und Verkehrssimulationen im Allgemeinen) werden daher in der Regel als agentenbasierte Modelle beschrieben [62]. Ein Agent beschreibt alle sich in einem Fahrzeug befindenden Personen, unabhängig von deren Anzahl, Alter, Geschlecht oder anderen Eigenschaften. In späteren Kapiteln nimmt die Rolle eines Agenten der Computer ein, der die Steuerung des automatisierten Fahrzeugs übernimmt.

3.1.6 Diskretisierung und Dimensionslosigkeit

Zur Durchführung einer mikroskopischen Simulation mit Zellularautomatenmodellen ist es nötig, in ein System mit diskreten und dimensionslosen Größen überzugehen. Ein Fahrzeug kann dabei, abhängig vom Modell, eine oder mehrere angrenzende Zellen gleichzeitig belegen. Mit „gleichzeitig“ ist dabei im Rahmen dieser Modelle in einem Zeitschritt gemeint. Aus diesen diskretisierten dimensionslosen Größen folgt direkt auch eine diskretisierte dimensionslose Geschwindigkeit v , angegeben in Zellen pro Zeitschritt. Analog wird die Beschleunigung a in Zellen pro Zeitschrittquadrat angegeben.

Diese Größen werden im Rahmen der Auswertung für gewöhnlich zurück in ihre dimensionsbehafteten Größen überführt, sodass die Dichte in KFZ pro km und der Fluss in KFZ pro Stunde angegeben werden. Es ist in diesem Zusammenhang außerdem noch wichtig zu erwähnen, dass der Bremsweg in einem diskretisierten System mit beschränkter Bremskapazität nicht schlicht entsprechend der kontinuierlichen Gleichung 2.3 bestimmt werden kann. Wie in [63] erläutert, muss stattdessen die Geschwindigkeit v des Fahrzeugs durch das Bremsvermögen D des Modells (Zellen pro Zeitschritt) geteilt werden, um die Zeit $T = \frac{v}{D}$ zu erhalten, welche das Fahrzeug benötigt, um zum Stillstand zu kommen. Diese wird dann in den ganzzahligen Anteil a und den gebrochen rationalen Anteil b derart aufgeteilt, dass gilt $a + b = T$. Mithilfe von a, b, D kann der Bremsweg in einem diskretisierten System mit endlichem Bremsvermögen somit durch

$$B = D \left(ab + \frac{a(a-1)}{2} \right) \quad (3.1)$$

bestimmt werden. Die unterschiedlichen Modelle legen anhand spezifischer Regeln fest, wie sich ein Fahrzeug in einem Zeitschritt verhält (Bremsen, Beschleunigen, etc.) und wie viele Zellen es fährt. In Abgrenzung zu den submikroskopischen Modellen wird dabei jedoch versucht, den Verkehr zwar möglichst realistisch, aber mit einem vergleichsweise geringen Satz von Regeln, zu simulieren. Bevor die eigentlichen Modelle detailliert vorgestellt werden, wird zunächst eine Einführung der Zellennachbarschaft sowie der Update-Methoden vorgenommen.

3.1.7 Update-Methode und Nachbarschaften bei Zellularautomatenmodellen

Die im Folgenden betrachteten Zellularautomatenmodelle verwenden maximal zweidimensionale Nachbarschaften im Falle von mehrspurigen Systemen. Bei zweidimensionalen Nachbarschaften wird zwischen der Moore-Nachbarschaft und der Von-Neumann-Nachbarschaft unterschieden [64]. Beide Nachbarschaften sind in Abbildung 3.1 skizziert. Bei Zellen ober- und unterhalb der betrachteten Zelle (rot markiert) handelt es sich, im Rahmen der hier betrachteten Straßenverkehrsmodelle, um Spuren über- bzw. unterhalb der Spur, auf der sich das Fahrzeug gerade befindet. Die Zelle rechts von der betrachteten Zelle ist die nächste Zelle in Fahrtrichtung und jene links von der Betrachteten ist dementsprechend die vorherige Zelle in Fahrtrichtung. Ein Agent kann immer nur von einer Zelle in eine benachbarte Zelle wechseln (wobei in den hier betrachteten Simulationen keine Rückwärtsbewegung betrachtet wird). Der Unterschied zwischen den zwei Nachbarschaften ist also, dass ein Agent in einem System mit Moore-Nachbarschaften, eine Spur wechseln und gleichzeitig eine Zelle nach vorne fahren kann, während diese Aktion in der Von-Neumann-Nachbarschaft in zwei Aktionen unterteilt ist. Auch wenn ein Agent beide Aktionen in einem Zeitschritt durchführen kann (und oft wird), ist dies für Verkehrssimulationen die geeignetere Variante, da so Spurwechsel und Vorwärtsbewegungen getrennt voneinander bestimmt und betrachtet werden können. Dies vereinfacht die Implementierung und Nachvollziehbarkeit der Regeln, weswegen in den nachfolgenden Modellen stets Von-Neumann-Nachbarschaften betrachtet werden. Dies bedeutet jedoch nicht, dass auch immer die vollständige Von-Neumann-Nachbarschaft zur Anwendung gebracht wird. In einem einspurigen Modell zum Beispiel gibt es keine Zellen horizontal zur Fahrtrichtung der betrachteten Zelle und auch in zweispurigen Systemen existiert stets nur eine Zelle horizontal zur Fahrtrichtung.

In einem einspurigen Modell kann sich Agent n also v_n^t Zellen in einem Zeitschritt nach vorne bewegen, indem er sich v_n^t mal auf die nächste Nachbarzelle in Fahrtrichtung fortbewegt. Hierbei beschreibt v_n^t die Geschwindigkeit des n -ten Agenten zum Zeitschritt t .

In einer mikroskopischen Simulation werden in der Regel tausende von Fahrzeugen über viele Zeitschritte simuliert, um daraus makroskopische Größen zu bestimmen. Die Ergebnisse der Simulationen hängen jedoch nicht nur von den gewählten Größen der Simulationsparameter und -regeln ab, sondern auch von der Art und Weise, wie von einem Zeitschritt zum nächsten übergegangen wird. Dabei gibt es verschiedene Update-Methoden, die alle einen unterschiedlichen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen.

So werden bei der sogenannten sequentiellen Methode [65] alle Fahrzeuge in einer Liste angeordnet und dann der Reihe nach geupdated. Dies hat den Nachteil, dass das zweite

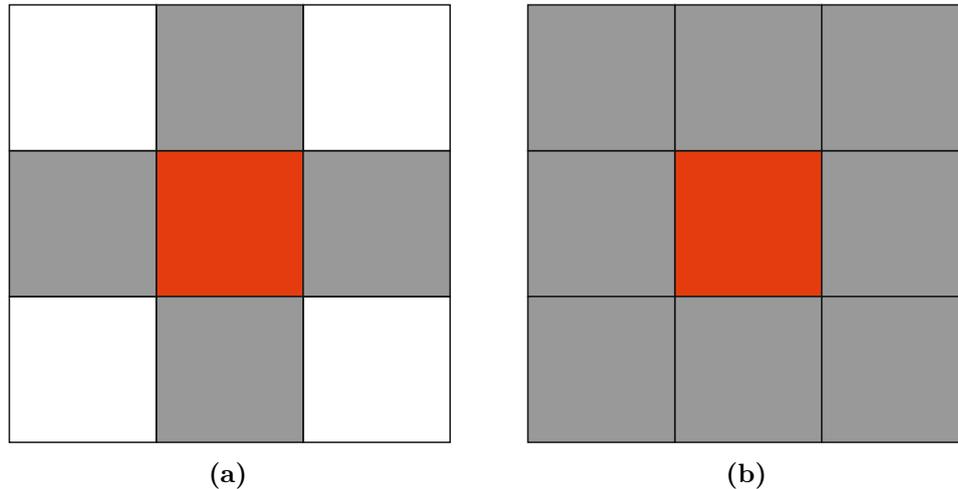


Abbildung 3.1: Mögliche Nachbarschaften in einem Zellularautomatenmodell. Die grauen Zellen gehören jeweils zur Nachbarschaft der roten Zelle, während die weißen Zellen nicht dazu gehören. Die Von-Neumann-Nachbarschaft wird in (a) gezeigt, während (b) die Moore-Nachbarschaft skizziert.

Fahrzeug bereits auf die veränderte Geschwindigkeit und Position des ersten Fahrzeugs reagieren kann, ohne dass der Zeitschritt bereits abgeschlossen ist. Dies würde eine Reaktionsgeschwindigkeit von 0 s bedeuten.

Bei der zufällig-sequentiellen Methode wird dieser Fehler etwas reduziert, da hier die Liste nicht in fester Ordnung durchgearbeitet wird, sondern stets die Auswahl des Fahrzeugs zufällig erfolgt. Hierdurch tritt das Problem der reduzierten Reaktionszeit zwar nicht immer und nicht bei jedem Fahrzeug auf, wird aber auch nicht gänzlich eliminiert.

Daher wird im Folgenden die sogenannte parallele Update-Methode [65] angewendet, bei der alle Fahrzeuge gleichzeitig geupdatet werden. Das Problem bei dieser Methode ist, dass ein Computer stets einen Schritt nach dem anderen ausführt und somit nicht mehrere Fahrzeuge gleichzeitig berücksichtigen kann. Im Rahmen von mehrkernigen parallelen Simulationen können zwar 10 – 20 Fahrzeuge gleichzeitig geupdatet werden, bei hunderten von Fahrzeugen würde dies dennoch eher einem sequentiellen Update entsprechen. Stattdessen wird ein Zeitschritt in mehrere Unterzeitschritte unterteilt, welche dann sequentiell geupdatet werden. Im ersten Zeitschritt wird zunächst der Abstand eines Fahrzeuges zu dem vorausfahrenden Fahrzeug bestimmt und die nötigen Größen für die Berechnung der Geschwindigkeit zwischengespeichert. Im nächsten Unterschnitt wird dann die neue Geschwindigkeit aller Fahrzeuge auf Basis dieser Daten nacheinander berechnet ehe sie im letzten Unterschnitt entsprechend dieser Berechnung bewegt werden.

3.2 Simulationsmodelle

Mithilfe dieser Update-Methoden können nun einige relevante Zellularautomatenmodelle vorgestellt werden, die mit unterschiedlichen Regeln den Verkehr simulieren. Die hier vorgestellten Modelle sind zunächst alle eindimensional, bzw. einspurig, können jedoch durch Regeln für den Spurwechsel zu mehrdimensionalen Modellen erweitert werden. Derartige Spurwechselregeln werden in Kapitel 7 vorgestellt.

Beim ersten vorgestellten Modell handelt es sich um das Nagel-Schreckenberg-Modell [33]. Dieses wurde mit dem Ziel erstellt, Straßenverkehr zu simulieren und basiert auf einigen einfachen Annahmen. Damit ist es bereits dazu in der Lage, den „Stau aus dem Nichts“ (zuerst beobachtet in [66]) darzustellen. Dies konnte bis dahin von keinem anderen Modell realisiert werden.

Das anschließend vorgestellte sogenannte Bremslicht-Modell [67] basiert auf dem Nagel-Schreckenberg-Modell und führt einige weitere Größen ein, durch welche die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Agenten besser und mit höherer Reichweite beschrieben werden kann.

Anschließend wird noch das von Lee et al. [2] erstellte Modell vorgestellt. Dieses Modell arbeitet mit sich verschieden verhaltenden Agenten und einer begrenzten Bremsbeschleunigung, wodurch es möglich ist, Unfälle zu reproduzieren. Das Verhalten der Agenten wurde in dem letzten vorgestellten Modell von Pottmeier et al. [31] so angepasst, dass Unfälle vermieden werden.

3.2.1 Nagel-Schreckenberg-Modell

Das Nagel-Schreckenberg-Modell aus dem Jahre 1992 [33] (im Folgenden NaSch-Modell) ist das erste Zellularautomatenmodell, welches für den Straßenverkehr entwickelt wurde. Es ist trotz der einfachen, im Folgenden vorgestellten Regeln dazu in der Lage, wichtige Beobachtungen des Straßenverkehrs, wie den Stau aus dem Nichts, zu reproduzieren. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 3.2 eine Konfiguration aus vier Fahrzeugen zusammen mit den grundlegenden Größen skizziert.

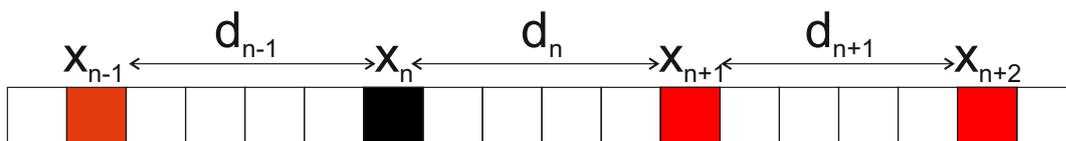


Abbildung 3.2: Fahrzeugkonfiguration in einem Zellularautomatenmodell. Die schwarz gefüllte Zelle beschreibt eine vom Fahrzeug n belegte Zelle, während die roten Zellen von vorausfahrenden oder folgenden Fahrzeugen belegt sind.

Wie bei den weiteren in diesem Kapitel vorgestellten Modellen entspricht ein Zeitschritt im NaSch-Modell einer Sekunde in der Realität, was der durchschnittlichen Reaktionszeit eines Menschen entspricht [68]. Die Größe einer Zelle wird zu 7,5 Meter gewählt, da dies dem durchschnittlichen Raum entspricht, den ein Fahrzeug im dichtesten Stau einnimmt [33]. Durch diese Wahl wird folglich gewährleistet, dass die Dichte in einem simulierten Stau der Realität entspricht. Aus diesen zwei Größen wird eine Beschleunigung von $a = 1 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}^2} = 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und eine Geschwindigkeit von $v = 1 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}} = 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ festgelegt. Die Geschwindigkeit v_n^t und der Ort x_n^t des Agenten n können zu jedem Zeitpunkt anhand der nachfolgenden Regeln bestimmt werden:

1. Beschleunigung:

$$v_n^{t+\frac{1}{3}} = \max(v_n^t + 1, v_{\max}) \quad (3.2)$$

2. Bremsen:

$$v_n^{t+\frac{2}{3}} = \min(v_n^{t+\frac{1}{3}}, d_n^t) \quad (3.3)$$

3. Trödeln:

$$v_n^{t+1} = \begin{cases} \max(v_n^{t+\frac{2}{3}} - 1, 0), & \text{mit Wahrscheinlichkeit } p \\ v_n^{t+\frac{2}{3}}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.4)$$

4. Bewegung:

$$x_n^{t+1} = x_n^t + v_n^{t+1} \quad (3.5)$$

Im ersten Schritt wird überprüft, ob der Agent n langsamer als die erlaubte maximale Geschwindigkeit v_{\max} fährt. Ist dies der Fall, wird seine Geschwindigkeit um eins erhöht. Für v_{\max} wird in der Originalveröffentlichung $5 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}} = 135 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ gewählt, da dies nahe der Richtgeschwindigkeit auf deutschen Autobahnen liegt [69]. Anschließend wird im zweiten Schritt geprüft, ob die Anzahl an freien Zellen zum vorausfahrenden Fahrzeug d_n^t größer als dessen aktualisierte Geschwindigkeit ist. Durch Einführung diese Regel wird verhindert, dass der Agent n einen Unfall verursacht, wenn der Agent $n + 1$ in diesem Zeitschritt zum Stillstand kommt. Im dritten Schritt trödelt der Agent mit einer Wahrscheinlichkeit p , dass heißt er reduziert seine Geschwindigkeit um eins oder beschleunigt nicht, obwohl dies eigentlich möglich wäre. Abschließend werden durch die letzte Regel, alle Fahrzeuge entsprechend ihrer aktualisierten Geschwindigkeit fortbewegt, bevor wieder mit der ersten Regel für den nächsten Zeitschritt begonnen wird.

Das NaSch-Modell ist das erste Simulationsmodell gewesen, das ein stochastisches Element in Form von Gleichung (3.4) implementierte. Bedingt durch die Einführung des Trödelparameters können Agenten nachfolgende Fahrzeuge ausbremsen, auch wenn die Strecke frei ist. Dadurch kann es zu einer Verkettung von Bremsmanövern und Überreaktionen kommen, welche schließlich einen Stau aus dem Nichts zur Folge haben.

Dieses einfache Modell ist zwar in der Lage einige empirische Größen und Beobachtungen wiederzugeben, jedoch gibt es auch noch andere Größen, wie die Ausflussrate aus einem Stau [40] oder den in Kapitel 2 erwähnten „slow-to-start“ Effekt, die noch nicht korrekt wiedergegeben werden. Daher wurde das Modell in den nachfolgenden Jahren mehrfach weiterentwickelt.

In [70] wurde die Trödelwahrscheinlichkeit in zwei Größen aufgeteilt. Einmal für den Fall, dass ein Agent still steht und einmal für den Fall, dass er fährt. Durch diese vorgenommene Änderung konnte das Verhalten eines zum Stillstand gekommenen Fahrzeugs besser reproduziert werden. Typische Zeiten zum erneuten Anfahren liegen dabei im Bereich von über einer Sekunde.

Im Bremslicht-Modell wird die Trödelwahrscheinlichkeit noch weiter unterteilt und die Wechselwirkungsreichweite zwischen den Agenten erweitert, um ein realistischeres Verhalten der Fahrzeuge zu erzeugen. Die dabei eingeführten Änderungen sind relevant für die vorliegende Arbeit und werden daher ausführlich im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

3.2.2 Bremslicht-Modell

Das Bremslicht-Modell wurde im Jahr 2000 von Knospe et al. veröffentlicht [67]. Wie der Name bereits impliziert, ist eine der größten Änderungen die Einführung eines Bremslichts gewesen. Die Implementierung dieses Bremslichtes erfolgt mittels des Parameters b_n^t . Dabei wird eine Aktivierung des Bremslichtes ($b_n^t=1$) vorgenommen, wenn der Agent n aktiv bremst, daher nicht lediglich weniger beschleunigt (getrödelt) hat. Dadurch können nun drei Wechselwirkungsreichweiten definiert werden:

1. Bei großen Abständen zwischen den Fahrzeugen können alle Agenten (abgesehen von statistischen Schwankungen) mit ihrer Wunschgeschwindigkeit (v_{\max}) fahren.
2. Bei mittleren Abständen können Agenten auf die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs reagieren und so frühzeitig ihre Geschwindigkeit reduzieren.
3. Bei geringen Abständen passen die Agenten ihre Geschwindigkeit derart an, dass die Unfallfreiheit stets erhalten bleibt.

Diese drei Punkte lassen sich gut den drei Phasen der Drei-Phasen-Theorie (siehe Kapitel 2.3.2) zuordnen. Des Weiteren wird die Zellgröße im Rahmen des Bremslicht-Modells auf 1,5 m reduziert, um ein realistischeres Beschleunigungsvermögen zu reproduzieren. Jedes Fahrzeug belegt daher 5 Zellen. Zusätzlich zur Einführung des Bremslichtes wurde die Trödelwahrscheinlichkeit von einem Parameter in eine Variable geändert. Zu jedem Zeitschritt muss nun für jedes Fahrzeug festgelegt werden, wie hoch die

Trödelwahrscheinlichkeit ist. Dies hängt davon ab, ob das Fahrzeug gerade still steht oder fährt und ob das vorausfahrende Fahrzeug ein aktives Bremslicht hat oder nicht. Durch diese Änderungen ist das Modell bereits in der Lage, viele empirische Größen zu reproduzieren. Allerdings verwendet das Modell ein unrealistisch unendlich hohes Bremsvermögen. Zudem entspricht die Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten nicht den empirischen Beobachtungen.

Um auch auf diese Schwäche adäquat einzugehen, wird im Folgenden das Lee-Modell präsentiert, welches auch diese Punkte berücksichtigt.

3.2.3 Modell von Lee et al.

Das den folgenden Simulationen zugrunde liegende Modell wurde von Lee et al. [2] entwickelt und wird im Folgenden Lee-Modell genannt. Es weist zwei wesentliche Unterschiede zu vorangehenden Zellularautomatenmodellen auf. Zum einen gibt es eine endliche Bremsbeschleunigung D , welche dazu führt, dass Unfälle entstehen können, weil eine abrupte Reduzierung der Geschwindigkeit von einem Zeitschritt zum nächsten ausgeschlossen ist. Zum anderen wird das verschiedenartige Verhalten der Fahrer in unterschiedlichen Situationen durch das Einführen einer Optimismus-Variablen γ berücksichtigt. Diese wird gemäß

$$\gamma_n^t = \begin{cases} 0, & \text{für } v_n^t \leq v_{n+1}^t \leq v_{n+2}^t \text{ oder } v_{n+2}^t \geq v_{\max} - 1 \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.6)$$

bestimmt. Der Agent n schätzt dabei eine Situation als optimistisch ein, wenn eins von zwei Szenarien zutrifft. Im ersten Szenario folgt der Agent dem vorausfahrenden Fahrzeug $n + 1$, welches wiederum dem Fahrzeug $n + 2$ folgt, wobei keiner schneller als das vorausfahrende Fahrzeug fahren darf. Die Fahrzeuge beschleunigen also entweder alle frei oder befinden sich in einem synchronisierten Zustand. Im zweiten Szenario befindet sich das Fahrzeug $n + 2$ in Freifahrt und fährt mit seiner Wunschgeschwindigkeit. Die Reduzierung um bis zu 1 berücksichtigt das Trödeln. Da das Bremsvermögen in diesem Modell begrenzt ist, muss zu jedem Zeitpunkt eine als sicher geschätzte Geschwindigkeit c_{n+1} (abhängig von der Einschätzung der Situation) durch die Gleichung

$$x_n^t + \Delta + \sum_{i=0}^{\tau_f(c_n^{t+1})} (c_n^{t+1} - D \cdot i) \leq x_{n+1}^t + \sum_{i=1}^{\tau_l(v_{n+1}^t)} (v_{n+1}^t - D \cdot i) \quad (3.7)$$

3. Simulationsmodelle

berechnet werden. Die Lösung dieser Gleichung muss dabei numerisch bestimmt werden, wobei τ_f , τ_l , und Δ als

$$\Delta = L + \gamma_n^t \max\left(0, \min(g_{\text{safe}}, v_n^t - g_{\text{safe}})\right), \quad (3.8)$$

$$\tau_f(v) = \gamma_n^t \frac{v}{D} + (1 - \gamma_n^t) \max\left(0, \min\left(\frac{v}{D}, t_{\text{safe}}\right) - 1\right), \text{ und} \quad (3.9)$$

$$\tau_l(v) = \gamma_n^t \frac{v}{D} + (1 - \gamma_n^t) \min\left(\frac{v}{D}, t_{\text{safe}}\right) \quad (3.10)$$

definiert sind. Bei g_{safe} und t_{safe} handelt es sich um Sicherheitsparameter, die so gewählt werden, dass keine Unfälle entstehen und gleichzeitig realistische Fahrzeugfolgezeiten reproduziert werden. L beschreibt die Länge eines Fahrzeuges. Da in diesem und den folgenden Modellen nur PKW-Verkehr betrachtet wird, sind alle Fahrzeuge $L = 5$ Zellen $= 7,5$ m lang. Die tatsächliche als sicher betrachtete Geschwindigkeit \tilde{c}_n^{t+1} für den nächsten Zeitschritt entspricht, nach

$$\tilde{c}_n^{t+1} = \max[c_n^{t+1} | c_n^{t+1} \text{ welche Gleichungen (3.7) - (3.10) erfüllen}] \quad (3.11)$$

der maximalen Geschwindigkeit c_n^{t+1} , die alle vier Gleichungen erfüllt. Mithilfe dieser Geschwindigkeit kann dann die tatsächliche Geschwindigkeit aktualisiert werden, wobei hier mittels

$$\tilde{v}_n^{t+1} = \min(v_{\text{max}}, v_n^t + a, \max(0, v_n^t - D, \tilde{c}_n^{t+1})) \quad (3.12)$$

berücksichtigt wird, dass der Agent nicht um mehr als $a = 1 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}^2}$ beschleunigen beziehungsweise $D = 2 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}^2}$ bremsen darf.

Im Anschluss wird noch in Analogie zu den vorhergehenden Modellen getestet, ob das Fahrzeug trödelt. Während im Bremslicht-Modell $p = p_0$ für ein stillstehendes und $p = p_d$ für ein fahrendes Fahrzeug mit vorausfahrendem Fahrzeug ohne Bremslicht verwendet wurde, was einem un stetigen Übergang entspricht, wird die Trödelwahrscheinlichkeit nun durch

$$p_n^t = \max\left(p_d, p - v_n^t \frac{p_0 - p_d}{v_{\text{slow}}}\right) \quad (3.13)$$

so definiert, dass sie stetig ist. Nachdem die Trödelwahrscheinlichkeit festgelegt wurde, muss nun noch mit

$$v_n^{t+1} = \max\left(0, v_n^t - D, \tilde{v}_n^{t+1} - \eta\right) \quad (3.14)$$

berücksichtigt werden, dass der Agent nicht trödeln kann, wenn er bereits maximal aktiv bremst. Dabei gilt $\eta = 1$, wenn der Agent mit der Wahrscheinlichkeit p_n^t trödelt, andernfalls gilt $\eta = 0$.

Abschließend wird das Fahrzeug entsprechend, genau wie im NaSch-Modell, um v_n^{t+1} fortbewegt, wobei auch hier die kürzere Zellenlänge von 1,5 m zu berücksichtigen ist.

3.2.4 Modell von Pottmeier et al.

Im Lee-Modell kann es aufgrund einer Fehleinschätzung des Fahrers zu Unfällen kommen. Dieses Phänomen wurde bereits in [31] detailliert untersucht und es wurden daraufhin mehrere verschiedene Regeländerungen vorgestellt, mit denen sich Kollisionen vermeiden lassen. Da für die folgenden Untersuchungen Unfälle zunächst nicht von Interesse sind, wird die zum Bremslicht-Modell analoge Lösung

$$b_n^t = \begin{cases} 1, & \text{für } \tilde{v}_n^{t+1} < v_n^t \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.15)$$

übernommen. Dabei beschreibt \tilde{v}_n^{t+1} die Geschwindigkeit für den nächsten Zeitschritt ohne Trödeln. Mithilfe dieses Bremslicht-Parameters wird schließlich die Einschätzung des Fahrers mit

$$\gamma_n^t = \begin{cases} 0, & \text{für } b_{n+2}^t = 0 \text{ und } (v_n^t \leq v_{n+1}^t < v_{n+2}^t \text{ oder} \\ & (v_{n+2}^t \geq v_{\max} - 1 \text{ und } v_n^t - v_{n+1}^t \leq D)) \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.16)$$

derart abgeändert, dass Unfälle vermieden werden. Man sieht, dass, sobald der Fahrer vor dem vorausfahrenden Fahrzeug aktiv bremsen muss ($b_{n+2}^t = 1$) oder wenn der Fahrer zu schnell auf den Vordermann auffährt ($v_n^t - v_{n+1}^t \leq D$), der Agent die Situation aufgrund von Gleichung (3.16) nicht mehr optimistisch einschätzt. Dieses so abgeänderte Modell wird fortan nach seinem Begründer, das Pottmeier-Modell genannt. Der Einfluss dieser Änderungen wird in [31] diskutiert, und darüber hinaus auch in der Validierung des nachfolgenden Modells in Kapitel 4.3 noch einmal verdeutlicht.

Bevor das neue Modell formal eingeführt wird, werden im letzten Unterkapitel 3.2.5 weitere historische Modelle vorgestellt, die automatisierte Fahrzeuge (AF) oder kommunizierende, automatisierte Fahrzeuge (KAF) simulieren. Ziel ist dabei, auf die Vor- und Nachteile dieser Modelle einzugehen.

3.2.5 Andere Modelle mit automatisierten Fahrzeugen

Viele historische Modelle betrachten automatisierte Fahrzeuge als menschliche Fahrzeuge mit „adaptive-cruise-controll“ (ACC) [8] beziehungsweise „cooperative-adaptive-cruise-controll“ (CACC) [71] Systemen. Dabei eignen sich Fahrzeugfolgemodelle wie [10, 23, 24] gut solche Systeme zu simulieren. Jedoch gibt es auch Zellularautomatenmodelle, die auf ACC- beziehungsweise CACC-Systeme beruhen [11, 23, 25]. Diese ACC- beziehungsweise CACC-Modelle haben den großen Vorteil, dass es bereits entsprechende Systeme im

3. Simulationsmodelle

aktuellen Einsatz gibt und sie daher mit empirischen Werten kalibriert werden können. Jedoch müssen diese Systeme oft noch die Kontrolle an den menschlichen Fahrer zurückgeben, sollte die Verkehrssituation den vorgegebenen Parameterraum verlassen [26]. Experimente haben gezeigt, dass die Übernahme der erneuten Kontrolle über das Fahrzeug durch den Fahrzeugführer zu größeren Reaktionszeiten und damit höheren Fahrzeugfolgezeiten führt [27]. Einige dieser Modelle berücksichtigen diesen Umstand und betrachten stattdessen ACC-Systeme, die das Fahrzeug in allen Verkehrssituationen steuern können und damit mit geringeren Fahrzeugfolgezeiten operieren können. Das Definieren von Agentenverhalten über die Fahrzeugfolgezeiten hat das Problem, dass verschiedene Verhaltensweisen von Agenten gar nicht oder nur teilweise berücksichtigt werden können [10, 25].

Gerade für den heterogenen Verkehr ist es jedoch wichtig, mehrere Unterscheidungen im Verhalten zwischen AF und MF Agenten zu berücksichtigen, weswegen das im Zuge dieser Arbeit vorgestellte Modell nicht über Fahrzeugfolgezeiten definiert wird. Stattdessen wird das Modell direkt über das Verhalten der Agenten definiert und anschließend so kalibriert, dass die Fahrzeugfolgezeiten den zu erwartenden Ergebnissen entsprechen. Auch andere Modelle, welche die Bewegung der Fahrzeuge nicht über die Fahrzeugfolgezeiten definieren, berücksichtigen oft nur einige Unterschiede zwischen AF und MF Agenten oder können keinen realistischen, homogenen MF Agentenverkehr reproduzieren.

Das in [28] vorgestellte Modell berücksichtigt zum Beispiel eine reduzierte, sich von Null unterscheidende, Reaktionszeit der AF und dass die AF Agenten keine „Fehler“ beim Fahren, wie zum Beispiel zu trödeln, machen. Jedoch berücksichtigt das Modell nicht, dass MF sich nicht zwingend an die gesetzlichen Vorgaben halten und Sicherheitsabstände unterfahren können. Hierdurch ist es dem Modell nicht möglich, gefährlichere Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Agenten zu reproduzieren. Auch sind die Unterschiede zwischen AF und MF Agenten lediglich anhand der Wahl verschiedener Parameter gegeben. Ein grundsätzlich anderes Verhalten kann damit jedoch nicht wiedergegeben werden.

In [12] wird ein weiteres Zellularautomatenmodell vorgestellt, in dem AF mit MF Agenten gemischt werden. Dieses Modell ist, trotz Diskretisierung von Raum und Zeit, in der Lage die reduzierten Reaktionszeiten der AF Agenten zu simulieren und prognostiziert eine Steigerung der Straßenkapazität, die im Einklang mit anderen Modellen und theoretischen Untersuchungen [29] steht. Jedoch ist das Modell weder in der Lage, weitere wichtige Unterschiede zwischen AF und MF Agenten zu betrachten, noch eine realistische Straßenkapazität für homogenen MF Agentenverkehr zu reproduzieren.

Ein weiteres Zellularautomatenmodell wird in [30] vorgestellt. In diesem Modell wird zwar das statistische Trödeln der AF Agenten eliminiert, jedoch basiert es auf dem

NaSch-Modell und ist somit weder in der Lage, unterschiedliche Reaktionszeiten noch ein endliches Bremsvermögen zu reproduzieren. Ferner wird der Unterschied zwischen AF und MF Agenten auf die Bestimmung des Sicherheitsabstandes reduziert.

Wichtig ist außerdem, dass keines dieser Modelle in der Lage ist, mit einem endlichen Bremsvermögen die empirischen Fahrzeugfolgezeiten von unter einer Sekunde und die synchronisierte Phase in einer Weise zu reproduzieren, wie es dem Lee-Modell möglich ist. Dabei sind gerade die geringen Fahrzeugfolgezeiten von unter einer Sekunde wichtig für die Mensch-Maschinen-Interaktion. Eine derartige Unterschreitung ist eine wichtige potenzielle Gefahrenquelle, auf die die AF Agenten reagieren müssen.

Nachdem nun erläutert worden ist, weshalb ein neues Modell vorgestellt und die dazu nötigen Grundlagen betrachtet wurden, wird im nächsten Kapitel 4 das Lee-Modell (bzw. Pottmeier-Modell) entsprechend angepasst.

4

Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

Die bisher eingeführten Zellularautomatenmodelle verwenden alle dieselbe Zeitschrittlänge von einer Sekunde, weil dies ungefähr der mittleren Reaktionszeit eines Autofahrers entspricht [68]. Für AF wird jedoch eine reduzierte Reaktionszeit von zirka 0,5s als realistisch angenommen [20]. Für KAF kann die Reaktionszeit sogar auf zirka 0,1s reduziert werden [21]. Daher wird im Folgenden ein auf dem Lee-Modell basierendes, Zellularautomatenmodell vorgestellt, in dem die Zeitschrittlänge ebenfalls auf 0,1s reduziert wird. Dies ermöglicht es, alle Reaktionszeiten der verschiedenen Fahrzeugtypen realistisch abzubilden. Mit einer Veränderung der Zeitschrittlänge ist es auch nötig, die Größe der Zellen im Modell anzupassen.

4.1 Anpassung der Zellengröße

Die Größe einer Zelle ist für die Dynamik des Systems vor allem für die Geschwindigkeit, die in $\frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ angegeben wird, und die Beschleunigung, welche von der Dimension $\frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}^2}$ wird, relevant.

Damit die KAF Agenten ihre reduzierte Reaktionszeit effektiv nutzen können, ist es nötig, dass sie weiterhin in jedem Zeitschritt beschleunigen oder bremsen können. Daher wird auch in diesem Modell die Beschleunigung auf $A = 1 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}^2} = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und das Bremsvermögen auf $D = 2 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}^2} = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ festgelegt. Zusammen mit der zuvor festgelegten Zeitschrittlänge von 1 Zeitschritt = 0,1s folgt somit, dass 1 Zelle = 0,015m lang sein muss. Dies bedeutet, dass sich die Geschwindigkeit um einen Faktor 10 ändert und somit die Maximalgeschwindigkeit $v_{\max} = 200 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 108 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ beträgt.

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

Auch wenn die Zeitschrittlänge und Zellengröße nun so festgelegt worden sind, dass die Agenten in derselben Zeit, wie in den ursprünglichen Modellen, gleich viel Abbremsen bzw. Beschleunigen können, bedeutet dies jedoch nicht, dass auch der Bremsweg bzw. die zurückgelegte Strecke bei einer Beschleunigung gleich ausfallen. Wie Abbildung 4.1 (a) verdeutlicht, legt ein Agent in einem Modell mit einer Zeitschrittlänge von 1 s selbst bei einer gleich großen Beschleunigung in jeder Sekunde, in der beschleunigt wird, eine größere Strecke zurück, als dies in einem kontinuierlichen System oder einem System mit einer Zeitschrittlänge von 0,1 s der Fall ist. Analog ist die zurückgelegte Strecke, eines bremsenden Fahrzeugs, in einem System mit einer Schrittlänge von 0,1 s, höher als in solchen mit 1 s Zeitschrittlänge, wie in Abbildung 4.1 (b) zu sehen ist.

So legt zum Beispiel im Lee-Modell ein Fahrzeug, das aus dem Stand auf die Maximalgeschwindigkeit beschleunigt $\sum_{i=1}^{20} i = 210$ Zellen bzw. 315 m zurück, während ein Agent in diesem Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge $\sum_{i=1}^{200} i = 20100$ Zellen bzw. 301,5 m und ein Fahrzeug mit kontinuierlicher Beschleunigung 300 m zurücklegt. Ein Fahrzeug, das im Lee-Modell von v_{\max} bis zum Stillstand bremst, benötigt nach Gleichung 3.1 einen Bremsweg von 135 m, 148,5 m im 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell und 150 m in einem kontinuierlichen System. Zwar mitteln sich diese Unterschiede über die Zeit heraus, es existieren jedoch in einem diskreten Modell nur die einzelnen Punkte.

Da sich diese Unterschiede über die Gesamtlänge eines Systems und einer Simulation betrachtet ausgleichen, kann auch ein Modell mit einer Zeitschrittlänge von 1 s empirische Ergebnisse reproduzieren. Jedoch hat dies einige Einflüsse auf die Dynamik der Fahrzeuge, die im Folgenden durch entsprechende Regel- und Parameteranpassungen berücksichtigt werden müssen.

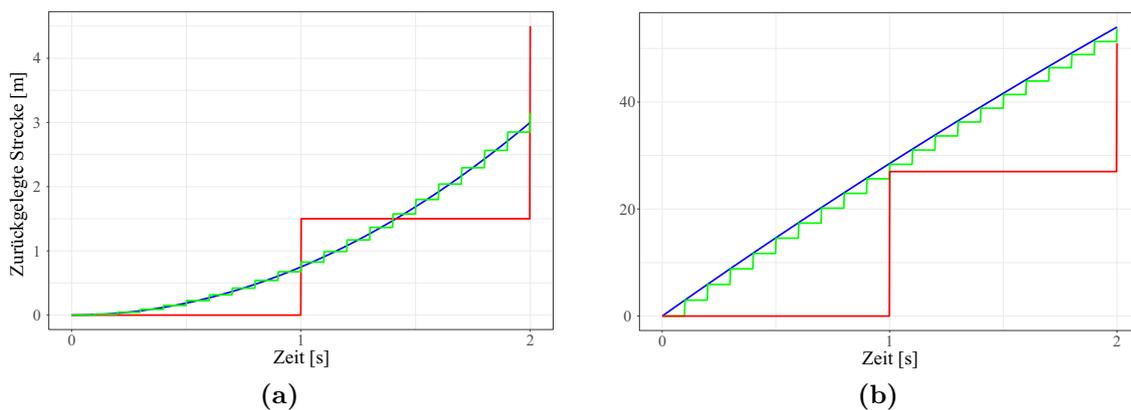


Abbildung 4.1: Zurückgelegte Strecke eines Fahrzeuges, das 2 Sekunden aus dem Stand beschleunigt (a) oder 2 Sekunden lang von v_{\max} abbremst (b). Der kontinuierliche Fall ist in blau abgebildet, der Fall in einem Modell mit einer Zeitschrittlänge von 1 s in rot und für das Modell mit 0,1 s Zeitschrittlänge in grün.

Nachdem nun die grundlegenden Größen des Modells festgelegt worden sind, gilt es, die Regeln des ursprünglichen Modells anzupassen und zu erweitern.

4.2 Regeln des Modells

Analog zum Lee-Modell muss jeder Agent auch in diesem Modell eine sichere Geschwindigkeit c_n^{t+1} analog zu Gleichung (3.7) bestimmen. Dazu muss berücksichtigt werden, dass die Reaktionszeit des menschlichen Agenten r_n nicht mehr $r_n = 1$, sondern $r_n = 10$ beträgt. Dies ändert Gleichung (3.7) zu

$$x_n^t + \Delta + r_n \cdot c_n^{t+1} + \sum_{i=1}^{\tau_f(c_n^{t+1})} (c_n^{t+1} - D \cdot i) \leq x_{n+1}^t + \sum_{i=1}^{\tau_l(v_{n+1}^t)} (v_{n+1}^t - D \cdot i). \quad (4.1)$$

Hier muss berücksichtigt werden, dass der Bremsweg der Agenten höher als im ursprünglichen Modell ausfällt. Wenn $c_n^{t+1} < v_n^t$ gilt, wird im Lee-Modell ein Fehler entsprechend $\frac{v_n^t - c_n^{t+1}}{D}$ in Kauf genommen. Da sich die Verkehrssituation in diesem Modell jedoch von einem Zeitschritt zum Nächsten nicht zu stark verändern kann, ist dieser Fehler im Lee-Modell stets klein genug, sodass keine Unfälle entstehen.

In dem entwickelten Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge wird dieser Fehler aufgrund des verlängerten Bremsweges so groß, dass es zu Unfällen kommt. Um dies zu vermeiden, muss daher der Fehler reduziert werden, indem das Verhalten des Agenten n in den nächsten 10 Zeitschritten berücksichtigt wird. Dadurch muss die Gleichung (4.1) gemäß

$$\begin{aligned} x_n^t + \Delta + \sum_{i=1}^{r_n} \min(v_n^t + a \cdot i, \max(v_n^t - D \cdot i, c_n^{t+1})) \\ + \sum_{i=1}^{\tau_f(c_n^{t+1})} (c_n^{t+1} - D \cdot i) \leq x_{n+1}^t + \sum_{i=1}^{\tau_l(v_{n+1}^t)} (v_{n+1}^t - D \cdot i) \end{aligned} \quad (4.2)$$

angepasst werden. Damit die als sicher geschätzte Geschwindigkeit c_n^{t+1} korrekt bestimmt werden kann, muss nicht nur die Gleichung selbst, sondern auch die darin verwendeten Größen $\tau_f(v)$ und Δ angepasst werden. Bei $\tau_f(v)$ muss dabei lediglich der Faktor „-1“ zu „- r_n “ abgeändert werden, um die erhöhte Reaktionszeit zu berücksichtigen.

Die Anpassung von Δ (Gleichung (3.8)) gestaltet sich dagegen etwas komplizierter. In dieser Gleichung wird der Sicherheitsabstand von der Geschwindigkeit abgezogen. Durch die zuvor vorgenommenen Änderungen wird die Geschwindigkeit um einen Faktor 10 geändert, während sich die Zellengröße um einen Faktor 100 ändert. Der Sicherheitsabstandsfaktor g_{safe} im Lee-Modell liegt bei $g_{\text{safe}} = 4$ Zellen = 6 m. Bei einer direkten Anpassung der Größe, entsprechend der Änderung der Zellgröße, würde dies nun $g_{\text{safe}} = 400$ Zellen bedeuten.

Da jedoch $v_{\text{max}} = 200 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ gilt, wäre der zweite Term in Gleichung (3.8) stets 0. Der Einfluss der Geschwindigkeit auf den zusätzlichen Sicherheitsabstand im passiven Verhalten ist jedoch wichtig und sollte bei ausreichend hohen Geschwindigkeiten

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

größer null sein. Daher wird ein zusätzlicher Parameter v_{safe} eingeführt, der diesen Größenunterschied ausgleicht.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich aufgrund des längeren Bremsweges auch der Sicherheitsabstand vergrößern sollte, was sich direkt auf die Parameter $g_{\text{safe}}, v_{\text{safe}}$ auswirkt. Beide Parameter haben einen direkten Einfluss auf die Entstehung und Erhaltung der synchronisierten Verkehrsphase und werden später so kalibriert, dass diese den empirischen Werten und den Ergebnissen des Lee-Modells entsprechen. Durch diese Anpassungen ändern sich die Gleichungen (3.8)-(3.10) ebenfalls. Sie müssen für das neue Modell mittels

$$\Delta = L + \gamma_n^t \max(0, \min(g_{\text{safe}}, v_n^t \cdot v_{\text{safe}} - g_{\text{safe}})), \quad (4.3)$$

$$\tau_f(v) = \gamma_n^t \frac{v}{D} + (1 - \gamma_n^t) \max(0, \min(\frac{v}{D}, t_{\text{safe}}) - r_n), \text{ und} \quad (4.4)$$

$$\tau_l(v) = \gamma_n^t \frac{v}{D} + (1 - \gamma_n^t) \min(\frac{v}{D}, t_{\text{safe}}) \quad (4.5)$$

berechnet werden. Zur korrekten Bestimmung dieser Gleichungen ist es nötig, dass jeder Agent zunächst entscheidet, ob die Situation optimistisch oder pessimistisch zu bewerten ist, wie es bereits durch Gleichung 3.6 im Lee-Modell bestimmt wurde. Zunächst wird dazu v_{fast} , entsprechend der Geschwindigkeitsänderungen, von 19 auf 190 geändert und D auf $r_n \cdot D$.

Ein weiterer wichtiger Punkt zur Unfallvermeidung ist die Reduzierung des Optimismus von langsam fahrenden Agenten. Sowohl im Lee-Modell als auch in Pottmeiers unfallfreier Version kommt es regelmäßig vor, dass Agenten ihre Situation in einem Stau fälschlicherweise optimistisch einschätzen. Diese Fehleinschätzung kann entstehen, wenn der Agent $n + 2$ zwei Zeitschritte in Folge trödelt, ehe dieser erneut anfährt. Hierdurch ist im Stau eine größere Lücke entstanden und der Agent kann mehrere Zeitschritte in Folge beschleunigen. Dies erlaubt auch dem folgenden Agenten $n + 1$ zu beschleunigen, ehe Agent $n + 2$ zum Stillstand kommt.

In einer solchen Situation gilt nun für den n -ten Agent $v_n^t \leq v_{n+1}^t < v_{n+2}^t$. Der Agent schätzt seine Situation optimistisch ein, auch wenn er sich gerade in einem Stau befindet. Da Agenten mit einer Geschwindigkeit von bis zu $2 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ keinen Bremsweg benötigen, um zum Stillstand zu kommen, können Unfälle vermieden werden.

In dem hier vorgestellten Modell entspricht diese Geschwindigkeit jedoch bis zu $20 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ und die Agenten benötigen in der Folge einen Bremsweg von bis zu 90 Zellen. Dies zeigt, dass gerade bei geringen Geschwindigkeiten der Unterschied im Bremsweg einen großen Einfluss haben kann. Der Agent n darf daher im Folgenden seine Situation erst optimistisch einschätzen, wenn

$$v_{n+1}^t \geq v_s = 20$$

gilt. Dies ändert Gleichung 3.16 zu

$$\gamma_n^t = \begin{cases} 0, & \text{wenn } b_{n+2}^t = 0 \text{ und } v_{n+1}^t \geq v_s \text{ und } (v_n^t \leq v_{n+1}^t < v_{n+2}^t \\ & \text{oder } (v_{n+2}^t \geq v_{\max} - 1 \text{ und } v_n^t - v_{n+1}^t \leq r_n \cdot D)). \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.6)$$

Damit diese Einschätzung korrekt wird, muss die Funktion des Bremslichtes überarbeitet werden. Nach 3.15 berücksichtigt die Berechnung des Bremslichtes nur den vorherigen Zeitschritt. Im Rahmen dieses Modells würde dies jedoch bedeuten, dass Agent $n + 1$ für 8 Zeitschritte in Folge bremsen könnte, ehe er den Bremsvorgang im darauffolgenden Zeitschritt beendet. In diesem Fall würde Agent n im darauf folgenden zehnten Zeitschritt nur das deaktivierte Bremslicht registrieren und das aktive Bremsen des Agenten $n + 1$ nicht als solches interpretieren.

Stattdessen ist es nötig, dass das Bremslicht des Agenten für die volle Sekunde aktiv bleibt, solange der Agent auch nur einen der zehn Zeitschritte aktiv bremsst, damit der nachfolgende Agent dies korrekt als aktives Bremsen anstatt als Trödeln interpretieren kann. Hierdurch ändert sich die Berechnung des Bremslichtes gemäß

$$b_n^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } (c_n^{t+1} < v_n^t \ \& \ t \bmod r_n = 0) \text{ oder } (b_n^t = 1 \ \& \ t \bmod r_n \neq 0). \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.7)$$

Nach diesen Änderungen kann nun die als sicher geschätzte Geschwindigkeit analog zu Gleichung 3.11 nach

$$\tilde{c}_n^{t+1} = \begin{cases} \max(c_n^{t+1} \mid c_n^{t+1} \text{ erfüllt (4.2) - (4.5)}), & \text{wenn } t \bmod r_n = 0 \\ \tilde{c}_n^t, & \text{wonnst} \end{cases} \quad (4.8)$$

bestimmt werden. Diese Geschwindigkeit wird nur alle r_n Zeitschritte neu bestimmt und in den folgenden Zeitschritten übernommen, um sicherzustellen, dass menschliche Agenten nur einmal pro Sekunde auf Änderungen der Verkehrssituation reagieren können. Analog zu dieser Änderung wird durch

$$\eta_n^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{Wenn } \text{rand}() < p_n^{t+1} \ \& \ t \bmod r_n = 0 \\ 0, & \text{Wenn } \text{rand}() > p_n^{t+1} \ \& \ t \bmod r_n = 0 \\ \eta_n^t, & \text{Wenn } t \bmod r_n \neq 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

berücksichtigt, dass Agenten nur alle r_n Zeitschritte auf ihr eigenes Trödeln reagieren dürfen.

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

Durch diese Anpassungen ist es möglich, unfallfreien, homogenen, menschlichen Verkehr zu simulieren. Die Ergebnisse der Simulationen entsprechen jedoch weder empirischen Werten, noch den Ergebnissen des Lee-Modells oder jenen von Pottmeier et al. Im letztgenannten Fall reduzieren die Agenten ihre Geschwindigkeit für eine Sekunde um $0,54 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Dies ist nur ein Zehntel des ursprünglichen Modells und zu niedrig, um empirische Werte reproduzieren zu können. Auch eine Vergrößerung des Trödelparameters würde nicht ausreichen, um diesen Unterschied zu kompensieren.

Stattdessen wird den Agenten erlaubt, ihre Geschwindigkeit auf bis zu $\tilde{c}_n^{t+1} - v_{\text{da}}$ zu reduzieren. Wenn v_n^t bereits kleiner ist, wird die Geschwindigkeit nicht weiter reduziert, da dies einem Trödeln des Agenten gleichkäme. Eine maximal verträdelte Geschwindigkeit von $v_{\text{da}} = 10$ erlaubt den Agenten, genauso stark zu trödeln, wie dies im ursprünglichen Modell der Fall ist. Jedoch verringert der Agent in diesem Modell seine Geschwindigkeit schrittweise, weswegen der Einfluss des Trödels immer noch etwas geringer als im Lee-Modell ausfällt.

Um dies zu kompensieren muss der Trödelparameter von $p_d = 0,11$ auf $p_d = 0,19$ erhöht werden. Damit Agenten dazu in der Lage sind um mehr als $1 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ aufgrund von Trödeln abbremsen zu können, muss das Beschleunigen in den betreffenden Zeitschritten unterbunden werden. Dies ändert den Beschleunigungsparameter zu einer Variable, die nach

$$a_n^{t+1} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } \eta_n^{t+1} = 1 \ \& \ v_n^t > \tilde{c}_n^{t+1} - v_{\text{da}} \ \& \ v_n^t \geq v_{\text{min}} \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.10)$$

berechnet wird. Wie aus dieser Gleichung hervorgeht, können Agenten maximal auf v_{min} in Folge von Trödeln abbremsen. Dadurch wird verhindert, dass Agenten zum Stillstand kommen und damit die Dynamik im gestauten Verkehr zu stark verändert wird. Eine minimale Geschwindigkeit trotz Trödels von $v_{\text{min}} = 7$ erlaubt es, Agenten auf bis zu $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ abzubremsen, und verhindert gleichzeitig, dass der mittlere Verkehrsfluss im Stau niedriger als im Lee-Modell und den empirischen Werten wird. Zudem muss der $v_{\text{max}}^S - 1$ Term in Gleichung (4.6) zu $v_{\text{max}}^S - v_{\text{da}}$ abgeändert werden.

Durch diese Änderungen ist nun jedoch der Verkehrsfluss in Staus deutlich größer als im Lee-Modell oder bei empirisch ermittelten Werten. Agenten können in diesem Modell anfahren sobald die Lücke zu dem vorausfahrenden Fahrzeug größer als 0,15 m ist. Dies entspricht nur einem Zehntel des Wertes in den historischen Modellen. In der Realität würde ein Fahrer so lange warten, bis die Lücke eine ausreichende Größe aufweist. Stattdessen würde der Fahrer weiter warten bis die Lücke größer ist. Dieses bewusste Trödeln war zuvor nicht nötig, da im Lee-Modell die Lücke mit nur einer Zelle bereits 1,5 m groß ist.

In diesem Modell wird das bewusste Trödeln durch Anpassung des slow-to-start Trödelparameters, welcher im Folgenden mittels

$$p_{0,n}^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \tilde{c}_n^{t+1} < c_{\min} \\ p_0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.11)$$

bestimmt wird, berücksichtigt. Der Parameter $c_{\min} = 10$ reguliert dabei, wie lange der Agent n bewusst trödelt. Er wurde so festgelegt, dass $p_0 = 0,37$ möglichst ähnlich zum Lee-Modell gewählt wird und gleichzeitig der Verkehrsfluss aus einem Stau heraus den empirischen Wert von zirka $J_{\text{out}} \approx 1800 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ [40] reproduziert.

Wie im folgenden Unterkapitel gezeigt wird, ist es mit den oben genannten Regeländerungen in Verbindung mit dem nachfolgenden Parametersatz möglich, mit diesem Modell realistischen Fahrzeugverkehr zu simulieren: $v_{\max} = 200$, $g_{\text{safe}} = 530$, $t_{\text{safe}} = 57$, $v_{\text{safe}} = 12$, $p_d = 0,19$, $p_0 = 0,37$, $v_{\text{fast}} = 190$, $v_{\text{slow}} = 60$, $L = 500$, $v_{\min} = 7$, $c_{\min} = 10$, $v_s = 20$.

4.3 Modellvalidierung

Ein Zellularautomatenmodell reproduziert genau dann realistischen Fahrzeugverkehr, wenn die makroskopisch gemittelten Ergebnisse der Simulationen den empirisch gemessenen Werten entsprechen. Da jene Modelle von Pottmeier et al. und Lee et al. bereits so kalibriert wurden, werden in diesem Kapitel Simulationsergebnisse der drei Modelle, sowie empirischer Werte verglichen, um zu zeigen, dass das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell vergleichbare Ergebnisse erzeugt.

4.3.1 Vergleichsgrundlagen

Damit die drei Modelle miteinander verglichen werden können, müssen alle Simulationen unter denselben Randbedingungen durchgeführt werden. Gemäß [72] wird in den folgenden Simulationen, wenn nicht anders angegeben, stets ein 15 km langer Streckenabschnitt mit periodischen Randbedingungen für zirka 14 Stunden simuliert. Dies entspricht $L_{\text{sys}} = 10^4$ Zellen sowie $T_{\text{sim}} = 5 \cdot 10^4$ Zeitschritten sowohl im Lee- als auch im Pottmeier-Modell und $L_{\text{sys}} = 10^6$ Zellen sowie $T_{\text{sim}} = 5 \cdot 10^5$ Zeitschritten im 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell. In jeder Instanz einer Simulation wird die Dichte durch eine homogene Verteilung der Fahrzeuge im System auf einen Wert zwischen 10 und $120 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ festgelegt.

Bevor die Ergebnisse dieser Simulationen miteinander und mit empirischen Werten verglichen werden können, ist es nötig zu erläutern, welche Ergebnisse betrachtet werden und warum. Ein großes Problem bei der Validierung von Verkehrssimulationen ist, dass

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

empirische Werte stark von Umweltfaktoren sowie der lokalen Struktur des Netzwerkes abhängen. Wie in [38] gezeigt werden konnte, hängt die Straßenkapazität zum Beispiel davon ab, ob und wie stark Niederschlag auftritt. Auch die Nähe zu einer Auf- oder Abfahrt kann einen Einfluss auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer haben [73, 74].

In den vergangenen Jahren konnten jedoch einige Erkenntnisse über verschiedene Zustände des Verkehrs gewonnen werden, aufgrund derer das Modell kalibriert und validiert werden kann. Nach der Drei-Phasen-Theorie (siehe Kapitel 2.3.2) kann der Verkehr in drei verschiedene Phasen, die Freifluss-, die synchronisierte, sowie die gestaute Phase unterteilt werden. Die gestaute Phase kann durch den Ausfluss aus einem Stau $J_{\text{out}} \approx 1800 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ [40] sowie der Geschwindigkeit $v_{\text{jam}} = 15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, mit welcher sich ein Stau entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet, [41, 42] kalibriert und validiert werden.

Die Freifluss-Phase zeichnet sich hauptsächlich dadurch aus, dass sich alle Agenten mit ihrer Wunschgeschwindigkeit ($v_{\text{max}} \pm 10$ aufgrund von Trödeln) fortbewegen. Eine weitere wichtige Größe für die Betrachtung der Freifluss- und der synchronisierte Phase ist die Fahrzeugfolgezeit δt_n , welche entsprechend Gleichung (2.1) bestimmt wird. Empirische, gemessene Verteilungen der Fahrzeugfolgezeiten zeigen, dass im Freifluss oft Werte kleiner der Reaktionszeit auftreten und die Varianz der Verteilungen in der synchronisierten Phase stark gegenüber jener im Freifluss reduziert ist.

Eine weitere Möglichkeit, die verschiedenen Phasen des Verkehrs sowie den Verkehr selber zu analysieren, ist die Betrachtung des Fundamentaldiagramms, wie es in Kapitel 2.3.1 eingeführt wurde. Das Lee-Modell sowie Pottmeiers unfallfreie Variante erzeugen charakteristische Verläufe, die sich gut in die drei Phasen einteilen lassen. Da das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell auf diesen beiden Modellen basiert, sollte es einen ähnlichen Verlauf erzeugen. Nach [32] sind dies die vier Eigenschaften (Stauausfluss, Staugeschwindigkeit, Fahrzeugfolgezeiten, Fundamentaldiagramm), die ein Zellularautomatenmodell korrekt reproduzieren muss, um empirischen Verkehr realistisch zu simulieren.

Außerdem sollte es auch einen vergleichbaren Verlauf für den Anteil an Fahrern geben, welche die Situation nach 4.6 optimistisch einschätzen. Die aktuelle Einschätzung einer Situation ist jedoch sehr subjektiv und kann in der Realität von Fahrer zu Fahrer stark abweichen. Die Agenten in den hier betrachteten Simulationen hingegen fahren so optimistisch wie möglich, ohne viele Unfälle zu erzeugen. Das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell und Pottmeiers Variante erzeugen keine Unfälle. Das Ziel dieser Einschätzung ist nicht die große Vielfalt an realitätsnahem Verhalten wiederzugeben, sondern realistische Fahrzeugfolgezeiten von unter einer Sekunde zu erzeugen, ohne Unfälle zu produzieren. Der Anteil an Agenten, welche die Situation optimistisch einschätzen, kann daher nur unter den drei Modellen miteinander verglichen werden, ohne empirische Werte zu

betrachten. Für die folgenden Kapitel wurden diese Größen simuliert und die Ergebnisse sowohl untereinander als auch mit empirischen Werten verglichen.

4.3.2 Mittlerer Ausfluss aus einem Stau

Die erste betrachtete Größe ist der Ausfluss aus einem Stau heraus. Um diese Größe im 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell zu untersuchen, wurden 100 Fahrzeuge mit je $v_n = 0$ und $d_n = 0$ am Anfang eines 15 km langen Systems mit offenen Randbedingungen erzeugt. Das System wurde anschließend so lange propagiert, bis das letzte Fahrzeug n in der Schlange schnell genug gefahren ist, um nicht mehr von p_0 betroffen zu sein ($v_n^t > v_{\text{slow}}$). Dies ist nötig, um sicherzustellen, dass der Agent den Stau verlassen hat und nicht lediglich einen freien Bereich innerhalb des Staus passiert.

Entsprechend

$$J_{\text{out}} = \frac{N_j}{\tau_j} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \quad (4.12)$$

lässt sich der mittlere Ausfluss aus einem Stau bestimmen, indem die Zahl der Fahrzeuge im Stau N_j durch die Zeit τ_j , in Sekunden, die es benötigt, bis das letzte Fahrzeug schneller als v_{slow} fährt, geteilt wird. Da dies den Ausfluss in $\frac{\text{Fahrzeuge}}{\text{Sekunde}}$ angibt, wird das Ergebnis mit 3600 multipliziert und stattdessen in $\frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ angegeben.

Diese Simulation wurde für einen festen Satz von Parametern 100 mal durchgeführt, um daraus einen Mittelwert mitsamt Fehler bestimmen zu können. Anschließend wurden diese Simulationen mehrere Male wiederholt, wobei jedes Mal mindestens einer der drei Systemparameter $p_0, p_d, v_{\text{slow}}$ verändert wurde. Einige Ergebnisse sind in Abbildung 4.2 abgebildet. Der Übersicht halber werden dabei p_d in 0,03er und v_{slow} in Schritten von $10 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ variiert.

Wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich ist, hängt J_{out} maßgeblich von p_0 ab. Dies war ein zu erwartendes Ergebnis, da eine Steigerung von p_0 bedeutet, dass der Agent n im Durchschnitt länger braucht, um anzufahren, nachdem der Agent $n + 1$ angefahren ist.

Auch wie groß der Einfluss von v_{slow} ist hängt von p_0 ab. Nach Gleichung (3.13) beeinflusst v_{slow} wie schnell die tatsächliche Trödelwahrscheinlichkeit des Agenten von p_0 zu p_d übergeht, für den Fall, dass dieser soeben angefahren ist. In Abbildung 4.2 (a) wurde $p_d = 0,19$ festgelegt. Daher ist der Unterschied in Gleichung 3.13 für $v_n^t < v_{\text{slow}}$ zu p_d geringer, wenn p_0 geringer ist und anders herum.

Aus demselben Grund ist der Einfluss von p_d in Abbildung 4.2 (b) auf J_{out} geringer, wenn p_0 größer wird. Bei konstantem $v_{\text{slow}} = 60$ wird die Trödelwahrscheinlichkeit für $v_n^t < v_{\text{slow}}$ stärker von einem erhöhten p_0 dominiert.

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

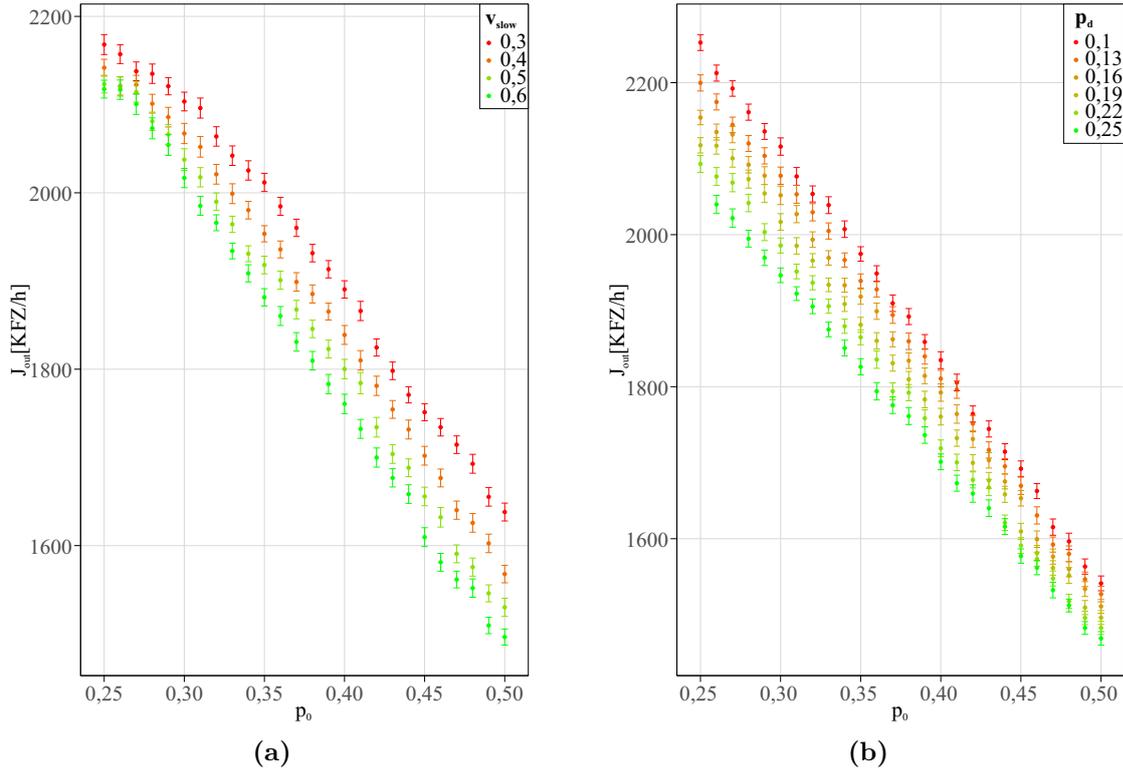


Abbildung 4.2: Mittlerer Ausfluss J_{out} aus einem Stau mit Standardfehler in Abhängigkeit des Trödelparameters p_0 sowie v_{slow} (a) und p_d (b).

Wie bereits erwähnt, sollte J_{out} in etwa $1800 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ entsprechen. Dies wird vom Lee-Modell und Pottmeiers unfallfreier Variante mit einem Wert von $J_{\text{out}} \approx 1900 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ gut reproduziert. Mit einem Wert von $J_{\text{out}} = 1830 \pm 105 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ für die Parameter $p_0 = 0,37$, $p_d = 0,19$, $v_{\text{slow}} = 60$ liegt das hier vorgestellte Modell innerhalb von $J_{\text{out}} = 1800 \pm 100 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ und reproduziert somit sowohl den empirischen Wert, als auch die Ergebnisse der Vorgängermodelle.

4.3.3 Mittlere Staugeschwindigkeit

Als Nächstes soll gezeigt werden, dass auch die mittlere Staugeschwindigkeit v_j , mit der sich ein Stau entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet, von dem 0,1-Sekunden-Zeitschritt-Modell reproduziert wird. Um diese Größe zu bestimmen, wird eine virtuelle Messschleife an einen beliebigen Punkt innerhalb des Systems gelegt, welche wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, die Daten aufnehmen und verarbeiten. Am Ende der Simulation wird dann die Autokorrelation $a_x(t)$ in Abhängigkeit der Zeitdifferenz zwischen zwei Messpunkten t entsprechend

$$a_x(t) = \frac{\langle \rho_s^t \rho_s^{t+\Delta t} \rangle - \langle \rho_s^t \rangle \langle \rho_s^{t+\Delta t} \rangle}{\langle (\rho_s^t)^2 \rangle - \langle \rho_s^t \rangle^2} \quad (4.13)$$

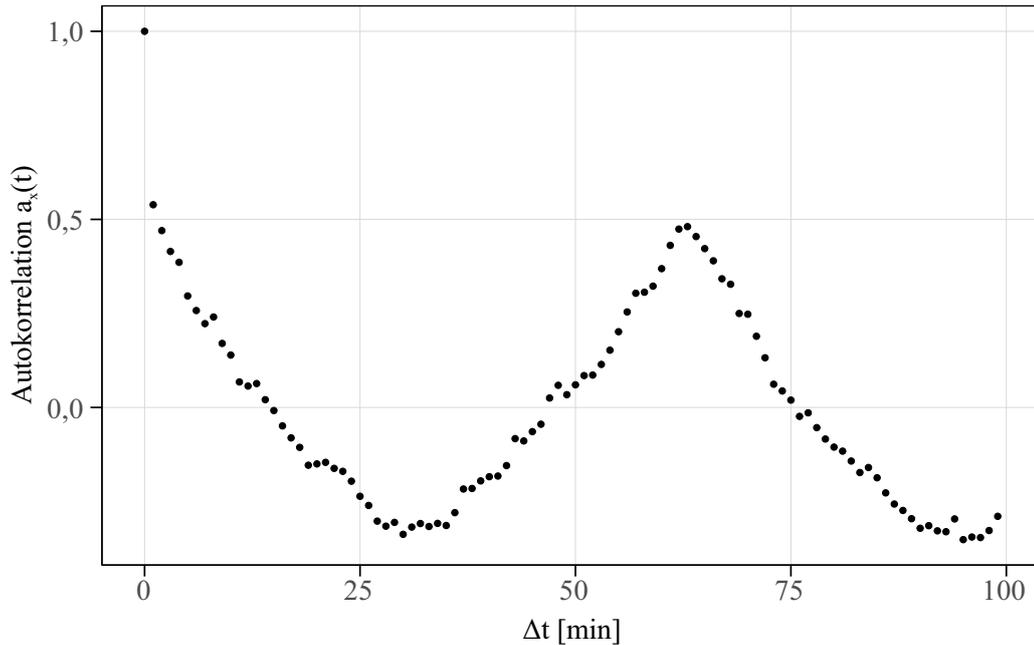


Abbildung 4.3: Autokorrelation der durchschnittlichen Dichte an einer Messschleife am Punkt x mit Daten derselben Stelle Δt Minuten später.

bestimmt. Sie gibt an, wie ähnlich die lokale Dichte an einer Stelle x mit jener an derselben Stelle $\Delta t = 1, 2, \dots, 100$ Minuten später ist. Eine hohe Korrelation tritt in diesem Zusammenhang auf, wenn ein gestauter Zustand sowohl für den Zeitpunkt t , als auch für den Zeitpunkt $t + \Delta t$ wahrscheinlich ist. In Abbildung 4.3 ist beispielhaft die Autokorrelation für ein System mit den Parametern $p_0 = 0,37$, $p_d = 0,19$, $v_{\text{slow}} = 60$ aufgeführt.

Die Autokorrelation beginnt mit dem Maximalwertwert von 1, da jeder Satz von Daten die höchste Korrelation mit sich selber zeigt. Von dort ab zeigt sie ein oszillierendes Verhalten, da der Stau aufgrund der periodischen Randbedingungen in der Oszillationszeit einmal durch das System wandert, ehe er erneut bei Punkt x ankommt. Der Verlauf der Autokorrelation stimmt gut mit empirisch gefundenen Werten [75] und historischen Untersuchungen [76, 77] überein. Zusammen mit der Länge des Systems $L = 15$ km lässt sich aus der Oszillationsperiode Δt_{period} die Geschwindigkeit des Staus v_j gemäß der Vorschrift

$$v_j = \frac{L \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}}}{\Delta t_{\text{period}}} \quad (4.14)$$

berechnen. Die Länge wird dabei mit 60 multipliziert, um die Einheit der Geschwindigkeit von $\frac{\text{km}}{\text{Minute}}$ in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ zu ändern.

Auf diese Weise wird die Geschwindigkeit des Staus in Abhängigkeit von p_0 , p_d und v_{slow} durch Simulationen bestimmt und die Ergebnisse in Abbildung 4.4 aufgetragen. Für jeden Satz an Parametern wird die Simulation zehnmal wiederholt, um die Standardabweichung der Ergebnisse auftragen zu können.

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

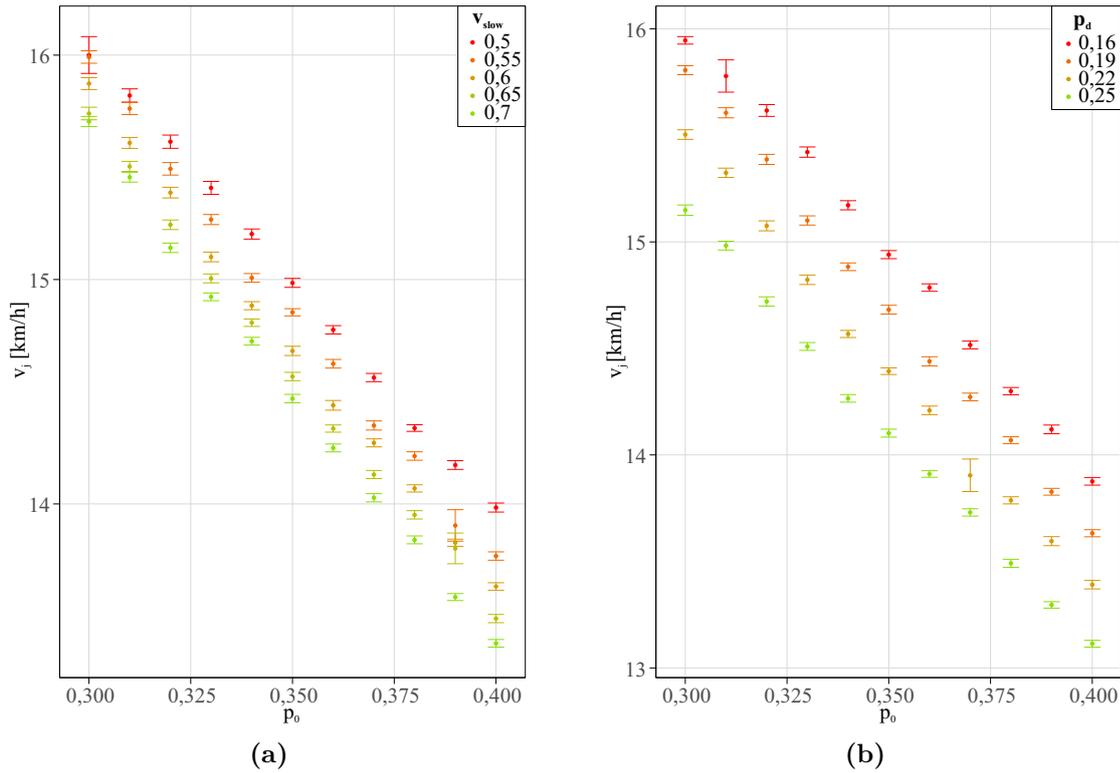


Abbildung 4.4: Mittlere Geschwindigkeit des Staus v_j , mit dem sich ein Stau entgegen der Fahrtrichtung in Abhängigkeit des Trödelparameters p_0 sowie v_{slow} (a) und p_d (b) ausbreitet.

Der Verlauf von Abbildung 4.4 (a) lässt sich analog zu Abbildung 4.2 beschreiben und erläutern. Auch hier nimmt der Einfluss von v_{slow} bei steigendem p_0 zu. Ein steigendes p_0 bewirkt, dass Agenten im Mittel länger brauchen, um anzufahren, nachdem der vorausfahrende Agent angefahren ist. Dies erzeugt einen größeren zeitlichen Abstand zwischen zwei Agenten. Ein größerer zeitlicher Abstand bedeutet, dass es länger dauert, bis Agent n nach $n + 1$ in den Stau eingefahren ist. Dies bedeutet wiederum, dass es länger dauert bis der Stau um die Länge des Fahrzeuges n entgegen der Fahrtrichtung wandert. Somit bewirkt ein größerer zeitlicher Abstand direkt eine Verringerung von v_j , wie sie im Graphen zu erkennen ist.

Der Einfluss von p_d hingegen hängt nicht von p_0 ab. Wie schon bei p_0 sinkt v_j bei steigendem p_d , da durch eine erhöhte Trödelwahrscheinlichkeit der mittlere zeitliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen zunimmt.

Der empirisch gemessene Wert für v_j liegt bei etwa $15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, was vom Lee- und Pottmeier-Modell mit einem Wert von zirka $14,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ gut reproduziert wird. Das hier vorgestellte Modell erzeugt mit den Parametern $p_0 = 0,37$, $p_d = 0,19$, und $v_{slow} = 60$ den gleichen Wert von $14,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und kann somit den gestauten Zustand des Verkehrsflusses realistisch reproduzieren.

4.3.4 Fahrzeugfolgezeiten

Die Fahrzeugfolgezeit τ , eingeführt in Kapitel 2.1.1, beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Fahrzeugen. Empirische Beobachtungen [78] haben gezeigt, dass die Verteilung dieser Größe stark vom Zustand des Systems abhängt und außerdem zwischen der synchronisierten- und der Freifluss-Phase unterschieden werden muss.

Die empirische Verteilung des Freiflusses weist drei markante Eigenschaften auf. Erstens sollte der minimale Abstand zwischen zwei Fahrzeugen 0,5s nicht unterschritten werden [79, 29]. Zweitens sollte das Maximum der Verteilung nahe 1s lokalisiert sein und drittens von dort innerhalb weniger Sekunden stark abfallen [78, 80]. Die Ergebnisse des Lee-Modells, Pottmeiers unfallfreier Variante, sowie des 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell mit zwei verschiedenen Werten für t_{safe} sind in Abbildung 4.5 für drei verschiedene Dichten im Freifluss-Bereich aufgetragen.

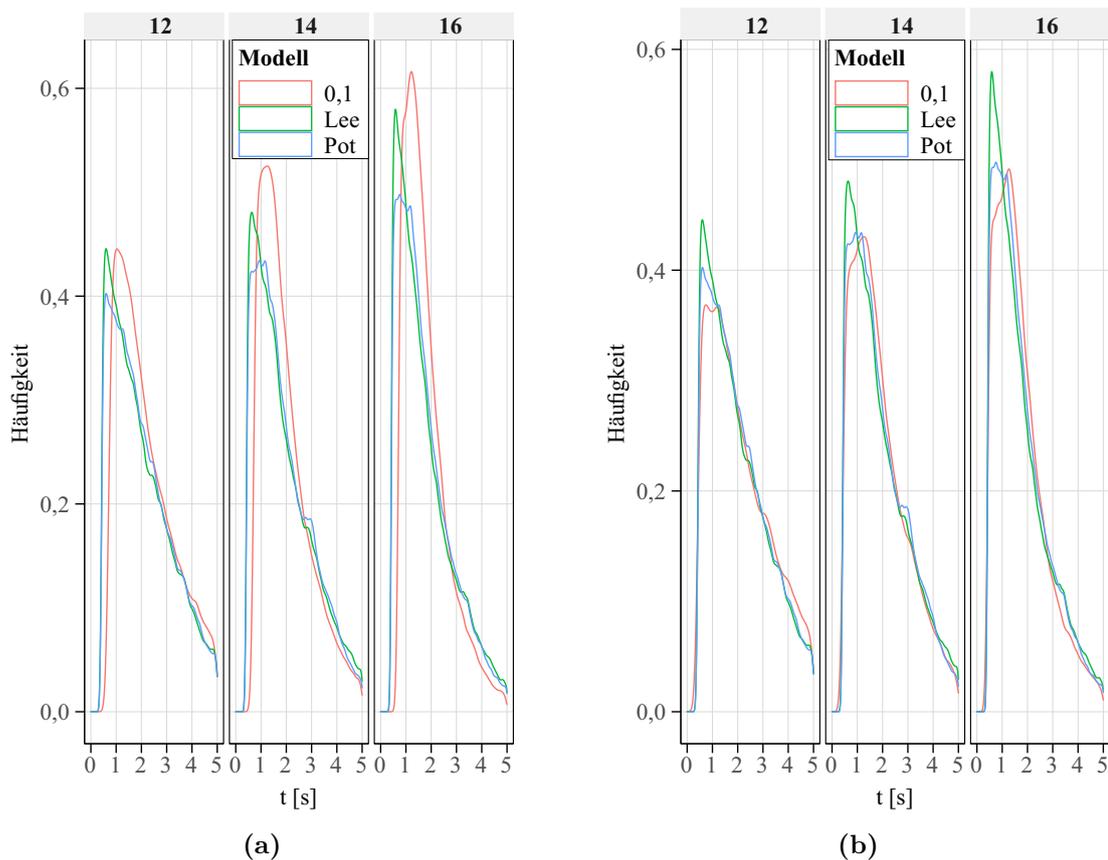


Abbildung 4.5: Verteilung der Fahrzeugfolgezeit in Sekunden im Freifluss für das Lee-, das Pottmeier-Modell, und dem hier vorgestellten 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell für die drei Dichten $\rho = 12, 14, 16 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$. Abbildung (a) zeigt die Verteilung des 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modells für den Fall $t_{\text{safe}} = 57$ Zeitschritte und (b) für $t_{\text{safe}} = 37$ Zeitschritte.

Alle drei Modelle reproduzieren einen schnellen Abfall der Fahrzeugfolgezeiten unabhängig der Wahl von t_{safe} . Die Wahl von t_{safe} wirkt sich jedoch stark auf die minimale Fahrzeugfolgezeit, sowie die Lage des Maximums der Verteilung aus. Ein zeitlicher

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

Sicherheitsabstand von $t_{\text{safe}} = 37$ Zeitschritte, wie in Abbildung 4.5 (b) zu sehen, reproduziert mit den Vorgängermodellen vergleichbare Werte. Alle drei Modelle haben ihr Maximum bei einer Fahrzeugfolgezeit von zirka 0,75 Sekunden, was gut mit den empirischen Werten aus [78] übereinstimmt, jedoch etwas zu hoch für jene aus [80] ausfällt. Die Maxima des Lee-Modells fallen im direkten Vergleich etwas höher aus, da das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell, wie auch das Modell von Pottmeier et al., mit einem verringerten Optimismus der Agenten arbeiten, sodass dicht auffahrende Fahrzeuge seltener vorkommen.

Jedoch reproduzieren die drei Modelle minimale Fahrzeugfolgezeiten von bis zu unter $\tau = 0,28$ s. Empirisch wird hingegen oft $\tau = 0,5$ s als die minimal akzeptable Fahrzeugfolgezeit gefunden [79, 29]. Eine solche Fahrzeugfolgezeit wird durch die Wahl von $t_{\text{safe}} = 57$ zwar besser reproduziert, indes verschiebt sich dadurch auch die Verteilung leicht. So beginnen die Verteilungen durch die Wahl eines größeren t_{safe} erst später ($\tau = 0,52$ s anstatt $\tau = 0,28$ s). Sie steigen jedoch auch schneller an, sodass sich die Kurve weniger verschiebt und die Maxima der Verteilungen sogar sinken. Das Maximum der Verteilung des 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modells verschiebt sich durch die Steigerung von t_{safe} bei einer Dichte von $\rho = 16 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ zum Beispiel von $\tau = 1,27$ auf $\tau = 1,21$ s. Analog verschiebt sich das Maximum für eine Dichte von $\rho = 14 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ von $\tau = 1,27$ zu $\tau = 1,23$ s. Lediglich für eine Dichte von $12 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ steigt das Maximum bei einer Steigerung von t_{safe} von $\tau = 0,83$ auf $\tau = 1,08$ s. Da diese Unterschiede also geringer als die Varianzen zwischen zwei verschiedenen Messungen [78, 80] sind, immer noch Werte unter einer Sekunde reproduziert werden und die minimale Fahrzeugfolgezeit von $\tau = 0,5$ s im Folgenden für AF und somit auch heterogenen Verkehr wichtig ist, wird trotz der Verschiebung der Verteilung ein Wert von $t_{\text{safe}} = 57$ für die nachfolgenden Simulationen verwendet.

Die Wahl von t_{safe} reguliert lediglich die Größe des verbleibenden Abstandes bei optimistischer Fahrweise und hat nur einen geringen Einfluss auf den synchronisierten Zustand, welcher von der passiven Fahrweise dominiert wird (siehe Unterkapitel 4.3.5). Dies ist auch in Abbildung 4.6 zu sehen, in welcher die Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten für den synchronisierten Zustand der drei Modelle für drei verschiedene Dichten aufgetragen ist. In Abbildung 4.6 (a) ist erneut das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell für $t_{\text{safe}} = 57$ und (b) $t_{\text{safe}} = 37$ gewählt worden. In beiden Fällen ist die Varianz der Verteilung deutlich geringer, als im Falle des Freiflusses und lässt sich gut mit der Verteilung des Pottmeier-Modells vergleichen. Dessen Verteilung ist zu leicht höheren Werten verschoben, da die Agenten in diesem Modell im Durchschnitt öfter die Situation pessimistisch einschätzen und somit mehr Abstand zu dem vorausfahrenden Fahrzeug halten (siehe Kapitel 4.3.5). Dies sorgt wiederum für einen geringen Anteil an Überreaktionen, wenn ein Agent von einer optimistischen zu einer pessimistischen Einschätzung übergeht, weshalb die Verteilung in der Folge eine geringere Varianz und ein höheres Maximum aufweist. Das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell ähnelt diesem

stark, da die Bestimmung der Einschätzung auf dessen Regeln basiert. Die Varianz ist leicht erhöht und der Mittelwert zu kleineren Werten verschoben, da sich die Dynamik aufgrund der unterschiedlichen Größenänderungen (ein Zehntel für die Geschwindigkeit gegen ein Hundertstel für den Raum) leicht verändert hat. Allgemein beschreiben alle drei Modelle den empirischen Verlauf der Fahrzeugfolgezeiten [78], jedoch in guter Übereinstimmung.

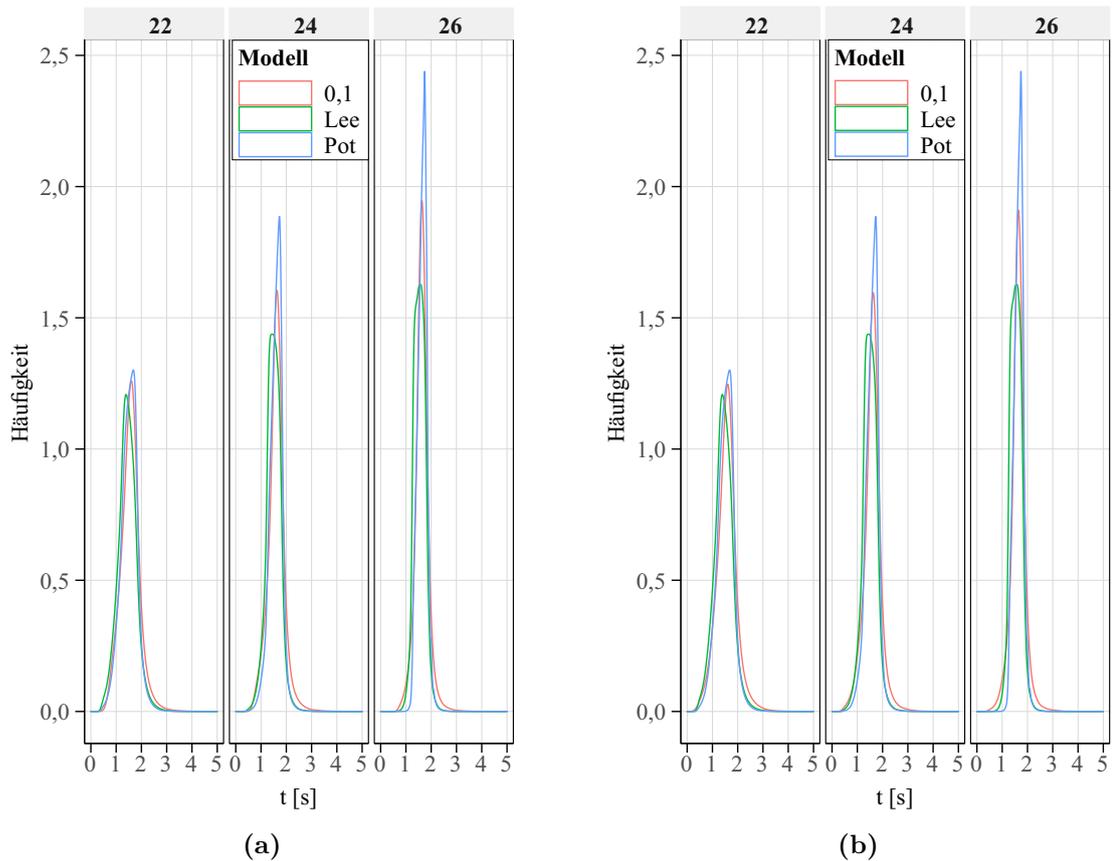


Abbildung 4.6: Verteilung der Fahrzeugfolgezeit in Sekunden in der synchronisierten Phase für das Lee-, das Pottmeier-Modell und dem hier vorgestellten 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell für die drei Dichten $\rho = 22, 24, 26 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$. Abbildung (a) zeigt die Verteilung des 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modells für den Fall $t_{\text{safe}} = 57$ Zeitschritte und (b) für $t_{\text{safe}} = 37$ Zeitschritte.

4.3.5 Optimismusparameter der Agenten

Die Einschätzung der Situation eines Fahrers kann sich zwischen zwei Individuen stark unterscheiden und auch nicht durch GPS-Daten oder Zählschleifen erfasst werden. Die Variablen in den drei Modellen können daher nur untereinander verglichen werden und sind in Abbildung 4.7 in Abhängigkeit der Dichte aus einer Simulation aufgetragen. Der Verlauf für alle drei Modelle lässt sich eindeutig in drei Bereiche einteilen, die den drei Phasen des Drei-Phasen-Modells entsprechen.

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

Im ersten Bereich, bis zu einer Dichte von $\rho = 20 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ befindet sich das System im Freifluss und nahezu alle Fahrzeuge schätzen ihre Situation optimistisch ein. Der Abfall des Anteils an optimistischen Fahrern ist für das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell im Vergleich zu den zwei anderen Modellen leicht erhöht, da die Fahrzeuge aufgrund des erhöhten Bremsweges stärker auf das Verhalten des vorausfahrenden Fahrzeuges reagieren müssen. Der Unterschied ist jedoch gering im Vergleich zu jenem zwischen den verschiedenen Phasen.

Im Anschluss folgt die synchronisierte Phase, in der Fahrzeuge einander mit geringem Abstand folgen. Dies erhöht die Wechselwirkung, weshalb der Anteil an optimistischen Fahrzeugen stark abnimmt. Aufgrund der Synchronisierung reduzieren sich die Abstände und Geschwindigkeiten bei steigender Dichte nur leicht, weswegen der Anteil optimistischer Fahrzeuge nahezu stabil bleibt. Die drei Modelle unterscheiden sich jedoch stark im Betrag, auf der sich die Anteile stabilisieren. Pottmeiers unfallfreie Variante vom Lee-Modell reduziert den Optimismus der Agenten zur Vermeidung von Unfällen, weswegen der Anteil an optimistischen Fahrzeugen sich hier stark unterhalb des Lee-Modells stabilisiert. Auch das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell verwendet eine Einschätzung der Situation, die Unfälle vermeidet und weist dabei Ähnlichkeiten zu Pottmeiers Variante auf. Der Anteil an optimistischen Agenten stabilisiert sich jedoch auf einem leicht höheren Niveau, da die Agenten durch die Änderung in Gleichung 4.2 frühzeitiger und somit weniger stark reagieren müssen.

Abschließend folgt die letzte Phase, in der das System in Bereiche des Freiflusses und jene des gestauten Zustands unterteilt werden können. Auch hier unterscheiden sich die drei Modelle wieder stark voneinander. In allen drei Fällen steigt der Anteil an optimistischen Agenten zunächst an. Der größte Unterschied in den Verläufen ist, dass die Werte des Lee- und Pottmeier-Modells für größere Dichten leicht ansteigen, während im 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell die Werte konstant abfallen. Die Werte in allen drei Modellen sind größer null, da sich das System in Bereiche des Freiflusses und des gestauten Zustands aufteilt. Die lokale Dichte ist im Stau sehr hoch und im frei fließenden Bereich sehr niedrig, was den Agenten erlaubt die Situation optimistisch einzuschätzen. Die Bereiche des Freiflusses werden mit steigender Dichte jedoch zunehmend weniger und kleiner, sodass der Anteil an optimistisch fahrenden Agenten abnimmt. Dies wird gut vom 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell wiedergegeben. Ein Stau lässt sich mikroskopisch oft in mehrere kleine Staus mit einigen wenigen freien Zellen zwischen diesen aufteilen, da einzelne Agenten beim Aufschließen trödeln. Wenn ein Agent diese Lücke nun nach kurzem Trödeln aufschließt und die nachfolgenden Agenten nicht trödeln, können diese die Situation im Lee- und im Pottmeier-Modell optimistisch einschätzen, selbst wenn sie nur 3 oder 4 Zellen auf das vorausfahrende Fahrzeug aufschließen. Dies wird im 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell verhindert, da hier für Agenten $v_n^t \geq 20$ gelten muss, ehe sie die Situation optimistisch einschätzen können. Der Anteil an optimistischen

Fahrzeugen im 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell gibt also gut das Verhältnis aus Freifluss zu gestautem Zustand an, während es sich im Lee- und Pottmeier-Modell hauptsächlich um Rauschen handelt.

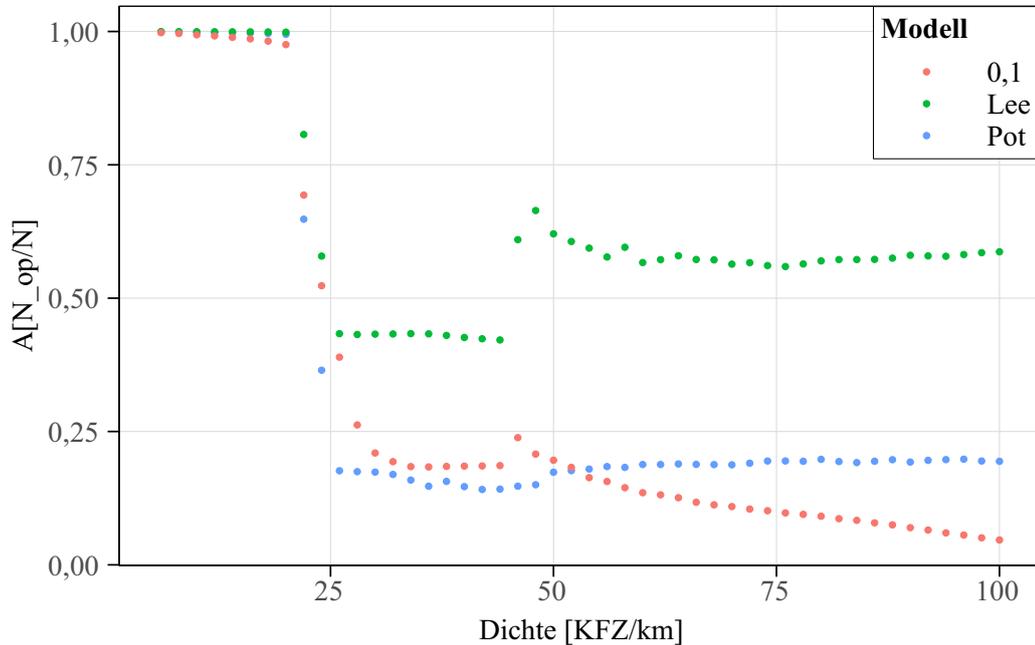


Abbildung 4.7: Über eine Simulation (zirka 14h) gemittelter Anteil der Fahrer, die ihre Situation optimistisch einschätzen in Abhängigkeit der Dichte für das Lee-Modell (grün), Pottmeiers unfallfreie Version (blau), und das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell (rot)

4.3.6 Verkehrsfluss

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert, erzeugt ein Auftragen des global gemessenen Flusses gegen die zu Beginn der Simulation festgelegten Dichte ein Fundamentaldiagramm, welches in Abbildung 4.8 (a) für alle drei Modelle dargestellt ist. In Abbildung (b)-(d) sind die Fundamentaldiagramme der drei Modelle, aufgenommen an einer Stelle der Simulationsstrecke mit Hilfe einer virtuellen Zählschleife dargestellt. Wie bei echten Zählschleifen wurde immer über eine Minute gemittelt. Alle drei Modelle zeigen einen vergleichbaren Verlauf, der gut mit empirischen Werten übereinstimmt und eine Identifizierung der drei Verkehrsphasen ermöglicht.

Im Bereich von $\rho = 0 - 20 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ befindet sich der Verkehr im Freifluss. Die Abstände zwischen den Fahrzeugen sind groß genug, um Wechselwirkungen zum großen Teil zu vermeiden. Alle Fahrzeuge fahren mit ihrer Wunschgeschwindigkeit (v_{\max}), sofern sie nicht trödeln. Der maximale Fluss liegt bei allen drei Modellen mit einem Wert von $J_{\max} = 2140 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ gleich hoch und tritt bei der gleichen Dichte von $20 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ auf.

4. Modell mit reduzierter Zeitschrittlänge

Ab einer Dichte von $\rho = 21 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ bis zirka $\rho = 44 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ zeigen alle drei Modelle synchronisierten Verkehr. Hier sind die Unterschiede zwischen den drei Modellen am größten, da sich sowohl das Verhältnis von optimistischen zu pessimistischen Agenten als auch die Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten ändert. Aufgrund des höheren Anteils an optimistischen Verkehrsteilnehmern im Lee-Modell weist dieses die geringste mittlere Fahrzeugfolgezeit und somit den höchsten Fluss in der synchronisierten Phase auf. Pottmeiers unfallfreie Variante hingegen hat den geringsten Anteil an optimistisch fahrenden Fahrzeugen in der synchronisierten Phase und weist daher die höchste mittlere Fahrzeugfolgezeit auf. Lediglich das Verhalten des 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell weicht dadurch, dass der Fluss kurzzeitig über jenem des Lee-Modells steigt, obwohl dieses leichter Optimismus ermöglicht, von den Erwartungen ab. Von $\rho = 38 - 44 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ steigt der Fluss über jenen des Lee-Modells an. Der Fluss des 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modells und des Pottmeier-Modells stagniert in diesem Bereich, was bedeutet, dass sich das Verhältnis aus Geschwindigkeit und Dichte hier linear antiproportional verhält. Da die Agenten in diesen Modellen die Situation öfter passiv einschätzen, überreagieren sie seltener, was letztlich zu einer Stabilisierung des Verkehrsflusses führt. Im Lee-Modell hingegen schätzen Agenten die Situation zunehmend, fälschlicherweise als optimistisch ein und müssen in der Folge übermäßig stark abbremesen. Dies verringert den Fluss des Modells so stark, dass es unterhalb jenen des 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modells abfällt.

Bei einer weiteren Steigerung der Dichte brechen die Flüsse in allen drei Modellen ein und das System geht in die gestaute Phase über, welche weiter in gestaute und frei fließende Bereiche unterteilt werden kann. Der Fluss des Systems ist hier maßgeblich vom Verhältnis der beiden Bereiche zueinander, der Ausfahrrate aus einem Stau und dem Verhalten im Stau abhängig. Da die Dichte in allen Simulationen vorgegeben und konstant ist und die Ausfahrrate aus einem Stau zu Beginn der Simulationen so kalibriert wurde, dass alle drei Modelle in etwa denselben Wert reproduzieren, ist auch das Verhältnis der beiden Zustände zueinander gleich groß. Wie zuvor erwähnt, mussten daher lediglich v_{\min} und c_{\min} so gewählt werden, dass der Fluss im Stau nicht höher ist als von empirischen Werten vorgegeben. Man sieht, dass dies durch die Wahl von $v_{\min} = 7$ und $c_{\min} = 10$ gegeben ist, sodass alle drei Modelle einen sehr ähnlichen Fluss reproduzieren.

Die drei lokal aufgenommenen Fundamentaldiagramme in Abbildung 4.8 (b)-(d) weichen ebenfalls nur leicht voneinander ab. Das Maximum des hier vorgestellten Modells ist etwas geringer als jenes des Pottmeier-Modells, welches wiederum geringer als das Maximum des Lee-Modells ist. Die Unterschiede sind jedoch gering und verteilen sich gut um das Maximum der empirischen Werte in Abbildung 2.1. Alle drei Modelle halten die synchronisierte Phase länger aufrecht als in den empirischen Daten. Ein Vergleich mit anderen empirischen Messungen [33, 31, 67] zeigt jedoch, dass die Dichte an dieser Stelle der A3 in dem gemessenen Zeitraum zu selten den kritischen Wert überschreitet.

Die Schwankungen der Werte in diesem Bereich lassen sich jedoch ebenfalls gut von den drei Modellen reproduzieren, lediglich das Modell von Pottmeier et al. weist leicht verringerte Schwankungen auf, da die Agenten hier die Situation oft passiv einschätzen und den Verkehr stärker synchronisieren.

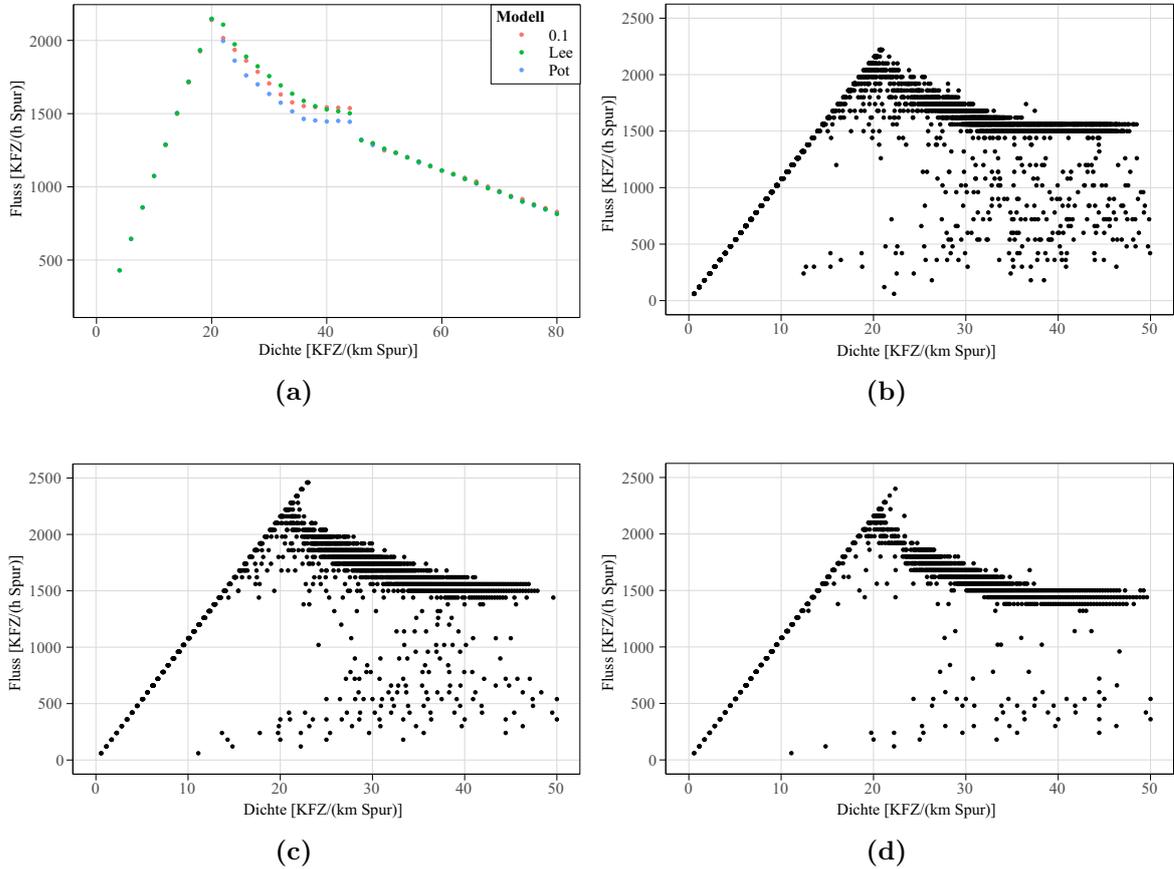


Abbildung 4.8: Verkehrsfluss über Dichte für das Lee-Modell (grün), Pottmeiers unfallfreie Variante (blau) und das 0,1 Sekunden-Zeitschritt-Modell (rot) in (a). Lokale Fundamentaldiagramme gemessen in denselben Simulationen an nur einer Stelle mit Hilfe einer virtuellen Zählschleife für das hier vorgestellte 0,1s-Modell (b), das Lee-Modell (c), und das Modell von Pottmeier et al. (d).

5

Automatisierte Fahrzeuge

Nachdem die Zeitschrittlänge des Lee-Modells (bzw. die unfallfreie Variante davon in Form des Pottmeier-Modells) im vorherigen Kapitel 4 auf 0,1 s reduziert und validiert wurde, werden in diesem Kapitel autonome Agenten eingeführt. Die Einführung dieser Agenten wird dabei in mehreren Schritten durchgeführt. Zunächst wird in Unterkapitel 5.1 betrachtet, welche Unterschiede es zwischen AF (autonomen Fahrzeugen) und MF (menschlich gesteuerten Fahrzeugen) gibt, ehe diese in das Modell implementiert werden. Daran anschließend wird homogener AF Verkehr mit homogenem MF Verkehr verglichen und daraufhin heterogener Verkehr, in welchem beide Fahrzeugtypen gemischt vorkommen, analysiert. Im abschließenden Unterkapitel 5.3.3 wird ein passiveres Verhalten der AF auf MF vorgestellt und analysiert.

5.1 Einführung automatisierter Fahrzeug Agenten

Bevor AF als Agenten in das Modell implementiert werden können, ist es nötig, die Datengrundlage dieses Modells zu diskutieren und festzulegen, wie sie sich von MF Agenten unterscheiden sollen.

5.1.1 Datengrundlage für automatisierte Fahrzeuge

Ein großes Problem bei der Analyse von AF ist, dass es noch keine ausreichende Menge von AF auf den Straßen gibt und empirische Daten daher kaum zu erhalten sind [22]. Da jedoch davon ausgegangen wird, dass AF auch bei einer Durchdringungsrate kleiner als eins bereits einen großen Einfluss auf den Verkehr haben werden, werden zurzeit viele

Modelle entwickelt und deren Ergebnisse miteinander verglichen [10–13, 23–30], um zu analysieren, wie diese Fahrzeuge in den Straßenverkehr integriert werden können. Diese Modelle basieren auf Annahmen zu technischen Daten der automatisierten Fahrzeuge, von denen in dieser Arbeit drei wichtige berücksichtigt werden.

5.1.1.1 Sicherheitsabstand

Eine dieser Annahmen, die im nächsten Unterkapitel für dieses Modell ebenfalls implementiert wird, ist, dass AF sich stets an die Verkehrsregeln halten sollten [15, 16]. Ob dieses Verhalten korrekt ist, oder ob AF einige Regeln unter gewissen Umständen brechen dürfen sollten, um menschliche Fahrer nicht zu stark zu irritieren, wird zurzeit diskutiert [53–55] und ist vor allem für innerstädtischen Verkehr oder in der Nähe von Engstellen relevant. In dieser Arbeit wird allerdings nur Autobahnverkehr ohne Engstellen betrachtet. In dem hier entwickelten Modell, das Autobahnverkehr ohne Engstellen beschreibt, halten sich Agenten, die MF repräsentieren, nur an zwei Stellen nicht an das Gesetz: Zum einen beim Spurwechsel und zum anderen beim Sicherheitsabstand. Der Spurwechsel wird später in Kapitel 7 analysiert, weswegen hier zunächst nur der Sicherheitsabstand betrachtet wird. Laut der deutschen Straßenverkehrsordnung [81] muss der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug so groß sein, dass auch bei einer Notbremsung unfallfrei hinter diesem gehalten werden kann. Des Weiteren können gängige Messmethoden für automatisierte Fahrzeuge, wie etwa Lidar [82], nicht den Status des Bremslichtes oder die Geschwindigkeit des Agenten $n + 2$ registrieren. Stattdessen können AF nur die relevanten Daten des direkten vorausfahrenden Fahrzeugs bestimmen, was eine optimistische Einschätzung der Situation problematisch und gefährlich machen würde.

AF sollen nicht nur den Verkehr sicherer machen, sondern auch die Straßenkapazität durch effizienteres Fahren erhöhen [83]. Sie sollten also auf der einen Seite stets den Sicherheitsabstand einhalten, auf der anderen Seite aber mit einem so geringen Abstand wie möglich fahren. Dies hat zur Folge, dass AF nach Möglichkeit dem vorausfahrenden Fahrzeug in jeder Verkehrssituation mit genau dem nötigen Sicherheitsabstand folgen.

5.1.1.2 Trödelwahrscheinlichkeit

Der nächste Unterschied zwischen AF und MF liegt im Trödelerhalten. Die Einführung eines Trödelparameters war einer der wichtigsten Schritte, um mit dem NaSch-Modell empirisch gewonnene Verkehrsdaten zu reproduzieren. Auch die Aufteilung des Trödelparameters, um den Slow-to-Start Effekt (siehe Kapitel 2.3.1) zu reproduzieren, war ein wichtiger Schritt, um Zellularautomatenmodelle näher an empirische Ergebnisse zu bringen. Das Trödeln ist also eine grundlegende Eigenschaft menschlicher Autofahrer, die jedoch keinen positiven, sondern einen negativen Einfluss auf den Fluss hat. Es ist

daher zu erwarten, dass diese Eigenschaft nicht von AF übernommen wird und diese nicht trödeln [13]. Dies soll so auch vom Modell wiedergegeben werden.

5.1.1.3 Reaktions- und Fahrzeugfolgezeit

Während die beiden vorangegangenen Änderungen in allen Modellen angenommen werden, gilt dies nicht für die Änderung der Reaktionszeit. Da der Mindestsicherheitsabstand, in Form der Fahrzeugfolgezeit, direkt von der Reaktionszeit der Agenten abhängt, implementieren viele Modelle [11, 79, 84] die Reaktionszeit indirekt, indem sie die mittlere Fahrzeugfolgezeit auf einen entsprechenden Wert festlegen oder kalibrieren. Wie später gezeigt wird, entspricht die minimale Fahrzeugfolgezeit der AF Agenten in dem in dieser Arbeit betrachteten Modell gut der Reaktionszeit. Die in Kapitel 3.2.5 erwähnten historischen Modelle, betrachten AF Agenten mit teilweise großen Unterschieden in der Reaktionszeit. In [25] wird zum Beispiel ein instantanes Reaktionsvermögen angenommen, während minimale Fahrzeugfolgezeiten von bis zu 1,6 s in [79] angenommen werden.

Modelle mit solch hohen Fahrzeugfolgezeiten simulieren in der Regel Fahrzeuge mit ACC (siehe Kapitel 3.2.5) Systemen. Diese Systeme kontrollieren die laterale Bewegung der Fahrzeuge, indem sie die Geschwindigkeit des Fahrzeuges an die Situation anpassen und mithilfe von Spurhalte-Assistenten dafür sorgen, dass das Fahrzeug innerhalb der Spur bleibt. In einem einspurigen Modell sind diese ACC unterstützenden Fahrzeuge dem Verhalten automatisierter Fahrzeuge also sehr ähnlich. Da es für diese bereits empirische Daten gibt [79], werden sie gerne als Grundlage für automatisierte Agenten verwendet. Ein Nachteil der ACC Systeme ist jedoch, dass sie das Fahrzeug nur innerhalb bestimmter Parameter lenken können. So müssen sie zum Beispiel die Kontrolle des Fahrzeuges zurück an den Fahrer geben, wenn die Geschwindigkeit einen gewissen Wert unterschreitet oder wenn unerwartete Situationen eintreten [26]. Versuche haben dabei gezeigt, dass Fahrer, welche sich für einige Zeit nicht auf den Verkehr konzentriert haben, da die Systeme die Steuerung des Fahrzeuges übernommen haben, eine längere Zeit benötigen, um die Situation zu analysieren und erst dann darauf reagieren können [27]. Die im Folgenden betrachteten AF Agenten sollen jedoch vollständig automatisierte Agenten beschreiben, welche die Kontrolle nicht an den Fahrer zurückgeben müssen und das Fahrzeug in allen Verkehrslagen, in denen es auch ein Mensch kann, steuern. Die gewählte Reaktionszeit der AF Agenten sollte in diesem Modell also niedriger liegen als in historischen Modellen.

Andere Modelle, die auch AF Agenten und nicht ACC gesteuerte Fahrzeuge simulieren, verwenden in der Regel eine Reaktionszeit zwischen 0 s [25] und 1 s [11–13, 30]. Die obere Grenze entsteht dabei durch Zellularautomatenmodelle, welche AF Agenten simulieren, jedoch keine reduzierte Zeitschrittlänge haben. Auch diese Werte sind daher zu hoch. Auf der anderen Seite verwenden Modelle wie [25] ein instantanes Reaktionsvermögen,

da sie davon ausgehen, dass ein Computer eine neue Geschwindigkeit in einer solch kurzen Zeit berechnen kann, dass diese im Verhältnis zur menschlichen Reaktionszeit vernachlässigbar ist.

Während ein Computer nur wenige Millisekunden braucht, um eine gegebene Geschwindigkeit mit gegebenen Messwerten auszurechnen, kann die Aufnahme der Messwerte allerdings einen längeren Zeitraum benötigen. Zurzeit gibt es drei verschiedene Messmethoden, die alle in AF Anwendung finden. Diese sind Radar-, Lidar-, und Kameraaufnahmen. Die Aufnahme und korrekte Verarbeitung dieser Daten kann dabei sehr aufwendig und fehleranfällig sein. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht relevant ist, wie genau die Daten erfasst werden, sei für weitere Erklärungen dieser drei Systeme auf [20] verwiesen. Für das folgende Modell ist nur relevant, dass alle drei Methoden Daten über einen kurzen Zeitraum aufnehmen, um die Ergebnisse zu mitteln und somit Fehlerquellen zu reduzieren. Um Fehler zu minimieren, wird außerdem eine Redundanz der Daten vorausgesetzt und nur Ergebnisse, die von mindestens zwei der drei Messmethoden erfasst wurden, werden verarbeitet [20]. Durch diese Mittelungen und Vergleiche der Messmethoden entsteht eine Reaktionszeit von zirka 0,5 s für die AF. Dies ist nicht nur die minimal sichere Reaktionszeit, sondern entspricht auch der minimalen akzeptablen Fahrzeugfolgezeit für menschliche Fahrer [79, 85] und wird daher als die Reaktionszeit für AF Agenten festgelegt.

5.1.2 Implementierung automatisierter Fahrzeuge

Nachdem erläutert wurde, welche Unterschiede es zwischen AF und MF Agenten gibt, gilt es nun, diese in das Modell zu implementieren. Der Einfachheit halber werden sie in derselben Reihenfolge implementiert, wie sie auch vorgestellt wurden. Agenten in dem Modell erhalten dazu von nun an eine zusätzliche Eigenschaft A_n , die festlegt, ob ein Agent ein AF oder ein MF beschreibt. $A_n = 1$ beschreibt dabei einen AF Agenten und $A_n = 0$ einen MF Agenten.

5.1.2.1 Sicherheitsabstand

MF Agenten, welche die Situation optimistisch einschätzen ($\gamma_n^t = 0$) stellen sicher, dass es in den nächsten t_{safe} Zeitschritten nicht zu einem Unfall kommt. Wenn t_{safe} also geringer ist als die Zeit, die ein Agent braucht, um zum Stillstand zu kommen, unterschreitet der Agent den erlaubten Mindestabstand. Daher gibt es zwei Möglichkeiten, dieses Verhalten für AF Agenten zu verhindern. Entweder t_{safe} wird für AF Agenten jeden Zeitschritt so neu berechnet, dass die Zeit genauso lange ist, wie der Agent braucht, um von seiner aktuellen Geschwindigkeit zum Stillstand zu kommen, oder γ_n^t wird für AF Agenten auf 1 festgelegt. Die einzige Funktion des optimistischen Zustandes ist die Reduzierung des

Sicherheitsabstandes unterhalb des sicheren Minimums. Dies ist für AF Agenten nicht nötig, was in Gleichung 4.6 berücksichtigt werden muss. Demzufolge kann das Verhalten sowohl von AF, als auch von MF Agenten korrekt durch

$$\gamma_n^t = \begin{cases} 0, & \text{wenn } (b_{n+2}^t = 0 \ \& \ A_n = 0) \ \text{und } v_{n+1}^t \geq v_s \ \text{und } (v_n^t \leq v_{n+1}^t < v_{n+2}^t \\ & \text{oder } (v_{n+2}^t \geq v_{\max} - v_{\text{da}} \ \text{und } v_n^t - v_{n+1}^t \leq r_n \cdot D)) \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.1)$$

bestimmt werden. Diese Änderung hat den Vorteil, dass das Überreagieren von MF Agenten, das durch den Übergang von $\gamma_n^t = 0$ zu $\gamma_n^t = 1$ entsteht, vermieden wird. Jedoch bedeutet dies auch, dass AF Agenten dauerhaft den zusätzlichen Sicherheitsabstand g_{safe} berücksichtigen. Da AF Agenten jedoch, um den Verkehrsfluss zu optimieren, nicht mit mehr als dem nötigen Sicherheitsabstand folgen sollten, sollte dies vermieden werden. Der Sicherheitsabstand muss daher entsprechend

$$g_{\text{safe}} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } A_n = 1 \\ 530, & \text{wenn } A_n = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

für AF und MF Agenten unterschiedlich festgelegt werden. Analog dazu muss auch v_{safe} durch

$$v_{\text{safe}} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } A_n = 1 \\ 12, & \text{wenn } A_n = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

angepasst werden, um sicherzustellen, dass $\Delta = L$ für alle Geschwindigkeiten v_n^t gilt.

5.1.2.2 Trödelwahrscheinlichkeit

Die Anpassungen der Trödelwahrscheinlichkeiten lassen sich, analog zur Bestimmung des zusätzlichen Sicherheitsabstandes, im vorausgehenden Unterkapitel durch einfache Nullsetzung des Parameters verwirklichen. In diesem Fall würde jedoch Gleichung 3.13 unnötigerweise berechnet werden. Effizienter ist es daher, die Trödelwahrscheinlichkeit durch

$$p_n^t = \begin{cases} 0, & \text{wenn } A_n = 1 \\ \max\left(p_d, p_0 - v_n^t \frac{p_0 - p_d}{v_{\text{slow}}}\right), & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.4)$$

zu bestimmen.

5.1.2.3 Reaktions- und Fahrzeugfolgezeit

Da das Modell zuvor eigens dazu entwickelt wurde, die Reaktionszeiten der AF Agenten reduzieren zu können, kann diese Änderung nun einfach durch Anpassung der

Reaktionszeit r_n verwirklicht werden, für die

$$r_n = \begin{cases} 5, & \text{wenn } A_n = 1 \\ 10, & \text{wenn } A_n = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

gilt.

5.2 Einfluss automatisierter Fahrzeug Agenten auf den Verkehr

Nachdem nun alle Änderungen, die nötig sind, um AF Agenten zu modellieren, dargestellt wurden, werden die Ergebnisse von Simulationen mit diesen Agenten vorgestellt und mit Verkehr ausschließlich bestehend aus MF Agenten verglichen. Anschließend wird Mischverkehr mit variierenden Anteilen beider Agententypen analysiert.

5.2.1 Homogener Verkehr

Zum Vergleich von 100 % AF Agentenverkehr mit 100 % MF Agentenverkehr wurden für beide Varianten mehrere Simulationen mit verschiedenen Dichten durchgeführt und die Ergebnisse in Form eines Fundamentaldiagramms in Abbildung 5.1 aufgetragen.

Die erste und größte Änderung, die zu sehen ist, ist, dass der Verkehrsfluss bei 100 % AF Agentenverkehr ein mehr als doppelt so hohes Maximum von $J = 4752 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ erreicht als bei 100 % MF Agentenverkehr. Da es keine empirischen Werte für homogenen automatisierten Verkehr gibt, kann dieses Ergebnis nur mit theoretischen Werten und anderen Modellen verglichen werden. Nach [11, 29] wird von theoretischen Vorhersagen eine Erhöhung der Straßenkapazität auf etwa $C = 4800 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ erwartet, was gut dem Ergebnis dieses Modells entspricht. Auch die Ergebnisse weiterer Modelle [10, 84] lassen sich gut mit diesem Wert vergleichen.

Des Weiteren fällt bei Betrachtung von Abbildung 5.1 auf, dass es bei AF Verkehr scheinbar keine synchronisierte Phase gibt. Stattdessen wirkt es so, als würde der Verkehr direkt von der Freifluss-Phase in die gestaute Phase übergehen und das Fundamentaldiagramm nimmt ab einer Dichte von zirka $\rho = 44 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ linear ab. Im MF Verkehr endet die synchronisierte Phase, wenn die Verkehrsdichte so hoch ist, dass die mittlere Geschwindigkeit unter einen kritischen Wert fällt. Unterhalb dieses Wertes ist es möglich, dass Fahrzeuge auf das Trödeln vorausfahrender Fahrzeuge so stark überreagieren, dass sie bis zum Stillstand kommen. Da $p_0 > p_d$ gilt, entsteht so schnell ein Stau, der sich dann durch das System fortsetzt und dieses in die gestaute Phase

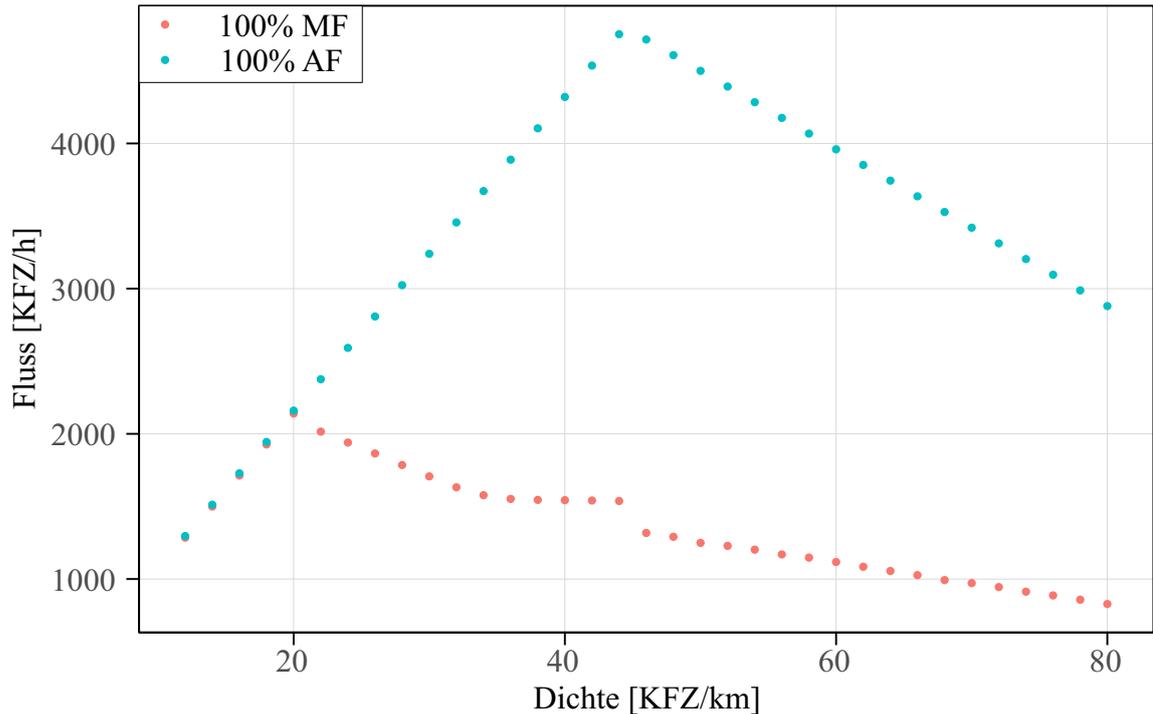


Abbildung 5.1: Fundamentaldiagramm für homogenen MF Agentenverkehr (rot) und AF Agentenverkehr (blau).

überführt. AF Agenten hingegen trödeln weder, noch reagieren sie über. Stattdessen verteilen sie sich optimal über das System und fahren dann alle mit dem gleichen Abstand (± 1 aufgrund der Diskretisierung) und der gleichen Geschwindigkeit. Es ist also passender zu sagen, dass die gestaute Phase nicht existiert und die synchronisierte Phase maximal gestärkt wurde. Dies reduziert den durchschnittlichen Treibstoffverbrauch, was als wichtiges Argument in der Debatte um AF genannt wird [3, 6, 7], und erhöht die Genauigkeit von Verkehrsprognosen. Außerdem zeigt dies, dass das Modell AF Agenten ohne statistische Schwankungen (durch Trödeln) simulieren kann, was als eines der aktuellen Probleme von Zellularautomatenmodellen zur Beschreibung von Straßenverkehr mit automatisierten Fahrzeugen benannt wird [23].

Die Dichte von $\rho = 44 \frac{\text{Kfz}}{\text{km}}$ im Maximum des Verkehrsflusses entspricht einem Fahrzeug alle 1515 (bzw. 1516 aufgrund der Diskretisierung) Zellen. Mit einer Fahrzeuglänge von $L = 500$ Zellen und einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von $v = 200 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$, entspricht das einer Fahrzeugfolgezeit von $\tau = 0,5075 \text{ s}$ (bzw. $\tau = 0,508 \text{ s}$). Eine Verringerung des Abstandes ist also nicht möglich, ohne den zulässigen Sicherheitsabstand zu unterschreiten. Dies bedeutet, dass die Agenten die Straßenkapazität optimal unter der Randbedingung der gegebenen Reaktionszeit ausnutzen.

Damit ist dieses Modell in der Lage, die wichtigsten Ergebnisse bekannter Zellularautomatenmodelle, welche ebenfalls AF Agenten simulieren, zu reproduzieren und durch die Stabilisierung der synchronisierten Phase sowie durch Simulation von unterschiedlichem

Verhalten der Agententypen zu verbessern. Bevor nun heterogener Verkehr, in dem AF und MF Agenten gemischt werden, simuliert und kurz betrachtet wird, welchen Einfluss die einzelnen Änderungen am Modell für AF Agenten auf den Verkehr haben.

5.2.2 Einfluss der Änderungen

Um zu analysieren, welchen Einfluss die drei Änderungen, die für die Einführung der AF Agenten gemacht wurden, haben, wird jede dieser Änderungen für jeweils eine Simulation nicht verwendet. Im Folgenden werden zunächst AF Agenten simuliert, die nicht trödeln und eine reduzierte Reaktionsgeschwindigkeit haben. Außerdem wird simuliert, dass sie, wie MF Agenten, die Situation optimistisch oder pessimistisch einschätzen und somit den Mindestabstand unterfahren und überreagieren können. Im Anschluss daran werden AF Agenten simuliert, die nicht überreagieren oder den Mindestabstand unterfahren und eine reduzierte Reaktionszeit haben, jedoch trödeln. Als nächstes wird der Fall betrachtet, dass AF Agenten trödeln, während Gleichungen (5.1) bis (5.3) eingehalten werden. Abschließend wird noch der letzte Fall betrachtet, in dem die AF Agenten erneut nicht mehr trödeln, jedoch eine Reaktionszeit von $r_n = 10$ verwenden.

5.2.2.1 Sicherheitsabstand

Abbildung 5.2 zeigt zwei Fundamentaldiagramme von 100 % AF Agentenverkehr. Einmal für den Fall, dass die Agenten alle drei Änderungen verwenden und einmal für den Fall, dass sie die Abstandsänderung nicht verwenden. Zunächst einmal fällt auf, dass der maximale Fluss durch Einhalten der Sicherheitsabstände reduziert wurde. Da die Agenten nicht trödeln und im optimistischen Zustand einen geringeren Sicherheitsabstand als im pessimistischen Zustand verwenden, ist der maximale Fluss in diesem Fall höher. Sobald der Abstand jedoch so gering wird, dass er nicht mehr für den optimistischen Zustand reicht, gehen alle Agenten im System in den passiven Zustand über, was einen großen capacity-drop erzeugt. Im weiteren Verlauf verwenden die Agenten dann den zusätzlichen, geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand, wie ihn auch MF Agenten anwenden. Daher stabilisiert sich der Fluss hier auf einem niedrigeren Niveau als ohne diesen Abstand, analog zum Ende der synchronisierten Phase bei MF Agentenverkehr. Um den Verkehrsfluss zu optimieren, wäre es daher möglich den Agenten zu erlauben, den Sicherheitsabstand in Situationen, in denen MF Agenten dies tun, ebenfalls zu unterschreiten und keinen erhöhten, geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand zu verwenden. In diesem Fall wäre das Maximum des Flusses höher und würde dann auf das Niveau der sicher fahrenden Fahrzeuge abfallen. Dies würde jedoch sowohl gegen die geltenden Gesetze verstoßen, als auch ein Sicherheitsrisiko darstellen. Im Fall von

unvorhergesehenen Situationen, würde dann kein Fahrzeug rechtzeitig reagieren können und es könnte zu Kettenauffahrunfällen mit sehr vielen Fahrzeugen kommen.

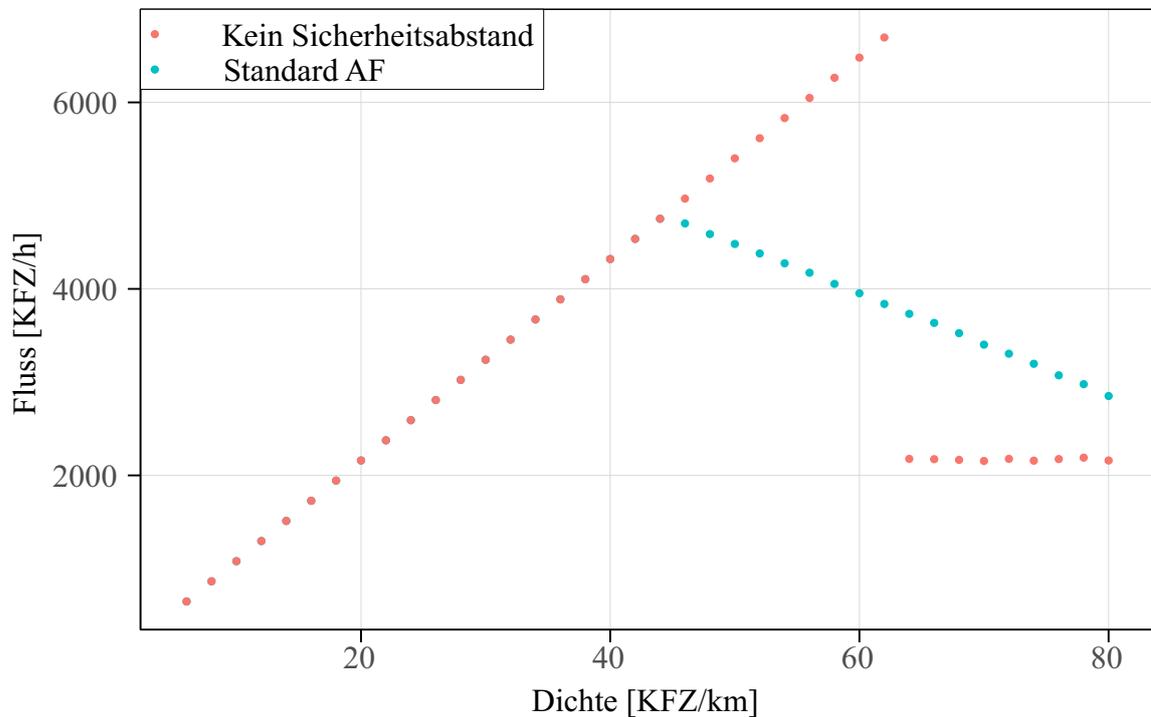


Abbildung 5.2: Fundamentaldiagramm für 100 % AF Verkehr mit allen drei Änderungen (blau) und ohne korrektes Einhalten des Sicherheitsabstandes (rot).

5.2.2.2 Trödeln

Die nächste, in Abbildung 5.3 betrachtete Änderung für AF Agenten, ist das Abschalten des Trödelns. Obwohl die AF Agenten auf Fehlverhalten nicht über- und schneller reagieren als MF Agenten, bricht der Fluss aufgrund des Trödelns früher ein. Des Weiteren stellt sich keine synchronisierte Phase ein, da die AF Agenten keinen zusätzlichen Sicherheitsabstand g_{safe} einhalten. Sobald das System den Freifluss verlässt, wechselwirken die Agenten so stark miteinander, dass sie früher oder später zum Stillstand kommen. Das System geht also direkt von der Freifluss- in die gestaute Phase über, was einen großen capacity-drop erzeugt. Auch in der Freifluss-Phase liegt der Fluss bei gleicher Dichte leicht unterhalb dem eines Systems, das vollständig aus AF Agenten besteht, welche nicht trödeln. Dies liegt daran, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit aufgrund des Trödelns verringert ist, auch wenn die Fahrzeuge im Mittel noch zu weit voneinander entfernt sind, um auf das Fehlverhalten des vorausfahrenden Agenten zu reagieren. Im Vergleich zu den Änderungen des Sicherheitsabstandes ist der Fluss in allen Verkehrsphasen und bei allen Dichten reduziert.

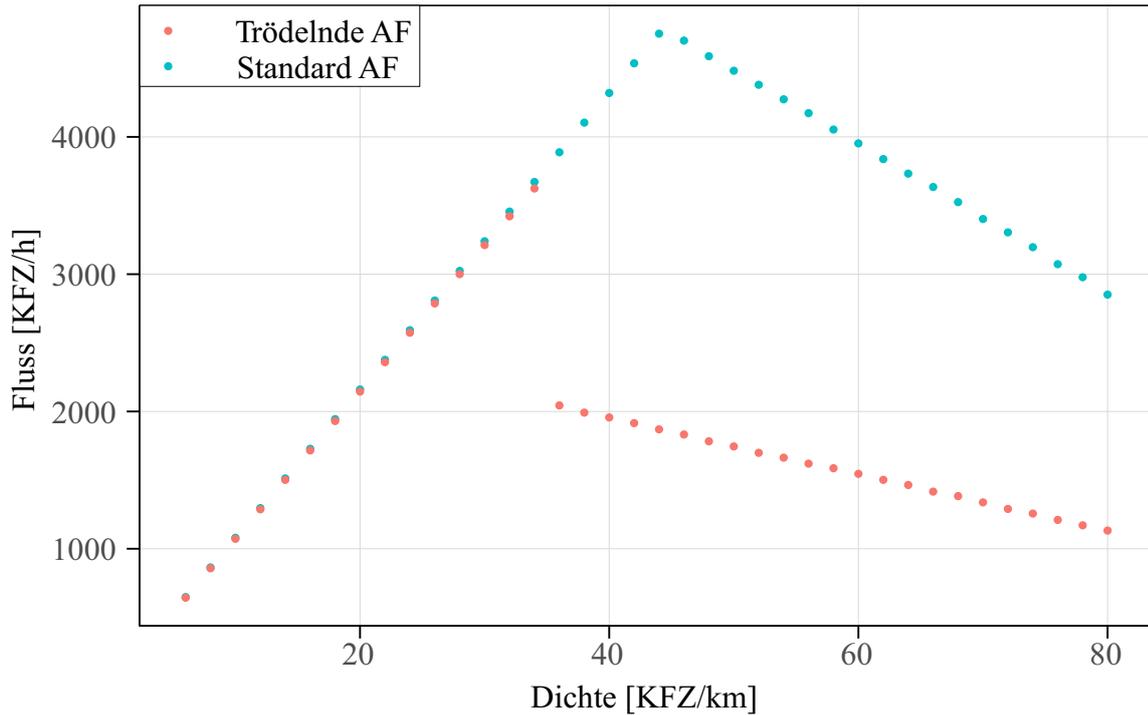


Abbildung 5.3: Fundamentaldiagramm für 100 % AF Verkehr mit allen drei Änderungen (blau) und mit trödelnden AF Agenten (rot).

5.2.2.3 Reaktionszeit

Abschließend wird in Abbildung 5.4 der Fall betrachtet, dass Agenten einen sicheren minimalen Abstand lassen und nicht trödeln, jedoch $r_n = 10$ anstatt $r_n = 5$ verwenden. Wie zu erwarten ist, ähneln sich die Verläufe der zwei Fundamentaldiagramme stark. Sie unterscheiden sich nur in der Steigung der synchronisierten Phase und dem maximalen Fluss. Da, wie zuvor gezeigt, die minimale Fahrzeugfolgezeit unter den gegebenen Umständen fast identisch der Reaktionszeit ist, lässt sich die Verringerung des maximalen Flusses leicht erklären. Eine höhere mittlere Fahrzeugfolgezeit bedeutet größere mittlere Abstände zwischen den Fahrzeugen und somit einen geringeren Fluss.

Der zweite Punkt hingegen, dass das Gefälle des abfallenden Astes bei geringer Reaktionszeit höher ist, scheint zunächst überraschend. Im synchronisierten Bereich sind die Abstände zwischen den Agenten bereits so gering, dass die Fahrzeuge ständig miteinander in Wechselwirkung stehen. Da die Agenten nicht trödeln, verteilen sie sich komplett gleichmäßig über das System, sodass alle Agenten mit derselben Geschwindigkeit (± 1 aufgrund der Diskretisierung) und demselben Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug fahren. Jedes weitere Fahrzeug im System (jede Erhöhung der Dichte) verringert nun direkt diesen mittleren Abstand und dadurch auch die Geschwindigkeit der Agenten. Diese Änderung der Geschwindigkeit ist dabei genauso antiproportional zur Dichte, dass der Fluss linear abfällt. In beiden Fällen ($r_n = 10$

oder $r_n = 5$) muss die mittlere Geschwindigkeit bei einer Dichte von $\rho = \rho_{\max}$ (siehe Kapitel 2.1.4) 0 erreichen. Da der Endpunkt also gleich ist, beide linear abfallen und der Abfall bei einer höheren Reaktionszeit früher beginnt, ist zu erwarten, dass die Steigung geringer ist.

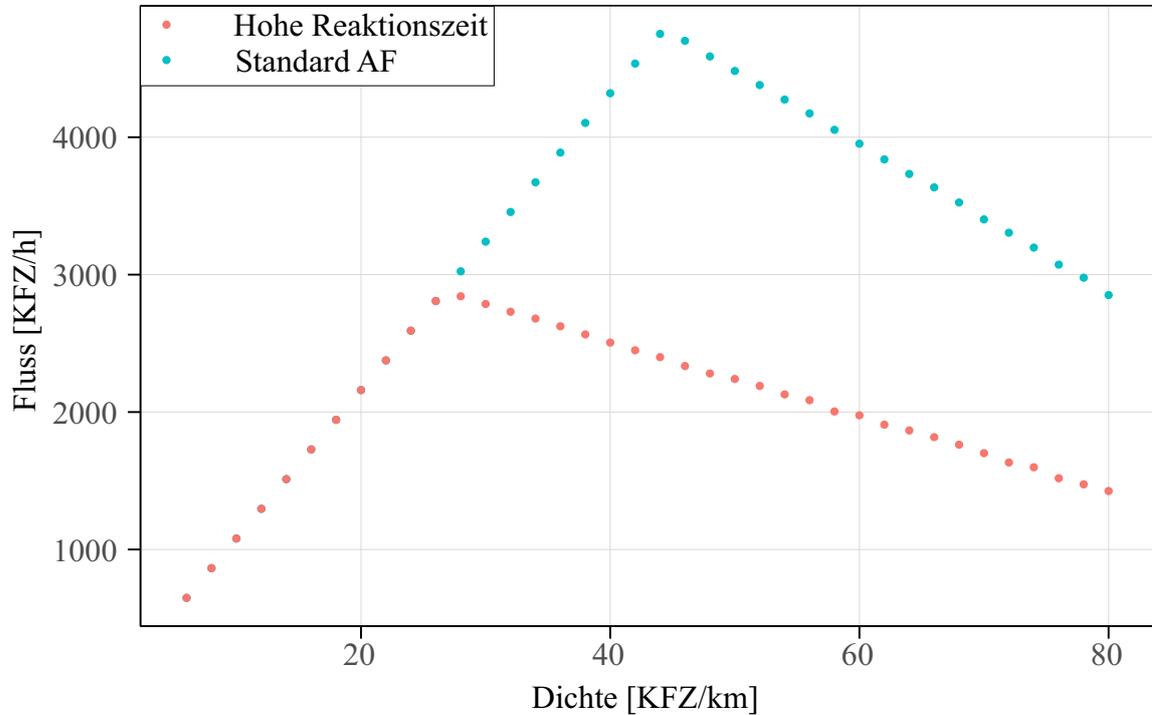


Abbildung 5.4: Fundamentaldiagramm für 100 % AF Verkehr mit allen drei Änderungen (blau) und mit $r_n = 10$ AF Agenten (rot).

Nachdem der Fluss homogenen AF Verkehrs und dessen Eigenschaften analysiert wurden, werden nun im nächsten Unterkapitel die Ergebnisse von Simulationen mit heterogenem Verkehr, in dem AF und MF Agenten gemischt werden, präsentiert und analysiert.

5.3 Heterogener Verkehr

Bevor heterogener Verkehr simuliert werden kann, müssen mögliche Unterschiede in den Wechselwirkungen besprochen werden. Im einfachsten Fall reagieren AF und MF Agenten nicht anders, wenn sie MF oder AF Agenten folgen. Diese Annahme macht Simulationen einfacher, ist jedoch in Frage zu stellen. So ist die Mensch-Maschinen-Interaktion eins der meist diskutierten Probleme des automatisierten Verkehrs [54]. Da es sich als schwierig gestalten würde, das Verhalten aller menschlichen Fahrer zu verändern, gehen die meisten Lösungsansätze für dieses Problem von einem passiveren Verhalten der AF Agenten, die MF Agenten folgen, aus [25, 29, 54]. Dies erhöht nicht

nur die Sicherheit der Mitfahrer im Fall von unvorhersehbarem Fehlverhalten eines MF Agenten, sondern erlaubt es dem AF Agenten auch weniger zu bremsen, wenn der vorausfahrende MF Agent trödelt. Dies erhöht den Fahrkomfort für die Mitfahrer, reduziert den Einfluss des Trödelns auf den Verkehrsfluss und erlaubt es den AF Agenten, effizienter im Treibstoffverbrauch zu fahren.

Während das passivere Verhalten von AF Agenten allgemein als Lösungsansatz akzeptiert ist, wird zurzeit noch diskutiert, wie dieses umgesetzt werden soll. Bevor dieses Verhalten jedoch im Kapitel 5.3.3 implementiert wird, wird in den Kapiteln 5.3.2 und 5.3.2.1 zunächst einmal betrachtet, welchen Einfluss die Heterogenität auf den Fluss hat, wenn die Agenten sich unabhängig vom Typ des vorausfahrenden Fahrzeuges verhalten.

Hierzu muss zunächst noch eine Änderung am Modell vorgenommen werden. In dem Modell, wie es bisher verwendet wird, können AF Agenten ihr Bremslicht nach einem Bremsprozess von 0,5s deaktivieren, ohne dass ein folgender MF Agent auf diesen Bremsprozess reagiert, da das Bremslicht dann bereits wieder deaktiviert ist. In der Realität würde ein MF Agent (im Mittel) nach einer Sekunde auf ein Bremslicht reagieren, selbst wenn es dann bereits wieder abgeschaltet ist. Des Weiteren verwenden AF Agenten selber den Status des Bremslichtes zur Berechnung des Sicherheitsabstandes nicht, da der Bremslichtstatus nur für die Einschätzung der Situation (optimistisch oder pessimistisch) verwendet wird und AF Agenten jede Situation pessimistisch einschätzen. Daher kann das Bremslicht bei AF Agenten mit

$$b_n^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } (b_n^t = 1 \ \& \ t \bmod 10 \neq 0) \text{ oder } (c_n^{t+1} < v_n^t \ \& \ t \bmod r_n = 0) \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases} \quad (5.6)$$

für mehr als 0,5s aktiviert bleiben, ohne das Verhalten eines folgenden AF Agenten zu beeinflussen. Auf diese Weise wird eine korrekte Reaktion eines folgenden MF Agenten gewährleistet.

5.3.1 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden nun zwei Simulationsergebnisse für heterogenen Verkehr, in dem AF und MF Agenten gemischt werden, vorgestellt. Dazu wurden zunächst Fundamentaldiagramme, analog zu Kapitel 4.3, für heterogenen Verkehr erstellt und mit homogenem MF Verkehr verglichen. Für jedes Fundamentaldiagramm wurde der Anteil an AF Agenten am Verkehr in 0,1er Schritten festgelegt. Der Unterschied im Verkehr, welcher durch eine Steigerung von 0,1 AF Agenten entsteht, ist dabei nicht konstant, wie im Unterkapitel 5.3.2.1 gezeigt wird. Er ist jedoch ähnlich genug, damit im folgenden Unterkapitel 5.3.2 nur eines dieser Fundamentaldiagramme beispielhaft gezeigt und analysiert wird. Im daran anschließenden Unterkapitel 5.3.2.1 wurden die

Simulationen für alle Durchdringungsraten je 100 mal wiederholt, um den mittleren Einfluss der Heterogenität auf die Straßenkapazität zu analysieren.

5.3.2 Fundamentaldiagramm heterogenen Verkehrs

Abbildung 5.5 zeigt ein Fundamentaldiagramm für heterogenen Verkehr, bei einer Durchdringungsrate der AF Agenten von 0,1, zusammen mit homogenem MF Agentenverkehr zum Vergleich. Wie zu sehen ist, erhöhen AF Agenten nicht nur die Straßenkapazität, da sie nicht trödeln, sondern verstärken durch ihr konstantes Fahren, ohne Trödeln oder Überreagieren durch Änderungen optimistischen oder pessimistischem Fahrverhaltens, die synchronisierte Phase. Dass diese nicht zu höheren Dichten verlängert wird, obwohl sie verstärkt wurde, liegt daran, dass der Effekt für eine 10 % Durchdringungsrate kleiner als die diskretisierten Dichte-Schritte der Simulationen ist.

Abschließend steigern AF Agenten in heterogenem Verkehr auch in der gestauten Phase den Fluss aus mehreren Gründen. Wenn der vorausfahrende Agent anfährt, braucht ein MF Agent mindestens eine Sekunde, ehe dieser anfahren kann, trödelt dann jedoch noch mit einer Wahrscheinlichkeit von $p_0 = 0,37$ und braucht eine weitere Sekunde, ehe er anfahren kann. Dies ist für AF Agenten nicht der Fall. Sie trödeln nicht und fahren 0,5 s, nachdem das vorausfahrende Fahrzeug angefahren ist, ebenfalls an. In Bereichen des Freiflusses erhöhen die AF Agenten den Fluss, da sie hier nicht trödeln und einen geringeren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug benötigen. In gestauten Bereichen entstehen oft kleinere Lücken, welche die MF Agenten erst schließen, wenn diese ausreichend groß geworden sind. Dies ist für AF Agenten nicht der Fall und sie schließen Lücken, sobald diese entstehen, was ebenfalls den Fluss steigert.

Allgemein zeigt dies, dass AF Agenten nicht nur die Straßenkapazität steigern könnten, sondern auch, nachdem der Verkehr den Freifluss verlassen hat, einen wichtigen Beitrag zur Stabilität des Flusses liefern könnten. Dies kann den Treibstoffverbrauch reduzieren und die Genauigkeit von Verkehrsprognosen erhöhen. Abschließend sei auf die leichten Schwankungen des Flusses in der gestauten Phase hingewiesen. Diese Schwankungen entstehen, unabhängig von der gewählten Relaxationszeit, durch die periodischen Randbedingungen und die Art und Weise, wie die AF Agenten auf das System verteilt werden. Derselbe Effekt betrifft auch die heterogenen Straßenkapazitäten und wird dort genauer erklärt.

5.3.2.1 Heterogene Straßenkapazität

In [29] wurde der Einfluss von AF Agenten in heterogenem Verkehr auf die Straßenkapazität mathematisch, durch Vergleiche der durchschnittlichen Fahrzeugfolgezeiten

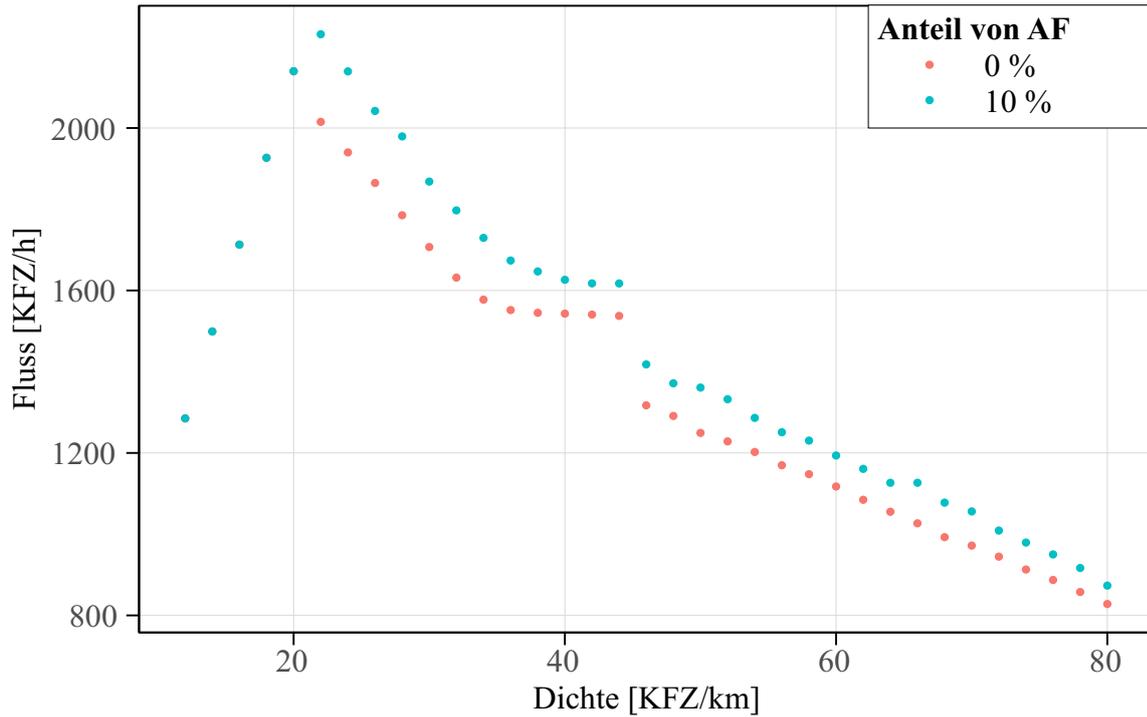


Abbildung 5.5: Fundamentaldiagramm für homogenem MF Agentenverkehr (rot) und heterogenem Verkehr mit 10 % AF Agenten und 90 % MF Agenten (blau).

analysiert. Demnach folgt für die Straßenkapazität in gemischtem Verkehr

$$C_{\text{het}}(x) = \frac{3600}{xT_{\text{AF}} + (1-x)T_{\text{MF}} + \frac{L}{v}}. \quad (5.7)$$

Dabei ist x der Anteil an AF Agenten, $L = 7,5$ m die mittlere Länge der Fahrzeuge, $v = v_{\text{max}} \approx 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ die maximale Reisegeschwindigkeit und $T_{\text{AF}}, T_{\text{MF}}$ sind jeweils die mittleren Fahrzeugfolgezeiten von AF und MF Agenten. T_{AF} wurde zuvor so kalibriert, dass es in etwa 0,5 s entspricht und T_{MF} lässt sich aus der Straßenkapazität von homogenem MF Verkehr zu 1,42 s bestimmen.

In Abbildung 5.6 wurde diese Funktion, normiert auf die Straßenkapazität in homogenem MF Verkehr, zusammen mit den Ergebnissen von Simulationen, in denen der Anteil von AF zu MF Agenten festgelegt und zwischen verschiedenen Simulationsinstanzen variierte wurde, aufgetragen. Jede dieser Simulationen wurde dabei 100 mal durchgeführt, um Mittelwerte und Standardabweichungen bilden zu können.

Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, sind die aus Simulationen gewonnenen Straßenkapazitäten in guter Übereinstimmung mit der Theorie. Die bestehenden Abweichungen, die vor allem bei höheren Anteilen von AF zu sehen sind, haben verschiedene Ursachen. Die zwei größten Einflüsse sind dabei das Verhalten von MF Agenten und die Art und Weise wie AF Agenten auf das System verteilt werden. Die Gleichung (5.7) berücksichtigt lediglich die verschiedenen Fahrzeugfolgezeiten von AF und MF, nicht jedoch, dass MF

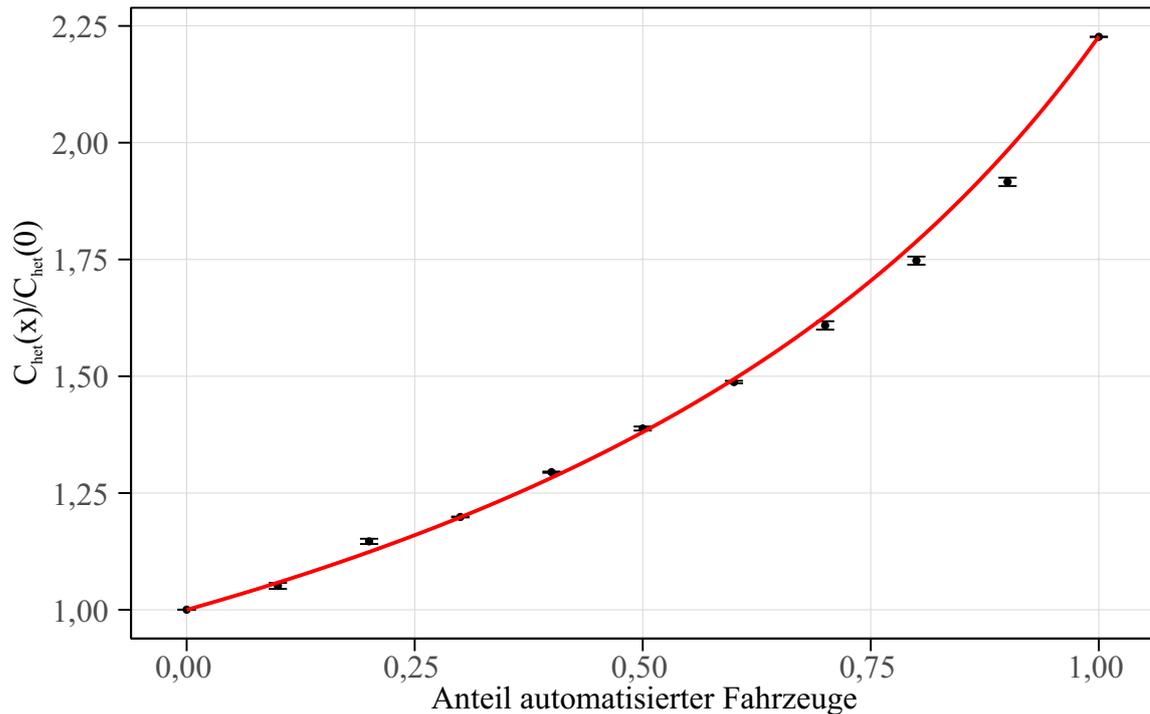


Abbildung 5.6: Die auf homogenem MF Agentenverkehr normierte Steigerung der Straßenkapazität in Abhängigkeit des Anteils der AF Agenten. Die Kurve gibt den funktionalen Verlauf entsprechend der mathematischen Theorie [29] wieder, während die schwarzen Punkte die mittleren Simulationsergebnisse inklusive Standardabweichung wiedergeben.

zusätzlich trödeln und überreagieren können. Diese Unterschiede sind zwar relevanter nachdem der Verkehr den Freifluss verlassen hat, haben jedoch auch einen Einfluss auf den maximalen Freifluss und somit auf die Straßenkapazität. Diese Unterschiede können erklären, wieso die Simulationsergebnisse bei niedrigen Durchdringungsraten oberhalb der theoretischen Kurve liegen können.

Dass die Werte oberhalb der Kurve liegen ist die Ausnahme, da sich die Verteilung der AF Agenten negativ auf die Kapazität des Systems auswirkt und der Steigerung somit entgegenwirkt. Zu Beginn einer jeden Simulation wird jedes Fahrzeug mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit als AF Agent erstellt, sonst als MF Agent. Diese Wahrscheinlichkeit entspricht dabei gerade der für die Simulation geplanten Durchdringungsrate der AF Agenten. Anschließend wird überprüft, ob der so erreichte Anteil an AF Agenten der vorausgesetzten Durchdringungsrate entspricht. Sollte dies nicht der Fall sein, wird der Prozess so lange wiederholt, bis dem so ist, wobei eine Fehlertoleranz von bis zu $\pm 1\%$ aufgrund der Endlichkeit der Strecke und der finiten Anzahl an Fahrzeugen akzeptiert wird. Die Verteilung, der so in das System gesetzten AF Agenten, ist daher zufällig und kann von Simulation zu Simulation stark variieren.

Um den Einfluss dieser Variation zu verdeutlichen, wurde in Abbildung 5.7 die Straßenkapazität bei einer Durchdringungsrate von 0,7 AF Agenten für drei verschiedene Dichten mit je 100 Durchläufen simuliert. Wie man sieht, ist der Fluss bei einer Dichte von $32 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ noch stabil und fluktuiert nur leicht um einen Wert von ungefähr $3400 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$. In jeder Instanz gibt es lokale Bereiche, in denen MF Agenten dominieren und kleinere Bremswellen erzeugen, die jedoch von Bereichen, in denen AF Agenten dominieren, kompensiert werden können. Diese Bremswellen verringern zwar die mittlere Geschwindigkeit im System leicht, jedoch nicht so stark, dass es zu einem Ende der Freifluss-Phase kommt. Der Fluss der Simulationen schwankt daher in Abhängigkeit der Größe dieser lokalen Variationen der Durchdringungsrate. In Simulationen, in denen es nur wenige bzw. kleine Bereiche ohne AF Agenten gibt, sind die Flüsse höher als in solchen mit mehreren oder größeren Bereichen.

Dieser Fluss und damit die Straßenkapazität steigt bei einer Steigerung der Dichte auf $33 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ noch weiter an, schwankt jedoch auch stärker. Aufgrund der gesteigerten Dichte verringern sich auch die mittleren Abstände zwischen den Agenten, wodurch die AF Agenten weniger Möglichkeiten haben, das Fehlverhalten der MF Agenten zu kompensieren. Bei dieser Dichte hängt der Fluss also bereits davon ab, wie viele MF Agenten von AF Agenten gefolgt werden. Das System wird hier von den lokalen Bereichen dominiert, in denen die Durchdringungsrate der AF Agenten am Niedrigsten ist.

Bei einer Dichte von $34 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ zeigt der Fluss nun noch mehr Varianz und kann, je nachdem wie die Agenten auf das System aufgeteilt sind, höher oder tiefer als der Fluss bei einer Dichte von $33 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ sein. Dies zeigt, dass die Verteilung der Fahrzeuge sich nicht nur auf den Fluss auswirkt, sondern auch darauf, in welcher Phase sich das System befindet. Im Rahmen der einspurigen Simulationen können Fahrzeuge dabei ihre Anordnung im System nicht verändern. Dies bedeutet, dass der Zustand des Systems im Folgenden zum Teil, unabhängig von der Relaxationszeit, von der initialen Konfiguration abhängt. Derselbe Effekt ist zwar auch für den realen Verkehr zu erwarten, wird jedoch in den Simulationen durch die periodischen Randbedingungen verstärkt.

Im Vergleich zu anderen Modellen [12, 25, 30] ist die Steigerung des Verkehrsflusses ähnlich, jedoch ist dieses Modell zusätzlich in der Lage, auch die synchronisierte Phase abzubilden und durch heterogenen Verkehr zu stabilisieren und einen höheren Fluss in ihr zu erzeugen.

5.3.3 Passives Verhalten automatisierter Fahrzeug-Agenten auf menschlich gesteuerte Fahrzeuge

Nachdem gezeigt wurde, dass das Model in der Lage ist, sowohl homogenen, als auch heterogenen, aus AF und MF Agenten zusammengesetzten Verkehr zu simulieren und

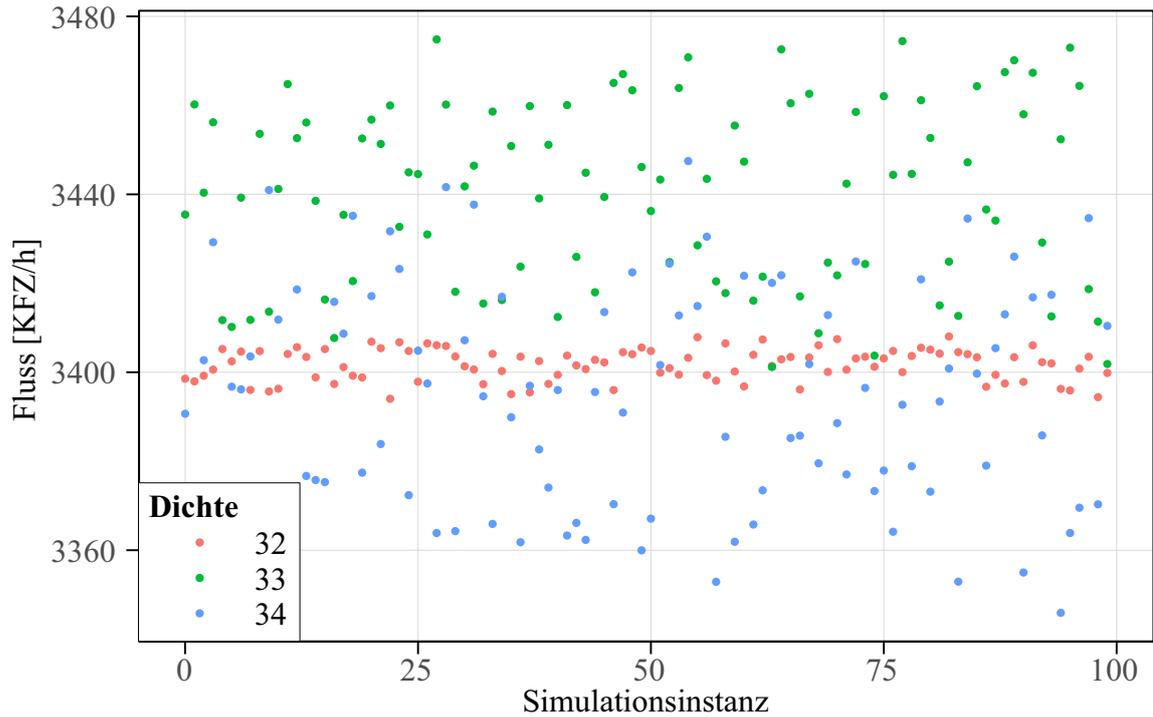


Abbildung 5.7: Der Fluss in je 100 verschiedenen Simulationsinstanzen für die drei Dichten 32 (rot), 33 (grün), und 34 (blau) in $\frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$.

realistische Ergebnisse zu reproduzieren, gilt es nun, ehe es zu kommunizierenden Fahrzeugen geht, das Verhalten von AF Agenten, die MF Agenten folgen, anzupassen. Wie zuvor bereits erläutert wurde, wird zurzeit erwartet, dass AF Agenten passiv auf das Fehlverhalten von menschlichen Fahrern reagieren [54]. Wie dieses passive Verhalten aussehen soll, ist jedoch noch umstritten.

In [29] zum Beispiel wird die minimale Fahrzeugfolgezeit, mit der ein AF Agent einem MF Agenten folgen darf, um 0,4s auf 0,9s gesteigert, während in [25] AF Agenten ihre Geschwindigkeit stets so bestimmten, als ob das vorausfahrende MF um $1 \frac{\text{Zelle}}{\text{Zeitschritt}}$ langsamer fährt, als dies tatsächlich der Fall ist. Dort wird also stets angenommen, dass der MF Agent im aktuellen Zeitschritt anfängt zu trödeln.

5.3.3.1 Definition des passiven Verhaltens

Da das passive Verhalten zusätzlich zum Trödeln jedoch noch weitere Fehlverhalten berücksichtigen soll, wird dieses in diesem Modell durch eine Erhöhung der minimalen Fahrzeugfolgezeit berücksichtigt. Durch die Einführung des zusätzlichen zeitlichen Sicherheitsabstandes (von hier ab ZZS)

$$\delta_n^t = \begin{cases} 4 & \text{wenn } A_n = 1 \ \& \ A_{n+1} = 0 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (5.8)$$

ergibt sich

$$\begin{aligned}
 x_n^t + \Delta + \sum_{i=1}^{r_n + \delta_n^t} \min(v_n^t + a \cdot i, \max(v_n^t - D \cdot i, c_n^{t+1})) \\
 + \sum_{i=1}^{\tau_f(c_n^{t+1})} (c_n^{t+1} - D \cdot i) \leq x_{n+1} + \sum_{i=1}^{\tau_l(v_{n+1}^t)} (v_{n+1}^t - D \cdot i)
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

für die Berechnung der als sicher geschätzten Geschwindigkeit c_n^t .

5.3.3.2 Einfluss des passiven Verhaltens

Da sich durch einen größeren Abstand zwischen Fahrzeugen nicht nur die Sicherheit erhöht, sondern auch der Fluss verringert, muss der Anteil der AF Agenten, die MF Agenten folgen, entsprechend mit der erhöhten mittleren Fahrzeugfolgezeit im Freifluss $T_{AF,MF}$ in Gleichung (5.7) berücksichtigt werden. Diese ändert sich dadurch zu

$$C_m(x) = \frac{3600}{x^2 T_{AF} + x(1-x)T_{AF,MF} + (1-x)T_{MF} + \frac{L}{v}}. \tag{5.10}$$

Um den Einfluss des ZZS auf das Modell zu analysieren, wurden die Simulationen, wie sie für Abbildung 5.6 durchgeführt wurden, mit diesem wiederholt. Die Ergebnisse sind, zusammen mit der theoretischen Funktion, in Abbildung 5.8 zu sehen. Für einen einfacheren Vergleich wurden die Ergebnisse der Simulationen ohne den ZZS erneut aufgetragen. Wie man in dieser Abbildung sehen kann, hat der ZZS, wie zu erwarten, keinen Einfluss auf homogenen AF oder MF Agentenverkehr, da er dort nicht zum Einsatz kommt. Auch der niedrigere Verlauf der Kurve wurde bereits prognostiziert und ist ein direktes Resultat des gesteigerten mittleren Abstandes zwischen den Agenten. Ein gesteigerter mittlerer Abstand zwischen den Agenten bedeutet, dass bei einem gleichen Abstand mit zunehmender Dichte eine geringere Geschwindigkeit gefahren werden muss. Umgekehrt bedeutet dies, dass der kritische minimale Abstand, ab dem AF Agenten aufgrund des Fehlverhaltens der vorausfahrenden MF Agenten zum Abbremsen gezwungen werden, bei einer geringeren Dichte erreicht wird.

Dass AF Agenten durch den ZZS besser in der Lage sind, menschliches Fehlverhalten zu kompensieren, lässt sich daran erkennen, dass die Simulationsergebnisse mit ZZS (blaue Punkte) öfter oberhalb der theoretischen Kurve liegen, als dies bei den Ergebnissen ohne, abgebildet in rot, der Fall ist. Die AF Agenten können die Fluktuationen zwar besser kompensieren, jedoch nicht so gut, dass sie den Abfall der Kapazität aufgrund des gesteigerten Abstandes kompensieren können.

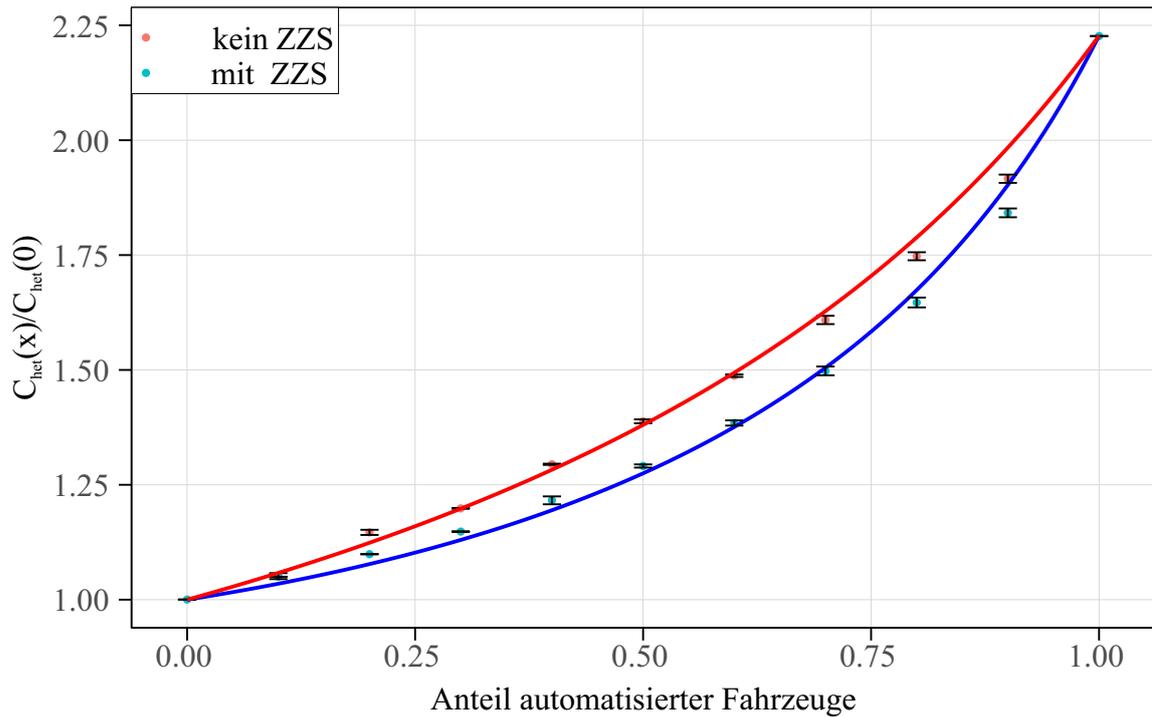


Abbildung 5.8: Die auf homogenem MF Agentenverkehr normierte Steigerung der Straßenkapazität in Abhängigkeit des Anteils der AF Agenten mit Agenten, die den ZZS verwenden in blau und ohne in rot. Die Punkte zeigen die Simulationsergebnisse inklusive Standardabweichung, während die Kurven den theoretischen Verlauf nach Gleichung (5.10) zeigen

Da die Hauptfunktion des ZZS jedoch wirkt, kann dieses Modell nun heterogenen Straßenverkehr, in dem AF und MF Agenten gemischt werden, auf Basis aller aktuellen Prognosen zu Eigenschaften der AF Agenten simulieren.

6

Kommunizierende, automatisierte Agenten

Nachdem AF Agenten eingeführt und in heterogenem Verkehr simuliert wurden, werden diese Fahrzeuge nun in diesem Kapitel durch Kommunikation zwischen Agenten erweitert und als kommunizierende, automatisierte Fahrzeug (KAF) Agenten eingeführt. Dazu wird zunächst erläutert, wie Kommunikation zwischen verschiedenen Fahrzeugen möglich ist und wie diese im Rahmen dieses Modells umgesetzt werden soll, ehe sie modelliert, simuliert und dann analysiert wird.

6.1 Kommunikationsarten

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten und Technologien, durch welche Kommunikation zwischen AF realisiert werden kann [6]. Da jedoch die Infrastruktur in dem hier vorgestellten Modell nicht berücksichtigt wird und das System stets vollständige Informationen über die aktuelle Verkehrslage hat, soll von diesen Methoden nur die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation Optionen betrachtet werden. Es sei nur kurz erwähnt, dass Alternativen wie Fahrzeug-X-Kommunikation, in welcher Fahrzeuge sowohl mit der Infrastruktur als auch direkt mit anderen Fahrzeugen kommunizieren, als wichtige Alternativen –vor allen in urbanen Systemen mit Kreuzungen– betrachtet werden. Für weitergehende Literatur dazu sei auf [86, 4, 87] verwiesen.

Da die Art der Kommunikation keinen Einfluss auf die Entscheidungen der Agenten haben sollte, wird in diesem Modell eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation angenommen. Der industrielle Standard für Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ist zurzeit IEEE

6. Kommunizierende, automatisierte Agenten

80.211p [21]. Für das Zellularautomatenmodell ist lediglich wichtig, dass die Agenten kommunizieren, nicht aber, wie dies technisch umgesetzt wird. Es sei nur angemerkt, dass die nötigen Informationen durch 'Cooperative Awareness Messages', wie in [21] erläutert, von jedem kommunizierenden Fahrzeug in 100 ms Perioden ausgegeben und von anderen Fahrzeugen ausgewertet werden. Dieses Zeitintervall entspricht einem Zeitschritt in dem hier vorgestellten Modell.

Zurzeit wird Kommunikation im Straßenverkehr hauptsächlich für 'cooperative adaptive cruise control' CACC Systeme betrachtet [71]. Dieses System entnimmt die nötigen Daten –Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeuges– und verwendet diese, um die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeuges so zu bestimmen, dass das Fahrzeug nicht nur ohne Unfallrisiko, sondern auch mit ausreichendem Abstand fährt. Es handelt sich also um eine Erweiterung des ACC Systems durch Kommunikationsdaten.

Das CACC System soll die vollständige longitudinale Steuerung des Fahrzeuges übernehmen, während alles Weitere vom Fahrer des Fahrzeuges durchgeführt wird. Ein KAF sollte hingegen das Fahrzeug in allen Situationen, wie zum Beispiel an Ampeln, Baustellen, Kreuzungen oder beim Spurwechsel, steuern. In diesem Kapitel wird jedoch nur longitudinaler einspuriger Verkehr simuliert, wofür ein KAF wie ein Fahrzeug mit CACC System fungiert.

Zusätzlich zu KAF könnten auch normale, von Menschen kontrollierte Fahrzeuge mit einem Kommunikationssystem ausgestattet sein. Diese Fahrzeuge verwenden die erhaltenen Daten anderer kommunizierender Fahrzeuge selbst nicht, geben aber periodisch ihre Informationen weiter, um folgenden Fahrzeugen die Nutzung dieser zu ermöglichen. Diese Art von Fahrzeugen werden in der Regel als 'Here I Am' Fahrzeuge (HIAF) bezeichnet [10] und operieren in diesem Modell wie normale MF Agenten. Im Gegensatz zu gewöhnlichen MF Agenten können ihnen folgende KAF Agenten in vollem Funktionsumfang operieren (siehe Unterkapitel 6.2).

Zuletzt sei angemerkt, dass verschiedene Kommunikationsmöglichkeiten unterschiedliche Reichweiten haben. Das hier verwendete IEEE 80.211p hat eine Reichweite von bis zu 300 m [25]. Dies hat zur Folge, dass einerseits weiter entfernte Fahrzeuge nicht berücksichtigt werden und andererseits Daten von mehr als einem Fahrzeug berücksichtigt werden würden, wenn diese sich innerhalb der 300 m Reichweite befinden.

Im ersten Fall ist das nächste Fahrzeug so weit entfernt, dass das Fahrzeug n unabhängig vom Zustand des Fahrzeuges $n + 1$ frei fahren würde. Da dies somit keinen Einfluss auf die Simulationen hat, wird für diese erste Version der Kommunikation der 300 m Maximalabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ignoriert und stattdessen nur betrachtet, ob das KAF einem kommunizierenden Fahrzeug folgt oder nicht. Für den zweiten Fall, dass mehrere KAF Fahrzeuge in einem Platoon einander folgen, wird das Platoon zunächst beschränkt, jedes kommunizierende Fahrzeug kann nur die

eigenen Daten an das folgende Fahrzeug weitergeben und die Daten des vorausfahrenden kommunizierenden Fahrzeugs verwenden. Diese Entscheidung reduziert zwar den Effekt von KAF Platoons, ermöglicht jedoch eine deutlich einfachere Implementierung der KAF und hat keine Auswirkungen auf die Mensch-Maschine-Interaktion. Eine weitreichendere Wechselwirkung wird jedoch für nachfolgende Arbeiten von Interesse sein.

6.2 Einführung von kommunizierenden, automatisierten Fahrzeugen

Entsprechend der in Kapitel 6.1 erklärten Variante der Kommunikation erhält das KAF n die Informationen des vorausfahrenden Fahrzeuges ($n + 1$) alle 0,1 s. Für eine einfache Implementierung mit diskreten Zeitschritten wird davon ausgegangen, dass die Berechnung der neuen Geschwindigkeit, entsprechend Gleichung 5.9, vernachlässigbar kurz gegenüber der Zeit der Datenübertragung ist. Dadurch reduziert sich die Reaktionszeit von KAF auf 1 Zeitschritt, wenn das vorausfahrende Fahrzeug ebenfalls kommuniziert. Hier ist zu berücksichtigen, dass sowohl andere KAF als auch HIAF ihre Position dem folgenden Fahrzeug kommunizieren, jedoch nur erstere diese Informationen verwenden. Daher wird ein Kommunikationsfähigkeits-Parameter C_n eingeführt, welcher angibt, ob ein Fahrzeug kommuniziert oder nicht. Fahrzeuge, die in der Lage sind ihre eigenen Informationen an das folgende Fahrzeug weiterzugeben (KAF und HIAF), verwenden $C_n = 1$ und solche, die es nicht können (AF und MF) $C_n = 0$. Diese Information ist wichtig, da die Reaktionszeit eines KAF nicht fix $r_n = 1$ ist, sondern bei der Initialisierung in Abhängigkeit des Fahrzeugs $n + 1$ bestimmt werden muss. Für den Fall eines mehrspurigen Systems kann die Reaktionszeit sogar von Zeitschritt zu Zeitschritt variieren, abhängig von der Kommunikationsfähigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Für den zunächst behandelten einspurigen Fall muss dies jedoch nur einmal bei der Initialisierung mittels

$$r_n = \begin{cases} 10, & \text{wenn } A_n = 0, \\ 5, & \text{wenn } A_n = 1 \ \& \ ((C_n = 1 \ \& \ C_{n+1} = 0) \ | \ C_n = 0), \\ 1, & \text{wenn } A_n = 1 \ \& \ C_n = 1 \ \& \ C_{n+1} = 1 \end{cases} \quad (6.1)$$

festgelegt werden.

Ansonsten gelten für KAF Agenten alle Regeln wie sie auch für AF Agenten im vorherigen Kapitel 5 festgelegt wurden. Sie trödeln nicht, ändern ihren Optimismus nicht und folgen vorausfahrenden MF bzw. HIAF mit einem ZZS. Durch Anwendung des ZZS folgen KAF Agenten MF weiterhin mit 0,5 s und unterschreiten damit nicht die minimal akzeptable Fahrzeugfolgezeit. Eine Erhöhung der ZZS für KAF Agenten wäre jedoch denkbar und

simpel zu realisieren, um vorausfahrenden MF nicht das Gefühl zu geben, bedrängt zu werden. So kann zwar bereits homogener KAF Verkehr simuliert werden, jedoch gibt es einen wichtigen Punkt in der Mensch-Maschine-Interaktion, der noch beachtet werden muss, ehe heterogener Verkehr aus MF, HIAF und KAF Fahrzeugen simuliert werden kann.

6.2.1 Mensch-Maschine-Interaktion

Die Einführungen von AF und KAF Agenten in den Straßenverkehr soll das Unfallrisiko reduzieren oder bestenfalls eliminieren [5]. Dies ist einer der Gründe, warum der ZZS eingeführt wurde. Erste Simulationen, die mit den so konfigurierten KAF in heterogenem Verkehr durchgeführt wurden, zeigen jedoch, dass vermehrt Unfälle aufgrund der Mensch-Maschine-Interaktion entstehen. Dieses Problem entsteht durch MF oder HIAF, die KAF optimistisch folgen.

Sollte der Agent $n+2$, im homogenen MF Verkehr, plötzlich aufgrund einer Änderung der Verkehrssituation bremsen, reagiert der Agent $n+1$ eine Sekunde später auf die geänderte Geschwindigkeit, während der Agent n nach derselben Sekunde auf die Änderung des Bremslichtes und der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen $n+1$ und $n+2$ reagiert. Hierdurch wurde die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Agenten $n+1$ und n reduziert und es kommt nicht zu Unfällen, selbst wenn der Agent n dem Agenten $n+1$ mit weniger als dem Sicherheitsabstand folgt.

In einem ähnlichen Fall in heterogenem MF und AF Verkehr, in dem ein MF Agent einem AF Agenten folgt, reagiert der AF Agent $n+1$ bereits nach $0,5\text{ s}$ auf die Änderung des Agenten $n+2$, während der Agent n weiterhin erst nach 1 s darauf reagiert. Dies vergrößert den Geschwindigkeitsunterschied zwischen den beiden Agenten um $5 \cdot D = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ während des Abbremsvorganges. Der verbleibende Sicherheitsabstand im optimistischen Zustand reicht jedoch noch aus, um dennoch Unfälle zu vermeiden. Es wäre trotzdem denkbar, dass die im Folgenden für KAF zusätzlich eingeführten Anpassungen auch zu einem gewissen Maße auf AF Agenten angewendet werden sollten, um das Unfallrisiko weiter zu minimieren.

Aufgrund der reduzierten Reaktionszeit von $0,1\text{ s}$ der KAF ist der Geschwindigkeitsunterschied zwischen einem KAF Agenten $n+1$ und einem folgenden MF Agenten in einer vergleichbaren Situation bereits $9 \cdot D = 2,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Dieser Unterschied über die gesamte Dauer des Bremsvorganges ist so groß, dass der MF Agent auf das vorausfahrende KAF auffährt und einen Unfall erzeugt.

Das Unfallrisiko liegt in diesem Fall also bei dem MF Agenten, der zu langsam reagiert und den Sicherheitsabstand nicht einhält. Auch wenn dies der Fall ist, kann nicht mit

Sicherheit gesagt werden, dass die menschlichen Fahrer das Problem beheben, indem sie sich in Zukunft an den Sicherheitsabstand halten. Ganz im Gegenteil: Wie bereits erwähnt, wird nicht erwartet, dass Probleme in der Mensch-Maschine-Interaktion durch Änderungen im Verhalten aller Menschen gelöst werden können. Stattdessen müssen die Maschinen die Probleme durch Anpassung ihres Verhaltens kompensieren [54].

Dies wird erreicht, indem KAF Agenten, die von MF oder HIAF gefolgt werden, den ZZS zum vorausfahrenden Fahrzeug weiter erhöhen, solange dieses das Bremslicht nicht aktiv hat. Nachdem das Fahrzeug $n + 2$ das Bremslicht aktiviert, kann so der KAF Agent $n + 1$ diesen ZZS überfahren, ehe das Fahrzeug bremsen muss. Dies gibt dem folgenden Agenten mehr Zeit zu reagieren und verhindert Unfälle. In der Realität könnte der KAF Agent $n + 1$ auch direkt reagieren, aber deutlich schwächer abbremesen, um einen stetigeren aber dennoch sicheren Fluss zu gewährleisten.

Simulationen haben gezeigt, dass 0,4s zusätzlich im Rahmen des Modells ausreichen, um Unfälle vollständig zu vermeiden. Dies war zu erwarten, da die Agenten damit analog zu den AF Agenten 0,5s zeitliche Abstände verfolgen. Wie auch bei AF Agenten könnte es in der Realität jedoch zu empfehlen sein, mehr als 0,4s zu wählen, da manche Autofahrer langsamer reagieren als andere, was nicht in diesem Modell abgebildet ist. Somit folgt für die Bestimmung des ZZS

$$\delta_n^t = \begin{cases} 8, & \text{wenn } C_n = 1 \ \& \ A_{n+1} = 0 \ \& \ A_{n-1} = 0 \ \& \ b_{n+1}^t = 0 \\ 4, & \text{sonst wenn } (A_n = 1 \ \& \ A_{n+1} = 0) \ \text{oder } (C_n = 1 \ \& \ A_{n-1} = 0 \ \& \ b_{n+1}^t = 0) . \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.2)$$

Mithilfe dieses erweiterten ZZS kann nun heterogener KAF und MF (bzw. HIAF) Verkehr simuliert werden. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden im nächsten Unterkapitel analysiert.

6.3 Einfluss von kommunizierenden automatisierten Fahrzeugen

Zur Betrachtung des Einflusses von KAF auf den Verkehr wurden Simulationen analog zu jenen für Abbildung 5.6 bzw. 5.8 mit KAF statt AF Agenten durchgeführt. Die Simulationen wurden zweimal mit verschiedenen Kommunikationsfähigkeiten C_n für die MF Agenten wiederholt. In der ersten Variante fungierte kein MF als HIAF ($C_n = 0$), während in der zweiten Variante die MF als HIAF ($C_n = 1$) initialisiert wurden. Die Ergebnisse sind zusammen in Abbildung 6.1 aufgetragen. Zum Vergleich wurden zusätzlich die Ergebnisse der Simulationen mit AF Agenten aufgetragen. Die roten und

6. Kommunizierende, automatisierte Agenten

blauen Kurven wurden Analog zur Gleichung (5.10) mit den entsprechenden Werten für KAF erzeugt.

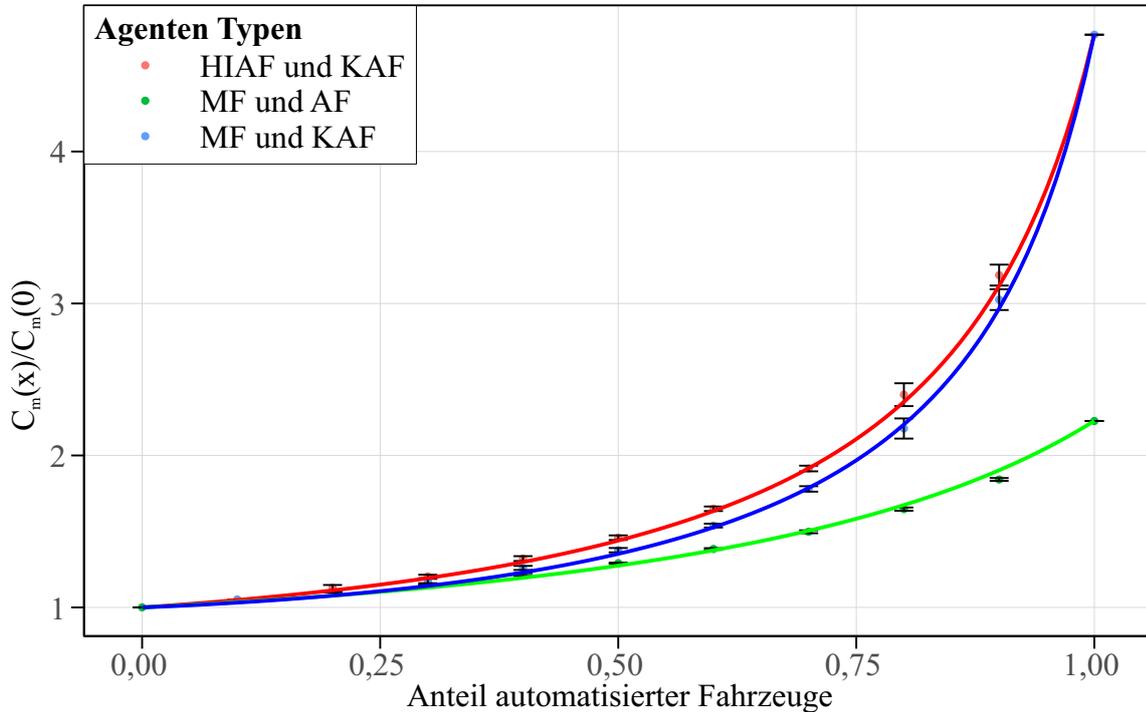


Abbildung 6.1: Die auf homogenen MF Agentenverkehr normierte Steigerung der Straßenkapazität in Abhängigkeit des Anteils der verschiedenen Agenten. Die roten Punkte zeigen die simulierten Ergebnisse für ein System mit KAF und HIAF, während die Kurve den theoretischen Verlauf zeigt. Die blaue Kurve zeigt den theoretischen Verlauf für den Fall, dass es keine HIAF gibt und die grüne Kurve für den Fall normaler AF, die ebenfalls nicht kommunizieren.

Wie aus der Abbildung hervorgeht, ist die potenzielle Straßenkapazitätssteigerung mit KAF signifikant höher als mit AF. Dies war zu erwarten, da KAF und AF beide nicht trödeln oder überreagieren und KAF zusätzlich eine geringere Reaktionszeit benötigen, was die zulässigen Mindestabstände verringert und einen höheren Fluss ermöglicht.

Der Einfluss von HIAF auf den Verkehr ist im Verhältnis dazu geringer, da diese dennoch trödeln, überreagieren und eine hohe Reaktionszeit haben. Zusätzlich dazu ist für den Effekt dieser Fahrzeuge die Reihenfolge, wie sie ins System gesetzt werden, entscheidend, denn ein HIAF, das nicht von einem KAF gefolgt wird, hat keinen Einfluss auf die Straßenkapazität. Dennoch steigern diese Fahrzeuge im Mittel über ein ganzes System betrachtet die Straßenkapazität um bis zu 6%, was in etwa $330 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ mehr ermöglicht, den Straßenabschnitt zu passieren, ohne dass der Verkehr die Freifluss-Phase verlässt.

Eine Betrachtung der Messpunkte im Verhältnis zu den Kurven zeigt, dass die Punkte für heterogenen KAF Verkehr öfters oberhalb der Kurven liegen, als dies bei den Punkten für heterogenen AF Verkehr der Fall ist. Da AF Agenten eine Reaktionszeit von 0,5s benötigen, müssen sie das Verhalten vorausfahrender Fahrzeuge für die nächsten 0,5s

prognostizieren und entsprechend reagieren. Wenn das vorausfahrende Fahrzeug bremst, muss der Agent also damit rechnen, dass das Fahrzeug für die nächsten 0,5s bremst und ebenfalls entsprechend bremsen, selbst wenn der Agent $n + 1$ nur in diesem einen Zeitschritt gebremst hat. Dies ist nur halb so lange wie bei MF Agenten, weswegen sie Bremswellen reduzieren und den Fluss steigern können. Jedoch beträgt dies bei KAF Agenten nur ein Fünftel dieser Zeit und sie können das Trödeln und Überreagieren von MF Agenten noch besser kompensieren.

Da für KAF nicht nur relevant ist, ob sie einem anderen KAF oder einem MF Agenten folgen, sondern auch, ob sie von einem KAF oder einem MF Agenten gefolgt werden, ist die Varianz der Messergebnisse deutlich größer als bei heterogenem AF Verkehr. Dies ist besonders für Durchdringungsraten von 0,8 und 0,9 KAF der Fall. Bei diesen Werten ist der Verkehr durch die KAF bereits so homogenisiert, dass die verschiedenen Simulationsdurchläufe sich in Systeme aufteilen lassen, in denen es zu einem Übergang aus der Freifluss-Phase kommt und solche, in denen dies nicht der Fall ist. Beide Gruppierungen variieren dann zusätzlich um ihre Mittelwerte aufgrund der unterschiedlich starken Einflüsse der MF Agenten entsprechend der Größe ihrer Konvois. Sollten in einem Durchlauf in einem Bereich des Systems mehr MF Agenten einander folgen als in anderen Instanzen, ist in diesem Durchlauf der Fluss geringer, unabhängig davon, ob sich das System insgesamt im Freifluss befindet oder nicht.

Zuletzt sei angemerkt, dass Messwerte aller drei Kurven bei 10 % in etwa gleich hoch sind. Die Messpunkte der grünen und blauen Kurven bleiben sogar bis etwa 30 % gleich auf. Dies wurde auch in [12, 25, 30] beobachtet und kann durch die zufällige Verteilung der automatisierten Fahrzeuge im System erklärt werden. Bei solch niedrigen Durchdringungsraten ist die Chance, dass ein KAF einem anderen KAF (bzw. HIAF) folgt, relativ gering, weswegen die meisten KAF Agenten wie AF Agenten operieren und daher einen ähnlichen Einfluss auf die Straßenkapazität haben.

Wie zum Abschluss des vorherigen Kapitels 6.2.1 erwähnt, wurde δ_n^t so gewählt, dass gerade keine Unfälle mehr möglich sind. In der Realität muss dieser Wert voraussichtlich jedoch größer gewählt werden, da die Reaktionszeiten von Menschen fluktuieren und oft auch die in diesem Modell für alle angenommene eine Sekunde überschreiten können. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf homogenen KAF oder AF Agentenverkehr, was bedeutet, dass die Steigerung der Kurve lediglich etwas flacher zu Beginn und steiler zum Schluss verlaufen würde. Erst wenn δ_n^t insgesamt einen Wert von 14 (bzw. 9) erreichen oder überschreiten würde, wäre die Fahrzeugfolgezeit von KAF (bzw. AF) Agenten höher als von MF Agenten. In diesem Fall wäre es möglich, dass der Einfluss von KAF bzw. AF Agenten auf heterogenen Verkehr bei geringen Durchdringungsraten sich zunächst negativ auf die Straßenkapazität auswirkt. Ähnliche Ergebnisse wurden bereits in vorherigen Modellen gefunden [8–11] und zeigen, dass die Mensch-Maschine-Interaktion das wichtigste Problem für die Einführung von KAF und AF in realem Verkehr darstellt.

Zusätzlich konnte dieses Modell auch zeigen, dass die Mensch-Maschinen-Interaktion nicht nur wichtig für die Effizienz des heterogenen Flusses ist, sondern sich auch maßgeblich darauf auswirkt, wie sicher heterogener Verkehr in Zukunft sein wird.

6.3.1 Erzeugung von Fahrzeugplatoons

Wie bereits erwähnt wurde, variiert der Fluss eines gegebenen Systems mit einer heterogenen Verteilung von MF und KAF oder AF so stark, dass sich zwei Instanzen mit der gleichen Dichte in unterschiedlichen Zuständen befinden können. Als Vereinfachung wird im Folgenden (K)AF verwendet, wenn etwas sowohl auf AF als auch KAF zutrifft. Um zu zeigen, wie sich die Straßenkapazität ändert, wenn feste (K)AF Platoons erstellt werden, wurden weitere Simulationen bei einer Durchdringungsrate von 0,5 für die (K)AF durchgeführt und sind in Abbildung 6.2 aufgetragen. Jede Simulation wurde dabei 20 mal wiederholt. Aus der daraus resultierenden Standardabweichung lässt sich ableiten, welchen Einfluss die Verteilung der Agenten auf die Straßenkapazität hat.

In diesen Simulationen wurden die (K)AF nicht zufällig auf das System verteilt, sondern stattdessen in einer vorgegebenen Ordnung im System initialisiert. Für eine Platoonlänge von 1 beispielsweise wurden die MF und (K)AF stets abwechselnd initialisiert. Für eine Platoonlänge von 10 wurden 10 (K)AF nacheinander initialisiert gefolgt von 10 MF und so weiter. Die Straßenkapazität bei einer Platoonlänge von 0 zeigt dabei die Ergebnisse für den bisher betrachteten Fall, in welchem keine feste Platoonlänge vorgegeben wurde und die Fahrzeuge zufällig verteilt wurden.

Wie in der Abbildung 6.2 zu sehen ist, konnten die Ergebnisse gut durch den funktionalen Zusammenhang

$$C(P) = C_0 - C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot P} \quad (6.3)$$

genähert werden. Dabei ist P die Platoonlänge und C_0, C_1, C_2 sind Kalibrierungsparameter. Der Parameter C_0 ist dabei von besonderem Interesse, da er angibt, wie hoch die Straßenkapazität $C(P)$ für eine hinreichend große Platoonlänge ansteigt. Diese Werte sind $C_0 = 3400 \pm 8 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ für KAF und $C_0 = 2873 \pm 5 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ für AF. Für die Platoonlänge von 0, welche eine zufällige Verteilung der (K)AF auf das System repräsentiert, wurden hingegen Straßenkapazitäten von zirka $2898 \pm 35 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ für KAF und $2732 \pm 15 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ für AF simuliert. In beiden Fällen steigt die Straßenkapazität also durch eine Organisation des Systems an. Dies ist jedoch nicht direkt der Fall. Zunächst fällt die Straßenkapazität bei einer Steigerung der Platoonlänge von $P = 0$ auf $P = 1$ stark ab. Dies liegt daran, dass es für jedes (K)AF eine gewisse Wahrscheinlichkeit gibt, einem weiteren (K)AF zu folgen. Die mittlere Platoonlänge ist somit für eine Durchdringungsrate von 0,5 höher als $P = 1$, was sich auf die Straßenkapazität überträgt.

Die Standardabweichungen der beiden Werte verschwinden für $P = 0$ und die meisten höheren Werte vollständig, was zeigt, dass die Schwankungen in Abbildung 6.2 durch die zufällige Platoon-Verteilung im System entstehen. Lediglich in einigen Fällen, während die Funktion noch steigt, liegt eine nicht verschwindende Standardabweichung vor, wenn der maximale Fluss zwischen zwei diskretisierten Dichten liegt. Zudem kann man

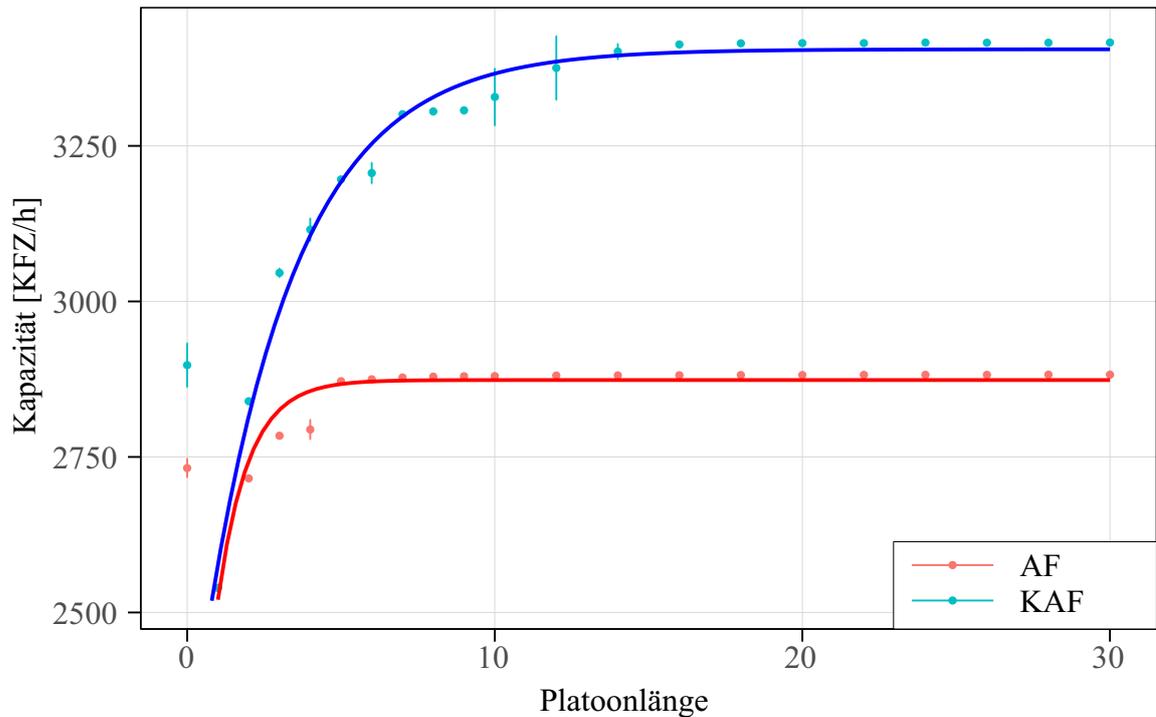


Abbildung 6.2: Straßenkapazität in Abhängigkeit der vorgegebenen Länge von AF (rot) bzw. KAF (blau) Platoons. Die Punkte geben die Simulationsergebnisse inklusive Standardabweichung an, während die Kurven die gefitteten Funktionen wiedergeben.

in Abbildung 6.2 sehen, dass die mögliche Kapazitätssteigerung durch KAF deutlich höher als durch AF ist. Dies war zu erwarten, da für KAF nicht nur relevant ist, was für einem Typ von Fahrzeug sie folgen, sondern auch von was für einem Typ von Fahrzeug sie gefolgt werden. Platoons von diesen Fahrzeugen bringen somit einen höheren Straßenkapazitätsgewinn mit sich, da auch das vorausfahrende Fahrzeug einen geringeren Sicherheitsabstand verwenden kann, wenn es von einem KAF gefolgt wird.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse gelten ausschließlich für einspurigen Verkehr. Wie gerade gezeigt wurde, sind die Ergebnisse davon abhängig, in welcher Reihenfolge die Agenten im System erzeugt werden. Im folgenden Kapitel 7 werden daher Regeln zum Spurwechseln eingeführt, durch die Simulation mehrspurigen Verkehrs möglich ist, in welchem die Fahrzeuge ihre Reihenfolge selbst ändern können.

7

Mehrspuriger Verkehr

Die bisherigen Simulationen und Modellierungen beschränkten sich auf einspurigen Verkehr. Wie in den letzten Kapiteln 5 und 6 gezeigt wurde, hat dies zusammen mit den periodischen Randbedingungen den Nachteil, dass (K)AF und MF ihre Anordnung im System nicht ändern können. Wie gezeigt wurde, ist die Mensch-Maschine Interaktion maßgeblich für den Einfluss von (K)AF auf den heterogenen Verkehr. Für ein (K)AF ist es effizienter einem anderen (K)AF zu folgen, da diese dann einen niedrigeren Sicherheitsabstand zueinander benötigen. Wenn die initiale, zufällig verteilte Anordnung nicht optimal ist, hat dies daher negative Auswirkungen auf den Fluss und kann (im schlimmsten Fall) sogar auf den Übergang des Flusses aus der Freifluss-Phase hinausführen, auch wenn die Dichte im System bei gegebener Durchdringungsrate eigentlich noch zu gering dafür ist.

In einem mehrspurigen System wäre es nun denkbar, dass die (K)AF so die Spuren wechseln, dass sie öfter einem anderen (K)AF folgen. Dies würde die Anordnung effizienter gestalten und den (K)AF erlauben, den Verkehrsfluss weiter zu steigern. Andererseits müssen (K)AF einen ZZS verwenden, wenn sie einem MF folgen. Für MF auf der anderen Spur könnte dieser ZZS jedoch wie eine größere Lücke aussehen, in welche sie die Spur wechseln können. Dadurch würden sie die (K)AF zum Abbremsen zwingen, damit diese wieder einen ausreichenden Sicherheitsabstand zum neuen vorausfahrendem MF einhalten. Diese neue Lücke könnte dann für den nächsten MF wie eine ausreichend große Lücke für einen Spurwechsel aussehen, wobei das folgende (K)AF nun zusätzlich auch noch langsamer ist, was einen Spurwechsel weiter erleichtert. Die Mensch-Maschine Interaktion hat folglich auch in mehrspurigen Systemen einen großen Einfluss auf die potenziellen Auswirkungen heterogenen Verkehrs [12].

Im folgenden Kapitel werden daher Regeln für Spurwechsel sowohl für MF als auch für (K)AF vorgestellt, mithilfe welcher im Anschluss die Ergebnisse von mehrspurigen Simulationen analysiert werden.

7.1 Spurwechselregeln

Da das in den vorherigen Kapiteln vorgestellte Modell auf den Regeln von Lee et al. bzw. Pottmeier et al. basiert, ist ein logischer erster Schritt zur Erstellung von Spurwechselregeln die Betrachtung jener Regeln, die für diese Modelle entwickelt wurden, um mehrspurige Systeme simulieren zu können. Der erste Satz von Regeln wurde von Pottmeier et al. in [72] entwickelt und definiert, wie Fahrzeuge in einem symmetrischen Modell die Spuren wechseln können. Symmetrisch bedeutet dabei, dass beide Spuren gleichberechtigt sind und es zum Beispiel kein Rechtsfahrgebot gibt, wie es in Deutschland der Fall ist [81]. Später wurden dann von Habel et al. in [88] Regeln für ein asymmetrisches Modell, in welchem es ein Rechtsfahrgebot gibt, vorgestellt.

Auch wenn es in den meisten Ländern ein Rechtsfahrgebot gibt, wird sich im Folgenden zunächst auf ein symmetrisches Modell konzentriert, da es in dem hier vorgestellten Modell weder LKW, welche eine Spur bevorzugen würden, noch Auf- oder Abfahrten, welche nur an einer Spur angeschlossen sind, gibt. Durch symmetrische Regeln können bereits die wichtigsten empirischen Verkehrsbobachtungen in mehrspurigem Verkehr reproduziert werden, wie im Laufe des folgenden Unterkapitels gezeigt wird. Auch wurde in [89] bereits gezeigt, dass es bei symmetrischen und asymmetrischen Spurwechseln keinen wichtigen Unterschied in den Einschätzungen der Fahrer gibt, ob ihr Spurwechsel sicher oder unsicher ist. Dies wäre wichtig für die Mensch-Maschine-Interaktion. Die Gleichungen der Spurwechselregeln für menschliche Autofahrer, die in [72] präsentiert und im Folgenden größtenteils adaptiert wurden, berücksichtigen die asymmetrischen Regeln daher nicht und reproduzieren zunächst nur symmetrische Spurwechselregeln. Jedoch führte Habel et al. einen geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand für Spurwechsel ein, welcher mit in die Spurwechselregeln integriert werden soll.

Bevor Spurwechselregeln eingeführt werden können, muss jedoch die Nomenklatur für zweispurige Systeme definiert und eine Änderung an der Bestimmung der als sicher geschätzten Geschwindigkeit \tilde{c}_n^{t+1} erläutert werden.

7.1.1 Nomenklatur für zweispurige Systeme

Bei mehrspurigen Systemen muss jeder Agent n viele verschiedene Agenten berücksichtigen. Zum Beispiel gibt es neben dem vorausfahrenden Agenten $n + 1$ auch einen

vorausfahrenden Agenten $n + 1$ auf der Nebenspur. Daher wird ein zusätzlicher Index λ eingeführt. Dieser beschreibt die Spur des Agenten, während $\lambda + 1$ die andere Spur beschreibt, auf welche getestet wird, ob die Spur gewechselt werden soll. Damit wird jeder Agent durch n, λ identifiziert anstatt nur durch n . Betrachten wir zum Beispiel den Agenten n auf einer Spur. Dessen vorausfahrender Agent ist dann $\lambda, n + 1$, während der Agent welcher vor ihm fahren würde, wenn er in diesem Zeitschritt die Spur wechseln würde, $\lambda + 1, n + 1$ ist. Zur Veranschaulichung ist eine Skizze einer zweispurigen Konfiguration in Abbildung 7.1 aufgetragen.

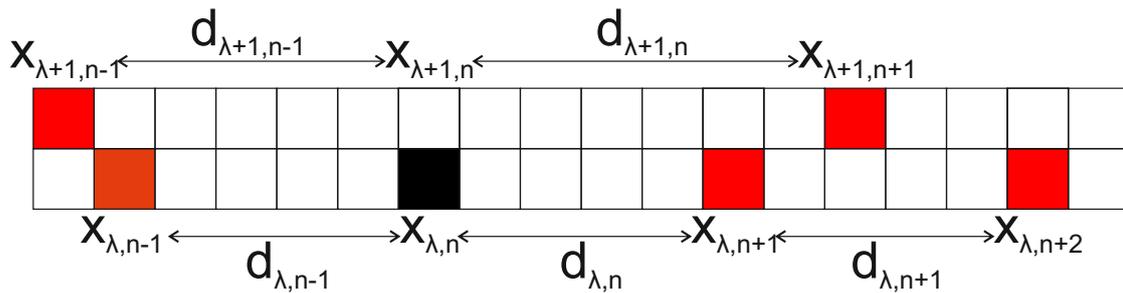


Abbildung 7.1: Skizze einer Fahrzeugkonfiguration in einem zweispurigen Zellularautomatenmodell. Die schwarz gefüllte Zelle beschreibt eine vom Fahrzeug n belegte Zelle, während die roten Zellen von den jeweils vorausfahrenden oder folgenden Fahrzeugen auf einem der beiden Spuren belegt sind.

7.1.2 Änderung der als sicher geschätzten Geschwindigkeit

Fahrer auf mehrspurigen Straßenabschnitten müssen in Deutschland ein zusätzliches Gesetz berücksichtigen, wenn diese an einem Stau vorbeifahren. Nach [81] dürfen Fahrer nur mit einer leicht höheren Geschwindigkeit als der Fahrer auf der Nebenspur an einem Stau auf der Nebenspur vorbeifahren, um das Unfallrisiko aufgrund von Fahrzeugen, welche die Spur aus dem Stau heraus wechseln, zu reduzieren. Dies wird nun in diesem Modell relevant, da die Agenten aufgrund der reduzierten Zeitschritt- und Zellenlängen eine verringerte Beschleunigungsstrecke benötigen, wie in Kapitel 4.1 bereits erläutert wurde. Diese verringerte Beschleunigungsstrecke bedeutet, dass die Agenten in einer vergleichbar langen Strecke eine höhere Geschwindigkeit erreichen. Da die zeitliche Beschleunigung gleich bleibt, hat dies nur einen geringen Effekt auf den Fluss, welcher durch Änderungen im Trödelverhalten in Kapitel 4.2 kompensiert werden konnte. Ein räumlicher Unterschied wirkt sich im zweispurigen System jedoch stark auf die Korrelation zwischen den Spuren aus. In einem System mit symmetrischen Spurwechselregeln und ohne Einflüsse, welche eine Spur anders betreffen als die andere Spur, sollten die beiden Spuren, bis auf kleinere lokale Schwankungen, dasselbe Verhalten im Fluss und in der Geschwindigkeit vorweisen. Durch die Änderung der Beschleunigungsstrecke ist es jedoch den Agenten auf der nicht gestauten Spur möglich

schneller zu fahren als dies in den ursprünglichen Modellen der Fall war. Hierdurch sind diese oft zu schnell, um es den Agenten auf der Nebenspur zu erlauben auf die schneller fahrende Spur zu wechseln. Dies entkoppelt die beiden Spuren und führt zu zu großen Unterschieden im Fluss. Daher muss hier das zuvor erwähnte Gesetz explizit, durch

$$C_n^{t+1} = \begin{cases} \tilde{c}_n^{t+1}, & \text{wenn } v_{\lambda+1,n+1}^t \geq 20 \\ \max(\tilde{c}_n^{t+1}, 30), & \text{sonst,} \end{cases} \quad (7.1)$$

direkt nach der Bestimmung von \tilde{c}_n^{t+1} entsprechend Gleichung (4.8) berücksichtigt werden. Mit dieser Änderung können nun symmetrische Spurwechselregeln, durch welche es möglich ist realistischen zweispurigen Straßenverkehr zu reproduzieren, im Folgenden Unterkapitel definiert werden.

7.1.3 Grundlagen für Spurwechsel

Der Prozess der Spurwechsel lässt sich in drei Schritte aufteilen. Im ersten Schritt wird überprüft, ob ein Spurwechsel erwünscht ist und im zweiten, ob er möglich ist. Nur wenn er erwünscht und möglich ist, wird im dritten Schritt die Spur gewechselt.

Empirische Betrachtungen haben dabei gezeigt, dass der Spurwechsel von der initialen Intention bis zum vollständigen Wechsel im Mittel etwa 3s dauert [31, 72, 90]. In Zellularautomatenmodellen hingegen werden sie aufgrund der Diskretisierung des Raumes und der Zeit in einem Zeitschritt (1s) durchgeführt. Pottmeier et al. versuchten die 3 Sekunden in ihren Regeln in [72] zu berücksichtigen, konnten dafür jedoch nicht die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Sicherheitsabstandes beim Spurwechseln berücksichtigen.

Die Dauer eines Spurwechsels ist hauptsächlich für Sicherheitsaspekte relevant. So kann sich die Verkehrssituation innerhalb der drei Sekunden so stark ändern, dass ein ursprünglich sicherer Spurwechsel unsicher wird. Führt der Fahrer den Spurwechsel weiter durch, kann es dann zu einem Unfall kommen. In diesem, wie auch anderen Zellularautomatenmodellen werden Unfälle nicht reproduziert, sodass die drei Sekunden hier nicht direkt berücksichtigt werden müssen. Wichtig ist dabei lediglich, dass Fahrer nur die Spur wechseln können, wenn die Situation für mindestens 3s sicher ist. Dies reduziert die Anzahl an möglichen Spurwechseln. Das Ziel von Zellularautomatenmodellen ist es also, stattdessen die Spurwechselregeln so zu definieren, dass der Spurwechsel sicher ist und Spurwechsel so häufig wie empirisch beobachtet [90] durchgeführt werden.

Im Rahmen vom hier vorgestellten Modell könnten Agenten die Spur sogar alle 0,1s wechseln. Dies würde jedoch eine starke Steigerung der möglichen Spurwechsel, weit über die empirischen Befunde hinaus, und Missachtung der einen Sekunde mittlere

Reaktionszeit [68] bedeuten. Analog zu anderen Zellularautomatenmodellen dürfen die Agenten daher in diesem Modell die Spur nur alle 10 Zeitschritte, also in 1 s Intervallen, wechseln. Dies gilt auch für (K)AF, da auch wenn diese schneller reagieren können, der physikalische Prozess des Spurwechsels einige Zeit in Anspruch nimmt.

In den folgenden Unterkapiteln werden nun die Spurwechselregeln für verschiedene Fahrzeugtypen und heterogenen Verkehr definiert. Diese Regeln werden dann in der Simulation alle 10 Zeitschritte abgefragt und der Spurwechsel, wenn erwünscht und möglich, entsprechend durchgeführt, bevor der normale Zeitschritt mit Vorwärtsbewegungen berechnet wird. Dies erlaubt es folgenden Agenten direkt auf Spurwechsel zu reagieren, was der Überlegung entspricht, dass diese eigentlich 3 s Zeit haben sich auf die veränderte Situation anzupassen. Die Zeitschritte werden also in zwei Unterzeitschritte unterteilt, wie es in Zellularautomatenmodellen üblich ist [91].

7.1.4 Spurwechselregeln für menschlich gesteuerte Fahrzeuge

Im ersten Schritt eines Spurwechsels wird überprüft, ob dieser gewünscht ist. Dazu wird, entsprechend Gleichung (7.2), überprüft, ob die neue als sicher geschätzte Geschwindigkeit nach einem Spurwechsel größer wäre als aktuell. Der Parameter C_{improve}^n reguliert dabei, wie häufig die Spur gewechselt wird und wie groß die potenzielle Geschwindigkeitssteigerung sein muss, damit der Agent den Spurwechsel durchführt. Ohne diesen Parameter wäre es Agenten möglich, die Spur zu wechseln, um minimal schneller oder gleich schnell fahren zu können. Da ein Spurwechsel jedoch immer mit einem gewissen Aufwand und Risiko verbunden ist, wechseln Fahrer nicht für minimale Verbesserungen die Spur. Es ist zu erwarten, dass $C_{\text{improve}}^n > 0$ nötig ist, um realistische Spurwechselzahlen zu reproduzieren. Nur wenn Gleichung (7.2) erfüllt ist, gilt ein Spurwechsel als wünschenswert und es wird weiter überprüft, ob dieser auch möglich, also sicher, ist. Dazu müssen Gleichungen (7.3) bis (7.5) erfüllt sein. Die ersten beiden dieser Gleichungen stellen sicher, dass die Abstände zu den folgenden und vorausfahrenden Fahrzeugen auf der neuen Spur groß genug sind, damit keine Unfälle aufgrund des Spurwechsels geschehen. g_{change} und t_{change} sind dabei ein räumlicher und zeitlicher Sicherheitsabstand die so gewählt werden müssen, dass keine Unfälle auftreten und die Anzahl an Spurwechseln den empirischen Beobachtungen entsprechen.

Die vierte Gleichung (7.5) betrachtet die als sicher geschätzte Geschwindigkeit $\tilde{c}_{\lambda+1,n-1}^t$ des nachfolgenden Agenten auf der neuen Spur, wenn der betrachtete Agent n die Spur wechseln sollte. Dort wird also überprüft, dass der nachfolgende Agent nicht zu stark aufgrund des Spurwechslers abbremsten muss. C_{safe}^n ist also ebenfalls ein Sicherheitsparameter, welcher festlegt, wie stark der Agent n den neuen folgenden Agenten $\lambda + 1, n - 1$ ausbremsen darf, um die Spur zu wechseln.

$$\tilde{C}_{\lambda,n}^t < \tilde{C}_{\lambda+1,n}^t - C_{\text{improve}}^m \quad (7.2)$$

$$x_{\lambda+1,n+1}^t - x_{\lambda+1,n}^t - L > \max\left(g_{\text{change}}, v_{\lambda,n}^t \cdot t_{\text{change}}\right) \quad (7.3)$$

$$x_{\lambda+1,n}^t - x_{\lambda+1,n-1}^t - L > \max\left(g_{\text{change}}, v_{\lambda+1,n-1}^t \cdot t_{\text{change}}\right) \quad (7.4)$$

$$v_{\lambda+1,n-1}^t - C_{\text{safe}}^m \leq \tilde{c}_{\lambda+1,n-1}^t \quad (7.5)$$

Nur wenn der Agent alle vier Regeln erfüllt und der Zeitschritt ein Vielfaches von 10 ist, darf er die Spur wechseln. Nachdem ein Agent eine Spur gewechselt hat, darf er dann die folgenden $t_{\text{pause}} = 50$ Zeitschritte (entsprechend 5s) nicht erneut die Spur wechseln. Die gleiche Regel wurde auch in [92] verwendet und ist in der Lage, das ständige unrealistische Hin- und Herwechseln von einzelnen Agenten durch den sogenannten Ping-Pong Spurwechseleffekt zu reduzieren [78, 93, 94].

Durch diese Regeln kann nun homogener, menschlicher, zweispuriger Straßenverkehr simuliert werden. Wie in Kapitel 7.2.1 gezeigt wird, ist das Modell so bereits in der Lage, die wichtigsten empirischen Spurwechselverhalten zu reproduzieren. Damit auch automatisierter Fahrzeugverkehr simuliert werden kann, werden zunächst im folgenden Unterkapitel noch die Spurwechselregeln für (K)AF eingeführt.

7.1.5 Spurwechselregeln für automatisierte Fahrzeuge

Menschliche Fahrer entscheiden verschieden, ob sie die Spur wechseln können, abhängig davon, ob sie die Situation optimistisch oder pessimistisch einschätzen. Wenn sie optimistisch fahren, können sie entsprechend Gleichung (7.2) die Spur wechseln, während weniger als der nötige Sicherheitsabstand verbleibt. Außerdem bremsen sie für $C_{\text{safe}}^m > 0$ in Gleichung (7.5) oft beim Spurwechsel die neuen nachfolgenden Agenten aus, unabhängig davon wie sie die Situation einschätzen.

Beide Verhalten sind zwar in empirischen Daten dokumentiert [90], jedoch rechtlich eigentlich verboten ([81] in Deutschland). Automatisierte Fahrzeuge sollten dieses Verhalten nicht reproduzieren. Daher wird $C_{\text{safe}}^{\lambda+1,n} = 0$ gesetzt und Gleichungen (7.3),(7.4) werden mittels

$$x_{\lambda+1,n+1}^t - x_{\lambda+1,n}^t - L > S\left(v_{\lambda,n}^t, r_{\lambda,n}, v_{\lambda+1,n+1}^t\right), \quad (7.6)$$

$$x_{\lambda+1,n}^t - x_{\lambda+1,n-1}^t - L > S\left(v_{\lambda+1,n-1}^t, r_{\lambda+1,n-1}, v_{\lambda+1,n}^t\right) \quad (7.7)$$

so angepasst, dass sie stets den minimalen Sicherheitsabstand berücksichtigen. Dabei wird der Sicherheitsabstand $S\left(v_{\lambda,n}^t, r_{\lambda,n}, v_{\lambda,n+1}^t\right)$ mithilfe des diskreten Bremsweges in einem System mit endlichem Bremsvermögen, wie er in Gleichung (3.1) eingeführt

wurde, bestimmt zu

$$S(v_{\lambda,n}^t, r_{\lambda,n}, v_{\lambda,n+1}^t) = d_p(v_{\lambda,n+1}^t) - d_p(v_{\lambda,n}^t) - r_{\lambda,n} v_{\lambda,n}^t. \quad (7.8)$$

Des Weiteren muss auch bei Gleichung (7.2) berücksichtigt werden, dass autonome Fahrzeuge versuchen, die Verkehrssituation zu optimieren und daher bei deutlich geringeren Verbesserungen ihrer Situation bereits die Spur wechseln sollten. Aufgrund von Fahrkomfort für die Passagiere sollte die Verbesserung jedoch groß genug sein, um einen Spurwechsel zu rechtfertigen und daher wird $C_{\text{improve}}^n = 4$ anstatt 0 gewählt, was einer Verbesserung von mindestens $2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ entspricht.

Durch diese Regeländerungen kann nun theoretisch zweispuriger homogener AF und KAF Verkehr simuliert werden. Die Hauptfunktion von Spurwechseln ist jedoch die Synchronisierung der verschiedenen Spuren. Dies wäre in rein automatisierten Systemen nicht nötig, da kein Agent trödelt und es somit keine statistischen Schwankungen auf und zwischen den Spuren gibt. Da es in diesen Systemen ohne äußere Beschränkungen, wie zum Beispiel Auf- und Abfahrten, keinen Anreiz für einen Spurwechsel gibt, würde sich ein solches System wie zwei einspurige Systeme verhalten. Dies wird auch später in Abbildung 7.7 gezeigt, wo die Ergebnisse für ein- und zweispurige Systeme exakt übereinander liegen und in den gesamten Simulationen kein Spurwechsel registriert wurde. Die hier eingeführten Regeln für Spurwechsel sind daher nur in heterogenem Verkehr, wo MF und (K)AF Agenten gemischt werden, relevant. Um solche Systeme zu simulieren, müssen jedoch erst abweichende Regeln für (K)AF Agenten, welche hinter einen MF Agenten wechseln und anders herum, definiert werden.

7.1.6 Änderungen für heterogenen Verkehr

Wie auch bei einspurigem Verkehr ist es nicht zu erwarten, dass MF Agenten zusätzliche Rücksicht auf das veränderte Verhalten von automatisierten Fahrzeugen nehmen. Sie sollten daher $\tilde{c}_{\lambda+1,n-1}^t$ in Gleichung (7.5) bestimmen, als wäre der folgende Agent auf der neuen Spur ein MF Agent, auch wenn dieser eigentlich ein AF oder KAF Agent ist. Dies bedeutet, dass er den Optimismus des Agenten wie von einem Menschen berechnet und eine Reaktionszeit von $r_{\lambda+1,n-1} = 10$ ansetzt. (K)AF Agenten hingegen sollten die Situation stets korrekt einschätzen und die Eigenarten der MF Agenten berücksichtigen. Dazu sind zwei Unterschiede zu betrachten.

Zunächst einmal muss ein KAF Agent, welcher die Spur wechselt, betrachten, ob sich seine Reaktionszeit durch den Spurwechsel ändert. Sollte er aktuell einem anderen kommunizierenden Fahrzeug folgen, verwendet er eine Reaktionszeit von $r_n^t = 1$ sonst $r_n^t = 5$. Dies kann sich entsprechend dem neuen, vorausfahrenden Fahrzeug auf der

Zielspur auf 1 oder 5 verändern, je nachdem ob Fahrzeug $(\lambda + 1, n + 1)$ kommuniziert oder nicht.

Des Weiteren sollten (K)AF Agenten, welche hinter einen (bei KAF auch vor einen) MF Agenten wechseln, berücksichtigen, dass sie den ZZS entsprechend Gleichung (6.2) anwenden müssen, was Gleichung (7.6) gemäß

$$x_{\lambda+1,n+1}^t - x_{\lambda+1,n}^t - L > S(v_{\lambda,n}^t, r_{\lambda,n}, v_{\lambda+1,n+1}^t) + \delta_n^t \cdot v_{\lambda,n}^t \quad (7.9)$$

ändert.

7.2 Simulation von zweispurigem Verkehr

Wie auch bei der Einführung der Regeln, werden die Simulationen von zweispurigem Verkehr in mehreren Schritten durchgeführt. Zunächst wird in Unterkapitel 7.2.1 die Parameterwahl für die MF Agenten erläutert und anschließend gezeigt, dass empirische Ergebnisse reproduziert werden können. Anschließend wird im Unterkapitel 7.2.2 heterogener Verkehr bei einer Durchdringungsrate von 0,5 betrachtet, um den Einfluss von Spurwechseln zu betrachten. Danach werden in den Unterkapiteln 7.2.3 und 7.2.4 jeweils der Einfluss der Durchdringungsrate in heterogenem zweispurigem Verkehr auf die Spurwechselzahlen sowie die Straßenkapazität analysiert. Abschließend werden in Kapitel 7.2.5 noch einmal alle für empirischen Verkehr als relevant benannten Größen [32] für zweispurigen homogenen, menschlich gesteuerten Verkehr sowie der Einfluss von automatisierten Fahrzeugen auf diese betrachtet.

7.2.1 Homogener, menschlich gesteuerter Fahrzeugverkehr

Wie eingangs des Kapitels 4.3 erwähnt wurde, muss überprüft werden, ob die zwei Spuren des Systems den gleichen Verlauf im Fundamentaldiagramm zeigen und dieser gut vergleichbar mit jenem des einspurigen Verkehrs ist. Außerdem muss überprüft werden, ob die Spurwechselzahlen in Abhängigkeit der Dichte mit jenen des empirisch beobachteten Verkehrs vergleichbar sind. Wenn dies gegeben ist, kann das Modell homogenen, rein menschlich gesteuerten, zweispurigen Straßenverkehr realistisch reproduzieren und für nachfolgende Untersuchungen verwendet werden.

Dazu gilt es zunächst, die vier nötigen Parameter C_{improve}^n , g_{change} , t_{change} , und C_{safe}^n zu kalibrieren. C_{improve}^n reguliert, wie stark sich ein Spurwechsel für einen MF Agenten lohnen muss, also um wie viel er seine Geschwindigkeit auf der neuen Spur voraussichtlich steigern kann. Dieser Anreiz liegt bei den historischen Modellen bei $C_{\text{improve}}^n = 1$ [72, 88]. Da die Regel in beiden historischen sowie in dem hier vorgestellten Modell identisch

ist, sollte auch der Wert gleich groß sein, woraus $C_{\text{improve}}^n = 10$ folgt. Gleichungen (7.3) und (7.4) hingegen mussten angepasst werden, da aus einer reduzierten Zeitschrittlänge eine veränderte Bremsstrecke folgt, wie in Kapitel 4.1 erläutert wurde. Der Wert von t_{change} wurde in [95] als Kalibrationsparameter zwischen 1,8s und 3s gewählt, sodass die Anzahl an Spurwechseln den empirischen Werten entspricht. Aus einer analogen Analyse folgt, dass $t_{\text{change}} = 2,8\text{s}$ entsprechende empirische Werte gut reproduziert, wie anschließend gezeigt wird. Der Parameter $g_{\text{change}} = 300$ hingegen wurde möglichst gering gewählt, ohne dass Unfälle bei geringen Geschwindigkeiten auftreten. Der letzte Parameter C_{safe}^n legt fest, wie stark MF Agenten die neuen folgenden Agenten auf der Zielspur ausbremsen dürfen, um einen Spurwechsel zu ermöglichen. In den historischen Modellen, in welchen dieser Parameter verwendet wurde, wurde er stets zu $C_{\text{safe}}^n = 1 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ kalibriert [72, 78, 88]. Dies würde in dem hier vorgestellten Modell einem Wert von $C_{\text{safe}}^n = 10 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}}$ entsprechen. Da die Bremswege jedoch länger geworden sind, bedeutet dies im Umkehrschluss, dass eine geringere Lücke zu einer stärkeren Abbremsung führen muss. Daher ist zu erwarten, dass dieser Parameter leicht höher gewählt werden musste. Simulationen zeigten hier, dass die Ergebnisse mit $C_{\text{safe}}^n = 14$ gut den empirischen Daten und anderen Modellen entsprechen.

Mithilfe dieser Parameter kann nun zweispuriger homogener MF Verkehr simuliert werden. Die Ergebnisse einer solchen Simulation wurden für Abbildung 7.2 in Form eines Fundamentaldiagramms analog zu jenem in Kapitel 4.3.6 erstellt. In derselben Simulation wurde dabei jedes Fahrzeug, das seine Spur wechselte, registriert und die Anzahl an Spurwechseln pro km in Abhängigkeit der Dichte in Abbildung 7.3 aufgetragen.

Der Fluss für das zweispurige System hat einen sehr ähnlichen Verlauf zum einspurigen. Lediglich zu Beginn der synchronisierten und der gestauten Phase gibt es leichte Unterschiede. Die Differenz zu Beginn der synchronisierten Phase entsteht durch Agenten, welche ihre Situation durch Spurwechsel leicht verbessern können. Da aufgrund der Synchronisierung die Situation auf der anderen Spur nicht viel besser ist und der nachfolgende Agent auf der neuen Spur gegebenenfalls noch ausgebremst wird, ist der Einfluss sehr gering und nimmt bei steigender Synchronisierung schnell ab.

In der gestauten Phase hingegen liegt der Fluss leicht unterhalb jener des einspurigen Modells aufgrund der Änderung, wie sie in Kapitel 7.1.2 erläutert wurde. Agenten auf beiden Spuren müssen ab und zu abbremsen, auch wenn sie aufgrund ihres vorausfahrenden Fahrzeuges eigentlich schneller fahren dürften, um nicht zu schnell an der langsameren Nebenspur vorbeizufahren. Dieser Einfluss reduziert den Fluss am meisten bei einer Dichte von $\rho = 50 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$. In diesem Fall sinkt der Fluss im Mittel um circa 2%, was einer Reduzierung um $J \approx 24 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ entspricht. Die mittlere Geschwindigkeit ändert sich durch das vorsichtigeres Vorbeifahren an einem Stau auf der anderen Spur im Mittel um $v \approx 0,9 \frac{\text{Zellen}}{\text{Zeitschritt}} = 0,486 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Diese Änderung ist weniger als ein Zehntel der Auflösungsgenauigkeit von historischen Modellen und somit vernachlässigbar gering.

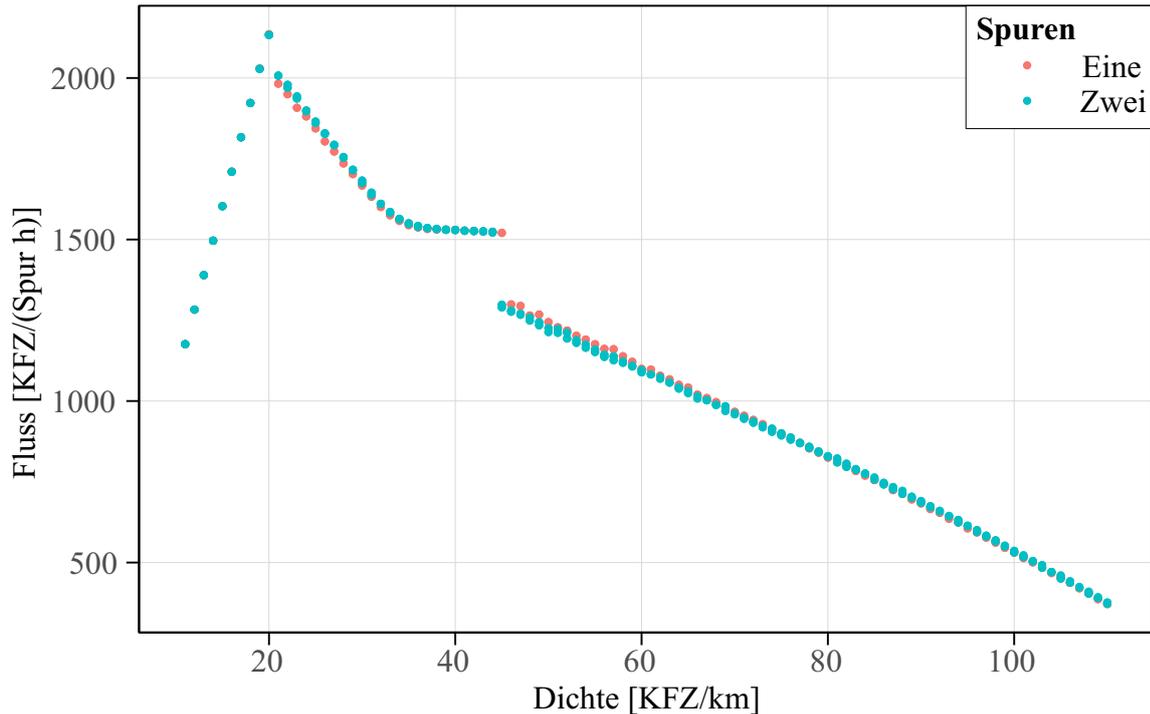


Abbildung 7.2: Verkehrsfluss über Dichte für das einspurige Modell (rot) und das zweispurige Modell (blau).

Der letzte Unterschied ist im Übergang von der synchronisierten zur gestauten Phase zu sehen. Hier geht das zweispurige Modell bei einer leicht verringerten Dichte, im Gegensatz zum einspurigen Modell, zur nächsten Phase über. Dies liegt daran, dass Agenten durch ihren Spurwechsel das neue folgende Auto ausbremsen dürfen, was das einspurige Verhalten leicht stört und zu einem früheren Übergang führt. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits in den Modellen, auf welchen das hier vorgestellte basiert, festgestellt [72, 95].

Die Spurwechselzahlen aufgetragen über die Dichte in Abbildung 7.3 lassen sich gut mit den Ergebnissen historischer Modellen für symmetrische [72] und asymmetrische Spurwechsel [95] sowie empirischen Werten [90] vergleichen.

Bei geringen Dichten treten nur wenige Spurwechsel auf, da die Agenten wenig wechselwirken und es somit nur selten einen ausreichenden Anreiz zum Spurwechsel gibt. Jedoch steigt dieser Anreiz bei steigender Dichte schnell an. Ein ähnliches Verhalten wird auch in den empirischen Daten und beim asymmetrischen Spurwechsel beobachtet. Lediglich die symmetrischen Regeln können dieses Verhalten nicht reproduzieren, da dort der Spurwechsel für 3 s in Folge gewünscht und sicher sein muss, was sehr viel seltener auftritt als für nur 1 s.

Die Spurwechselzahl steigt bis zu einem Maximum von zirka $600 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}\cdot\text{h}}$ zum Ende der Freifluss-Phase, bei einer Dichte von $\rho = 20 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$, hin. Auch dies wird empirisch [90]

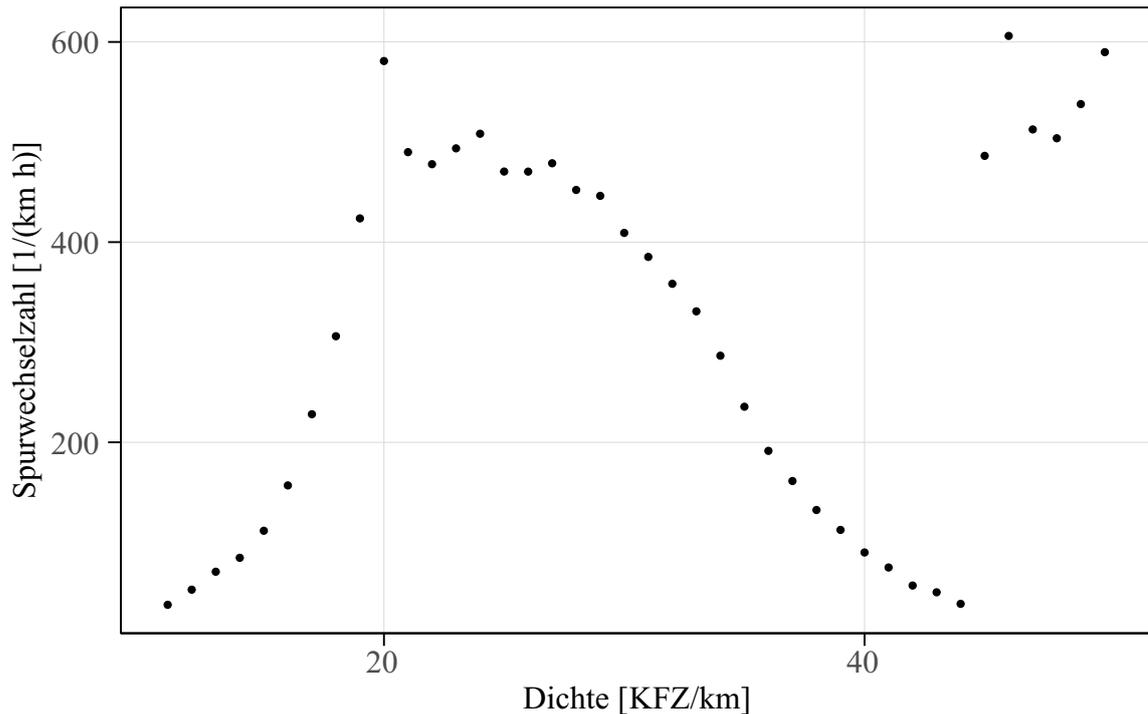


Abbildung 7.3: Spurwechselzahl in Abhängigkeit der Dichte.

sowie in dem symmetrischen Modell aus [72] mit nur leichten Variationen beobachtet. Anschließend geht das System in die synchronisierte Phase über und die Anzahl der Spurwechsel pro Kilometer und Stunde fällt bis zum Ende dieser Phase ab. Empirisch und im asymmetrischen Modell werden in diesem Bereich zwischen $70 \frac{\text{Spurwechsel}}{\text{km} \cdot \text{h}}$ bei einer Dichte von $40 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ beobachtet [90, 95]. Das hier vorgestellte Modell liegt mit im Mittel $90 \frac{\text{Spurwechsel}}{\text{km} \cdot \text{h}}$ ebenfalls in diesem Bereich, hat jedoch eine verringerte Varianz, da die Synchronisierung in diesem Modell stärker ist (siehe Kapitel 4.3.5). Das symmetrische Modell, vorgestellt in [72], kann diesen Verlauf lediglich qualitativ, nicht jedoch quantitativ wiedergeben.

Sowohl das hier vorgestellte, als auch die beiden historischen [72, 95] Modelle sind jedoch nicht in der Lage, die empirischen Spurwechselzahlen der gestauten Phase wiederzugeben. Empirisch sinkt die Spurwechselzahl monoton weiter, auch nachdem das System von der synchronisierten in die gestaute Phase übergegangen ist [90]. Alle zuvor erwähnten Zellularautomatenmodelle reproduzieren hier jedoch einen abrupten Anstieg in den Spurwechselzahlen, welcher sogar jenseits des Maximums der Freifluss-Phase liegt. Dieses Verhalten entsteht durch die periodischen Randbedingungen, in welchen sich das System in Bereiche des Freifluss- und des gestauten Zustandes aufteilt, anstatt synchronisierten Fluss zu bilden [31].

Außer diesem systematischen Fehler ist das Modell jedoch in der Lage, empirische Werte sowohl qualitativ als auch quantitativ zu reproduzieren. Dass dies auch für die anderen,

in Kapitel 4.3 betrachteten Größen gilt, wird an späterer Stelle in Kapitel 7.2.5, wo der Einfluss von (K)AF auf diese Größen analysiert wird, gezeigt. Somit sind nach [32] alle Bedingungen erfüllt, um empirischen Verkehr mithilfe des hier vorgestellten Modells zu simulieren. Im nächsten Schritt kann nun der Einfluss von (K)AF auf den Verkehr betrachtet werden.

7.2.2 Verkehrsfluss im heterogenen, zweispurigen Verkehr

Zur Simulation von heterogenem, zweispurigen Verkehr wurde, im Vergleich zu vorherigen Fundamentaldiagramm erstellenden Simulationen, die Relaxationszeit T_{relax} verdoppelt. Wie in Kapitel 6.3.1 gezeigt wurde, hängt der maximale Fluss von der Verteilung der (K)AF im System ab. Im Vergleich zu vorherigen Simulationen, in welchen das System also lediglich relaxiert werden musste, um sicherzustellen, dass das System nicht mehr von der anfänglichen Positionierung der Fahrzeuge und ihrer Startgeschwindigkeit abhängt, muss nun des Weiteren noch sichergestellt sein, dass die (K)AF Agenten ausreichend Zeit haben, ihre Konfiguration so zu ändern, dass die vorausfahrenden (und für KAF Agenten auch die folgenden) Fahrzeuge möglichst ebenfalls (K)AF sind. Wie im Folgenden zu sehen ist, reicht eine Verdopplung von T_{relax} nicht immer aus. Jedoch wird auch gezeigt, dass eine weitere Erhöhung von T_{relax} keinen weiteren Effekt hat.

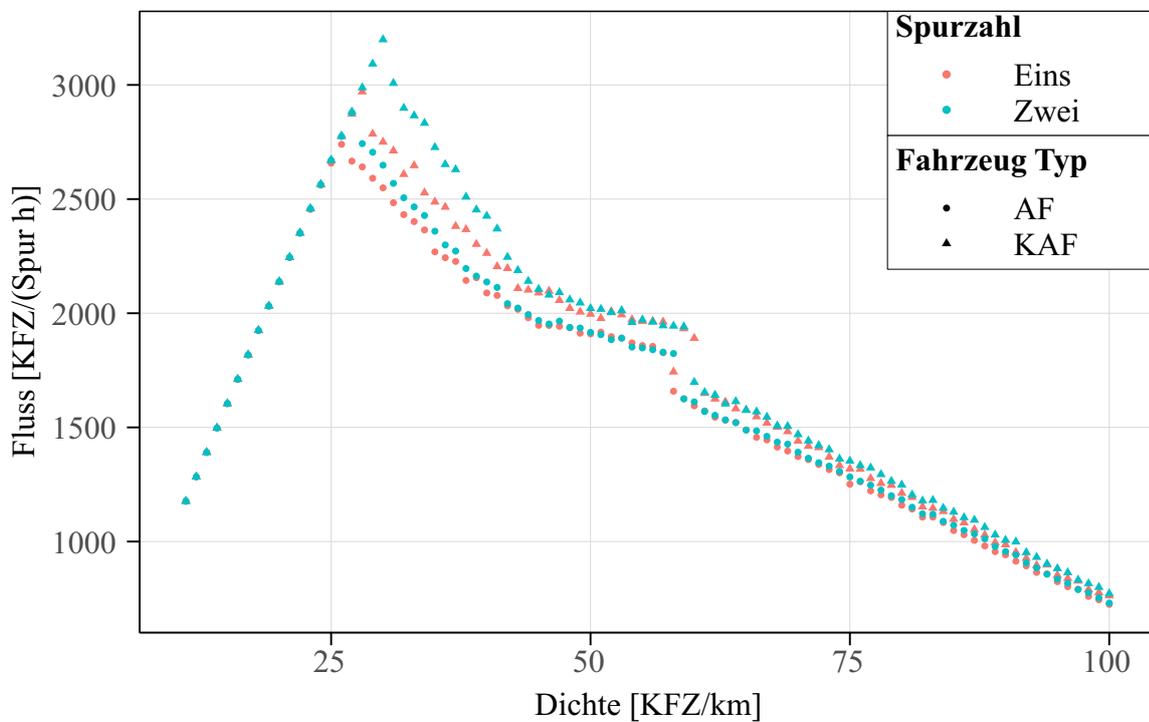


Abbildung 7.4: Verkehrsfluss über Dichte für das einspurige Modell (rot) und das zweispurige Modell (blau) bei einem Autonomanteil von 0,5. Die runden Messpunkte repräsentieren heterogenen AF und die dreieckigen KAF Verkehr.

Wie in Abbildung 7.4 zu sehen ist, variieren die Messpunkte der zweispurigen Simulationen weniger und das Maximum des Flusses ist höher als bei den einspurigen Simulationen. Letzteres war zu erwarten, da die (K)AF Agenten in zweispurigen Simulationen so die Spur wechseln können, dass sie wahrscheinlicher einem anderen (K)AF folgen können. Dies verringert auch die Schwankung zwischen den Messpunkten, ist jedoch nicht in der Lage, sie vollständig zu eliminieren. Wie in [14, 46, 96] beschrieben wird, gibt es im Verkehr eine Wahrscheinlichkeit p_{break} , dass es innerhalb einer Zeit T_{break} zu einem Übergang des System raus aus der Freifluss-Phase kommt. Diese Wahrscheinlichkeit p_{break} hängt nun nicht nur von der Anzahl an (K)AF sondern auch von deren Verteilung im System ab. So kann es mit der Wahrscheinlichkeit p_{break} zu Bremswellen im System zum Zeitpunkt T_{break} kommen, auch wenn diese eigentlich bei der gegebenen Durchdringungsrate von (K)AF noch nicht eintreten sollten, solange $T_{\text{break}} < T_{\text{relax}}$ gilt. Die Wahrscheinlichkeit p_{break} steigt bei einem länger betrachteten Zeitraum T_{break} , weshalb eine Steigerung von T_{relax} keine weitere Reduzierung der Schwankungen erzeugt. Dies zeigt sich vor allem im maximalen Fluss des heterogenen Verkehrs mit KAF. Die funktionale Anpassung in Kapitel 6.3.1 für einspurigen Verkehr, in welchem die Fahrzeuge in Platoons organisiert wurden, erzeugte einen maximalen Fluss von $C_0 = 3400 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ für hinreichend große Platoons. In Abbildung 7.4 erreicht der heterogene Verkehr mit KAF jedoch lediglich $J_{\text{max}} \approx 3200 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$. Dieser maximale Fluss entspricht gut $C(5) \approx 3200 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ in Gleichung (6.3). Eine mittlere Platoonlänge von 5 KAF entspricht jedoch nicht dem Optimum, was das System mit einer Platoonlänge von zirka 12 erreichen könnte. Dies zeigt, dass die KAF sich nicht vollständig organisieren können, ehe p_{break} eintritt. Dies entspricht einer Fahrzeugfolgewahrscheinlichkeit für KAF, einem weiteren KAF zu folgen, von zirka $p_{\text{follow}} = 0,8$. Das Maximum wird hingegen erst (näherungsweise) bei circa einer Platoonlänge von $P = 18$ erreicht, was einer Fahrzeugfolgewahrscheinlichkeit von zirka $p_{\text{follow}} = 0,93$ entspricht. Diese Wahrscheinlichkeit p_{follow} eines (K)AF einem weiteren zu folgen, ist während der Simulationen ebenfalls aufgenommen worden und in Abbildung 7.5 aufgetragen.

Das Verhalten von p_{follow} scheint sehr ähnlich für AF und KAF zu sein. Es gibt lediglich zwei Unterschiede, einen im Freifluss- und einen zu Beginn des gestauten Bereiches. Im Freifluss-Bereich steigt p_{follow} für AF kontinuierlich an, bis der maximale Fluss erreicht wurde. Für KAF hingegen fällt der Wert ab, bis er ein Minimum bei einer Dichte von $\rho = 24 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ erreicht und von dort wieder, bis das System den maximalen Fluss erreicht, ansteigt. Beide Wahrscheinlichkeiten sind jedoch deutlich höher als die initialen 0,5, welche in etwa durch die zufällige Verteilung erstellt wurden, was darauf hinweist, dass die (K)AF sich in Platoons organisieren.

Bei niedrigen Dichten treten Wechselwirkungen zwischen den Agenten seltener auf, wodurch die AF Agenten seltener einen Anreiz zum Spurwechsel erhalten. Wenn die Abstände zwischen den Agenten so groß sind, dass es für die Folgezeiten nicht wichtig

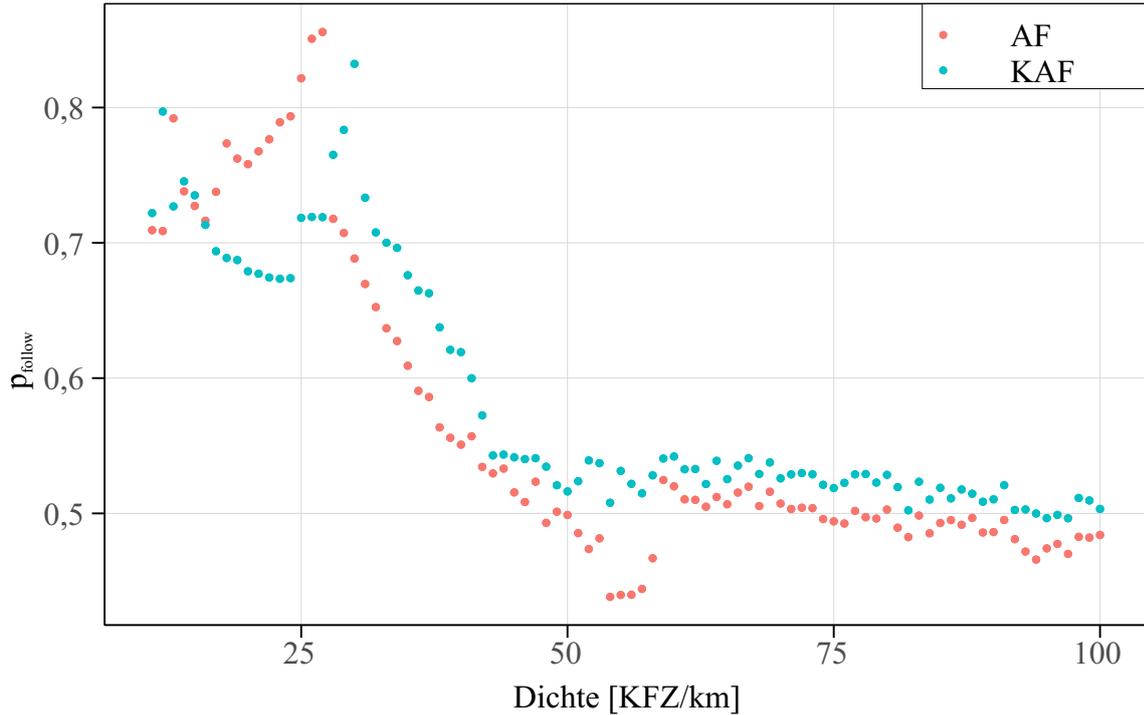


Abbildung 7.5: Die Wahrscheinlichkeit p_{follow} eines KAF (blau) bzw. eines AF (rot) einem weiteren (K)AF zu folgen in Abhängigkeit der Dichte bei einer Durchdringungsrate von 0,5.

ist, ob ein AF einem anderen AF oder einem MF folgt, wechseln sie nicht aktiv die Spur und die Durchschnittslänge der Platoons (bzw. p_{follow}) ist nicht so hoch wie theoretisch möglich. Das p_{follow} mit steigenden Dichten für KAF zunächst abnimmt, liegt daran, dass sie einen ZZS einhalten müssen, wenn sie einem anderen KAF folgen aber von einem MF gefolgt werden. Für steigende Dichten folgen Agenten einander mit geringerem Abstand und es kann häufiger vorkommen, dass ein KAF Agent durch einen Spurwechsel von einem MF Agenten mit geringem Sicherheitsabstand gefolgt werden würde. Dies verringert die Verbesserung, die ein KAF Agenten durch einen Spurwechsel erreichen könnte, sodass Spurwechsel im Mittel seltener durchgeführt werden. Erst wenn das System sich der kritischen Dichte nähert werden Platoons wichtiger für die Stabilität des Flusses und p_{follow} steigt an. Die KAF Agenten erreichen dabei ein Maximum von $p_{\text{follow}} = 0,83$ ehe das System die Freifluss-Phase verlässt. Dies passt gut zu den 0,8, welche auf einer einspurigen Strecke einen vergleichbaren maximalen Fluss erzeugten und liegt deutlich unterhalb der 0,93, welche nötig wären, um die maximale Kapazität zu erreichen. Wie bereits bei Abbildung 7.4 erwähnt wurde, zeigt auch dies, dass das System die Freifluss-Phase verlässt, ehe die KAF sich optimal verteilen können.

In der anschließenden synchronisierten Phase sinken die mittleren Abstände zwischen den Agenten weiter, was es den (K)AF Agenten, welche nur die Spur wechseln können, wenn dies sicher ist und nicht den folgenden Agenten ausbremst, seltener ermöglicht, die Spur

zu wechseln und Platoons zu bilden. Dieser Trend setzt sich auch in der gestauten Phase fort. In beiden Phasen bleibt p_{follow} der KAF oberhalb jener der AF, da für sie Platoons doppelt so effizient sind. Bemerkenswert ist dabei, dass die AF zum Ende beider Phasen wahrscheinlicher einem MF folgen, als einem AF. AF Agenten, welche einem anderen AF folgen, folgen diesen mit mehr als g_{safe} Zellen und geringen Geschwindigkeiten. Dies ermöglicht es MF Agenten, vor AF und in Platoons hinein die Spur zu wechseln. Die verbleibenden Platoons sind dennoch in der Lage, den Verkehr weiter zu stabilisieren.

Insgesamt könnte der maximale Fluss in Simulationen also gesteigert werden, wenn die (K)AF Agenten nicht zufällig, sondern in einigen Platoons auf das System verteilt werden. In der Realität ist es jedoch nicht zu erwarten, dass (K)AF vor Auffahrten auf eine Autobahn warten, ehe sie ein hinreichend großes Platoon gebildet haben. Außerdem wurde in [97] gezeigt, dass diese Platoons zusätzliche Probleme an Auf- und Abfahrten erzeugen, da ihre Gesamtlänge große Lücken benötigt, damit alle Agenten die Spur wechseln können. Daher entspricht die zufällige Verteilung der Agenten zusammen mit der daraus folgenden reduzierten Kapazität besser den Erwartungen heterogenen Verkehrs und wird auch für die nachfolgenden Simulationen verwendet. In diesen Simulationen wird nun zunächst der Einfluss der (K)AF auf die Spurwechsel in heterogenem zweispurigen Verkehr betrachtet. Anschließend folgt eine Betrachtung der Straßenkapazität, wie in den Kapiteln 5.3.2.1, 5.3.3.2 und 6.3, ehe abschließend eine Analyse der anderen in Kapitel 4.3 betrachteten Größen folgt, sodass der Einfluss der (K)AF auf alle von Zellularautomatenmodellen reproduzierten Verkehrsgrößen analysiert wurde.

7.2.3 Spurwechselzahlen in heterogenem, zweispurigem Verkehr

Zur Betrachtung des Einflusses der (K)AF auf die Spurwechselzahlen wurde die Simulation, wie sie für Abbildung 7.3 durchgeführt wurde, mehrfach wiederholt, wobei jedes Mal die Durchdringungsrate der (K)AF in 0,1er Schritten bis 0,9 erhöht wurde. Anschließend wurde betrachtet, bei welcher Dichte die maximale Spurwechselzahl im Freifluss auftritt und das Ergebnis, zusammen mit der entsprechenden Dichte, in Abbildung 7.6 aufgetragen. Die Durchdringungsrate wurde nur bis 0,9 erhöht, da ein Spurwechsel eines Agenten lediglich auftritt, wenn der Fluss asynchron zwischen den beiden Spuren ist, wodurch der Agent auf der anderen Spur schneller fahren könnte als auf der Eigenen. Da in homogenem, zweispurigem Verkehr mit (K)AF jedoch kein Agent trödelt, verhalten sich alle Agenten gleich, sind gleich schnell und haben den gleichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug bis auf Unterschiede aufgrund der Diskretisierung.

Wie in Abbildung 7.3 zu sehen ist, reduzieren die (K)AF die Anzahl an Spurwechseln mit steigender Durchdringungsrate. Dies war zu erwarten und hat mehrere Gründe. Zum

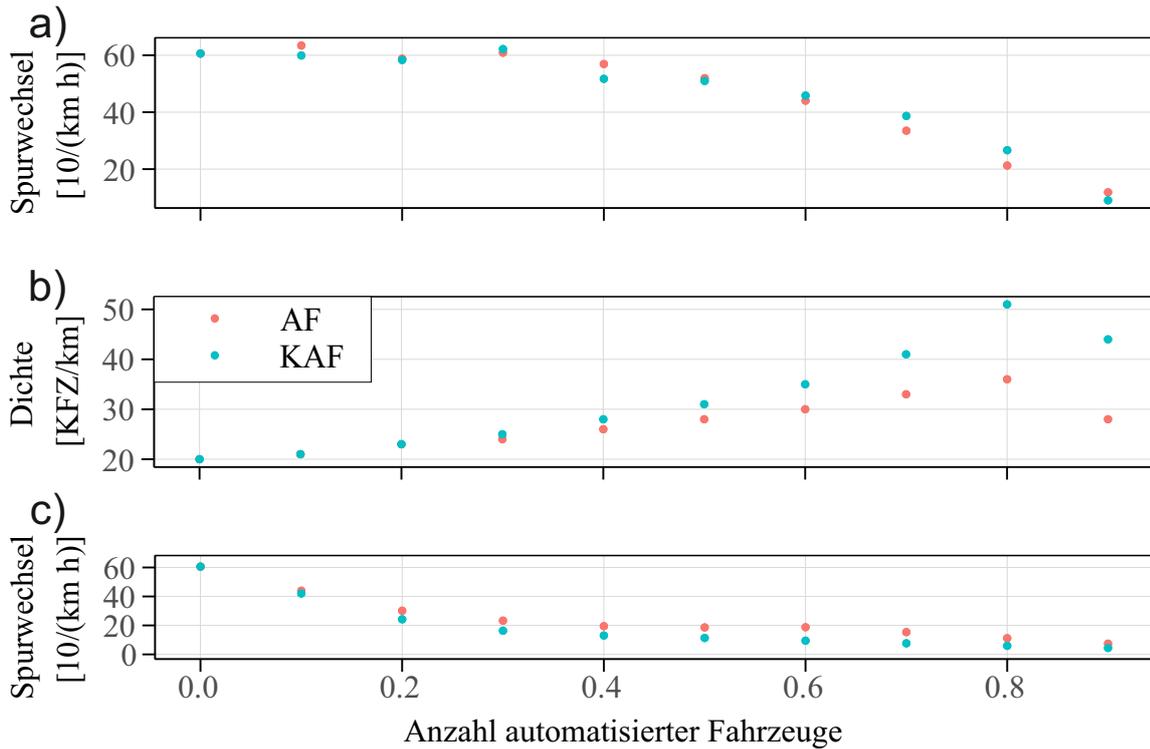


Abbildung 7.6: Abbildung a) zeigt die maximale Anzahl an Spurwechseln im Freifluss in Abhängigkeit der Durchdringungsrate für AF (rot) und KAF (blau), während Abbildung b) die Dichte angibt, bei welcher dieses Maximum auftritt. Die Abbildung c) zeigt die Spurwechselzahl bei einer festen Dichte von $\rho = 20 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$.

einen trödeln die Agenten nicht. Dies reduziert, wie bereits erwähnt, die Notwendigkeit für Spurwechsel. Zusätzlich dazu wenden (K)AF Agenten strengere Regeln für das Spurwechseln an. Es gibt also Situationen, in welchen ein MF Agent die Spur gewechselt hätte, der (K)AF Agent dies jedoch nicht tut und die Spurwechselzahl somit reduziert. Auch die Bildung von Platoons reduziert die Anzahl an registrierten Spurwechseln weiter. Die (K)AF Agenten müssen zwar zunächst einige Mal die Spur wechseln, um diese Platoons zu bilden, danach würden sie jedoch aus einem Platoon nur heraus wechseln, wenn die Situation auf der anderen Spur so viel besser ist, dass es den negativen Effekt von (K)AF Agenten, welche MF folgen (oder von ihnen gefolgt werden für KAF Agenten), kompensiert. Zuvor sollten jedoch die verbleibenden MF Agenten bereits ausreichend Gelegenheiten zum Spurwechsel gehabt haben, weshalb (K)AF Agenten nur schwer aus Platoons heraus die Spur wechseln.

Die (K)AF Agenten reduzieren nicht nur die Notwendigkeit für Spurwechsel, sodass weniger Spurwechsel auftreten, sondern verschieben auch das Maximum zu höheren Dichten, wie in Abbildung b) zu sehen ist. Dies liegt daran, dass sie den Fluss stabilisieren und das Maximum des Freiflusses zu höheren Dichten verschieben. Dieses Maximum fällt bei einer Durchdringungsrate von 0,9 ab, da die Spurwechselzahlen hier nur sehr langsam mit der Dichte steigen, sodass die oben bereits erläuterten Schwankungen größer sein können als der Unterschied zwischen zwei Dichten. Da die Spurwechselzahl mit

steigender Dichte im Freifluss stetig steigt, wirkt dieser Effekt der Reduzierung der Spurwechselzahlen aufgrund von (K)AF entgegen.

In Abbildung 7.6 c) wurde daher die Spurwechselzahl in Abhängigkeit der Durchdringungsrate der (K)AF bei einer festen Dichte von $\rho = 20 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$, bei der die maximale Spurwechselzahl im homogenem MF Verkehr auftritt, aufgetragen. Hier sieht man deutlich, dass die Spurwechselzahl schnell bei steigender Durchdringungsrate abfällt und sich 0 annähert. Spurwechsel werden oft im Zusammenhang mit einer erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit benannt [98–100]. Die reduzierte Anzahl aufgrund von (K)AF Agenten bedeutet also nicht nur einen gleichmäßigeren Verkehrsfluss, sondern auch ein verringertes Unfallrisiko, welches weiter verringert wird, da Spurwechsel von (K)AF, welche noch in diesen Zahlen inbegriffen sind, sicherer sind als jene von MF Agenten.

7.2.4 Straßenkapazitäten von heterogenem, zweispurigen Verkehr

Als Nächstes soll der Einfluss der Spurwechsel auf die Straßenkapazität in heterogenem Verkehr betrachtet werden. Dazu wurden analoge Simulationen zu den vorherigen Straßenkapazitätsanalysen in den Kapiteln 5.3.2.1, 5.3.3.2 und 6.3 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.7 aufgetragen. Für einen einfacheren Vergleich wurden die Ergebnisse ohne HIAF aus 6.3 in der Grafik mit aufgenommen.

Die Ergebnisse stimmen gut mit den Erwartungen aus den vorherigen Kapiteln überein. Die Straßenkapazität wird in ein- und zweispurigen Systemen gleichermaßen erhöht und die Messpunkte folgen einem ähnlichen Verlauf. Auch dass die Ergebnisse der zweispurigen Simulationen in den meisten Fällen oberhalb jener der einspurigen Simulationen und sogar der theoretischen Kurve liegen, war erwartbar, da die (K)AF Agenten sich durch Spurwechsel besser positionieren können. Hierdurch verändert sich das Verhältnis der Agenten, welche einem MF folgen, was eine geringere mittlere Fahrzeugfolgezeit zur Folge hat. Jedoch haben die meisten Messpunkte noch eine Standardabweichung größer Null, was bedeutet, dass es, unabhängig von der Durchdringungsrate, oft zu Staus kommt, ehe sich ausreichend Platoons bilden.

7.2.5 Einfluss automatisierter Fahrzeuge auf weitere Verkehrskarakteristiken

Nachdem gezeigt wurde, dass das hier vorgestellte Modell einen positiven Effekt von (K)AF auf die Spurwechselzahl sowie den Verkehrsfluss, unabhängig davon, ob es sich um ein einspuriges- oder mehrspuriges-System handelt, prognostiziert,

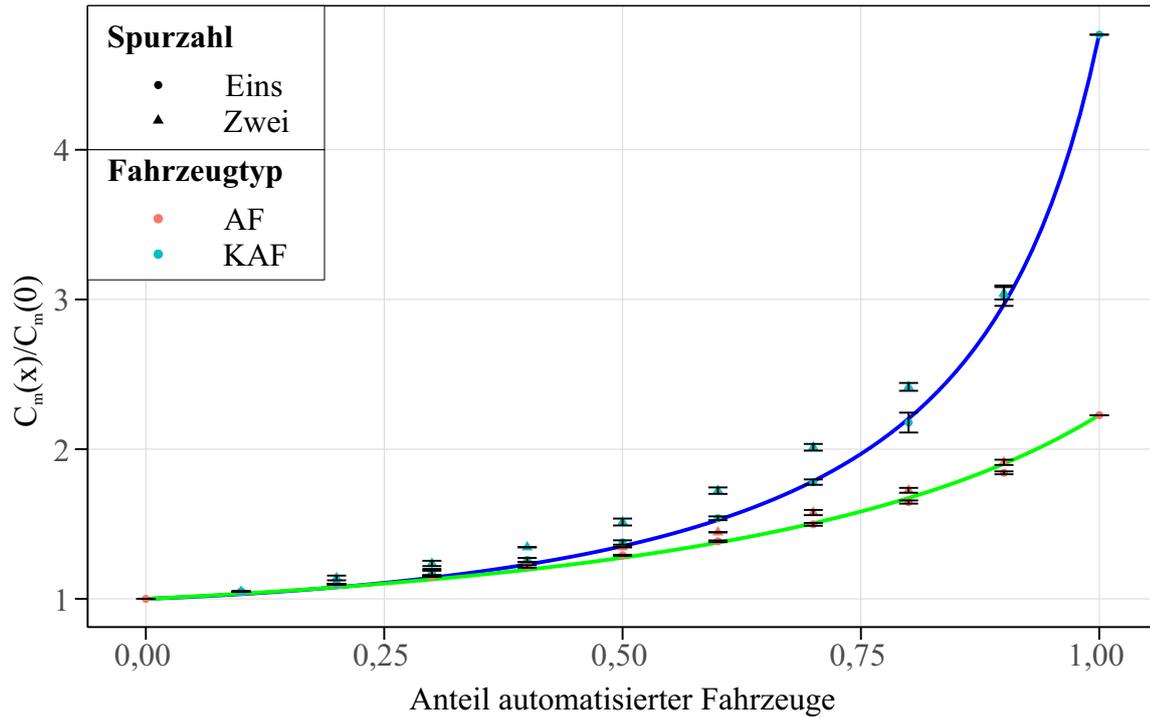


Abbildung 7.7: Die Straßenkapazität in Abhängigkeit der Durchdringungsrate von (K)AF. Die blaue Kurve beschreibt den theoretischen Verlauf mit KAF nach Gleichung (5.10) und die grüne Kurve den der AF.

soll abschließend noch der Einfluss der (K)AF auf die anderen Verkehrsgrößen in zweispurigen Systemen betrachtet werden. Diese sind der Ausfluss aus einem Stau J_{out} , die Geschwindigkeit v_j mit der sich ein Stau entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet, sowie die Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten in der Freifluss- und der synchronisierten Phase. Die folgenden Simulationen zur Analyse dieser Größen wurden dabei auf zweispurigen Systemen durchgeführt, um zum einen zu zeigen, dass das Modell alle nötigen empirischen Ergebnisse korrekt reproduziert und zum anderen, dass die natürliche Bildung von Platoons durch (K)AF in den entsprechenden Simulationen die statistischen Schwankungen reduzieren, auch wenn diese nicht gänzlich eliminiert werden können.

7.2.5.1 Stauausfluss

Die erste der drei betrachteten Größen ist der Stauausfluss J_{out} , welcher durch Simulationen analog zu Kapitel 4.3.2 mit verschiedenen Durchdringungsraten in 0,1er Schritten analysiert wird. Die Ergebnisse zu diesen Simulationen sind in Abbildung 7.8 für AF und KAF aufgetragen.

Theoretisch ließe sich die Simulation auch für eine Durchdringungsrate von 1 durchführen, indem die Agenten dazu künstlich in einen Stau erstellt werden. Jedoch lässt sich das Ergebnis dazu berechnen ohne dass Simulationen nötig sind, da die Statistik der MF

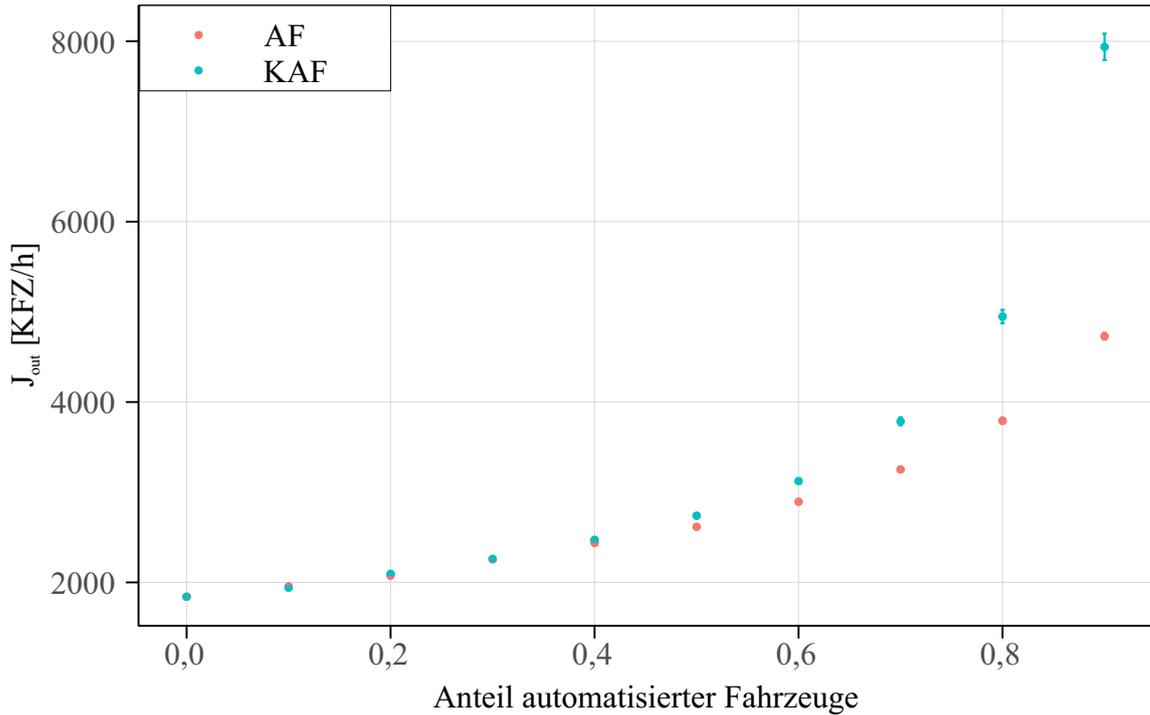


Abbildung 7.8: Mittlerer Ausfluss aus einem Stau J_{out} in Abhängigkeit der Durchdringungsrate von AF in rot und KAF in blau.

ausbleibt. Zum Beispiel fährt jede 0,1s ein KAF an, was bedeutet, dass 10 Agenten die Sekunde anfahren. Hieraus lässt sich leicht ein J_{out} von $36.000 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ prognostizieren. Die daraus verschobene Skalierung der y-Achse würde es lediglich schwerer machen, die Ergebnisse der anderen Simulationen zu analysieren, weswegen die Ergebnisse für eine Durchdringungsrate von 1 nicht aufgetragen sind.

Die Werte für J_{out} bei einer Durchdringungsrate von 0 sind mit $1840 \pm 110 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der einspurigen Simulationen in Kapitel 4.3.2. Dieser Wert steigt nun mit einer höheren Durchdringungsrate von (K)AF schnell an und der Effekt dieser Fahrzeuge ist mit einer Versechsfachung bei einer Durchdringungsrate von 0,9, größer als auf die Straßenkapazität C_m , welche nur zirka Verdreifacht wurde. Der Ausfluss aus einem Stau hängt in diesen Simulationen von drei Eigenschaften der Fahrzeuge ab: Der Trödelwahrscheinlichkeit bei Stillstand p_0 , während der Fahrt p_d sowie der Reaktionszeit r_n^t .

Da die (K)AF Agenten nicht trödeln ($p_0 = 0, p_d = 0$), fahren sie an, sobald die Lücke zum vorausfahrenden Fahrzeug dies erlaubt und beschleunigen stets soweit wie möglich. MF Agenten hingegen trödeln mit einer Wahrscheinlichkeit von $p_0 = 0,37$ bzw. $p_d = 0,19$ in einem solchen Fall. Zusätzlich brauchen sie mindestens 10 Zeitschritte, um auf eine ausreichende Lücke zu reagieren, selbst wenn sie nicht trödeln. AF Agenten hingegen brauchen nur 5 Zeitschritte, die Hälfte, und KAF nur 1 Zeitschritt, ein Zehntel dieser Zeit.

Beide Charakteristiken sind ausreichend, um die Steigerung von J_{out} durch heterogenen Verkehr zu erklären.

Lediglich die steigende Standardabweichung bei hohen Durchdringungsraten von KAF Agenten scheint zunächst unerwartet. Da die Agenten jedoch alle in einem großen Stau erstellt und dann lediglich einmal bis zum Ende des Systems fahren gelassen werden, können diese keine Platoons bilden. Die in Abbildung 7.8 aufgetragenen Ergebnisse hängen somit von der zufälligen Verteilung der Agenten im Stau ab, wodurch es bei hohen Durchdringungsraten zu steigenden Schwankungen kommt. Diese Schwankungen von bis zu $1466 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ sind nahezu so groß wie der Wert in rein homogenem MF Verkehr selbst. Dies bedeutet jedoch auch, dass selbst im ungünstigsten Fall J_{out} bei einer Durchdringungsrate von 0,9 mit $6471 \frac{\text{KFZ}}{\text{h}}$ circa 3,5 mal so hoch ist wie in homogenem MF Verkehr.

7.2.5.2 Staugeschwindigkeit

Auch die Analyse der Staugeschwindigkeit v_j läuft analog zur einspurigen Analyse in Kapitel 4.3.3 mit variabler Durchdringungsrate. Wie bei den vorherigen Simulationen wurde auch hier kein homogener (K)AF Verkehr simuliert. Im Gegensatz zum Stauausfluss ist die Staugeschwindigkeit für eine Durchdringungsrate von 1 jedoch nicht in der Simulation messbar. Aufgrund des veränderten Verhaltens der (K)AF Agenten teilt sich das System in homogenem Verkehr nicht in freifließende und gestaute Bereiche ein. Die Korrelation der Messpunkte ändert sich quasi nicht über die Zeit und v_j kann nicht aufgenommen werden. Die Ergebnisse mit einer Durchdringungsrate von 0 bis 0,9 sind in 7.9 aufgetragen.

Mit einem Wert von $v_j = 14.2 \pm 0,7 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ist die Staugeschwindigkeit in einem homogenen MF Agentenverkehr in etwa so groß wie im einspurigen System im Kapitel 5.2.1 und in guter Übereinstimmung mit den empirischen Beobachtungen [41, 42]. Wie in Kapitel 4.3.3 gezeigt wurde, hängt auch v_j von den beiden Trödelwahrscheinlichkeiten ab. Des Weiteren wurde in Kapitel 5.2.1 gezeigt, dass die Fahrzeugfolgezeit von der Reaktionszeit des Agenten abhängt. Eine verringerte Reaktionszeit bedeutet, dass ein Agent schneller in einen Stau einfährt, nachdem dessen vorausfahrendes Fahrzeug in diesen eingefahren ist. Hierdurch breitet sich der Stau schneller entgegen der Fahrtrichtung aus und v_j wird erhöht. Das erklärt die schnelle Steigerung von v_j bei gesteigerter Durchdringungsrate.

In diesen Simulationen wurde das System erst für T_{relax} Zeitschritte relaxiert, ehe die Messwerte aufgenommen wurden. Dies gibt den Agenten Zeit, Platoons zu bilden. Wie jedoch in den vorherigen Unterkapiteln ausreichend gezeigt wurde, gelingt dies nicht immer und gerade bei hohen Dichten wird es für die (K)AF Agenten schwer, die Spur sicher zu wechseln, ohne folgende Agenten auszubremsen. Hierdurch

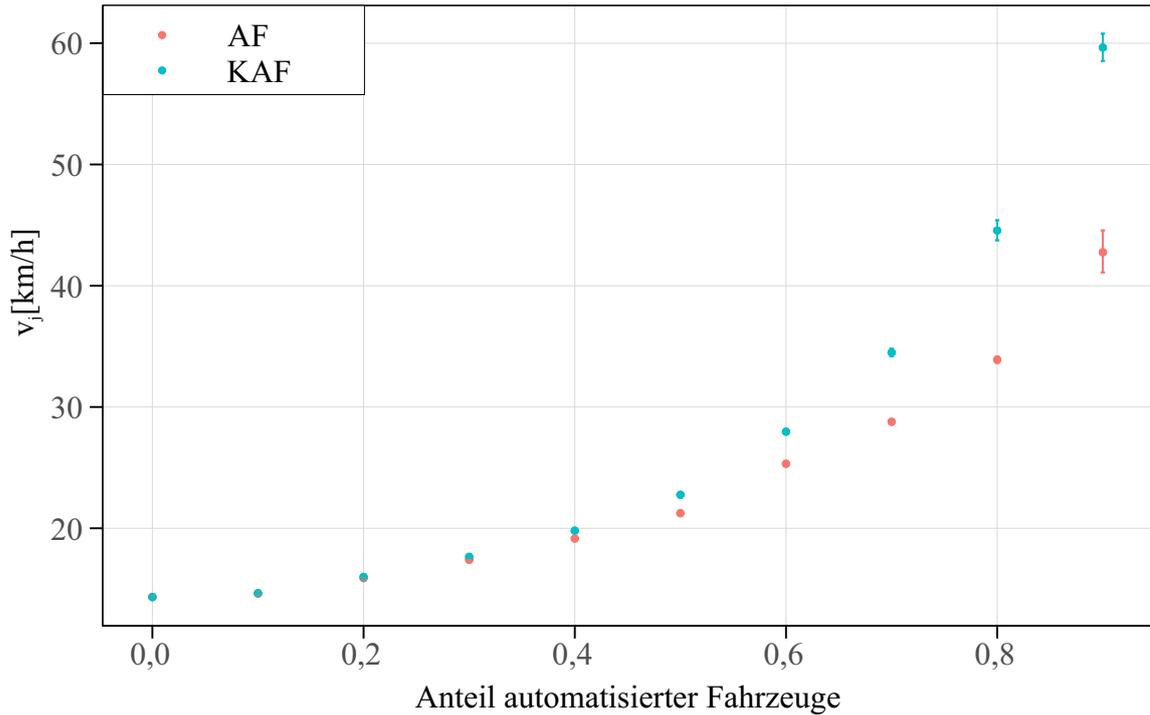


Abbildung 7.9: Mittlere Staugeschwindigkeit v_j in Abhängigkeit der Durchdringungsrate von AF in rot und KAF in blau.

kommt es zu Unterschieden zwischen verschiedenen Durchläufen mit verschiedenen, zufälligen Verteilungen der (K)AF Agenten, was bei hohen Dichten zu einer erhöhten Standardabweichung führt. Jedoch liegen die Ergebnisse, wie auch bereits im vorherigen Unterkapitel, stark oberhalb jener mit homogenem MF Verkehr.

7.2.5.3 Fahrzeugfolgezeiten

Die letzte zu betrachtende Größe ist die Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten in der Freifluss- sowie der synchronisierten Phase, dabei wird analog zu Kapitel 4.3.4 vorgegangen. Simulationen zur synchronisierten Phase wurden dabei bei einer höheren Dichte von $\rho = 38 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ durchgeführt (vergleiche $\rho = 26 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ in Kapitel 4.3.4), da sich heterogener Verkehr mit (K)AF bei geringeren Dichten nicht bei jeder Durchdringungsrate in der synchronisierten Phase befindet. Die Ergebnisse der Simulationen für beide Phasen wurden in Abbildung 7.10 für drei verschiedene Durchdringungsraten aufgetragen. Die Durchdringungsrate wurde dabei nicht über 0,5 erhöht, da der Effekt des heterogenen Verkehrs ausreichend ersichtlich ist und eine weitere Steigerung lediglich den einer Delta-Funktion ähnelnden Peak bei geringen Fahrzeugfolgezeiten ($t = 0,1$ s für KAF und $t = 0,5$ s für AF) schnell ansteigen ließe, was eine Darstellung der restlichen Verteilung erschweren würde.

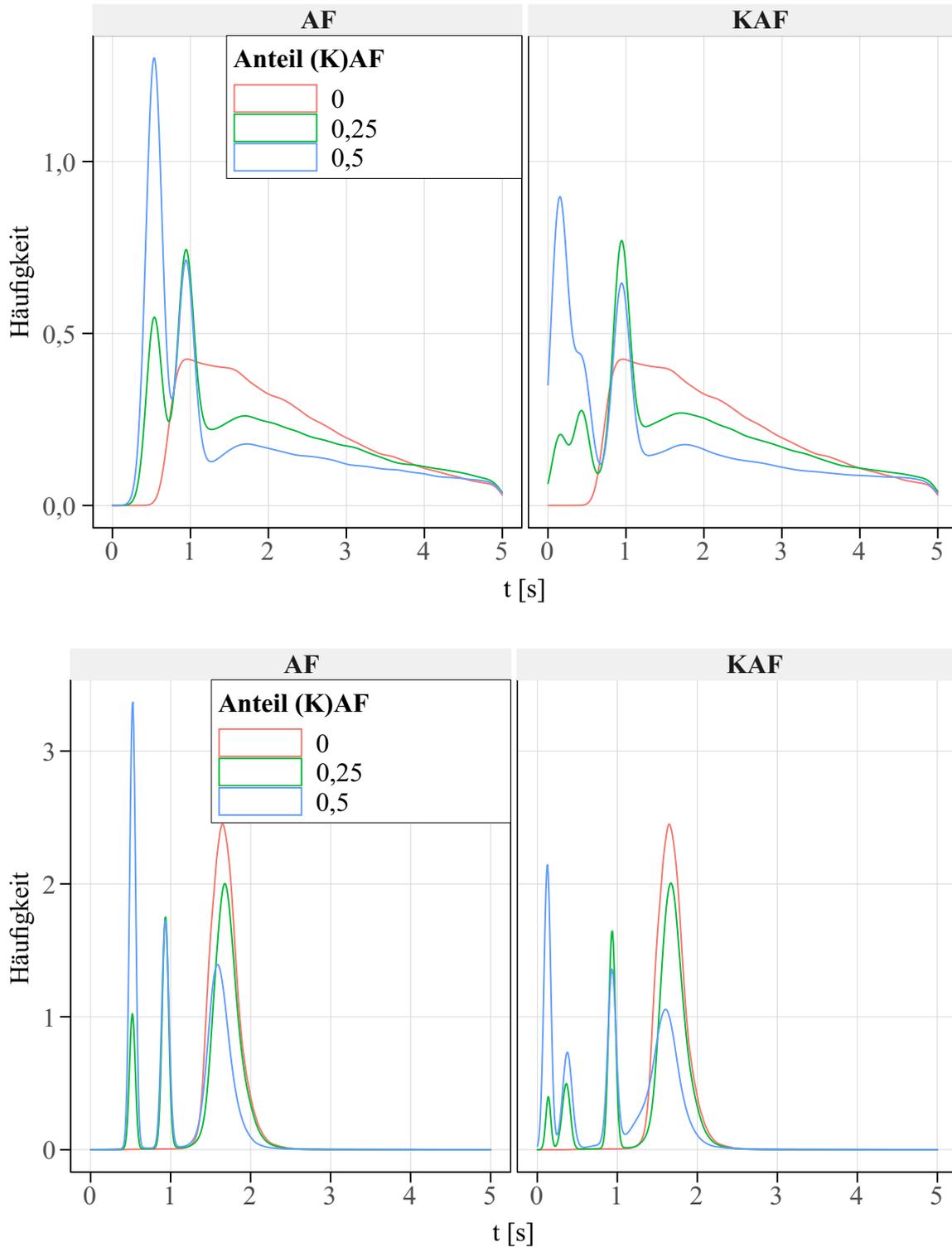


Abbildung 7.10: Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten in der Freifluss-Phase (oben) für eine Dichte von $\rho = 12 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ und der synchronisierten Phase (unten) für eine Dichte von $\rho = 38 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$. Beide Reihen zeigen AF (links) und KAF (rechts) für drei verschiedene Durchdringungsraten von 0 in rot, 0,25 in grün, und 0,5 in blau.

Die Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten in homogenem, menschlich gesteuertem, zweispurigen Verkehr in rot in Abbildung 7.10 beschreibt die empirischen Ergebnisse [78] besser als dies beim einspurigen System in Abbildung 4.5 der Fall ist. MF Agenten führen

Spurwechsel durch, selbst wenn sie folgende Agenten dabei ausbremsen. Dies verringert die mittleren Abstände so weit, dass der Peak der Fahrzeugfolgezeiten unter $t = 1$ s fällt.

Diese Verteilung ändert sich durch die Einführung von AF in heterogenem Verkehr. AF Agenten, welche einem MF Agenten mit dem ZZS folgen, halten ihre Fahrzeugfolgezeit um 0,9s. Jene, die anderen AF folgen, verwenden hingegen eine Fahrzeugfolgezeit von 0,5s. Da AF Agenten ihr Verhalten nicht verändern und nicht trödeln, ist ihre Fahrzeugfolgezeit eng um diese beiden Werte verteilt. Die Breiten der Verteilungen entstehen dabei durch die Diskretisierung des Systems sowie Schwankungen aufgrund des Trödelns von MF Agenten im System. Der Peak um den höheren Wert von 0,9s überlagert sich mit der Verteilung der MF Agenten, was sowohl die Höhe als auch die Breite des Peaks erhöht. Die Verteilung fällt dennoch deutlich schneller ab als im homogenen MF Agentenverkehr, da es zum einen weniger MF Agenten gibt, welche die hohen Fahrzeugfolgezeiten verwenden und zum anderen die AF Agenten im System die statistischen Schwankungen der MF Agenten ausgleichen. Eine Erhöhung des Anteils an AF Agenten lässt den Peak um 0,5s stark steigen, da die Wahrscheinlichkeit eines AF Agenten einem anderen AF zu folgen quadratisch zunimmt.

Die Verteilung in heterogenem Verkehr mit KAF Agenten sieht jener der AF Agenten ähnlich. KAF Agenten, welche einem MF folgen, verhalten sich wie AF Agenten weshalb die Verteilung um den Peak bei 0,9s ähnlich aussieht. Der Peak von KAF Agenten welche anderen KAF Agenten folgen, teilt sich in zwei Maxima auf. KAF Agenten, welche nicht nur anderen KAF folgen, sondern auch von einem KAF gefolgt werden, müssen lediglich die minimal sichere Fahrzeugfolgezeit von 0,1s einhalten. Jene, die zwar einem KAF folgen, jedoch von einem MF gefolgt werden, müssen hingegen den ZZS einhalten und folgen dem vorausfahrenden KAF mit 0,5s, solange der vorausfahrende Agent nicht aktiv bremst, was im Freifluss selten der Fall ist. Bei steigender Durchdringungsrates von KAF Agenten folgen diese seltener MF, oder werden von ihnen gefolgt, was die sekundären Maxima verringert und den Peak bei 0,1s schnell ansteigen lässt.

In der synchronisierten Phase ist die Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten in homogenem MF Verkehr aufgrund der erhöhten Dichte enger als in Abbildung 4.6. Wie auch in der gestauten Phase sind in der synchronisierten Phase nicht alle Fahrzeuge im synchronisierten Zustand, sondern das System teilt sich in freifließende und synchronisierte Bereiche auf. Bei steigender Dichte breiten sich die synchronisierten Bereiche aus, bis letztlich das gesamte System synchronisiert ist. Sollte es in diesem Bereich dann zu einer Bremswelle kommen, geht das System in die gestaute Phase über. Bei einer Dichte von $\rho = 38 \frac{\text{KFZ}}{\text{km}}$ ist ein Großteil des Systems in der synchronisierten Phase und die Verteilung hat eine geringe Breite.

Das Maximum der Verteilung, welches durch MF Fahrzeuge erzeugt wird, nimmt, wie auch in der Freifluss-Phase, in heterogenem Verkehr ab, da es weniger MF Agenten

7. Mehrspuriger Verkehr

gibt. Die weiteren Maxima, welche aufgrund der (K)AF Agenten entstehen, sind gut mit jenen aus der Freifluss-Phase vergleichbar, da die Agenten sich in beiden Phasen nicht unterschiedlich verhalten. Die Verteilung der MF Agenten beginnt jedoch in der synchronisierten Phase erst bei höheren Werten als die der (K)AF, weswegen sich die verschiedenen Verteilungen hier nicht überlagern und die Peaks klarer hervortreten.



Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, ein Zellularautomatenmodell zu erstellen, welches in der Lage ist, sowohl homogenen MF Verkehr zu reproduzieren, als auch heterogenen Verkehr, in dem MF mit AF und/oder KAF gemischt werden, zu simulieren. Das dazu nötige Vorgehen sowie die Ergebnisse dieser Simulationen werden im Folgenden zusammengefasst und im Anschluss wird ein Fazit gezogen. Ferner wird ein Ausblick über sinnvolle Erweiterungen des Modells sowie interessante Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

8.1 Zusammenfassung und Fazit

Zu Beginn der Arbeit wurde ein Überblick über grundlegende Größen, Theorien sowie historische Modelle gegeben. Von besonderer Relevanz war dabei das Modell von Lee et al. [2] beziehungsweise dessen unfallfreie Variante von Pottmeier et al. [31].

8.1.1 Modifizierung des Modells

Im Modell von Pottmeier et al. wurde in Kapitel 4 die Zeitschrittlänge auf 0,1s reduziert. Dazu wurden mehrere Änderungen an der räumlichen Diskretisierung und den Regeln des Modells vorgenommen. Auch hat das neue Modell im Vergleich zu den vorherigen Modellen eine veränderte Dynamik. Diese ist auf die reduzierte Zeitschrittlänge zurückzuführen, von der der Bremsweg und die Beschleunigungsstrecke abhängig sind. Dennoch ist das modifizierte Modell in der Lage, alle in [32] als wichtig bezeichneten, empirischen, einspurigen Verkehrsgrößen realistisch zu reproduzieren.

8.1.2 Einführung automatisierter Fahrzeuge

Anschließend daran wurden in Kapitel 5 automatisierte Fahrzeuge (AF) in das Modell eingeführt. Dabei wurde auf technische Daten und Annahmen aus der Literatur zurückgegriffen, um die Unterschiede zwischen AF und MF in den Regeln und Parametern zu definieren. Dies ist nötig, da es noch keine empirischen Daten zu heterogenem Straßenverkehr außerhalb von Testumgebungen gibt [22]. In der anschließenden Analyse konnte gezeigt werden, dass das Modell nicht nur in der Lage ist, die Ergebnisse historischer Prognosen und Modelle, welche eine Steigerung der Straßenkapazität annehmen, zu bestätigen, sondern auch wichtige, bisher unbeobachtete, von MF abweichende Eigenschaften zu berücksichtigen. Das Modell berücksichtigt, dass AF Agenten im Gegensatz zu MF Agenten weder trödeln noch überreagieren oder den nötigen Sicherheitsabstand gezielt nicht einhalten. Des Weiteren operieren AF Agenten mit einer halb so großen Reaktionszeit und es wurde ein Parameter für einen zusätzlichen zeitlichen Sicherheitsabstand (ZZS) eingeführt. Dieser ZZS bestimmt, wie viel größer der Abstand zwischen einem AF und einem vorausfahrenden MF sein muss, damit berücksichtigt werden kann, dass AF Agenten passiv auf menschliches Verhalten reagieren können sollen. Die Simulationen zeigten, dass dieser ZZS nicht nur den Verkehr sicherer macht, sondern auch seine Prognostizierbarkeit erleichtert. Auch wenn durch den ZZS der Einfluss der AF auf den Verkehrsfluss und die Straßenkapazität verringert wurde, so bleibt dieser dennoch positiv und die Straßenkapazität wächst bei steigender Durchdringungsrate von AF an.

8.1.3 Erweiterung zu kommunizierenden automatisierten Fahrzeugen

Als Nächstes wurden in Kapitel 6 kommunizierende, automatisierte Fahrzeuge (KAF) eingeführt und ihre Unterschiede zu rein automatisierten Fahrzeugen erläutert. Dabei musste beachtet werden, dass die KAF eine geringere Reaktionszeit als AF verwenden. Des Weiteren unterscheiden AF Agenten nur zwischen den zwei Fällen, ob das vorausfahrende Fahrzeug ein MF ist oder nicht. KAF hingegen müssen noch weiter zwischen den Möglichkeiten unterscheiden, ob das vorausfahrende Fahrzeug seine Daten durch Kommunikation weitergibt oder nicht. Zusätzlich dazu kann das Modell durch MF Agenten, die KAF folgen, entstehendes Auffahrrisiko reproduzieren. Dies konnte bisher von keinem anderen Modell berücksichtigt werden. Da nicht zu erwarten ist, dass alle menschlichen Fahrer ihr Verhalten ändern, um Unfälle zu vermeiden, wurde dieses Auffahrrisiko durch eine Änderung im Verhalten der KAF Agenten eliminiert. Diese verhalten sich danach nicht nur passiv, wenn sie einem MF folgen, sondern auch wenn sie von einem MF gefolgt werden. Dennoch prognostiziert das Modell einen positiven

Effekt durch Kommunikation auf den Verkehr in Form eines gesteigerten Flusses und einer höheren Straßenkapazität. Wie stark dieser Effekt ist, hängt von der Anordnung der Fahrzeuge im System ab. Da (K)AF MF mit einem größeren Abstand folgen als anderen Fahrzeugen, ist es für den Fluss ungünstig, wenn viele (K)AF MF folgen. Der Verkehr verlässt leichter und bei niedrigeren Dichten die Freifluss-Phase im Vergleich zum theoretischen Maximum bei einer optimalen Verteilung. In allen heterogenen Verkehrssimulationen lag der Fluss und die Straßenkapazität jedoch oberhalb derjenigen homogenen MF Verkehrs.

8.1.4 Zweispuriger Verkehr

In Kapitel 7 wurde das einspurige Modell durch Regeln für Spurwechsel auf mehrspurigen Verkehr erweitert. Diese Regeln sind unterschiedlich für MF und (K)AF. Dabei unterscheiden sie auch, ob ein (K)AF hinter oder vor einem MF die Spur wechselt oder nicht. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurde gezeigt, dass das Modell alle nach [32] als wichtig bezeichneten empirischen Größen qualitativ und quantitativ gut reproduzieren kann. (K)AF steigern nicht nur die Straßenkapazität und den Verkehrsfluss, sondern reduzieren auch die Notwendigkeit eines Spurwechsels, was den Verkehr gleichmäßiger und sicherer macht. Dieser Effekt wird noch weiter verstärkt, da die Spurwechsel den (K)AF Agenten erlauben, Platoons zu bilden, die stabiler und mit geringerem Sicherheitsabstand fahren können. Jedoch konnte auch gezeigt werden, dass Staus entstehen können, bevor die Platoons sich vollständig ausbilden konnten. Dies bedeutet, dass statistische Schwankungen im heterogenen Verkehr nicht nur aufgrund des Trödelverhaltens der MF auftreten und der Fluss von der initialen Konfiguration der MF und (K)AF Agenten abhängt.

8.1.5 Fazit

Abschließend lässt sich sagen, dass durch Simulationen des hier vorgestellten Modells homogener MF Verkehr alle relevanten Verkehrsgrößen (Fluss, Staugeschwindigkeit, Stauausfluss, Fahrzeugfolgezeiten im Freifluss und synchronisierten Fluss) reproduziert werden können. In heterogenem Verkehr mit (K)AF Agenten, ohne äußere Randbedingungen wie zum Beispiel Auf- oder Abfahrten, wird durch das Modell ein signifikant positiver Effekt von (K)AF auf alle verkehrsrelevanten Größen prognostiziert. Durch das Modell kann des Weiteren das unterschiedliche Verhalten von MF und (K)AF Agenten, entsprechend aktueller Annahmen zu (K)AF, realistischer und genauer simuliert werden als durch vergleichbare existierende Modelle.

8.2 Ausblick

Durch das hier vorgestellte Modell ist es zwar möglich, heterogenen, zweispurigen Verkehr realistisch zu simulieren, jedoch nur in Abwesenheit von Engstellen wie Auf-/Abfahrten oder Spureinzügen. Daher sollte das Modell in zukünftigen Arbeiten um diese Engstellen erweitert werden. Wie bereits zu Beginn von Kapitel 7 erwähnt wurde, ist es jedoch nötig, zunächst LKW und asymmetrische Spurwechselregeln zu implementieren, ehe Simulationsergebnisse mit Engstellen mit empirischen Daten verglichen werden können. In bereits existierenden asymmetrischen Spurwechselregeln mit LKW dürfen diese nicht die Spur wechseln [88, 94]. Dies könnte einen negativen Einfluss auf automatisierte LKW haben, die dann beispielsweise keine Platoons bilden können. Der Einfluss der asymmetrischen Spurchwechselregeln und von LKW sollte daher hinreichend analysiert werden, ehe Engstellen implementiert und ihr Einfluss auf den heterogenen Verkehr analysiert werden kann.

Auf diese Weise kann dann heterogener Autobahnverkehr in allen typischen Verkehrssituationen, wie sie auch in empirischem Verkehr auftreten, simuliert werden. Jedoch ist zu erwarten, dass eine neue virtuelle Art von Engstelle durch die Einführung von KAF entsteht. In [101] wurde gezeigt, dass Fahrzeuge aufgrund unzureichender Infrastruktur nicht überall kommunizieren können. Selbst dort, wo Kommunikation theoretisch möglich ist, kann diese aufgrund von Überlastung oder dem Übergang von einem Betreiber zu einem anderen mehrere Sekunden anstatt Millisekunden dauern. Da die Kommunikationsnetzwerke durch die Einführung von KAF noch weiter belastet werden, ist nicht zu erwarten, dass dieser Umstand vollständig behoben wird, auch wenn 5G als mögliche Lösung des Problems diskutiert wird [102, 103]. Stattdessen ist es möglich, dass KAF an bestimmten Stellen oder Zeiten nicht innerhalb von 0,1 s kommunizieren können. In solchen Fällen müssen sie sicherheitshalber ihre Geschwindigkeit reduzieren und ihren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug erhöhen, was die Straßenkapazität verringert und dann effektiv als Engstelle zu betrachten ist. Diese Engstelle ist für folgende MF besonders gefährlich, da für diese keine Änderung der Verkehrssituation zu erkennen ist, was ein gesteigertes Auffahrtsrisiko zur Folge hat. Daher ist es von besonderem Interesse, diese Art von Engstelle zu simulieren und zu analysieren, ehe sie in empirischem Verkehr erzeugt wird.

Nach der Analyse einer solchen Engstelle und der Einführung von LKW sowie klassischen Engstellen, ist auch die Analyse von heterogenem Innenstadtverkehr von besonderem Interesse. Dort können die (K)AF es ermöglichen, dass mehr Fahrzeuge pro Grünphase eine Kreuzung passieren, da sie nicht beim Anfahren trödeln. Wenn eine Ampel grün wird, ist es jedoch auch möglich, dass es in diesen deutlich komplexeren Systemen zu mehr Problemen in der Mensch-Maschinen-Interaktion kommt. (K)AF müssen sich

an alle Gesetze [81] halten, was gerade im Innenstadtverkehr oft schwierig ist. Zum Beispiel müssen sie beim Überholen von Fahrradfahrern einen Mindestabstand von 1,5 m einhalten, was bei entgegenkommendem Verkehr selten möglich ist. Es wäre daher vorstellbar, dass sie Fahrradfahrer sehr viel seltener überholen und dafür länger brauchen als MF, was die Straßenkapazität wiederum negativ beeinflusst. Eine Simulation und Analyse von Innenstadtverkehr ist daher für Prognosen über den Einfluss von (K)AF auf heterogenen Innenstadtverkehr wichtig.

Der Parameter δ_n^t , der das passive Verhalten der (K)AF gegenüber den MF Agenten beschreibt, wurde entsprechend der Annahmen anderer Wissenschaftler um 0,4 s erhöht. Für KAF wird dieser Wert auch verwendet, wenn dem Fahrzeug ein MF folgt. Der Wert ist dabei gerade groß genug, um Unfälle zu vermeiden. In der Realität wäre es denkbar, dass der Wert noch höher gewählt wird, um eine höhere Sicherheit zu gewährleisten. Eine Steigerung des Wertes wird jedoch nicht nur die Sicherheit steigern, sondern auch den Verkehrsfluss und die Straßenkapazität verringern. Wenn der Wert hinreichend groß wird, steigt auch der mittlere Abstand zum vorausfahrendem Agenten. Dieser Abstand ist dann unter Umständen groß genug, damit MF Agenten auf der Nebenspur ihn als hinreichend groß für einen Spurwechsel betrachten. Dies kann zu Bremswellen und einer weiteren Verringerung der Straßenkapazität in mehrspurigen Systemen führen. Eine Analyse der Variation dieses Parameters kann daher für die Modellierung von zukünftigem Verkehr von Interesse sein.

Abkürzungsverzeichnis

(K)AF automatisierte bzw. kommunizierend automatisierte Fahrzeuge 74

ACC adaptive cruise control 23

AF automatisiertes Fahrzeug 23

CACC cooperative adaptive cruise control 23

FCD Floating Car Data 7

HIAF „Here I Am“ Fahrzeuge 68

KAF kommunizierendes automatisiertes Fahrzeug 23

ZZS zusätzlicher zeitlicher Sicherheitsabstand 63

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC. **Staubilanz 2018**. 2019. www.adac.de/-/media/pdf/vek/fachinformationen/statistiken/staubilanz-adac-statistik.pdf [aufgerufen 02.11.2021].
- [2] H. K. LEE, R. BARLOVIC, M. SCHRECKENBERG, AND D. KIM. **Mechanical Restriction versus Human Overreaction Triggering Congested Traffic States**. *Physical Review Letters*, **92**(23):238702, 2004. doi:10.1103/PhysRevLett.92.238702.
- [3] D. J. FAGNANT AND K. KOCKELMAN. **Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations**. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **77**:167–181, 2015. doi:10.1016/j.tra.2015.04.003.
- [4] K. ABBOUD, H. A. OMAR, AND W. ZHUANG. **Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey**. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **65**(12):9457–9470, 2016. doi:10.1109/TVT.2016.2591558.
- [5] R. MARZOUG, B. C. TÉLLEZ, M. C. TÉLLEZ, G. A. M. PÉREZ, A. BASSAM, AND O. OUBRAM. **Optimization of traffic intersection using connected vehicles**. *International Journal of Modern Physics C*, **30**(06):1950042, 2019. doi:10.1142/S0129183119500426.
- [6] H. AMEEN, A. MAHAMAD, S. SAON, D. NOR, AND K. GHAZI. **A review on vehicle to vehicle communication system applications**. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, **18**(1):188–198, 2020. doi:10.11591/ijeecs.v18.i1.pp188-198.
- [7] R. MARZOUG, N. LAKOUARI, O. OUBRAM, H. EZ-ZAHRAOUI, L. CISNEROS-VILLALOBOS, AND J. G. VELÁSQUEZ-AGUILAR. **Impact of information feedback strategy on the car accidents in two-route scenario**. *International Journal of Modern Physics C*, **29**(09):1850081, 2018. doi:10.1142/S012918311850081X.
- [8] M. TREIBER, A. HENNECKE, AND D. HELBING. **Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations**. *Physical Review E*, **62**:1805–1824, 2000. doi:10.1103/PhysRevE.62.1805.
- [9] A. KESTING, M. TREIBER, M. SCHÖNHOF, AND D. HELBING. **Adaptive cruise control design for active congestion avoidance**. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **16**(6):668–683, 2008. doi:10.1016/j.trc.2007.12.004.
- [10] S. E. SHLADOVER, D. SU, AND X.-Y. LU. **Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Freeway Traffic Flow**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2324**(1):63–70, 2012. doi:10.3141/2324-08.

- [11] B. S. KERNER. **Failure of classical traffic flow theories: Stochastic highway capacity and automatic driving.** *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **450**:700–747, 2016. doi:10.1016/j.physa.2016.01.034.
- [12] D. YANG, X. QIU, L. MA, D. WU, L. ZHU, AND H. LIANG. **Cellular Automata–Based Modeling and Simulation of a Mixed Traffic Flow of Manual and Automated Vehicles.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2622**(1):105–116, 2017. doi:10.3141/2622-10.
- [13] S.-C. LO AND C.-H. HSU. **Cellular automata simulation for mixed manual and automated control traffic.** *Mathematical and Computer Modelling*, **51**(7-8):1000–1007, 2010. doi:10.1016/j.mcm.2009.08.042.
- [14] B. S. KERNER. **Physics of automated driving in framework of three-phase traffic theory.** *Physical Review E*, **97**(4-1):042303, 2018. doi:10.1103/PhysRevE.97.042303.
- [15] G. E. MARCHANT AND R. A. LINDOR. **The Coming Collision Between Autonomous Vehicles and the Liability System.** *Santa Clara Law Review*, **52**(4):1321–1340, 2012. <https://digitalcommons.law.scu.edu/lawreview/vol52/iss4/6> [aufgerufen 25.11.2021].
- [16] M. F. LOHMANN. **Liability Issues Concerning Self-Driving Vehicles.** *European Journal of Risk Regulation*, **7**(2):335–340, 2016. doi:10.1017/S1867299X00005754.
- [17] DEUTSCHER BUNDESTAG. **Ursachen von Verkehrsstaus 2020.** 2020. www.bundestag.de/resource/blob/709142/acf9f7b648f0899152750d20ca4af7d5/WD-5-050-20-pdf-data.pdf [aufgerufen 02.11.2021].
- [18] A. KESTING, M. TREIBER, M. SCHÖNHOF, F. KRANKE, AND D. HELBING. **Jam-Avoiding Adaptive Cruise Control (ACC) and its Impact on Traffic Dynamics.** In *Traffic and Granular Flow'05*, **49**, pages 633–643. Springer, 2007. doi:10.1007/978-3-540-47641-2_62.
- [19] N. H. T. S. ADMINISTRATION. **Crash Stats: Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey.** 2015. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812115> [aufgerufen 15.06.2020].
- [20] B. SCHOETTLE. **Sensor Fusion: A Comparison of Sensing Capabilities of Human Drivers and Highly Automated Vehicles.** 2017. <http://umich.edu/umtriswt/PDF/SWT-2017-12.pdf> [aufgerufen 25.11.2021].
- [21] ETSI. **EN 302 637-2 - Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basis Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service.** Technical Report V1.3.1, European Telecommunications Standards Institute (ETSI), 2014. https://www.etsi.org/deliver/etsi_EN/302600_302699/30263702/01.04.01_30/en_30263702v010401v.pdf [aufgerufen 25.11.2021].
- [22] J. MA, F. ZHOU, Z. HUANG, C. L. MELSON, R. JAMES, AND X. ZHANG. **Hardware-in-the-Loop Testing of Connected and Automated Vehicle Applications: A Use Case for Queue-Aware Signalized Intersection Approach and Departure.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2672**(22):36–46, 2018. doi:10.1177/0361198118793001.

- [23] Y.-M. YUAN, R. JIANG, M.-B. HU, Q.-S. WU, AND R. WANG. **Traffic flow characteristics in a mixed traffic system consisting of ACC vehicles and manual vehicles: A hybrid modelling approach.** *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **388**(12):2483–2491, 2009. doi:10.1016/j.physa.2009.02.033.
- [24] J. VANDERWERF, S. SHLADOVER, N. KOURJANSKAIA, M. MILLER, AND H. KRISHNAN. **Modeling Effects of Driver Control Assistance Systems on Traffic.** *Transportation Research Record*, **1748**(1):167–174, 2001. doi:10.3141/1748-21.
- [25] L. YE AND T. YAMAMOTO. **Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow.** *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **490**:269–277, 2018. doi:10.1016/j.physa.2017.08.015.
- [26] D. A. DICKIE AND L. N. BOYLE. **Drivers’ Understanding of Adaptive Cruise Control Limitations.** *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, **53**(23):1806–1810, 2009. doi:10.1177/154193120905302313.
- [27] K. FUNKHOUSER AND F. DREWS. **Putting the Brakes on Autonomous Vehicle Control.** *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, **60**(1):1859–1863, 2016. doi:10.1177/1541931213601424.
- [28] G. RICHTER, L. GROHMANN, P. NITSCHKE, AND G. LENZ. **Anticipating Automated Vehicle Presence and the Effects on Interactions with Conventional Traffic and Infrastructure.** In *SUMO User Conference 2019*, **62**, pages 230–243, 2019. doi:10.29007/s6m7.
- [29] B. FRIEDRICH. **The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic.** In *Autonomous driving*, pages 317–334. Springer, 2016. doi:10.1007/978-3-662-48847-8_16.
- [30] X. HU, M. HUANG, AND J. GUO. **Feature Analysis on Mixed Traffic Flow of Manually Driven and Autonomous Vehicles Based on Cellular Automata.** *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**(4):1–7, 2020. doi:10.1155/2020/7210547.
- [31] POTTMEIER. *Realistic Cellular Automaton Model for Synchronized Two-Lane Traffic: Simulation, Validation, and Applications.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2007.
- [32] W. KNOSPE, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Empirical test for cellular automaton models of traffic flow.** *Physical Review E*, **70**(25):016115, Jul 2004. doi:10.1103/PhysRevE.70.016115.
- [33] K. NAGEL AND M. SCHRECKENBERG. **A cellular automaton model for freeway traffic.** *Journal de Physique I*, **2**(12):2221–2229, 1992. doi:10.1051/jp1:1992277.
- [34] A. SCHADSCHNEIDER. **Physik des Straßenverkehrs: Skript zur Vorlesung.** 2004. <http://www.thp.uni-koeln.de/~as/Mypage/PSfiles/verkehr.pdf>. Universität zu Köln [aufgerufen 25.11.2021].
- [35] M. TREIBER AND A. KESTING. *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik.* Springer, 2010. doi:10.1007/978-3-642-05228-6.
- [36] K.-P. DÖGE. *Videodetektion im Straßenverkehr: Signalmodelle und Analyseverfahren.* Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2013. doi:10.1524/9783486720075.

- [37] N. SAVIĆ, M. JUNGHANS, AND M. KRSTIĆ. **Traffic Data Collection Using Tire Pressure Monitoring System.** In *Telematics - Support for Transport*, 471 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 19–28. Springer, 2014. doi:10.1007/978-3-662-45317-9_3.
- [38] L. HABEL, C. IDE, M. SCHRECKENBERG, AND C. WIETFELD. **Improving Vehicular Traffic Simulations Using Real-Time Information on Environmental Conditions.** In *84th Vehicular Technology Conference*, pages 1–5. IEEE, 2016. doi:10.1109/VTCFall.2016.7881044.
- [39] S. PIEPER, F. KUNDE, AND P. SAUER. **Anonymisierung von Floating Car Data.** In *Management digitaler Plattformen*, Informationsmanagement und digitale Transformation, pages 285–295. Springer, 2018. doi:10.1007/978-3-658-21214-8_18.
- [40] B. S. KERNER AND H. REHBORN. **Experimental features and characteristics of traffic jams.** *Physical Review E*, **53**(2):R1297–R1300, 1996. doi:10.1103/PhysRevE.53.R1297.
- [41] N. CHIABAUT, C. BUISSON, AND L. LECLERCQ. **Fundamental Diagram Estimation Through Passing Rate Measurements in Congestion.** *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **10**(2):355–359, 2009. doi:10.1109/TITS.2009.2018963.
- [42] G. DERVISOGLU, G. GOMES, J. KWON, A. MURALIDHARAN, P. VARAIYA, AND R. HOROWITZ. **Automatic Calibration of the Fundamental Diagram and Empirical Observations on Capacity.** *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, page 15, 2009. https://people.eecs.berkeley.edu/~varaiya/papers_ps.dir/trbParameter_Calibration.pdf [aufgerufen 25.11.2021].
- [43] B. S. KERNER, S. L. KLENOV, A. HILLER, AND H. REHBORN. **Microscopic features of moving traffic jams.** *Physical Review E*, **73**:046107, 2006. doi:10.1103/PhysRevE.73.046107.
- [44] B. S. KERNER. **Congested Traffic Flow: Observations and Theory.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1678**(1):160–167, 1999. doi:10.3141/1678-20.
- [45] B. S. KERNER, H. REHBORN, R.-P. SCHÄFER, S. L. KLENOV, J. PALMER, S. LORKOWSKI, AND N. WITTE. **Traffic dynamics in empirical probe vehicle data studied with three-phase theory: Spatiotemporal reconstruction of traffic phases and generation of jam warning messages.** *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **392**(1):221–251, 2013. doi:10.1016/j.physa.2012.07.070.
- [46] B. S. KERNER. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory.* Springer, 2009. doi:10.1007/978-3-642-02605-8.
- [47] B. S. KERNER. *Physics of Traffic: Empirical Freeway Pattern Features, Engineering Applications, and Theory.* Springer, 2004. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-540-40986-1>.
- [48] R. JIANG AND Q.-S. WU. **First order phase transition from free flow to synchronized flow in a cellular automata model.** *The European Physical Journal B*, **46**(4):581–584, 2005. doi:10.1140/epjb/e2005-00290-4.
- [49] B. S. KERNER, S. L. KLENOV, AND A. HILLER. **Empirical test of a microscopic three-phase traffic theory.** *Nonlinear Dynamics*, **49**(4):525–553, 2007. doi:10.1007/s11071-006-9113-1.
- [50] M. J. LIGHTHILL AND G. B. WHITHAM. **On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads.** *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **229**(1178):317–345, 1955. doi:10.1098/rspa.1955.0089.

- [51] D. HELBING, A. HENNECKE, V. SHVETSOV, AND M. TREIBER. **MASTER: macroscopic traffic simulation based on a gas-kinetic, non-local traffic model.** *Transportation Research Part B: Methodological*, **35**(2):183–211, 2001. doi:10.1016/S0191-2615(99)00047-8.
- [52] M. OBAID AND A. TOROK. **Macroscopic Traffic Simulation of Autonomous Vehicle Effects.** *Vehicles*, **3**(2):187–196, 2021. doi:10.3390/vehicles3020012.
- [53] J. C. GERDES AND S. M. THORNTON. **Implementable Ethics for Autonomous Vehicles.** In *Autonomes Fahren*, **14**, pages 87–102. Springer, 2015. doi:10.1007/978-3-662-45854-9_5.
- [54] S. NYHOLM AND J. SMIDS. **Automated cars meet human drivers: responsible human-robot coordination and the ethics of mixed traffic.** *Ethics and Information Technology*, **9**(4):332, 2018. doi:10.1007/s10676-018-9445-9.
- [55] M. INNERS AND A. L. KUN. **Beyond Liability.** In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pages 245–253. ACM, 2017. doi:10.1145/3122986.3123005.
- [56] J. LUDMANN. *Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Straßen : Analyse mit dem fahrzeugorientierten Verkehrssimulationsprogramm PELOPS.* Dissertation, Aachen, 1998.
- [57] V. A. VU AND G. TAN. **High-performance mesoscopic traffic simulation with GPU for large scale networks.** In *2017 IEEE/ACM 21st International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, pages 1–9, 2017. doi:10.1109/DISTRA.2017.8167676.
- [58] T. TOLEDO, T. BALASHA, AND M. KEBLAWI. **Optimization of Actuated Traffic Signal Plans Using a Mesoscopic Traffic Simulation.** *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, **146**(6):04020041, 2020. doi:10.1061/JTEPBS.0000363.
- [59] F. D. SOUZA, O. VERBAS, AND J. AULD. **Mesoscopic Traffic Flow Model for Agent-Based Simulation.** *Procedia Computer Science*, **151**:858–863, 2019. doi:10.1016/j.procs.2019.04.118.
- [60] P. SARKAR. **A brief history of cellular automata.** *ACM Computing Surveys*, **32**(1):80–107, 2000. doi:10.1145/349194.349202.
- [61] A. ADAMATZKY. *Game of Life Cellular Automata.* Springer, 2010. doi:10.1007/978-1-84996-217-9.
- [62] M. ABDOU, L. HAMILL, AND N. GILBERT. **Designing and Building an Agent-Based Model.** In *Agent-Based Models of Geographical Systems*, pages 141–165. Springer, 2012. doi:10.1007/978-90-481-8927-4_8.
- [63] S. KRAUSS, P. WAGNER, AND C. GAWRON. **Metastable states in a microscopic model of traffic flow.** *Physical Review E*, **55**(5):5597–5602, 1997. doi:10.1103/PhysRevE.55.5597.
- [64] D. P. H. KALISCH. *SIMS: Über die Möglichkeiten der Simulation gruppensdynamischer Prozesse.* Tectum-Verlag, 2003. isbn 3828885845.
- [65] F. SEREDYNSKI AND A. Y. ZOMAYA. **Sequential and parallel cellular automata-based scheduling algorithms.** *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, **13**(10):1009–1023, 2002. doi:10.1109/TPDS.2002.1041877.

- [66] J. TREITERER. **Investigation of Traffic Dynamics by Aerial Photogrammetry Techniques**. 1975. http://tft.eng.usf.edu/greenshields/docs/Treiterer_Dynamics.pdf [aufgerufen 26.11.2021].
- [67] W. KNOSPE, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Towards a realistic microscopic description of highway traffic**. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **33**(48):L477–L485, 2000. doi:10.1088/0305-4470/33/48/103.
- [68] W. HUGEMANN. **Driver Reaction Times in Road Traffic**. 2002. https://www.unfallrekonstruktion.de/pdf/evu_2002_reaction_english.pdf [aufgerufen 14.11.2021].
- [69] DEUTSCHER BUNDESTAG. **Autobahn-Richtgeschwindigkeits-Verordnung**. 2009. https://www.gesetze-im-internet.de/babrigeschwv_1978/BJNR018240978.html [aufgerufen 22.11.2021].
- [70] R. BARLOVIC, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Metastable states in cellular automata for traffic flow**. *The European Physical Journal B*, **5**(3):793–800, 1998. doi:10.1007/s100510050504.
- [71] A. I. DELIS, I. K. NIKOLOS, AND M. PAPAGEORGIOU. **Macroscopic traffic flow modeling with adaptive cruise control: Development and numerical solution**. *Computers & Mathematics with Applications*, **70**(8):1921–1947, 2015. doi:10.1016/j.camwa.2015.08.002.
- [72] A. POTTMEIER, C. THIEMANN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Mechanical Restriction Versus Human Overreaction: Accident Avoidance and Two-Lane Traffic Simulations**. In *Traffic And Granular Flow'05*, pages 503–508. Springer, 2007. doi:10.1007/978-3-540-47641-2_46.
- [73] W. BRILON, M. REGLER, AND J. GEISTEFELDT. **Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen**. *Strassenverkehrstechnik, Heft 3 (Teil 1) und Heft 4 (Teil 2)*, 2005. https://www.ruhr-uni-bochum.de/verkehrswesen/download/literatur/Zufallscharakter2005_05_29.pdf [aufgerufen 29.11.2021].
- [74] R. MAHNKE AND R. KÜHNE. **Probabilistic Description of Traffic Breakdown**. In *Traffic and Granular Flow'05*, **56**, pages 527–536. Springer, 2007. doi:10.1007/978-3-540-47641-2_50.
- [75] L. NEUBERT, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Single-vehicle data of highway traffic: a statistical analysis**. *Physical Review E*, **60**(6 Pt A):6480–6490, 1999. doi:10.1103/PhysRevE.60.6480.
- [76] A. POTTMEIER, R. BARLOVIC, W. KNOSPE, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Localized defects in a cellular automaton model for traffic flow with phase separation**. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **308**(1-4):471–482, 2002. doi:10.1016/S0378-4371(02)00547-2.
- [77] W. KNOSPE, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Microscopic Modeling of Synchronized Traffic**. In *Traffic and Granular Flow'01*, **1**, pages 97–102. Springer, 2003. doi:10.1007/978-3-662-10583-2_8.

- [78] W. KNOSPE, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **Single-vehicle data of highway traffic: microscopic description of traffic phases.** *Physical Review E*, **65**:056133, May 2002. doi:10.1103/PhysRevE.65.056133.
- [79] C. NOWAKOWSKI, J. O'CONNELL, S. E. SHLADOVER, AND D. CODY. **Cooperative Adaptive Cruise Control: Driver Acceptance of Following Gap Settings Less than One Second.** *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, **54**(24):2033–2037, 2010. doi:10.1177/154193121005402403.
- [80] M. KUMM AND M. SCHRECKENBERG. **Statistical Analysis of Temporal Headway Development through Empirical Data in Urban Traffic.** In *2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*, pages 1–9. IEEE, 2019. doi:10.1109/MTITS.2019.8883284.
- [81] DEUTSCHER BUNDESTAG. **Straßenverkehrs-Ordnung: StVO.** 2013. www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/ [aufgerufen 25.11.2021].
- [82] B. BEHROOZPOUR, P. A. M. SANDBORN, M. C. WU, AND B. E. BOSER. **Lidar System Architectures and Circuits.** *IEEE Communications Magazine*, **55**(10):135–142, 2017. doi:10.1109/MCOM.2017.1700030.
- [83] S. PETTIGREW. **Why public health should embrace the autonomous car.** *Australian and New Zealand journal of public health*, **41**(1):5–7, 2017. doi:10.1111/1753-6405.12588.
- [84] J. VANDER WERF, S. E. SHLADOVER, M. A. MILLER, AND N. KOURJANSKAIA. **Effects of Adaptive Cruise Control Systems on Highway Traffic Flow Capacity.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1800**(1):78–84, 2002. doi:10.3141/1800-10.
- [85] M. MAURER, J. C. GERDES, B. LENZ, AND H. WINNER, editors. *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte.* Springer, 2015. doi:10.1007/978-3-662-45854-9.
- [86] M. BOBAN, A. KOUSARIDAS, K. MANOLAKIS, J. EICHINGER, AND W. XU. **Connected Roads of the Future: Use Cases, Requirements, and Design Considerations for Vehicle-to-Everything Communications.** *IEEE Vehicular Technology Magazine*, **13**(3):110–123, 2018. doi:10.1109/MVT.2017.2777259.
- [87] B. SLIWA, T. LIEBIG, T. VRANKEN, M. SCHRECKENBERG, AND C. WIETFELD. **System-of-systems modeling, analysis and optimization of hybrid vehicular traffic.** In *2019 Annual IEEE International Systems Conference.* IEEE, 2019. doi:10.1109/SYSCON.2019.8836786.
- [88] L. HABEL AND M. SCHRECKENBERG. **Asymmetric Lane Change Rules for a Microscopic Highway Traffic Model.** In *Cellular automata*, **8751** of *Lecture Notes in Computer Science / Theoretical Computer Science and General Issues*, pages 620–629. Springer, 2014. doi:10.1007/978-3-319-11520-7_66.
- [89] M. VECHIONE, E. BALAL, AND R. L. CHEU. **Comparisons of mandatory and discretionary lane changing behavior on freeways.** *International Journal of Transportation Science and Technology*, **7**(2):124–136, 2018. doi:10.1016/j.ijtst.2018.02.002.
- [90] U. SPARMANN. **Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen.** In *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, 263. Institut für Verkehrswesen, Karlsruhe, 1987.

- [91] D. CHOWDHURY, L. SANTEN, AND A. SCHADSCHNEIDER. **Statistical physics of vehicular traffic and some related systems.** *Physics Reports*, **329**(4-6):199–329, 2000. doi:10.1016/s0370-1573(99)00117-9.
- [92] A. GOLDENTAL AND I. KANTER. **A minority of self-organizing autonomous vehicles significantly increase freeway traffic flow.** *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, **53**(41):414001, 2020. doi:10.1088/1751-8121/abb1e1.
- [93] M. RICKERT, K. NAGEL, M. SCHRECKENBERG, AND A. LATOUR. **Two lane traffic simulations using cellular automata.** *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **231**(4):534–550, 1996. doi:10.1016/0378-4371(95)00442-4.
- [94] W. KNOSPE, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, AND M. SCHRECKENBERG. **A realistic two-lane traffic model for highway traffic.** *Journal of Physics A: Mathematical and General*, **35**(15):3369–3388, 2002. doi:10.1088/0305-4470/35/15/302.
- [95] L. HABEL AND M. SCHRECKENBERG. **Analysis of Asymmetric Lane Changing in a CA-Based Highway Traffic Model.** *Journal of Cellular Automata*, **4**:351–361, 2016.
- [96] B. S. KERNER. *Breakdown in Traffic Networks.* Springer, 2017. doi:10.1007/978-3-662-54473-0.
- [97] L. JIN, M. ČIČIĆ, S. AMIN, AND K. H. JOHANSSON. **Modeling the Impact of Vehicle Platooning on Highway Congestion.** In *Proceedings of the 21st International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control*, pages 237–246. ACM, 2018. doi:10.1145/3178126.3178146.
- [98] M. SHAWKY. **Factors affecting lane change crashes.** *IATSS Research*, **44**(2):155–161, 2020. doi:10.1016/j.iatssr.2019.12.002.
- [99] H. JULA, E. B. KOSMATOPOULOS, AND P. A. IOANNOU. **Collision avoidance analysis for lane changing and merging.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **49**(6):2295–2308, 2000. doi:10.1109/25.901899.
- [100] T. DING, X. LI, L. ZHENG, AND Z. HAO. **Research on Safety Lane Change Warning Method Based on Potential Angle Collision Point.** *Journal of Advanced Transportation*, **2019**(3):1–14, 2019. doi:10.1155/2019/1281425.
- [101] B. SLIWA AND C. WIETFELD. **Empirical analysis of client-based network quality prediction in vehicular multi-MNO networks.** In *90th Vehicular Technology Conference*, pages 1–7. IEEE, 2019. doi:10.1109/VTCFall.2019.8891392.
- [102] M. KUTILA, K. KAUVU, P. AALTO, V. G. MARTINEZ, M. NIEMI, AND Y. ZHENG. **5G Network Performance Experiments for Automated Car Functions.** In *3rd 5G World Forum*, pages 366–371. IEEE, 2020. doi:10.1109/5GWF49715.2020.9221295.
- [103] C. KALALAS AND J. ALONSO-ZARATE. **Massive Connectivity in 5G and Beyond: Technical Enablers for the Energy and Automotive Verticals.** In *2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pages 1–5, 2020. doi:10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083809.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Empirisches und skizziertes Fundamentaldiagramm	9
2.2	Skizze des Fundamentaldiagramms der Drei-Phasen-Theorie	12
3.1	Moor und Von-Neumann Nachbarschaften	17
3.2	Skizze einer Fahrzeugkonfiguration in einem Zellularenautomaten. . . .	18
4.1	Effekt der Zeitschrittreduzierung auf die zurückgelegte Strecke während des Beschleunigungs- und Bremsprozesses.	28
4.2	Mittlerer Ausfluss aus einem Stau	36
4.3	Autokorrelation der Daten einer Messschleife mit zeitlich versetzten Daten derselben Stelle.	37
4.4	Mittlere Geschwindigkeit, mit der sich ein Stau entgegen der Fahrtrichtung ausbreitet	38
4.5	Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten im Freifluss	39
4.6	Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten in der synchronisierten Phase	41
4.7	Anteil der optimistischen Fahrer in Abhängigkeit der Dichte	43
4.8	Fundamentaldiagramme der Modelle	45
5.1	Fundamentaldiagramm für homogenen AF und MF Verkehr	53
5.2	Fundamentaldiagramm für AF, welche den Sicherheitsabstand wie MF Agenten bestimmen	55
5.3	Fundamentaldiagramm für AF, welche wie MF trödeln	56
5.4	Fundamentaldiagramm für AF mit erhöhter Reaktionszeit	57

5.5	Fundamentaldiagramm für heterogenen Verkehr mit einem Anteil von 10% AF.	60
5.6	Normierte Steigerung der Straßenkapazität in Abhängigkeit des Anteils der AF	61
5.7	Fluss für 70% automatisierten Verkehr in verschiedenen Simulationsinstanzen	63
5.8	Normierte Steigerung der Straßenkapazität in Abhängigkeit der automatisierten Fahrzeuge mit und ohne passives Verhalten der automatisierten Agenten.	65
6.1	Normierte Steigerung der Straßenkapazität in Abhängigkeit der kommunizierenden automatisierten Fahrzeuge	72
6.2	Einfluss der Platoonlänge von (K)AF auf die Straßenkapazität	75
7.1	Skizze einer Fahrzeugkonfiguration in einem zweispurigen System	79
7.2	Fundamentaldiagramm des zweispurigen homogenen MF Verkehrs	86
7.3	Spurwechselzahlen im homogenen MF Modell	87
7.4	Fundamentaldiagramm des zweispurigen heterogenen Verkehrs bei einem Anteil von 50% MF und AF Agenten	88
7.5	Wahrscheinlichkeit eines automatisierten Fahrzeugs einem anderen Fahrzeug in heterogenem zweispurigen Verkehr zu folgen.	90
7.6	Einfluss von AF auf die Spurwechselzahlen	92
7.7	Straßenkapazität in Abhängigkeit der Durchdringungsrate von AF in zweispurigem Verkehr.	94
7.8	Ausfluss aus einem Stau in Abhängigkeit der Durchdringungsrate von AF	95
7.9	Mittlere Staugeschwindigkeit in Abhängigkeit der Durchdringungsrate von AF	97
7.10	Verteilung der Fahrzeugfolgezeiten in Abhängigkeit der Durchdringungsrate von AF	98

Publikationen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Veröffentlichungen publiziert:

- T. Vranken, B. Sliwa, C. Wietfeld & M. Schreckenberg, „Adapting a cellular automata model to describe heterogeneous traffic with human-driven, automated, and communicating automated vehicles“, in *Physica a*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125792>
- T. Vranken & M. Schreckenberg, „Modelling multi-lane heterogeneous traffic flow with human-driven, automated, and communicating automated vehicles“, in *Physica a*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126629>

Außerdem wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 876 die folgenden weiteren Veröffentlichungen publiziert:

- T. Vranken, B. Sliwa, C. Wietfeld & M. Schreckenberg, „Performance Comparison of Dynamic Vehicle Routing Methods for Minimizing the Global Dwell Time in Upcoming Smart Cities“, in *IEEE 88th Vehicular Technology Conference*, 2018, doi: [10.1109/VTCFall.2018.8690655](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690655)
- B. Sliwa, T. Liebig, T. Vranken, M. Schreckenberg & C. Wietfeld, „System-of-Systems Modeling, Analysis and Optimization of Hybrid Vehicular Traffic“, in *Annual IEEE International Systems Conference*, 2019, doi: [10.1109/SYS-CON.2019.8836786](https://doi.org/10.1109/SYS-CON.2019.8836786)
- T. Vranken & M. Schreckenberg, „Cellular Automata Intersection Model“, in *Collective Dynamics*, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.17815/CD.2020.80>

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, die vorliegende Dissertation selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als den angegebenen Quellen angefertigt zu haben. Alle, aus fremden Werken direkt oder indirekt übernommene Inhalte, sind als solche gekennzeichnet.

Die vorliegende Dissertation wurde in keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht. Mit dieser Arbeit strebe ich die Erlangung des akademischen Grades "Doktor der Naturwissenschaften" (Dr. rer. nat.) an.

Duisburg, 01.03.2022

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/76122

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20220630-143246-0



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 Lizenz (CC BY 4.0) genutzt werden.