

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

Bachelorthesis

zur Erreichung des akademischen Grades Bachelor of Science

Thema:	Autonomes Fahren: Einflussnahme von statistischem Rauschen auf
	die Dynamik von Fahrzeugfolgemodellen
Autor:	Marius Alhelm
Matrikel-Nr.:	1429954
Studiengang:	B.Sc. Sicherheitstechnik
Universität:	Bergische Universität Wuppertal
Bearbeitungszeitraum:	28. August 2019 - 27. November 2019
1. Prüfer:	JunProf. Dr. Antoine Tordeux
2. Prüfer:	M.Sc. Basma Khelfa

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit, erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit (Bachelorthesis) selbstständig verfasst und keine andere als die angegebene Quelle und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Ort und Datum:

Unterschrift:

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit der Bergischen Universität Wuppertal entstanden. Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux danke ich für die hervorragende kontinuierliche Betreuung und die umfassende Unterstützung bei meiner Arbeit. Seine wissenschaftlichen Ratschläge und kritischen Betrachtungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Abschließend und im besonderen Maße gilt mein Dank meiner Familie, die mich in sämtlichen Belangen über den gesamten Zeitraum meines Studiums ausnahmslos unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

AbkürzungsverzeichnisVI
AbbildungsverzeichnisVII
TabellenverzeichnisIX
KurzfassungX
1 Einleitung 1
1.1 Problematik1
1.2 Lösung und ihre Herausforderung2
1.3 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise
2 Das autonome Fahren
2.1 Klassifizierung in sechs Automatisierungsstufen4
2.2 Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge6
2.2.1 Wahrnehmung6
2.2.2 Bewegungsplanung7
2.2.3 Ausführung7
2.3 Bewältigung von Herausforderungen durch automatisiertes und autonomes Fahren8
2.4 Autonomes Fahren in der Gegenwart / Unsicherheiten und Störungen
3 Charakteristiken der Verkehrsdynamik und -simulation10
3.1 Mikroskopische Variablen
3.2 Makroskopische Variablen12
3.3 Fundamentaldiagramme13
3.4 Trajektorien
3.5 Instabilität des Verkehrsflusses - Stop-and-Go-Stauwellen
4 Verkehrsflussmodellierung automatisierter Fahrzeuge
4.1 Fahrzeugfolgemodelle - Allgemeines17
4.2 Geschwindigkeit basiertes Modell19
4.3 Abstand basiertes Modell
4.4 Abstand und Geschwindigkeit basierte Modelle21
4.4.1 Full-Velocity-Difference-Model21
4.4.2 Constant-Time-Gap Model21

4.4.3 Adaptive-Time-Gap Model	22
4.5 Stabilität der Fahrzeugfolgemodelle	23
4.5.1 Lokale Stabilität	23
4.5.2 Globale Stabilität	24
4.6 NetLogo	25
5 Durchführung der Simulationen	26
5.1 Simulations-Interface	26
5.2 Methodik	28
5.2.1 Festlegung der Modellparameter und -variablen	28
5.2.2 Simulation / Ablauf des Simulationszyklus / Ausgabe von Daten	29
6 Ergebnisse und Auswertung	31
6.1 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlicher Anpassungszeit <i>Tr</i>	31
6.2 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlicher Anpassungszeit Tr	33
6.3 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlicher Geschwindigkeit V0	34
6.4 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlicher Geschwindigkeit V0	36
6.5 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen	38
6.6 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen	39
6.7 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlichem lichtem Zeitabstand / Wunschzeitabs	tand 40
6.8 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlichem lichtem Zeitabstand / Wunschzeitabs T	tand 42
6.9 Abschließender Vergleich ATG-Modell und CTG-Modell mit gleichen Parametern Variablen unter dem Einfluss von Störungen	und 43
7 Diskussion und Fazit	47
Literatur	51
Anhang	53

Abkürzungsverzeichnis

Die aufgeführten Abkürzungen und Bezeichnungen sind in alphabetischer Ordnung wiedergegeben.

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ATG	Adaptive-Time-Gap Model
CTG	Constant-Time-Gap Model
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FD	Fundamentaldiagramm
FVDM	Full-Velocity-Difference Model
GPS	Global Positioning System
OVM	Optimal-Velocity-Modell
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 27 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten CTG N=20 und CTG N=25 bei steigendem Sigma
Abbildung 26 Standardabweichung des Abstandes CTG N=20 und CTG N=25 bei steigendem Sigma
Abbildung 25 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG N=20 und ATG N=25 bei steigendem Sigma 39
Abbildung 24 Standardabweichung des Abstandes ATG N=20 und ATG N=25 bei steigendem Sigma
[m/s] bei steigendem Sigma
Abbildung 23 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten CTG V0=13,889 [m/s] und CTG V0=36,111
steigendem Sigma
Abbildung 22 Standardabweichung des Abstandes CTG V0=13,889 [m/s] und CTG V0=36,111 [m/s] bei
steigendem Sigma
Abbildung 21 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG V0=13,889 [m/s ²] und ATG V0=36,111 [m/s ²] bei
steigendem Sigma35
Abbildung 20 Standardabweichung des Abstandes ATG V0=13,889 [m/s] und ATG V0=36,111 [m/s] bei
Sigma
Abbildung 19 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten CTG Tr=1 s und CTG TR=5 s bei steigendem
Abbildung 18 Standardabweichung des Abstandes CTG Tr=1 s und CTG Tr=5 s bei steigendem Sigma
Sigma
Abbildung 17 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten ATG Tr=1 s und ATG Tr=5 s bei steigendem
Abbildung 16 Standardabweichung des Abstandes ATG Tr=1 s und ATG Tr=5 s bei steigendem Sigma
Abbildung 15 Trajektorien im NetLogo Interface während einer Simulation
Abbildung 14 Einstellung der Modellparameter in NetLogo
Abbildung 13 Darstellung des Interfaces während einer laufenden Simulation
Abbildung 12 Ist das homogene Gleichgewicht stabil oder instabil? (entnommen aus [10])23
Abbildung 11 Brutto- und Nettoabstand zwischen zwei Einzelfahrzeugen [10]
Abbildung 10 Ausbreitung von Stop-and-Go Stauwellen
Abbildung 9 Idealisierte Trajektorien
Abbildung 8 Trajektorien auf einem britischen Autobahnabschnitt
Abbildung 7 Mikro / Makro Zusammenhang graphisch dargestellt
Abbildung 6 Makroskopisches Fundamentaldiagramm
Abbildung 5 Makroskopisches Fluss-Dichte-Diagramm A5-Nord bei Frankfurt (entnommen aus [16]) 13
Abbildung 4 Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge [10]7
Abbildung 3 Erfassung exogener Daten mittels Sensortechnik
Abbildung 2 Automatisierungsstufen des automatisierten Fahrens nach SAE J3016 Norm [8]4
Abbildung 1 Entwicklung der Urbanisierung weltweit (Daten entnommen aus [2])1

Abbildung 28 Standardabweichung des Abstandes ATG T=0,8 s und ATG T=1,85 s bei steigendem
Sigma41
Abbildung 29 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG T=0,8 s und ATG T=1,85 s bei steigendem Sigma.41
Abbildung 30 Standardabweichung des Abstandes CTG T=0,8 s und CTG T=1,85 s bei steigendem
Sigma42
Abbildung 31 Durchschnittsgeschwindigkeit CTG T=0,8 s und CTG T=1,85 s bei steigendem Sigma 43
Abbildung 32 Standardabweichung des Abstandes ATG und CTG bei steigendem Sigma44
Abbildung 33 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG und CTG bei steigendem Sigma45
Abbildung 34 Standardabweichung des Abstandes ATG und CTG bei um 0,05 steigendem Sigma45
Abbildung 35 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG und CTG bei um 0,05 steigendem Sigma46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Mikro / Marko Beziehung Geschwindigkeit als Funktion des Abstandes	14
Tabelle 2 lokale und globale Stabilität für ATG und CTG unter folgenden Variablen	24
Tabelle 3 Schaltflächen und Optionen im Interface von NetLogo	27

Kurzfassung

Ziel der Bachelorthesis war die Untersuchung des Einflusses von Rauschstörungen auf die Dynamik der Fahrzeugfolgemodelle Adaptive-Time-Gap (ATG) und Constant-Time-Gap (CTG). Das Rauschen in den Modellen kann als eine zufällig auftretende Unvorhersehbarkeit oder Irrationalität in der Signalverarbeitung von Systemen oder des menschlichen Fahrverhaltens beschrieben werden. Die Störungen wirken auf die gewünschte Beschleunigung der Fahrzeugeinheiten ein und bewirken in den Modellen, bei anfänglich freiem Verkehrsfluss, das Auftreten von Schwankungen in der Verkehrsflussdynamik. Diese Schwankungen können sich, ähnlich wie in der Realität, in Fahrzeugkolonnen weiter aufschaukeln und zur Bildung von Stop-and-Go Wellen führen. Verkehrsinstabilitäten führen zu einer Vielzahl von Problemen, daher gilt es den Einfluss der Störungen und den Zusammenhang der Schwankungen in der Dynamik auf der Basis von zwei unterschiedlichen Fahrzeugfolgemodellen zu analysieren. Die Modelle unterscheiden sich in ihrer Differentialgleichung und sind beide dazu in der Lage festzulegen, wie Fahrzeuge sich in einer Kolonne bewegen. Dabei ist eine Differentialgleichung nicht-linear (ATG) und die andere linear (CTG). Über die Regelung der Anpassungszeit innerhalb der Modelle kann auch das Folgen mit einem ACC-System vereinfacht dargestellt werden. Die Analyse wurde mit der open source software NetLogo durchgeführt. In die Software wurde über einen Programmiercode ein Zyklus implementiert, der die Rauschstörung kontinuierlich erhöht.

Abstract

The aim of the bachelor thesis was to investigate the influence of white noise on the dynamics of the car-following models Adaptive-Time-Gap (*ATG*) and Constant-Time-Gap (*CTG*). White noise in the models can be described as an unpredictability or an irrationality in signal processing or in the nature of human driving behaviour. By adding a disturbance to the cars desired acceleration in a free flow traffic condition, formations and propagations of traffic oscillations can occur. These traffic flow oscillations, including the phenomenon of Stop-and-Go waves, lead to a variety of problems. Therefore the context between traffic flow oscillations and the influence of disturbances were analysed on the basis of two different car-following models. The models differ from each other in the differential equation and are both able to determine how vehicles follow one another on a roadway. One differential equation is designed non-linear (ATG) the other is designed linear (CTG). Via regulation of time adaptation between the cars and within the models, it is possible to describe a car-following on the basis of ACC-systems. The analysis was conducted with the open source software NetLogo. Within the software a programming code equipped the car-following models with a cycle that raised the white noise level continuously.

1 Einleitung

1.1 Problematik

Die Entwicklung, dass Menschen vom Land in die Stadt ziehen, ist ein Trend der die letzten Jahrzehnte andauert. (vgl. Abbildung 1) Durch globales Bevölkerungswachstum [1] und steigende Urbanisierung [2] wachsen Städte und Metropolen zu immer größeren Ballungsräumen heran, mit der Folge, dass Straßenverkehrsnetze in diesen Regionen häufiger und insbesondere zu Hauptverkehrszeiten (peak hours) überlastet sind. Aus der Überlastung der Verkehrsnetze resultieren vermehrt Instabilitäten der Verkehrsflussdynamik die sich in Form von Staus oder der Bildung von Stop-and-Go Wellen äußern. Nach einer Analyse der ADAC Staudatenbank bildeten sich im Jahr 2018 rund 745.000 Staus - etwa drei Prozent mehr als 2017. [3] Der Einfluss der Instabilitäten und die damit verbundene Einschränkung der Mobilität ist umfassend. Logistische Prozesse der Industrie werden verlangsamt und erhöhter Kraftstoffverbrauch, Schadstoffemission und Lärm haben negative Auswirkungen auf die Umwelt. Auch in Anbetracht des Bestandes an zugelassenen Fahrzeugen ist eine Abnahme der Verkehrsdichte nicht abzusehen. Laut Kraftfahrt-Bundesamt erhöhte sich der Bestand an zugelassenen Fahrzeugen 2019 in Deutschland im Vergleich zum Vorjahresstichtag um 1,1 Millionen Fahrzeuge auf insgesamt 64,8 Millionen. [4] Mit zunehmender Verkehrsdichte steigt zudem auch das Risikopotential für Verkehrsunfälle. (vgl. Kapitel 2.3) Da der Ausbau der Infrastruktur nur noch selten in der Lage ist mit den Entwicklungen der Urbanisierung und der wachsenden Verkehrsdichte Schritt zu halten, bedarf es alternativer Lösungen.



Abbildung 1 Entwicklung der Urbanisierung weltweit (Daten entnommen aus [2])

1.2 Lösung und ihre Herausforderung

Eine dieser Lösungen könnte das automatisierte und autonome Fahren sein. [5] Beim automatisierten und autonomen Fahren werden zahlreiche Verkehrsgrößen über Sensoren erfasst und mit den Daten des eigenen Fahrzeugs abgeglichen. Mithilfe dieser Daten ist es Systemen möglich, auch bei erhöhtem Verkehrsaufkommen automatisierten die Verkehrsflussdynamik stabil zu halten und gleichzeitig die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer zu verbessern. [6] Das Fahrerassistenzsystem adaptiver Fahrgeschwindigkeitsregler (auch bekannt als Abstandsregeltempomat oder Adaptive Cruise Control) ist für diese Regelung und allgemein im Entwicklungsprozess zum autonomen Fahren ein wichtiges Instrument. Es regelt die Fahrzeuggeschwindigkeit auf die vom Fahrer¹ eingestellte Wunschgeschwindigkeit und passt sie ggf. über die Regulierung der Beschleunigung und Einhaltung eines an vorausfahrende Fahrzeuge an. Jedoch Sicherheitsabstandes kann bei der Signalverarbeitung von vorausfahrenden Fahrzeugen oder anderen Objekten der Umwelt eine Störung im System auftreten. (vgl. Kapitel 2.4) Ein aktuelles Experiment aus dem Mai 2019 hat gezeigt, dass unter dem Einfluss von Störgrößen aktuell auf dem Markt erhältliche Fahrzeuge mit einem ACC-System noch nicht dazu fähig sind kollektive Stabilität herzustellen. [7]

Für das autonome Fahren sind Techniken. Methoden und Erkenntnisse von Fahrerassistenzsystemen wie das ACC daher von großer Bedeutung. Die Herausforderung solcher Systeme ist, dass sie auch unter widrigen Bedingungen eine zuverlässige Sicherheit gewähren müssen. Störungen im System beeinflussen die Sicherheit und die Verkehrsflussdynamik. Mithilfe von Fahrzeugfolgemodellen können wichtige Erkenntnisse über die Auswirkungen solcher Störungen gewonnen werden. Die Modelle können auf der Grundlage mathematischen geschwindigkeitsabstandsbasierten von und Differentialgleichungen Fahrzeugeinheiten mit einer ACC-Funktion nachbilden. Weiterhin kann mit diesen Einheiten der Einfluss der Störungen auf die Verkehrsflussdynamiken modelliert werden.

¹ In dieser Arbeit wird eine geschlechterneutrale Formulierung verwendet. Aufgrund des Textflusses und der Lesbarkeit wird auf die Erwähnung beider Geschlechter verzichtet. Es sind stets beide Geschlechter, männlich sowie weiblich, gemeint.

1.3 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Störungen durch ein Beschleunigungsrauschen auf die Dynamik des Verkehrsflusses in zwei unterschiedlichen stetigen longitudinalen Fahrzeugfolgemodellen untersucht. Betrachtet werden die Fahrzeugfolgemodelle Adaptive-Time-Gap Model (ATG) und eine Modifizierung des Full-Velocity-Difference Modells (FVDM). das Constant-Time-Gap Model (CTG). Das ATG ist Bestandteil der Forschung des Fachgebiets Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit der Bergischen Universität Wuppertal. Beide Modelle haben eine gekoppelte geschwindigkeits- und abstandsbasierte Differentialgleichung als Grundlage und können darüber Fahrzeugeinheiten mit ACC-Funktionen abbilden. Weiterhin ist es möglich beide Modelle mit den gleichen Parametern und Variablen zu modellieren, weswegen auch eine Vergleichbarkeit der Modelle zulässig ist. Ziel dieser Arbeit ist es in beiden Modellen mithilfe eines Simulationsprogrammes Störgrößen hinzuzufügen und den Einfluss auf die Dynamik zu erfassen. Dabei werden im Speziellen folgende Forschungsfragen untersucht:

- Gibt es einen Phasenübergang bei zunehmender Störung vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand innerhalb der Modelle? Wie lassen sich Phasenübergänge darstellen und woran ist globale Stabilität / Instabilität zu erkennen?
- Sind Abhängigkeiten oder Zusammenhänge von Variablen mit dem Rauschen in Bezug auf die Dynamiken in den jeweiligen Fahrzeugfolgemodellen zu erkennen?
- Wie robust sind die Modelle insgesamt gegenüber Störungen?
- Wie könnte das ATG-Modell stabiler gegenüber Störungen gemacht werden?
- Inwiefern können Aussagen der Verkehrsflussdynamik der Fahrzeugfolgemodelle unter Einflussnahme von Störungen auf die Fahrerassistenzsystem außerhalb der Simulationen übertragen werden?
- Wo liegen die Grenzen der Simulation von Dynamiken mit Fahrzeugfolgemodellen?

In Kapitel 2 wird der Entwicklungsprozess zum autonomen Fahrzeug dargestellt und warum in diesem Kontext weitere Erkenntnisse von ACC-Systemen wichtig sind. Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Variablen des Verkehrsflusses. Hier werden die Grundlagen der Verkehrsflussdynamik und -simulation zum Verständnis der Fahrzeugfolgemodelle erklärt. In Kapitel 4 folgt die Vorstellung der zu untersuchenden Modelle. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Festlegung der Parameter und Variablen, sowie der Durchführung der Simulationen. Nach Abschluss der Simulationen werden die Ergebnisse in Kapitel 6 verglichen und mögliche Besonderheiten werden herausgearbeitet.

2 Das autonome Fahren

2.1 Klassifizierung in sechs Automatisierungsstufen

National und international wird der Entwicklungsprozess zu einem fahrerlosen / autonomen Fahren in sechs Automatisierungsstufen klassifiziert. [8] (*vgl. Abbildung 2*)

SAE level	SAE name	SAE narrative definition	Execution of steering and acceleration/ deceleration	Monitoring of driving environment	Fallback performance of dynamic driving task	System capability (driving modes)	BASt level	NHTSA level
Humai	n driver mor	itors the driving environment						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a	Driver only	0
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes	Assisted	1
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes	Partially automated	2
<i>Autom</i> enviro	nated driving nment	<i>system</i> ("system") monitors the driving						
3	Conditional Automation	the driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the human driver will respond appropriately to a request to intervene	System	System	Human driver	Some driving modes	Highly automated	3
4	High Automation	the driving mode-specific performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task, even if a human driver does not respond appropriately to a request to intervene	System	System	System	Some driving modes	Fully automated	24
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving</i> system of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes		5/4

Abbildung 2 Automatisierungsstufen des automatisierten Fahrens nach SAE J3016 Norm [8]

Innerhalb dieser Klassifizierung nimmt der Automatisierungsgrad von Fahraufgaben mit ansteigender Stufe zu. Darüber hinaus lässt sich anhand der Klassifizierung nach SAE J3016 eine Abgrenzung der Begrifflichkeiten vornehmen. Im Folgenden werden die Automatisierungsstufen mit einigen Beispielen erläutert. Die Automatisierungsstufe 0 entspricht einem Fahrzeug bei dem der Fahrer durchgängig die Längsführung (*Gasgeben, Bremsen, Geschwindigkeit halten*) und Querführung (*Lenken*) übernimmt. Das Fahrzeug ist in der Lage Warnungen bei Gefahren (*Spurverlasswarner, Totwinkelüberwachung*) an den Fahrer zu senden und kann über unterstützende Systeme wie ABS oder ESP verfügen. Das Fahrzeug hat keine automatisierte Fahrfunktion.

In der **Automatisierungsstufe 1** kann ein System entweder die Längs- (*ACC-System*) oder Querführung (*Spurhalteassistenten*) übernehmen, während der Fahrer dauerhaft die jeweils andere Führung, sowie alle anderen verbleibenden Fahraufgaben übernimmt. Das System assistiert dem Fahrer bei der Fahrzeugführung.

Die **Automatisierungsstufe 2** wird als Teilautomatisiert bezeichnet. In dieser Stufe wird die Längs- und Querführung in spezifischen Anwendungsfällen gleichzeitig vom System übernommen. (*Stauassistent*) Der Fahrer überwacht das Fahrzeug und den Verkehr fortlaufend und muss weiterhin jederzeit dazu in der Lage sein die Steuerung des Fahrzeugs zu übernehmen.

Ab **Automatisierungsstufe 3** ist das System in der Lage innerhalb seiner Systemgrenzen selbstständig zu fahren. Dabei muss der Fahrer die Längs- und Querführung nicht mehr dauerhaft überwachen. Entspricht eine Verkehrssituation / Umgebungsbedingung nicht dem Funktionsumfang der Fahrerassistenzsysteme, fordert das Fahrzeug den Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugführung auf. Stufe 3 wird als bedingte Automatisierung bezeichnet.

Die **Automatisierungsstufe 4** wird als Hochautomatisiert bezeichnet. In dieser Stufe werden alle Fahraufgaben in einem definierten Bereich (z.B. *Autobahnfahrt*) an das Fahrzeug übergeben, ohne dass das System den Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugführung in diesem spezifischen Benutzungsfall auffordert.

Die letzte Entwicklungsstufe ist die **Automatisierungsstufe 5**. Diese Stufe wird als Vollautomatisiert bezeichnet. Hier kann das System die Fahraufgabe für alle Fahrsituationen und Umweltbedingungen die ein Mensch bewältigen kann übernehmen.

So wird also letztlich das autonome Fahren über die Entwicklung der Automatisierung von Fahrfunktionen sukzessive realisiert. Dabei entspricht lediglich die Automatisierungsstufe 5 einem vollkommen autonom handelnden Fahrzeug. Fahrzeuge mit den Automatisierungsstufen 2-4 sind als automatisiertes Fahren zu bezeichnen.

5

2.2 Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge

Um sich ständig verändernden Fahr- und Verkehrssituation und äußeren Umgebungsbedingungen anzupassen, verfügen autonome Fahrsysteme über eine charakteristische funktionale Architektur. Die Architektur der autonomen Fahrzeugführung lässt sich in drei Elemente gliedern [9]:

- 1. Wahrnehmung
- 2. Bewegungsplanung 🛹
- 3. Ausführung

Dabei interagieren Wahrnehmung, Bewegungsplanung und die Ausführung fortlaufend zyklisch miteinander.

2.2.1 Wahrnehmung

Bei der Wahrnehmung werden alle Daten die für ein autonomes Fortbewegen notwendig sind mithilfe von Sensortechnologie und Kommunikationstechnologie erfasst. Bei der Erfassung wird unter endogenen und exogenen Daten unterschieden. Endogene Daten sind Informationen die vom eigenen Fahrzeug stammen, bspw. können Systeme wie das Trägheitsnavigationssystem oder das Global Positioning System (*GPS*) Daten zur Fahrzeugposition und der Beschleunigung liefern und mithilfe von Kommunikationsgeräten, Vehicle to Vehicle (*V2V*) oder Vehicle to Infrastructure (*V2I*) an andere Fahrzeuge weiterleiten. Exogene Daten sind Informationen über die Umwelt des Fahrzeugs. Die Informationen der Umwelt werden bspw. durch Radar, Laser, Infrarot, Ultraschall, Kameras, V2V oder V2I gesammelt. Die einzelnen Sensoren ergänzen sich bei der Erfassung gegenseitig und kompensieren Schwächen der jeweiligen Systeme. So lassen sich Daten über Abstände und ihre Entwicklung in der Zeit oder über die Infrastruktur und andere Verkehrsobjekte der Umwelt sammeln.

Die erfassten endogenen und exogenen Sensorund Kommunikationsdaten werden zusammengeführt und anschließend interpretiert. Anhand der Daten entsteht eine Umfeld-Beschreibung world) die für die (virtual weitere Bewegungsplanung notwendig ist. [10]



Abbildung 3 Erfassung exogener Daten mittels Sensortechnik

2.2.2 Bewegungsplanung

Auf Grundlage der erfassten Daten werden kollisionsfreie und stetige Trajektorien für die Bewegungsplanung berechnet. Dabei werden eine Menge hindernisfreier Trajektorien aus der virtuellen Welt erstellt und aus der Menge die optimale Trajektorie (*kürzester sicherer Pfad*) ausgewählt. Die Auswahl der optimalen Trajektorie findet auf der Grundlage von drei verschiedenen Ebenen statt. Die Erste wird als strategische Ebene bezeichnet. Hierbei wird die Route vom Abfahrtszeitpunkt zum Ziel berechnet (*Routing*). Dabei ist eine Problematik z.B., nach welchem Kriterium die Route berechnet werden soll. Soll der Weg gewählt werden der am kostengünstigsten ist oder der mit der minimalen Reisezeit (*kürzester-Pfad-Problem*). Das System strebt dabei die Minimierung von beidem an.

Anschließend folgt die taktische Ebene in der die Manöverplanung mit in die Trajektorie einbezogen wird. Es wird eine Trajektorie gewählt die vor dem Hintergrund einer dynamischen Umwelt mit sich bewegenden Hindernissen effizient und sicher ist. Das Erkennen und Interpretieren von Fahrsituationen sorgt dafür, dass die Auswahl der Bewegung sich daran orientiert sich taktisch in den Verkehrsfluss einzusortieren, sodass Staus vermieden werden. Die letzte Ebene ist die operationale Ebene. Hier wird für die Bewegungsplanung die eigene lokale Umgebung berücksichtigt um Kollisionen zu vermeiden. [10]

Das Generieren von Trajektorien ist von Faktoren wie der Energie Verfügbarkeit, Fehlern und Störungen, sowie einer nicht-holonomen Fahrbeschränkung eingeschränkt. [9]

2.2.3 Ausführung

Die Ausführung regelt das Lenken, die Beschleunigung, das Bremsen und die Einsortierung auf der Grundlage der erfassten Daten der Wahrnehmung und der daraus berechneten Trajektorie. [10]



Abbildung 4 Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge [10]

2.3 Bewältigung von Herausforderungen durch automatisiertes und autonomes Fahren

Angesichts der schnell voranschreitenden technischen Entwicklung im Bereich der Fahrzeugautomatisierung rückt die Zukunftsvision des autonomen Fahrens in greifbare Nähe. Die Ausstattungsraten für Fahrerassistenzsysteme in Neuwagen nehmen kontinuierlich zu [11] und somit verändert sich auch das Bild des Straßenverkehrs mit der Zeit. In Zukunft werden immer mehr automatisierte Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sein.

Fahrerassistenzsysteme die für eine stetige Automatisierung der Fahrzeuge sorgen, lassen sich im Wesentlichen in Komfort- und Sicherheitssysteme unterscheiden. Durch steigende Vernetzungsgrade der automatisierten Funktionen in einem Fahrzeug ist der Übergang bei Fahrerassistenzsystem vermehrt ein fließender Übergang von Komfortund Sicherheitssystemen geworden. [12] Einzelne Fahrerassistenzsysteme verschmelzen zunehmend zu autonomeren Konstruktionen. Da beim fahrerlosen Fahren der Zeitverlust des Fahrens wegfällt und die Fahraufgabe vom System übernommen wird, wird sie als höchste Komforttechnologie betrachtet. Gleichzeitig gewährleistet das fahrerlose Fahren ein höheres Maß an Mobilität. So ist es Personen die keine Fahrerlaubnis erworben haben oder aufgrund ihres Alters oder der körperlichen Verfassung kein Fahrzeug führen können, trotzdem möglich mobil zu sein.

Darüber hinaus bietet die Entwicklung von zunehmender Automatisierung von Fahrfunktionen neben einem hohen Wertschöpfungspotential für die Automobilwirtschaft [13] eine Menge weiterer Chancen. Die Sicherheit im Straßenverkehr kann von der Automatisierung erheblich profitieren. Aufgrund von widrigen Bedingungen oder persönlichen Fehleinschätzungen des Menschen kommt es im Verkehr immer wieder zu kritischen Fahrsituationen. In diesen kritischen Fahrsituationen entscheiden häufig nur Bruchteile von Sekunden ob es zu einem Verkehrsunfall kommt oder nicht. Dabei ist der Mensch, mit mehr als 90 % nach einer Statistik des U.S. Departments of Transportation: National Highway Traffic Safety, hauptverantwortlich für die Entstehung solcher Situationen. [14] Da ein computergesteuertes System prinzipiell schneller reagieren kann als der Mensch, haben automatisiertes und autonomes Fahren das Potenzial durch die beschriebene hochempfindliche Sensorik und leistungsfähige Mikrorechner den Verkehr sicherer und stabiler zu gestalten. So kann beispielsweise eine adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung (*ACC*) kritische Situationen im Vorfeld, durch Einhaltung des genormten Sicherheitsabstandes, vermeiden.

Darüber hinaus ist es automatisierten Fahrzeugen aufgrund von steigenden Vernetzungsgraden möglich die gegebene Infrastruktur optimal zu nutzen. Infolge der optimalen Nutzung der Infrastruktur und der Stabilisierung des Verkehrsflusses werden, wie auch in der Einleitung bereits erwähnt, Kraftstoffverbrauch, Schadgas- und Lärmemissionen reduziert.

2.4 Autonomes Fahren in der Gegenwart / Unsicherheiten und Störungen

Gegenwärtig sind Fahrzeuge mit den Automatisierungsstufen 1 und 2 serienreif. Einige Automobilhersteller bewerben ihre Autos (*z.B. Audi A8*) so, dass sie die Automatisierungsstufe 3 erreicht haben. Die Fahrzeuge sind zwar mit den nötigen Equipments ausgerüstet um z.B. Staupiloten funktionieren zu lassen, jedoch wurden diese Funktionen nicht freigegeben. [15] Die nicht-Freigabe der Funktionen beruht auf der Gegebenheit, dass die Abgrenzung der Verantwortlichkeit zwischen Mensch und Maschine nicht eindeutig ist. Daraus resultieren kaum lösbare rechtliche und versicherungstechnische Probleme im Falle eines Verkehrsunfalls. Viele Automobilzulieferer und Automobilhersteller versuchen deshalb die Automatisierungsstufe 3 zu überspringen und sind nach eigenen Angaben dabei die Automatisierungsstufe 4 zu erreichen. [15] Realistische Prognosen gehen jedoch davon aus, dass erst in der übernächsten Dekade (ab 2030) erste Fahrzeuge mit einer Automatisierungsstufe 4 serienreif sein könnten. Die Erforschung der Fahrerassistenzsysteme hält somit weiter an.

In diesen Forschungsbereich fällt auch die vorliegende Arbeit. Mit einem simulierten Rauschen können in Fahrzeugfolgemodellen neue Informationen über Dynamiken gewonnen werden. Das Rauschen im Modell wirkt auf die Beschleunigung einzelner Fahrzeugeinheiten und soll so eine unbestimmte Störgröße darstellen. In der Realität kann es sein, dass Sendeimpulse von Sensortechnologien von atmosphärischen Verhältnissen oder Umwelteinflüssen, wie z.B. Schneeflocken, Regen, Nebel oder in der Luft fliegendem Laub reflektiert werden und dadurch das Messen der Abstände erschwert wird. Diese Unsicherheiten können je nach Schwere dazu führen, dass kritische Situationen und Instabilitäten der Verkehrsdynamik auch bei automatisierten Fahrfunktionen auftreten. Daher gilt es den Einfluss dieser Unsicherheiten und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen gesammelt werden, werden am Ende eines Entwicklungsprozesses zu einem Gesamtsystem, dem autonomen Fahren gebündelt.

3 Charakteristiken der Verkehrsdynamik und -simulation

3.1 Mikroskopische Variablen

In der Verkehrsdynamik und der Verkehrssimulation unterscheidet man zwischen zwei Variablentypen – den mikroskopischen und den makroskopischen Variablen. Die mikroskopischen Variablen beschreiben die individuellen Positionen, Abstände und Bewegungen einzelner Fahrzeuge zueinander. In Simulationen werden die einzelnen Fahrzeugeinheiten auch als Agenten bezeichnet und lassen sich zusammen mit den Abstandsvariablen über eine Lagrange'sche Betrachtungsweise abbilden. Lagrange Koordinaten sind dabei n die Agenten ID und t die Zeit.

Mikroskopische Variablen die sich in einem zweidimensionalen Raum darstellen lassen sind [10]:



Stellvertretend für Fahrzeugeinheiten (*Agenten*) sind die grauen Kreise. Die Agenten lassen sich im Koordinatensystem mit einer x und y Koordinate lokalisieren. Die Fahrzeugeinheiten sind im mathematischen Sinn also "getriebene Teilchen".

Mikroskopische Daten die sich eindimensional darstellen lassen sind Abstands- und Differenzvariablen [10]:

Räumlicher Abstand (spacing gap) (3.4) $s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ y_1

s beschreibt den Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier Fahrzeugeinheiten. Abstände zwischen zwei Punkten lassen sich eindimensional darstellen.

(3.5)

(3.6)

Lichter Abstand (*distance gap*) d = s - l

 y_1 x_1 x 2

d beschreibt den Abstand von der Frontstoßstange der folgenden Fahrzeugeinheit zur Heckstoßstange der vorausfahrenden Fahrzeugeinheit. Dabei ist *l* die Fahrzeuglänge.

Zeitlicher Abstand $\omega = s/v$

ω beschreibt den zeitlichen Abstand die eine folgende Fahrzeugeinheit braucht, um den Mittelpunkt der vorausfahrenden Fahrzeugeinheit zu erreichen, wenn diese in der Theorie schlagartig stehen bleibt. Dabei ist v die Fahrzeuggeschwindigkeit.

Lichter Zeitabstand T = d/v

Der lichte Zeitabstand beschreibt den Abstand ähnlich wie ω , nur mit dem Unterschied, dass der Zeitabstand der distance gap betrachtet wird.







Solche Einzelfahrzeugdaten werden in der Realität bspw. über Doppel-Induktionsschleifendetektoren erfasst. Die Detektoren sind unter der Fahrbahndecke der Fahrstreifen mit z.B. 1 m Abstand positioniert und können so über elektrische Spannungsunterschiede Geschwindigkeiten, Abstände und Zeitlücken messen. [16]

3.2 Makroskopische Variablen

Aus der Aggregierung der mikroskopischen Daten ergeben sich die makroskopischen Variablen. Makroskopische Variablen beschreiben den Zustand eines Agenten Kollektivs in Bezug auf eine definierte Fläche innerhalb eines Zeitintervalls. [10]

(3.8)

Makroskopischen Variablen sind:

Verkehrsdichte ρ [N/m] oder [N/m²]

$$\rho = \frac{J}{v}$$



Die Verkehrsdichte ρ beschreibt wie viele Fahrzeugeinheiten sich in einem Bereich oder einem Streckenabschnitt aufhalten.

• Geschwindigkeit V [m/s] oder [km/h]

$$V = \frac{\sum v_i}{4N}$$
(3.9)



Die Makroskopische Geschwindigkeit V ergibt sich aus dem arithmetischen Geschwindigkeitsmittel der Einzelgeschwindigkeiten und unterscheidet sich somit von der mikroskopischen Geschwindigkeit v_i einzelner Fahrzeuge.

Verkehrsfluss J [N/s] oder [N/h]

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} \tag{3.10}$$

 $\xrightarrow{J} \\ \xrightarrow{\rho} \\ \xrightarrow{\rho} \\ \xrightarrow{\varphi} \\ \xrightarrow{V} \\ \xrightarrow{V} \\ \xrightarrow{\varphi}$

Der Verkehrsfluss *J* beschreibt die Anzahl der Fahrzeuge ΔN , die eine definierte Fläche innerhalb eines Zeitintervalls Δt überqueren.

Werden anschließend die in einem definierten Bereich erfassten und aggregierten Größen über die Zeit aufgetragen, erhält man Zeitreihen von Fluss, Geschwindigkeit und Dichte. Anhand dieser Zeitreihen lassen sich Instabilitäten der Verkehrsdynamik ablesen. Die graphisch aufgetragenen Zeitreihen werden als Fluss-Dichte-Diagramme bezeichnet. Die idealisierten Fluss-Dichte-Diagramme werden auch als Fundamentaldiagramme (*FD*) bezeichnet. [16]



Abbildung 5 Makroskopisches Fluss-Dichte-Diagramm A5-Nord bei Frankfurt (entnommen aus [16])

3.3 Fundamentaldiagramme

In Fundamentaldiagrammen sind zwei unterschiedliche Verkehrsphasen zu erkennen. (*vgl. Abbildung 5 und 6*) In der ersten Phase können sich Fahrzeugeinheiten bei gleichzeitig steigender Dichte annähernd mit ihrer Wunschgeschwindigkeit V_0 frei fortbewegen. Dabei lässt sich die Geschwindigkeit V in idealisierten linearen FD an der Stelle ρ über die Steigung ermitteln.

$$V = v\left(\frac{1}{\rho}\right) \tag{3.11}$$

Der Verkehrsfluss steigt mit der Verkehrsdichte solange an bis die Kapazität K der Straße erreicht ist.

$$K = \frac{V_0}{V_0 T + l}$$
(3.12)

Nach dem Erreichen der Kapazität, kommt es bei weiter zunehmender Dichte zum Verkehrszusammenbruch. Auf den Verkehrszusammenbruch folgt eine abrupte Abnahme des Verkehrsflusses (*capacity drop*), während die Dichte weiter steigt.

Damit beginnt die zweite Phase, die Staubildung. Der Verkehrsfluss nimmt mit zunehmender Dichte weiter ab, bis zum Stillstand an dem Fahrzeugeinheit an Fahrzeugeinheit ρ_l steht. Ein Fahrzeug pro Fahrzeuglänge [10]:



r undamentalolagramm

$$l = \frac{1}{l} \tag{3.13}$$

Neben makroskopischen Fundamentaldiagrammen gibt es auch mikroskopische FD bei denen die Geschwindigkeit als eine Funktion des Abstands dargestellt ist. (*s. Tabelle 1*) Vergleicht man die Fundamentaldiagramme, so ist der kausale Zusammenhang zwischen den Variablen auch graphisch zu erkennen.

ρ



Abbildung 7 Mikro / Makro Zusammenhang graphisch dargestellt

Die Dichte ρ_l entspricht einer mittleren Geschwindigkeit V = 0. Wird der Abstand *s* innerhalb des Kollektivs größer nimmt die Dichte des Kollektivs ab und die mittlere Geschwindigkeit wächst wieder bis zur Wunschgeschwindigkeit V_0

Tabelle 1 Mikro / Marko Beziehung Geschwindigkeit als Funktion des Abstandes

Geschwindigkeit v, Abstand s	-	Mittlere Geschwindigkeit	V, Dichte ρ
Mikroskopisches FD			v = v(s)
Makroskopisches FD → für homogene	Flüsse gilt (<i>s</i>	= 1/p)	$V = v\left(\frac{1}{\rho}\right)$

3.4 Trajektorien

Trajektorien sind die Bewegungen einzelner Fahrzeugeinheiten. Sie lassen sich in Raum-Zeit-Diagrammen als Orts-Zeit-Linien darstellen und erlauben somit eine Berechnung aller bisher genannten Variablen des Verkehrs. Jede Fahrzeugeinheitenposition

(*Agentenposition*) x_i , x_{i+1} , ... ist in der betrachteten Raum-Zeit für alle *t* definiert. Um eine Vorstellung der Visualisierung der einzelnen Fahrzeugbewegungen zu bekommen, sind in Abbildung 8 Trajektorien



von laufenden Stop-and-Go-Wellen auf einem britischen Autobahnabschnitt zu sehen. [17] Dabei bildet jede Trajektorielinie den Bewegungsverlauf einer Fahrzeugeinheit in der betrachteten Raum-Zeit ab. Wenn in dieser Darstellungsweise mit dem Ort auf der Ordinate und der Zeit auf der Abszisse die Trajektorien horizontal sind, bedeutet das, dass die Geschwindigkeit gleich null ist und die Fahrzeugeinheiten bzw. Agenten stehen. Weiterhin stellt der horizontale Abstand zwischen den Trajektorien den Zeitabstand ω_i dar. Der vertikale Abstand zwischen den einzelnen Trajektorien entspricht dem räumlichen Abstand s_i der Agenten.

(3.15)

Um die Berechnung der Variablen anhand der Trajektorien zu verdeutlichen, sind in Abbildung 9 idealisierte Trajektorien dargestellt. Die Variablen lassen sich wie folgt berechnen [10]:

• Dichte
$$\rho = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} s_{i}} = \frac{1}{\bar{s}}$$
 (3.14)

• Fluss $J = \frac{m}{\sum_{1}^{m} \omega_{i}} = \frac{1}{\overline{\omega}}$



Abbildung 9 Idealisierte Trajektorien

3.5 Instabilität des Verkehrsflusses - Stop-and-Go-Stauwellen

Bei erhöhter Verkehrsdichte kann es aufgrund von menschlichen Einflussfaktoren zu Instabilitäten der Verkehrsflussdynamik kommen. Ein bekanntes Beispiel dafür ist das Auftreten sogenannter Stop-and-Go Stauwellen. Dabei fahren Fahrzeugeinheiten zunächst im Gleichgewicht und sind kolonnenstabil. Aus einem beliebigen Grund bremst eine Fahrzeugeinheit ab und das nachfolgende Fahrzeug muss seine Geschwindigkeit über die Regelung der Beschleunigung oder Bremsmanöver anpassen. Die



Abbildung 10 Ausbreitung von Stop-and-Go Stauwellen

Geschwindigkeitsanpassungszeit impliziert die Reaktionszeit des Fahrers. Über das Erkennen und Reagieren (*Anpassen*) auf die neue Verkehrssituation, muss der Fahrer kurzzeitig unter die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs treten um einen sicheren Abstand einzuhalten. Dieses Phänomen breitet sich in der Kolonne weiter gegen die Fahrtrichtung aus und die Geschwindigkeiten werden solange verringert, bis erste Fahrzeuge zum Stehen kommen. (*vgl. Abbildung 10 entnommen aus* [16]) Die Fahrzeugeinheiten sind in der Folge nicht mehr kolonnenstabil. Beim erneuten Anfahren nach dem Stillstand ist die Reaktionszeit der Fahrer erneut von Bedeutung und trägt dazu bei, dass sich das Phänomen weiter fortführt. Durch unterschiedliches Brems-, Beschleunigungs- und Reaktionsverhalten der Fahrer, staut sich der Verkehr zunächst also ohne ersichtlichen Grund auf und zeigt, dass das Auftreten von Stop-and-Go Stauwellen ein Phänomen der menschlichen Selbstverwaltung ist. Dieses Phänomen wird in der Literatur oft auch als Phantom Staubildung bezeichnet. Sinkt die Verkehrsnachfrage, so lösen sich die Stauwellen über die Zeit wieder auf.

Der menschliche Einfluss auf die Verkehrsdynamik kann über eine Anpassungszeit in Fahrzeugfolgemodellen simuliert werden. Ist die Anpassungszeit bei hoher Verkehrsdichte höher, so treten auch im Modell Stop-and-Go Wellen auf, die in Form von Trajektorien abgebildet werden. Die Stop-and-Go Trajektorien können in Modellen mit ACC-Systemen und damit verbundener geringerer Anpassungszeit geglättet werden, sodass die Verkehrsdynamik wieder kolonnenstabil ist. Wie sieht es jedoch unter dem Einfluss von Unsicherheiten bzw. Störungen aus?

4 Verkehrsflussmodellierung automatisierter Fahrzeuge

4.1 Fahrzeugfolgemodelle - Allgemeines

Um Bewegungsabläufe von Fahrzeugen im Verkehr zu simulieren werden häufig Fahrzeugfolgemodelle eingesetzt. Mit Fahrzeugfolgemodellen kann der Verkehrsfluss, zusammengesetzt aus mehreren einzelnen Fahrzeugen, als makroskopisches Phänomen erfasst werden. Für die Modellierung werden Einzelfahrzeugdaten (mikroskopische Variablen) benötigt, weshalb sie den mikroskopischen Verkehrsmodellen zugeordnet werden. Weitere mikroskopische Variablen sind unter anderem die Fahrzeuglänge l, die Anpassungszeit (*Reaktionszeit*) T^r und die bereits beschriebenen Fahrzeuggeschwindigkeit v_i , die Fahrzeugbeschleunigung \dot{v}_i oder *a*, die Fahrzeugposition x_i und der damit verbundene Abstand zwischen zwei Einzeleinheiten in Abhängigkeit der Zeit. Anhand der Variablen kann mithilfe von mathematischen Differentialgleichungen der Einfluss der Einheiten auf den Verkehr modelliert werden. Dabei ist eine wesentliche Charakteristik der Modelle, das bei einem Unterschreiten des angestrebten Abstandes die Beschleunigung entsprechend reduziert oder eine Bremsverzögerung eingeleitet wird, um den nötigen Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten. Der menschliche Einfluss auf den Verkehr kann dabei über die Anpassungszeit abgebildet werden. Die Regulierung der Geschwindigkeit, der Beschleunigung und des Abstandes bei gleichzeitig geringer Anpassungszeit entspricht in einem bestimmten Rahmen auch der Funktionsweise eines ACC-Systems. So kann mithilfe von Fahrzeugfolgemodelle auch der Einfluss automatisierter Funktionen auf die Verkehrsflussdynamik beobachtet werden. Auch zufällig eintretende Störgrößen, die die Irrationalität des Fahrverhaltens darstellen, können über ein Beschleunigungsrauschen abgebildet werden.

Weiterhin lassen sich Fahrzeugfolgemodelle zwischen den Aktionsmöglichkeiten einer Fahrzeugeinheit differenzieren. Es gibt Modelle der Längsdynamik (*Longitudinalmodelle*) und Modelle der Querdynamik (*Spurwechselmodelle*). In Modellen der Querdynamik haben Fahrzeuge die Möglichkeit ihre Fahrspur (*z.B. für Überholmanöver*) zu verlassen. Dagegen bewegen sich die Einheiten in einem Longitudinalmodell ausschließlich in Fahrtrichtung auf einer Spur. In dieser Arbeit werden ausschließlich Longitudinalmodelle betrachtet in denen sich die Fahrzeugeinheiten in einer Kolonne auf einer endlosen Bahn oder in einem Kreis hintereinander bewegen. Aufgrund ihrer zeit- und ortsabhängigen Variablen sind sie in der Lage Verkehrssituationen dynamisch darzustellen. Dabei kann mit der Änderung der Variablen auch die Änderung der Verkehrsflussdynamik beobachtet werden.

In longitudinalen Fahrzeugfolgemodellen können sich Fahrzeuge nur in Fahrtrichtung auf einer Fahrspur bewegen und können diese weiterhin nicht verlassen. Dadurch ist jedes Fahrzeug *i* eindeutig durch den Ort x_i , der Geschwindigkeit v_i und der Beschleunigung \dot{v}_i in Abhängigkeit der Zeit *t* charakterisiert. Aus den Positionen des Vorderfahrzeugs x_{i+1} und des folgenden Fahrzeuges x_i ergeben sich die für das Fahrverhalten wesentlichen Abstände. Der Brutto-Abstand s_i (*spacing gap*) ist durch die Differenz der Position der Mittelpunkte des vorausfahrenden Fahrzeugs und der des folgenden Fahrzeugs definiert. Der Netto-Abstand d_i (*distance gap*) durch die Differenz der spacing gap und der Fahrzeuglänge.(*vgl. Abbildung 11*)



Abbildung 11 Brutto- und Nettoabstand zwischen zwei Einzelfahrzeugen [10]

In zeitkontinuierlichen Modellen (*stetige Modelle*) werden durch gekoppelte gewöhnliche Differentialgleichungen die Fahrzeug-Einheiten-Reaktionen und der Ort x_i zu jedem Zeitpunkt t durch eine Beschleunigungsfunktion $\dot{v}_1(t)$ wie folgt modelliert:

$$\dot{x}_i(t) = \frac{dx_i}{dt} = v_i(t), \qquad (4.1)$$

$$\dot{v}_{i}(t) = \frac{dv_{i}(t)}{dt} = \alpha_{mic} (d_{i}, v(x_{i}), v(x_{i}+1)) = \alpha_{mic,i}(t).$$
(4.2)

Die Beschleunigungsfunktion $\dot{v}_{i}(t)$ stellt immer gültige kinematische Tatsachen dar und ist abhängig vom Abstand und der Differenzgeschwindigkeit der Fahrzeuge. [16]

Bei Modellen mit festen Zeitschritten Δt (*diskrete Modelle*) werden die Fahrzeug-Einheiten-Reaktionen und der Ort x_i anhand der Geschwindigkeit $v_i(t)$ in jedem Zeitschritt Δt modelliert. In dieser Arbeit werden im weiteren Verlauf stetige Modelle vorgestellt. Damit die Modelle modelliert werden können, werden sie über numerische Verfahren (*Euler Verfahren*) diskretisiert. Die Modelle sind dennoch als stetige Modelle zu sehen, da die Zeitschritte so klein sind, dass es keinen Einfluss auf die Dynamik gibt.

4.2 Geschwindigkeit basiertes Modell

Im Jahr 1953 wurde ein erster Vertreter der Fahrzeugfolgemodelle von Louis A. Pipes entwickelt. [18] Das Modell fügt einem einfachen Geschwindigkeitsmodell eine Anpassungszeit T^r hinzu.

Ein einfaches Geschwindigkeitsmodell kann als Modell erster Ordnung bezeichnet werden. Es beschreibt, dass die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs gleich der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs ist:

$$\dot{x}_i(t) = \dot{x}_{i+1}(t) \tag{4.3}$$

Nach dem Hinzufügen der Anpassungszeit $T^r \ge 0$ ist die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs gleich der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs nach der Anpassungszeit:

$$\dot{x}_i(t+T^r) = \dot{x}_{i+1}(t) \tag{4.4}$$

Über eine Linearisierung der Zeit und einer Ableitung folgt das Fahrzeugfolgemodell von Louis A. Pipes:

$$\dot{x}_i(t+T^r) \approx \dot{x}_i(t) + T^r \times \ddot{x}_i(t)$$
(4.5)

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{T^r} \left[\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_i(t) \right]$$
(4.6)

Das Pipes-Modell ist ein Modell zweiter Ordnung basierend auf einem Geschwindigkeitsmodell. Zweite Ordnung Modelle werden auch als Beschleunigungsmodelle bezeichnet. Es führt zu einer Homogenisierung der Geschwindigkeiten, jedoch beschreibt es keine Regelung für Abstände zwischen den Fahrzeugen. Dadurch können Kollisionen der Fahrzeuge im Modell nicht ausgeschlossen werden.

4.3 Abstand basiertes Modell

Ein typischer Vertreter der Abstand basierten Fahrzeugfolgemodelle ist das Optimal-Velocity-Modell (OVM) nach Masako Bando et al. [19]. In diesem Modell ist die Geschwindigkeit eine Funktion des Abstandes (*Optimal-Velocity-Funktion*) zum vorausfahrenden Fahrzeug nach einer Anpassungszeit. D.h. in Abhängigkeit der Fahrzeugabstände wird die Geschwindigkeit auf eine optimale Geschwindigkeit *V* unter der Berücksichtigung einer Anpassungszeit T^r angepasst. Die Optimal-Velocity-Funktion wird dargestellt durch:

$$V(s_i(t)) = V(x_{i+1}(t) - x_i(t)) = \dot{x}_i(t)$$
(4.7)

Das Modell erster Ordnung ist also ein Abstandsmodell und bildet nach dem Hinzufügen der Anpassungszeit $T^r \ge 0$ die Grundlage für das OVM:

$$\dot{x}_i (t + T^r) = V (x_{i+1}(t) - x_i(t))$$
(4.8)

Über eine Linearisierung der Zeit und einer Ableitung folgt das Fahrzeugfolgemodell OV-Modell von Bando:

$$\ddot{x}_{i}(t) = \frac{1}{T^{r}} \left[V \left(x_{i+1}(t) - x_{i}(t) \right) - \dot{x}_{i}(t) \right]$$
(4.9)

Das OV-Modell von Bando ist ein Modell zweiter Ordnung, basierend auf einem Abstandsmodell. Aus der Betrachtung des Wunschabstandes resultieren unrealistische Bremsverzögerungen und Beschleunigungen. Eine Homogenisierung des Verkehrsflusses tritt nur ein, falls die Anpassungszeit T^r sehr klein gewählt ist (*z.B. 0,1* s) und bildet damit auch in diesem Bereich keine realistischen Werte ab. Wenn Simulationen mit einer realistischen Anpassungszeit durchgeführt werden, kommt es zu Stop-and-Go Wellen.

4.4 Abstand und Geschwindigkeit basierte Modelle

4.4.1 Full-Velocity-Difference-Model

Aufgrund der unrealistisch hohen Beschleunigung und starken Bremsverzögerungen des OVM, wurde auf der Grundlage der Erkenntnisse ein neues Fahrzeugfolgemodell entwickelt – das Full-Velocity-Difference-Model. [20] Das FVDM ist ein Zusammenschluss aus den Geschwindigkeit und Abstand basierten Modellen. Es betrachtet sowohl den räumlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, als auch die Geschwindigkeit unter der Berücksichtigung von Anpassungszeiten. Daraus resultieren zwei Anpassungszeiten im Modell zweiter Ordnung.

$$\ddot{x}_{i}(t) = \frac{1}{T^{r}} \left[V \left(x_{i+1}(t) - x_{i}(t) \right) - \dot{x}_{i}(t) \right] + \frac{1}{T_{2}^{r}} \left[\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_{i}(t) \right]$$
(4.10)

Aus der Kombination der Variablen geht hervor, dass das Modell eine lineare Differentialgleichung ist. In Simulationen zeigt das Modell realistisches Verhalten für Stop-and-Go Wellen ohne dass es, bei vernünftiger Parameterschätzung, zu Kollisionen kommt. Darüber hinaus tritt eine Homogenisierung des Verkehrsflusses ein, wenn die Anpassungszeiten klein gewählt werden. Der Zusammenschluss der abstands- und geschwindigkeitsbasierten Modelle liefert im Vergleich zum OVM in der Realität realisierbare Beschleunigungswerte. Die Modellgrenzen liegen in der fehlenden Sensitivität bezüglich der Abstandsabhängigkeit und der Geschwindigkeitsdifferenzen. Egal wie groß der Abstand z.B. zu einem stehenden Fahrzeug ist, das FVDM passt die Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs auch bei beliebig großer Entfernung an das vorausfahrende Fahrzeug an und erreicht somit nicht seine Wunschgeschwindigkeit. [16]

4.4.2 Constant-Time-Gap Model

Das Constant-Time-Gap (*CTG*) Modell ist eine Modifizierung des FVDM. Im CTG wird die zweite Anpassungszeit T_2^r durch den lichten Zeitabstand *T* ersetzt. Für die globale Stabilität (*vgl. Kapitel 4.5.2*) des FVDM sind folgende Bedingungen gestellt:

$$\frac{2}{T} < \frac{2}{T_2^r} + \frac{1}{T^r}$$
(4.11)

Wird das T_2^r nun durch *T* ersetzt, so fällt $\frac{2}{T}$ auf beiden Seiten weg. Daraus ergibt sich für die globale Stabilität des CTG:

$$T, T_r > 0 \tag{4.12}$$

Das CTG bleibt aufgrund der Kombination der Variablen weiterhin linear:

$$\ddot{x}_{i}(t) = \frac{1}{T^{r}} \left(x_{i+1}(t) - x_{i}(t) - \dot{x}_{i}(t) \right) + \frac{1}{T} \left(\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_{i}(t) \right)$$
(4.13)

4.4.3 Adaptive-Time-Gap Model

Das Adaptive-Time-Gap Modell (*ATG*) ist ein Fahrzeugfolgemodell, das wie auch das FVDM und CTG ein abstands- und geschwindigkeitsbasiertes Modell darstellt. Die Anpassung erfolgt adaptiv an das vorausfahrenden Fahrzeugs über die Konstante-Zeitabstand-Strategie. [21] Für die Umsetzung wird der lichte Ist-Zeitabstand $T_i(t) = \frac{x_{i+1}(t)-x_i(t)-l}{\dot{x}_i(t)}$ gegen den Soll-Zeitabstand *T* und einer Anpassungszeit *T*^{*r*} aufgetragen:

$$\dot{T}_i(t) = \frac{1}{T^r} \left[T - T_i(t) \right]$$
(4.14)

Die Gleichung beschreibt den Unterschied zwischen dem aktuellen lichten Zeitabstand und dem Soll-Zeitabstand pro Anpassungszeit T^r und stellt somit die Grundlage für das Beschleunigungsmodell zweiter Ordnung dar:

$$\ddot{x}_{i}(t) = \frac{\dot{x}_{i}(t)}{T^{r}} \left[1 - \frac{T}{T_{i}(t)} \right] + \frac{1}{T_{i}(t)} \left[\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_{i}(t) \right]$$
(4.15)

Im Gegensatz zum FVDM und CTG ist die Zusammensetzung der Variablen in der Differentialgleichung des ATG Modells nicht linear und unterscheidet sich somit von den vorherigen Modellen. Darüber hinaus ist es möglich das ATG wie auch das CTG mit nur einer Anpassungszeit T^r zu modellieren. Die abstands- und geschwindigkeitsbasierten Differentialgleichungen können, im Rahmen der Modelle, mit geringer Anpassungszeit auch als ein vereinfachter Algorithmus für ACC-Systeme verstanden werden und können gleichzeitig mit höherer Anpassungszeit das Fahrverhalten unter menschlichem Einfluss vereinfacht simulieren.

4.5 Stabilität der Fahrzeugfolgemodelle

Fahrzeugfolgemodelle haben eine homogene Gleichgewichtslösung. Im homogenen Gleichgewicht, haben alle Fahrzeuge denselben Abstand voneinander und fahren gleich schnell, sodass keine Instabilitäten in der Dynamik auftreten. Für die Anfangsbedingungen, mit denen in den Modellen simuliert wird bedeutet das, sind die Anfangsbedingungen homogen bleibt auch das System ewig homogen. [10] Es gilt zu überprüfen wie stabil ist der Gleichgewichtszustand vor dem Hintergrund, dass auch die Verschiedenartigkeit des Verkehrs berücksichtigt wird. Der Verkehr ist komplex mit vielen unterschiedlichen Fahrsituationen, Reaktionszeiten, Störungen und ist somit in der Realität eher durch Heterogenität geprägt. Bei der Modellierung der Verschiedenartigkeit ist die Verwendung von Einzelfahrzeugdaten der mikroskopischen Modelle (Fahrzeugfolgemodelle) von Vorteil. Sie können die Verschiedenartigkeit im Rahmen ihrer Modellierungsgrenzen und die Auswirkungen auf die Stabilität des Verkehrsflusses darstellen. Dabei wird die Analyse der Stabilität in zwei Kategorien unterteilt, der lokalen Stabilität und der globalen Stabilität.



Abbildung 12 Ist das homogene Gleichgewicht stabil oder instabil? (entnommen aus [10])

4.5.1 Lokale Stabilität

Bei der lokalen Stabilität wird die Folgefahrt eines einzelnen Fahrzeugs hinter einem Führungsfahrzeug mit vorgegebener konstanter Geschwindigkeit in einem Modell untersucht. Das Modell wird dabei als lokal stabil betrachtet, wenn das folgende Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit ohne Schwankungen hinter dem Führungsfahrzeug fährt und es zu keiner Kollision kommt. Kommt es hingegen zu Abstands- und Geschwindigkeitsschwankungen oder sogar zu einer Kollision mit dem vorausfahrenden Fahrzeug ausgelöst durch Störungen, wird das Modell als lokal instabil bezeichnet.

4.5.2 Globale Stabilität

Bei der globalen Stabilität wird die kollektive Stabilität einer Fahrzeugkolonne im Modell betrachtet. Die Fahrzeugkolonne bewegt sich dabei auf einem Kreis oder auf einer endlosen Bahn, sodass sich Schwankungen von einzelnen Fahrzeugen, als Folge von unterschiedlichen Störungen, auf andere Fahrzeuge übertragen können. Schaukeln sich diese Störungen auf kommt es zu Instabilitäten des Verkehrsflusses wie z.B. die beschriebenen Stop-and-Go Wellen und die Kolonne wird als kolonneninstabil definiert. Sind die Modelle weiterhin nicht in der Lage das homogene Gleichgewicht wieder herzustellen, so wird das Modell als global instabil bezeichnet. Können die Fahrzeugfolgemodelle den homogenen Zustand wieder herstellen, ist das Modell global stabil.

Bei der Betrachtung des Pipes-Modells (*Geschwindigkeit basiertes Modell*) ist zu erkennen, dass das Modell lokal stabil ist. Wird das Modell jedoch im globalen Kontext betrachtet, so ist zu erkennen, dass es zwar zu einer Homogenisierung der Geschwindigkeit kommt, aber aufgrund der nicht Berücksichtigung der Abstände keine Homogenisierung der Abstände über die Zeit stattfindet. Somit sind in der Dynamik Kollisionen möglich und das Modell ist global instabil.

Für die in dieser Arbeit zu untersuchenden Modelle ATG und CTG (abstands- und geschwindigkeitsbasierte Modelle) gelten für folgende Variablen lokale und globale Stabilität:

Adaptive-Time-Gap Model		
Nicht-linear, lokal und global stabil für:	$1, 1' \ge 0$	
Constant-Time-Gap Model		
Linear, lokal und global stabil für:	$T, T^r > 0$	

Tabelle 2 lokale und globale Stabilität für ATG und CTG unter folgenden Variablen

Der homogene Zustand wird unter der Voraussetzung $T, T^r > 0$ in den Fahrzeugfolgemodellen erreicht. Dabei wird in den folgenden Simulationen dieser Arbeit nur die globale Stabilität der Modelle untersucht. Die globale Stabilität unterliegt aufgrund einer Fahrzeugkolonne, in der sich die einzelnen Fahrzeuge gegenseitig beeinflussen, viel strengeren Regeln als die lokale Stabilität. Der Einfluss von hinzugefügten Störgrößen auf diese Modelle ist im globalen Kontext zu testen und im Anschluss sind die Modelle miteinander zu vergleichen.

4.6 NetLogo

NetLogo ist eine Open Source Software die unter <u>https://ccl.northwestern.edu/netlogo/</u> frei erhältlich ist. Das Programm eignet sich besonders für die Modellierung von komplexen Systemen über die Zeit. Modellierer können Befehle an hunderte von Agenten geben, die alle unabhängig voneinander agieren. Somit ist es möglich die Verbindung zwischen mikroskopischen Verhalten der Individuen und den makroskopischen Mustern, die durch ihre Interaktionen untereinander auftreten, zu untersuchen. Dabei können für die Simulation verschiedene Bedingungen geschaffen werden und es ist dem Anwender möglich das Verhalten unter den Bedingungen zu beobachten. [22]

Das Programm eignet sich daher im besonderen Maße für die Simulation von Verkehrsdynamiken. Die Fahrzeugfolgemodelle ATG und CTG wurden mittels eines Programmiercodes in die Software implementiert, sodass die folgenden Simulationen Ergebnisse der gekoppelten Differentialgleichungen in der Software NetLogo sind. Der Code wurde im Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit unter der Leitung von Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux erstellt.

5 Durchführung der Simulationen

5.1 Simulations-Interface

Das über den Programmiercode in NetLogo erstellte Interface ist der Ausgangspunkt für die Einstellung der Parameter, Variablen und der Fahrzeugfolgemodelle. (*vgl. Abbildung 13*) Die beige hinterlegten Felder im Interface dienen der Darstellung der Verkehrsflussdynamik über die Zeit. Während der Simulation können anhand der Trajektorien Instabilitäten dargestellt werden, weiterhin wird die Anzahl der Kollisionen der Agenten aufgezeichnet, sowie die aktuelle Beschleunigungsrate, die aktuelle Standardabweichung des Abstandes, die Standardabweichung des Abstandes mit steigendem Sigma über die Zeit und die Durchschnittsgeschwindigkeit mit steigendem Sigma über die Zeit.



Abbildung 13 Darstellung des Interfaces während einer laufenden Simulation

Des Weiteren lassen sich die Anfangsbedingungen und das Modell, mit denen die Simulation durchgeführt werden soll, in den blau-grünen Schaltflächen auswählen.

In der folgenden Tabelle werden die Schaltflächen des Interfaces erklärt:

Tabelle 3 Schaltflächen und Optionen im Interface von NetLogo

Schaltfläche:	Optionen:
Set-up	Das Modell wird mit den ausgewählten Daten eingerichtet
Move	Das Modell startet die Simulationen mit den eingerichteten Daten
Model	Hier kann der Benutzer auswählen, welches Modell er für die Simulation benutzen möchte, es kann das ATG als Simulationsgrundlage oder das CTG gewählt werden
Initial-position	Die Initial-position ist der Verkehrszustand zum Simulationsbeginn, hier kann der Benutzer zwischen uniform, perturbed, jam oder random wählen
Nb-veh [N]	Auswahl der Anzahl an Agenten (number of vehicle)
V0 [m/s]	Auswahl der Wunschgeschwindigkeit der Agenten
<i>l</i> [m]	Auswahl der Länge der Agenten
<i>T</i> [s]	Auswahl des lichten Zeitabstands / Wunschzeitabstand
<i>T^r</i> [s]	Auswahl der Anpassungszeit
Sigma σ	Beschreibt eine zufällige Störgröße die sich auf die Beschleunigung auswirkt (<i>Beschleunigungsrauschen</i>)
Speed-ATG-always positive	Möglichkeit dem ATG Modell einen Term hinzuzufügen, damit unter dem Einfluss von Störungen keine negativen Geschwindigkeiten auftreten
Cycle	Beim Start der Simulation wird ein Zyklus mit zunehmender Störgröße durchlaufen
Create File	Möglichkeit die gesammelten Daten der Simulation in Textform aus NetLogo in Form einer Textdatei zu extrahieren

5.2 Methodik

5.2.1 Festlegung der Modellparameter und -variablen

Die Modelle ATG und CTG werden also mit bestimmten Parametern und Variablen initiiert. Auf der Grundlage dieser Werte und Zustände können Vergleiche zwischen den Modellen und Abhängigkeiten zu bestimmten Größen untersucht werden. Die Simulationen werden mit den folgenden Anfangszuständen durchgeführt:

Die Initial-Position wird bei beiden Modellen auf "uniform" festgelegt. Uniform beschreibt einen homogenen Zustand mit gleich großem Abstand zwischen den Agenten. Die Startposition ist deshalb so gewählt, da beobachtet werden soll, ob mit zunehmender Stärke der Störgröße ein Phasenübergang in der Verkehrsflussdynamik eintritt. D.h. gibt es kritische Werte bei denen die globale Stabilität in globale Instabilität umschwenkt.

Die Wunschgeschwindigkeit V0 wird auf 13,889 [m/s] und 36,111 [m/s] festgelegt. Die Geschwindigkeit 13,889 [m/s] entspricht ungefähr 50 [km/h] und bildet somit die Geschwindigkeit des Stadtverkehrs ab. Die Geschwindigkeit 36,111 [m/s] entspricht ungefähr 130 [km/h] der Richtgeschwindigkeit auf deutschen Autobahnen.

Die Fahrzeugeinheitenlänge *l* (*Agentenlänge*) wird auf 5,3 [m] festgelegt. 5,3 [m] ist die durchschnittlich berechnete Fahrzeuglänge die aus einer Analyse von Einzelfahrzeugdaten im Jahr 2000 hervorgegangen ist. Die durchschnittliche Fahrzeuglänge wurde unter der Berücksichtigung von Pkw, Pkw mit Anhänger, Lkw, Lkw mit Anhänger, Reisebussen und ihrer Häufigkeit im Straßenverkehr gebildet. [23]

Der lichte Zeitabstand / Wunschzeitabstand *T* wurde auf 0,8 [s] und 1,85 [s] festgelegt. Die ISO Norm 15622:2010-Intelligent transport systems – Adaptive Cruise Control systems – performance requirements and test procedures gibt vor, dass in Fahrzeugen mit einem ACC-System zwei auswählbare Zeitabstände zur Verfügung gestellt werden sollen. Unter stabilen Zustandsbedingungen soll der minimale auswählbare Zeitabstand für alle Geschwindigkeiten 0,8 [s] betragen. Mindestens eine Zeitabstandseinstellung soll zwischen 1,5 – 2,2 [s] zur Verfügung gestellt werden. 1,85 [s] entspricht dabei dem gemittelten Wert von 1,5 und 2,2 [s]. [24]

Weiterhin werden beide Modelle mit einer unterschiedlichen Anzahl an Agenten *N* simuliert. Die Anzahl der Agenten wurde auf 20 und auf 25 festgelegt. Dabei soll die Anzahl 25 eine höhere Verkehrsnachfrage simulieren.

Die Anpassungszeiten T^r sind aufgrund des Mangels an gesicherten Daten geschätzt worden. So ist 1 [s] für die Anpassungszeit an die Geschwindigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugs mit einem ACC-System geschätzt worden und zum Vergleich 5 [s] für die Anpassungszeit eines menschlichen Fahrers ohne ACC-System.

Die Störgröße Sigma σ wirkt im Modell auf die Beschleunigung ein. Sigma ist als ein Beschleunigungsrauschen von 0-2 [m/s²] festgelegt. Zum Vergleich der Größe sei hiermit erwähnt, dass die automatische Beschleunigung von ACC-System nicht 2,0 [m/s²] nach ISO Norm 15622 überschreiten sollte. [24] Somit wird mit Sigma von 0-2 [m/s²] eine sehr große Spannweite an Störungen durch Beschleunigungsrauschen betrachtet. Im Modell wird die Störgröße sukzessive in 0,1 Schritten erhöht. Die sukzessive Erhöhung der Störung erfolgt über die Einführung eines Simulationszyklusses. In der Ingenieurwissenschaft verwendet man häufig ein Rauschen, das in seiner Bandbreite beschränkt ist, um Störungen in einem Modell abzubilden.



Abbildung 14 Einstellung der Modellparameter in NetLogo

5.2.2 Simulation / Ablauf des Simulationszyklus / Ausgabe von Daten

Für die Simulation werden zunächst die Anfangsbedingungen mit einer Auswahl der beschriebenen Werte eingerichtet. Nach dem Einrichten wird die Simulation über die Schaltfläche Move gestartet. Die Simulation basiert auf einem Zyklus in dem die Störgröße Sigma sukzessive nach fünf Experimenten innerhalb des Zyklusses um 0,1 ansteigt.

Ein Experiment geht dabei im Rahmen des Zyklusses 700 Sekunden lang. Von den 700 Sekunden sind 500 Sekunden zunächst Wartezeit, damit sich die Verkehrsflussdynamik auf die Störung einstellt. Nach den 500 Sekunden Wartezeit werden 200 Sekunden lang die Standardabweichung der Abstände zwischen den Agenten und die Geschwindigkeit der Agenten gemessen. Nach fünf Experimenten mit dem gleichen Wert von Sigma, werden die gemessenen Standardabweichungen der Abstände und Geschwindigkeiten für den jeweiligen Wert von Sigma gemittelt. Somit wird die Verkehrsflussdynamik in den Fahrzeugfolgemodellen ATG und CTG kontinuierlich durch den Einfluss von einem größer werdenden Beschleunigungsrauschen beeinflusst.

Der Zyklus endet nach der Durchführung von fünf Experimenten mit einem Sigma von 2 [m/s²]. Die gemittelten Werte der Standardabweichung des Abstandes und der Durchschnittsgeschwindigkeiten mit steigendem Sigma werden in Form einer Textdatei zur weiteren Auswertung von NetLogo ausgegeben. Mit Excel wurden die Daten zur weiteren Untersuchung aufgearbeitet und gegenübergestellt.

Dabei konnte schon während der Simulation der Einfluss der Störgrößen über die Trajektorien und der anderen Darstellungsfenster im NetLogo-Interface beobachtet werden.



Abbildung 15 Trajektorien im NetLogo Interface während einer Simulation

Während der ersten Simulationen unter dem Einfluss von Rauschen kam es im ATG-Modell zu Problemen. Die Trajektorien beschrieben im Laufe der Simulation mit größerem Rauschen negative Geschwindigkeiten und zeigten so, dass die Agenten nicht dem Modell entsprechend reagieren. Deshalb musste das ATG-Modell um einen Term im Programmiercode erweitert werden. Mit dem Term konnte dieser Fehler behoben werden. Über die Schaltfläche "ATG-always-positive" konnte er aktiviert werden. Der Programmiercode für die Simulationen ist im Anhang zu finden.

6 Ergebnisse und Auswertung

Zunächst werden die Ergebnisse der Simulationen innerhalb eines Modells mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen unter dem Einfluss des Rauschens untersucht. So kann ein möglicher Zusammenhang oder Abhängigkeiten zwischen den Parametern und Variablen mit dem Rauschen und dem Auftreten von Instabilitäten innerhalb der Modelle aufgedeckt werden. Darüber hinaus soll so ermittelt werden, ob es innerhalb der Modelle zu Phasenübergängen ab einer bestimmten Störgröße kommt und unter welchen Einflüssen die Modelle robuster sind.

Im Anschluss werden das nicht-lineare Modell ATG und das lineare Modell CTG mit den gleichen Parametern und Variablen gegenübergestellt. Dabei soll beobachtet werden wie sich die Unterschiede zwischen den Modellen darstellen. Die nachfolgenden visualisierten Ergebnisse sind auf drei Nachkommastellen gerundet.

6.1 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlicher Anpassungszeit T^r

Bei Simulationen im ATG-Modell mit gleichen Variablen und Parametern aber unterschiedlicher Anpassungszeit T^r konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen dem Eintreten von Instabilitäten durch das Rauschen und T^r besteht. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Geschwindigkeit von 13,889 [m/s], einer Anzahl N = 20 und T = 0,8 für die unterschiedlichen $T^r = 1$ [s] und $T^r = 5$ [s] aufgeführt:



Abbildung 16 Standardabweichung des Abstandes ATG Tr=1 s und ATG Tr=5 s bei steigendem Sigma

Die Abbildung 16 zeigt die Standardabweichung des Abstandes für $T^r = 1$ [s] und $T^r = 5$ [s] im ATG-Modell bei steigendem Beschleunigungsrauschen Sigma. Zunächst ist deutlich zu erkennen, dass es innerhalb des Modells zu einem Phasenübergang kommt. Die Standardabweichung des Abstandes steigt mit zunehmendem Beschleunigungsrauschen langsam und stabil an, bis zu einem kritischen Punkt an dem die Abweichungen erheblich größer werden. Der Phasenübergang kennzeichnet das Auftreten von Stop-and-Go Wellen (*die Abweichungen des Abstandes werden innerhalb der Kolonne größer*) und globale Instabilität des Modells unter Einfluss der bestimmten Störgröße. Dabei unterscheiden sich die Werte in denen der Phasenübergang stattfindet. Bei größerer Anpassungszeit T^r im nichtlinearen Modell ATG ist das Auftreten einer Instabilität der Verkehrsflussdynamik deutlich früher zu erkennen. Das ATG-Modell ist also robuster gegenüber Störungen wenn die Anpassungszeit T^r kleiner gewählt wird.



Abbildung 17 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten ATG Tr=1 s und ATG Tr=5 s bei steigendem Sigma

Der Phasenübergang und die Bildung von Stop-and-Go Instabilitäten ist auch in der Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten (*Fahrzeugeinheiten*) zu erkennen. Bei einer geringeren Anpassungszeit sinkt die Durchschnittsgeschwindigkeit jedoch nicht so stark und deutlich später wie bei einer größeren Anpassungszeit unter dem Einfluss von Störgrößen. Diese Erkenntnisse können bestätigen, dass der Einsatz von ACC-Systemen, die eine geringere Anpassungszeit benötigen als der Mensch, die Verkehrsflussdynamik im Rahmen des ATG-Modells stabilisieren können. Gleichwohl ist zu erkennen, dass zufällig eintretende Störungen je nach Größe des Einflusses innerhalb des Modells ATG sowohl bei menschlicher

Anpassungszeit als auch bei einer Anpassungszeit eines ACC-Systems zu Instabilitäten der Verkehrsflussdynamik führen.

6.2 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlicher Anpassungszeit T^r

Bei Simulationen im CTG-Modell mit gleichen Variablen und Parametern aber unterschiedlicher Anpassungszeit T^r konnte kein eindeutiger Phasenübergang bei zunehmenden Beschleunigungsrauschen beobachtet werden. Ein Zusammenhang über Instabilitäten in Abhängigkeit von T^r bei einzelnen Störgrößen ist insofern vorhanden, dass die Standardabweichung des Abstandes bei erhöhter Anpassungszeit stärker ansteigt als bei geringerer Anpassungszeit. (*vgl. Abbildung 18*) Dabei aber bei beiden Anpassungszeiten trotzdem relativ konstant ansteigt. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Geschwindigkeit von 13,889 [m/s], einer Anzahl N = 20 und T = 0,8 für die unterschiedlichen $T^r = 1$ [s] und $T^r = 5$ [s] aufgeführt:



Abbildung 18 Standardabweichung des Abstandes CTG Tr=1 s und CTG Tr=5 s bei steigendem Sigma

Daraus ergibt sich, dass auch im CTG Modell zu erkennen ist, dass eine geringere Anpassungszeit insgesamt zu einer Stabilisierung der Verkehrsflussdynamik führt. Die Standardabweichung des Abstandes bleibt bei $T^r = 1$ [s] insgesamt kleiner und wächst nicht so stark an wie bei der Anpassungszeit $T^r = 5$ [s]. Die Durchschnittsgeschwindigkeit weist im Bereich des stärkeren Rauschens bei einer höheren Anpassungszeit mehr Abweichungen auf. Trotzdem bleibt die Durchschnittsgeschwindigkeit bei beiden Anpassungszeiten vergleichsweise stabil.



Abbildung 19 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten CTG Tr=1 s und CTG TR=5 s bei steigendem Sigma

6.3 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlicher Geschwindigkeit V0

Auch der Vergleich innerhalb des ATG-Modells mit gleichen Variablen und Parametern aber unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeiten bei stetig steigendem Rauschen hat interessante Ergebnisse geliefert. Nach einigen Durchläufen hat sich bestätigt, dass mit einer höheren Wunschgeschwindigkeit *V*0 der Phasenübergang innerhalb des Modells später einsetzt, dafür aber im Vergleich zur geringeren Wunschgeschwindigkeit im Anschluss stärkere Abweichungen aufweist. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Anpassungszeit von $T^r = 1 [s]$, einer Anzahl N = 20 und T = 0,8 für die unterschiedlichen Geschwindigkeit von 13,889 [m/s] und 36,111 [m/s] aufgeführt:



Abbildung 20 Standardabweichung des Abstandes ATG V0=13,889 [m/s] und ATG V0=36,111 [m/s] bei steigendem Sigma

In Abbildung 20 ist zu sehen. dass innerhalb des ATG-Modells höhere Wunschgeschwindigkeiten das Modell robuster gegenüber das Beschleunigungsrauschen machen. Das Modell bleibt unter einem Beschleunigungsrauschen von 1,2 [m/s²] global stabil bei höherer Geschwindigkeit, während bei niedriger Geschwindigkeit das Modell bereits global instabil ist. Der Phasenübergang und die damit verbundenen Stop-and-Go Instabilitäten setzen um eine Störung von 0,1 versetzt ein, weisen danach aber extremere Schwankungen auf. Die versetzt bildende Instabilität ist auch anhand der Durchschnittsgeschwindigkeit zu beobachten.



Abbildung 21 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG V0=13,889 [m/s²] und ATG V0=36,111 [m/s²] bei steigendem Sigma

Dieses Phänomen wurde innerhalb des nicht-linearen ATG-Modells auch mit der Anpassungszeit $T^r = 5 [s]$ nochmals überprüft und konnte sich für die verschiedenen Geschwindigkeiten bestätigen.

6.4 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlicher Geschwindigkeit V0

Das CTG wurde ebenfalls mit den gleichen Parametern und Variablen aber unterschiedlichen Wunschgeschwindigkeiten getestet. Im Gegensatz zum ATG-Modell brachte die höhere Geschwindigkeit so gut wie keine Veränderung. Das Modell blieb angesichts der größeren Geschwindigkeit gleichbleibend robust mit einer maximalen Abstands Standardabweichung von 1,113 [m] gegenüber dem Rauschen. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Anpassungszeit von $T^r = 1 [s]$, einer Anzahl N = 20 und T = 0,8 für die unterschiedlichen Geschwindigkeit von 13,889 [m/s] und 36,111 [m/s] aufgeführt:



Abbildung 22 Standardabweichung des Abstandes CTG V0=13,889 [m/s] und CTG V0=36,111 [m/s] bei steigendem Sigma

Ähnlich robust hielt sich demzufolge auch die Durchschnittsgeschwindigkeit und verdeutlicht somit, dass eine Änderung der Wunschgeschwindigkeit in Verbindung mit dem Rauschen keinen zusätzlichen Effekt auf die Verkehrsflussdynamik innerhalb des CTG-Modells hat.



Abbildung 23 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten CTG V0=13,889 [m/s] und CTG V0=36,111 [m/s] bei steigendem Sigma

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten unterscheiden sich nur minimal in einem Bereich von 0,06 [m/s] = 0,216 [km/h].

6.5 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen

Weiter wurden die Modelle dahingehend untersucht, wie sich die Störungen bei einem höheren Verkehrsaufkommen auswirken. Im ATG Modell traten Instabilitäten der Verkehrsflussdynamik bei einem höheren Verkehrsaufkommen N = 25 bereits bei einer geringeren Störung ein. Das Ergebnis war insofern zu erwarten, dass die einzelnen Fahrzeugeinheiten miteinander in Wechselwirkung stehen und die Störungen sich bei mehr Fahrzeugeinheiten schneller aufschaukeln. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Anpassungszeit von $T^r = 1 [s]$, T = 0.8 und einer Geschwindigkeit von 36,111 [m/s] für das unterschiedliche Verkehrsaufkommen N = 25 aufgeführt:



Abbildung 24 Standardabweichung des Abstandes ATG N=20 und ATG N=25 bei steigendem Sigma

In Abbildung 24 ist zu sehen, dass der Phasenübergang und die damit verbundene Bildung von Stop-and-Go Wellen im ATG-Modell bei einem höheren Verkehrsaufkommen wesentlich früher und bei geringerem Beschleunigungsrauschen auftritt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist bei einem höheren Verkehrsaufkommen insgesamt geringer als bei einer weniger großen Verkehrsnachfrage, die Phasenübergänge sind auch hier deutlich in einem Abnehmen der durchschnittlichen Geschwindigkeit zu erkennen.



Abbildung 25 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG N=20 und ATG N=25 bei steigendem Sigma

6.6 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlichem Verkehrsaufkommen

Das lineare CTG-Modell zeigte auch bei höherem Verkehrsaufkommen keinen verstärkten Einfluss der Störung. Die Standardabweichung des Abstandes und die durchschnittliche Geschwindigkeit der Agenten blieb auch bei größerem Beschleunigungsrauschen konstant. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Anpassungszeit von $T^r = 1 [s]$, T = 0.8 und einer Geschwindigkeit von 36,111 [m/s] für das unterschiedliche Verkehrsaufkommen N = 20 und N = 25 aufgeführt:



Abbildung 26 Standardabweichung des Abstandes CTG N=20 und CTG N=25 bei steigendem Sigma



Abbildung 27 Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten CTG N=20 und CTG N=25 bei steigendem Sigma

6.7 Vergleich ATG-Modell bei unterschiedlichem lichtem Zeitabstand / Wunschzeitabstand *T*

Als letzte Untersuchung der Störungen innerhalb der einzelnen Modelle wurden die Fahrzeugfolgemodelle mit gleichen Parametern und Variablen aber unterschiedlichem lichtem Zeitabstand *T* betrachtet. Innerhalb des ATG-Modells wurde beobachtet, dass mit größerem lichten Zeitabstand von T = 1,85 [*s*] die Instabilitäten in Form des Phasenübergangs eher auftraten aber insgesamt mit kleineren Abweichungen als bei einem kleineren lichten Zeitabstand. Das frühe Auftreten könnte die Folge von einer erhöhten Bremsverzögerung oder Beschleunigungsregelung sein um den gewünschten größeren Zeitabstand nach dem Einfluss der Störung wieder herzustellen. Dadurch schaukeln sich die Störungen auf. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Anpassungszeit von $T^r = 1$ [*s*], einer Geschwindigkeit von 36,111 [*m*/*s*] und *N* = 20 für die unterschiedlichen lichten Zeitabstände T = 0,8 s und T = 1,85 s aufgeführt:



Abbildung 28 Standardabweichung des Abstandes ATG T=0,8 s und ATG T=1,85 s bei steigendem Sigma

In Abbildung 28 ist zu sehen, dass der Phasenübergang für einen lichten Zeitabstand T = 1,85 s bereits bei einem Beschleunigungsrauschen von 0,6 [m/s²] eintritt. Bei einem kleineren lichten Zeitabstand von T = 0,8 s ist die Instabilität erst ab einem doppelt so hohem Wert von Sigma zu beobachten. Das ATG-Modell ist bei einem geringeren lichten Zeitabstand also wesentlich robuster gegenüber dem Beschleunigungsrauschen.



Abbildung 29 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG T=0,8 s und ATG T=1,85 s bei steigendem Sigma

6.8 Vergleich CTG-Modell bei unterschiedlichem lichtem Zeitabstand / Wunschzeitabstand *T*

Innerhalb des CTG-Modells konnte beobachtet werden, dass mit steigender Störung und größerem lichten Zeitabstand ähnlich wie beim ATG-Modell die Standardabweichung des Abstandes stärker ansteigt. Beispielhaft werden hier die Werte der Simulation mit einer Anpassungszeit von $T^r = 1 [s]$, einer Geschwindigkeit von 36,111 [m/s] und N = 20 für die unterschiedlichen lichten Zeitabstände T = 0.8 s und T = 1.85 s aufgeführt:



Abbildung 30 Standardabweichung des Abstandes CTG T=0,8 s und CTG T=1,85 s bei steigendem Sigma

Bei beiden lichten Zeitabständen bleibt das CTG-Modell dabei mit zunehmendem Beschleunigungsrauschen robust. Auch bei größeren Störungen kommt es zu keinem Phasenübergang.



Abbildung 31 Durchschnittsgeschwindigkeit CTG T=0,8 s und CTG T=1,85 s bei steigendem Sigma

6.9 Abschließender Vergleich ATG-Modell und CTG-Modell mit gleichen Parametern und Variablen unter dem Einfluss von Störungen

Abschließend wurden das ATG-Modell und das CTG Modell mit gleichen Parametern und Variablen bei zunehmenden Beschleunigungsrauschen simuliert und gegenübergestellt. Wie bereits aus den Untersuchungen der einzelnen Modelle mit unterschiedlichen Variablen hervorgegangen ist, ist das nicht-lineare ATG-Modell mit zunehmender Störgröße Sigma durch einen Phasenübergang gekennzeichnet. Der Phasenübergang beschreibt einen kritischen Punkt der Störgröße Sigma an dem eine stark zunehmende Abweichung des Abstandes zwischen den Agenten zu sehen ist. Er ist ein Indikator für Instabilitäten in der Verkehrsflussdynamik innerhalb des ATG-Modells. Die Instabilitäten sind in Form von Stop-Wellen and-Go aufgetreten und konnten auch in einer Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit der Agenten und anhand des Trajektorieverlaufs im Interface bestätigt werden. Die Robustheit gegenüber des Rauschens im ATG-Modell konnte durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit V0, einer Verringerung der Anpassungszeit T^r , eine Verringerung des lichten Zeitabstandes T und bei einem geringeren Verkehrsaufkommen Nerhöht werden. Der kritische Punkt an dem der Phasenübergang stattfindet ist also abhängig von verschiedenen Verkehrsvariablen.

Insgesamt zeichnete sich das lineare CTG-Modell durch eine niedrigere Standardabweichung des Abstandes und konstantere Durchschnittsgeschwindigkeit als robuster gegenüber Störungen aus.

Im CTG-Modell kam es zu keinem Phasenübergang und der Verkehrsfluss blieb stabil. Jedoch konnte auch im CTG-Modell eine Stabilisierung der Verkehrsdynamik mit verschiedenen Variablen bestätigt werden. So haben eine geringere Anpassungszeit und ein geringerer lichter Zeitabstand für eine geringere Standardabweichung des Abstandes zwischen den Agenten unter Einfluss der Störungen gesorgt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Eigenschaften von ACC-Systemen kleinere Abstände T und geringere Anpassungszeiten in beiden Modellen zu einem verkehrsoptimierenden Verhalten auch unter dem Einfluss von Störungen führen. Beispielhaft werden hier noch einmal die Modelle mit gleichen Parametern und Variablen gegenübergestellt. Aus der Simulation mit einer Anzahl von Agenten N = 20, einer Wunschgeschwindigkeit V0 = 13,889 [m/s], einem lichten Zeitabstand von T = 0,8 s und einer Anpassungszeit von $T^r = 1 [s]$ ergab sich folgendes Ergebnis:



Abbildung 32 Standardabweichung des Abstandes ATG und CTG bei steigendem Sigma

In Abbildung 32 der Gegenüberstellung des ATG- und CTG-Modells ist deutlich zu erkennen, dass die Standardabweichung des Abstandes der Agenten auch bei hoher Störgröße im CTG-Modell wesentlich kleiner ist als im ATG-Modell. Das ATG-Modell ist zunächst relativ robust gegenüber der Störung bis ein kritischer Punkt erreicht wird, der die Verkehrsdynamik instabil werden lässt. Daraus lässt sich schließen, dass das ATG-Modell metastabil ist. Metabstabil bedeutet, dass kleinere Störungen abklingen während es bei großen Störungen zu einem Aufschaukeln kommt. Der freie und gestaute Zustand aus dem Fundamentaldiagramm überlappen sich, sodass es zu gegebener Dichte zwei Flusswerte gibt. Der Ausfluss aus der Stauwelle ist dabei geringer als der maximal mögliche Fluss. [16] Die Metastabilität des ATG ist auch am Phasenübergang der Durchschnittsgeschwindigkeit zu erkennen. Innerhalb des CTG-Modells bleibt die Durchschnittsgeschwindigkeit auch bei einem sehr starken Beschleunigungsrauschen stabil.



Abbildung 33 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG und CTG bei steigendem Sigma

Um den Phasenübergang im ATG-Modell genauer zu beschreiben, wurde mit den gleichen Werten aber kleineren Störungsschritten von 0,05 [m/s²] noch einmal eine Simulation durchgeführt.



Abbildung 34 Standardabweichung des Abstandes ATG und CTG bei um 0,05 steigendem Sigma

Die detailliertere Auflösung der Standardabweichung in Abbildung 33 zeigt, dass ab einem Sigma Wert von 1,25 auf 1,3 [m/s²] der Phasenübergang stattfindet. Dabei steigt die Standardabweichung des Abstandes von 0,905 [m] auf 2,707 [m] und es treten Verkehrsinstabilitäten auf. Der nächste Schritt von Sigma weist eine Besonderheit auf, denn die Standardabweichung ist rückläufig und sinkt wieder auf 2,611 [m]. Die Kolonne kann sich ein Stück weit wieder stabilisieren. Der nächste Sigma Schritt erhöht die Standardabweichung des Abstandes dann doch wieder auf 3,854 [m] und verstärkt die globale Instabilität.



Abbildung 35 Durchschnittsgeschwindigkeit ATG und CTG bei um 0,05 steigendem Sigma

7 Diskussion und Fazit

Ziel dieser Arbeit war es den Einfluss des Rauschens auf die Dynamik in den Fahrzeugfolgemodellen ATG und CTG zu untersuchen. Das Rauschen hat in den Fahrzeugfolgemodellen unterschiedliche Auswirkungen auf die Verkehrsdynamiken gezeigt. Zum Abschluss dieser Arbeit werden die eingangs gestellten Fragen beantwortet und diskutiert.

1. Gibt es einen Phasenübergang bei zunehmender Störung vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand innerhalb der Modelle? Wie lassen sich Phasenübergänge darstellen und woran ist globale Stabilität / Instabilität zu erkennen?

Obwohl beide Fahrzeugfolgemodelle auf geschwindigkeits- und abstandsbasierten Differentialgleichungen basieren, zeigten sie unter dem Einfluss von Rauschen extrem unterschiedliche Dynamiken. Der Verkehrszustand konnte in Diagrammen über das Auftragen der Standardabweichung des Abstandes, sowie über das Auftragen der Durchschnittsgeschwindigkeit bei steigendem Rauschen dargestellt werden. (*vgl. Kapitel 6 Ergebnisse*)

Anhand dieser Darstellungsweise konnten im ATG-Modell Phasenübergänge beobachtet werden, die sich über eine stark ansteigende Standardabweichung des Abstandes definierten. Die Abweichungen der Abstände der Fahrzeugeinheiten in der Kolonne wurden ab einem kritischen Rauschpunkt erheblich größer und waren somit ein Indikator für die Bildung von Stop-and-Go Stauwellen. Das ATG-Modell war gegenüber kleinen Störungen global stabil und ist bei größeren Störungen global instabil geworden. Diese Eigenschaft wird auch als metastabil bezeichnet. Das ATG-Modell muss gegenüber Störungen weiter optimiert werden. Die Daten der durchgeführten Simulationen und die Beobachtung, dass es innerhalb des Modells zu Phasenübergängen kommt, sind für weitere Entwicklung des ATG-Modells von Vorteil.

Das CTG-Modell ist auch bei steigender Rauschstörung global stabil geblieben. Die Abweichungen der Abstände sind mit stärkeren Störungen innerhalb der Kolonne zwar auch größer geworden, waren aber im Vergleich zum ATG-Modell wesentlich kleiner. Darüber hinaus war innerhalb der Darstellungsweise der Diagramme kein Phasenübergang im CTG zu sehen.

2. Sind Abhängigkeiten oder Zusammenhänge von Variablen mit dem Rauschen in Bezug auf die Dynamiken in den jeweiligen Fahrzeugfolgemodellen zu erkennen?

Während der Simulationen waren in beiden Fahrzeugfolgemodellen Zusammenhänge zwischen den Variablen und dem Rauschen und deren Auswirkung auf die Dynamik zu erkennen. Im CTG-Modell haben eine geringere Anpassungszeit T^r und ein geringerer lichter Zeitabstand T für eine geringere Standardabweichung des Abstandes zwischen den Agenten gesorgt. Im ATG-Modell ist der Phasenübergang früher oder später, abhängig von den Variablen aufgetreten. So konnte die Robustheit gegenüber des Rauschens im ATG-Modell durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit V0, einer Verringerung der Anpassungszeit T^r , eine Verringerung des lichten Zeitabstandes T und bei einem geringeren Verkehrsaufkommen N erhöht werden.

3. Wie robust sind die Modelle insgesamt gegenüber Störungen?

Das lineare CTG-Modell war insgesamt weniger abhängig von einzelnen Verkehrsvariablen und wies darüber hinaus keinen Phasenübergang auf. Im Vergleich war es unter gleichen Bedingungen wesentlich stabiler gegenüber Rauschstörungen als das nicht-lineare ATG-Modell. Das nicht-lineare ATG-Modell war nur gegenüber kleinen Rauschstörungen stabil und zeigte eine Abhängigkeit von vielen Verkehrsvariablen auf. Da beide Modelle auf abstandsund geschwindigkeitsbasierten Differentialgleichungen mit nur einer Anpassungszeit basieren, muss der Unterschied der unter gleichen Bedingungen in der Dynamik entsteht, mit der Linearität und der nicht-Linearität der Modelle zusammenhängen.

4. Wie könnte das ATG-Modell robuster gegenüber Störungen gemacht werden?

Die Entdeckung, dass in Abhängigkeit der Verkehrsvariablen ein Phasenübergang im ATG-Modell an kritischen Rauschpunkten stattfindet und dass das lineare CTG-Modell wesentlich stabiler ist, könnte für die Weiterentwicklung des ATG-Modells von wesentlicher Bedeutung sein. Möglicherweise lässt sich auch das ATG-Modell über eine Linearisierung stabiler gegenüber Rauschstörungen machen. Diese Hypothese muss in einer weiteren Erforschung überprüft werden. Die über die Simulationen gewonnenen Informationen können zur Weiterentwicklung der Robustheit des ATGs beitragen. Die vom Modell übertragenen Informationen über Verkehrsdynamiken mit automatisierten Fahrzeugen könnten so nützliche Informationen für die Weiterentwicklung von ACC-Systemen darstellen. Möglicherweise kann darüber eine Verkehrsoptimierung auch unter widrigen Umwelteinflüssen in der Realität erreicht werden. 5. Inwiefern können Aussagen der Verkehrsflussdynamik der Fahrzeugfolgemodelle unter Einflussnahme von Störungen auf die Fahrerassistenzsystem außerhalb der Simulationen übertragen werden?

Im nicht-linearen ATG-Modell gab es kritische Rauschpunkte die zur Instabilität der Verkehrsflussdynamik geführt haben. Die kritischen Punkte wurden durch einen Phasenübergang eindeutig gekennzeichnet und sind abhängig von verschiedenen Verkehrsvariablen gewesen. So kam es im Rahmen der Simulationen bspw. zu globalen Instabilitäten bei einem Beschleunigungsrauschen von 0,6 [m/s²] – 1,2 [m/s²]. Aufgrund des Mangels an Daten kann nur spekuliert werden was einer solchen Störgröße in der Realität entspricht. Bspw. könnte ein Rauschen von 0 - 0,4 [m/s²] einem normalen technischen Zustand eines ACC-Systems entsprechen und ein Rauschen von 0,4 – 1,1 [m/s²] einer Störung durch atmosphärische Einflüsse, wie z.B. Regen oder Schnee. Unter dieser Annahme könnten mit einem automatisierten Fahrzeug im Fall von Umwelteinwirkungen und basierend auf der abstands- und geschwindigkeitsbasierten nicht-linearen Differentialgleichung des ATG-Modells Störungen des Verkehrsflusses in Form von Stop-and-Go Wellen entstehen. Würden die Umweltbedingungen ein max. Rauschen von 0,4 [m/s²] zulassen, so wären ACC-Systeme in der Lage die Dynamik des Verkehrs trotz des Rauschens zu stabilisieren. Diese Werte könnten erklären warum ACC-Systeme noch nicht die Fähigkeit haben kollektive Stabilität herzustellen. Diese Annahmen sind jedoch rein hypothetisch, da die Fahrzeugfolgemodelle zwar über die Anpassungszeit T^r sensorische und menschliche Erfassungs- und Reaktionszeiten und mit einem Beschleunigungsrauschen Sigma die Unvorhersehbarkeit des Verkehrs nachbilden können, jedoch die Wirklichkeit im Rahmen der Modellfähigkeiten nicht vollständig dargestellt werden kann.

Das Beschleunigungsrauschen im CTG-Modell führte auch bei starker Störung zu keinem erheblichen Anstieg der Abstand Standardabweichung. Somit waren keine Instabilitäten in Form von Stop-and-Go Wellen zu beobachten und das CTG-Modell scheint robuster gegenüber dem Rauschen zu sein. Jedoch um die globale Stabilität zu erhalten mussten die Fahrzeugeinheiten bei großen Störungen unrealistisch hohe Beschleunigungsraten erreichen. Zum Vergleich, ein Sportwagen hat ungefähr eine Beschleunigungsrate von 9 [m/s²] von 0-100 [km/h]. Im Fahrzeugfolgemodell CTG wurde bei einem Beschleunigungsrauschen von 1,8 [m/s²] zum Teil 12 [m/s²] erreicht um die Stabilität zwischen den Fahrzeugeinheiten zu gewährleisten und bilden somit keine realistischen Werte für den Straßenverkehr.

6. Wo liegen die Grenzen der Simulation von Dynamiken mit Fahrzeugfolgemodellen?

Die Grenzen sind zum einen die longitudinale und kurzsichtige Betrachtungsweise der Modelle. Bei der Betrachtung haben Fahrzeugeinheiten nicht die Möglichkeit ihre Fahrspur zu verlassen und betrachten nur das jeweilig vorausfahrende Fahrzeug. Zum anderen werden lokale Umgebungsbedingungen wie benachbarte Fahrsteifen, Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Signale von bspw. Bremslichtern nicht berücksichtig. Darüber hinaus ist der menschliche Fahrer dazu fähig Hypothesen über die Zeit zu bilden und so durch Antizipation den Verkehrsfluss zusätzlich zu beeinflussen.

Abschließend konnten in dieser Arbeit wichtige Informationen über die Dynamiken in Fahrzeugfolgemodellen unter Einfluss des Rauschens festgehalten werden. Obwohl beide Modelle abstands- und geschwindigkeitsbasierte Differentialgleichungen, die gleichen globalen Stabilitätsanforderungen und jeweils nur eine Anpassungszeit haben, waren die Unterschiede in der Dynamik extrem unterschiedlich. Anhand der erfassten und erarbeiteten Daten wurde jedoch eine gute Grundlage für die Weiterentwicklung der Robustheit des ATG-Modells geschaffen. Wenn das ATG eine größere Robustheit gegenüber dem Rauschen erreicht, wird es für die Erforschung des ACC-Systems und somit zum autonomen Fahren einen entscheidenden Beitrag leisten können.

Literatur

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs: World Population Prospects 2019.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs: World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.
- [3] ADAC e.V.: Staubilanz 2018 Neue Rekordlängen. URL: https://www.adac.de/deradac/verein/aktuelles/staubilanz/. Abrufdatum 20.10.2019.
- Kraftfahrt-Bundesamt: Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019.
 URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html?nn=644
 526. Abrufdatum 20.10.2019.
- [5] Raphael E. Stern et al.: Dissipation of stop-and-go waves via control autonomous vehicles: Field experiments. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [6] Verband der Automobilindustrie e.V.: Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren 2015.
- [7] George Gunter; Derek Gloudemans; Raphael E. Stern et al.: Are commercially implemented adaptive cruise control systems string stable? Mai / 2019.
- [8] SAE international: J3016 Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems 2014.
- [9] Sagar Behere; Martin Törngren: A functional architecture for autonomous driving 2015.
- [10] Dr. Antoine Tordeux: Grundlagen des automatisierten Fahrens 2019.
- [11] Robert Bosch GmbH: Bosch-Auswertung: Fahrerassistenzsysteme sind weiter stark auf dem Vormarsch. URL: https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/boschauswertung-fahrerassistenzsysteme-sind-weiter-stark-auf-dem-vormarsch-148032.html. Abrufdatum 28.10.2019.
- [12] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Wiesbaden 2014.

- [13] Frauenhofer-Institut f
 ür Arbeitswirtschaft und Organisation: Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen - Industriepolitische Schlussfolgerung. Studie im Auftrag des Bundesministeriums f
 ür Wirtschaft und Energie November / 2015.
- [14] U.S. Department of Transportation: National Highway Traffic Safety Administration: Traffic Safety Facts Februar / 2015.
- [15] Automotive News; Pete Bigelow: Why Level 3 automated technology has failed to take hold. URL: https://www.autonews.com/shift/why-level-3-automated-technology-hasfailed-take-hold.
- [16] Dr. Martin Treiber; Dr. Arne Kesting: Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik 2010.
- [17] Treiterer, J., et al.: Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetric techniques. Ohio State University, Columbus 1970.
- [18] Louis A. Pipes: An Operational Analysis of Traffic Dynamics. Journal of Applied Physics 1953.
- [19] Bando; Hasebe; Nakayama; Shibata; Sugiyama: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation.
- [20] Rui Jiang et al.: Full velocity difference model for a car-following theory. University of Science and Technology of China 2001.
- [21] Dr. Antoine Tordeux; Michel Roussignol; Sylvian Lassarre: An adaptive time gap carfollowing model. Université Paris-Est - LAMA, 5 bv Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, France.
- [22] Wilensky, U.: NetLogo http://ccl.northwestern.edu/netlogo/. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Northwestern University Evanston, IL 1999.
- [23] Jörg Kienzle: Analyse von Einzelfahrzeugdaten, Diplomarbeit. Stuttgart August / 2001.
- [24] GCC Standardization Organization (GSO): Intelligent transport systems Adaptive Cruise Control systems - performance requirements and test procedures (2010) ISO 15622.

Anhang

if model = "ATG"[

Programmiercode in Netlogo für Simulationen:

```
breed [vehicles vehicle]
globals[dt veh0 coll current-exp mean-sd mean-sd-tmp mean-sp mean-sp-tmp nb-tmp]
vehicles-own[x speed acc pred]
to set-up
 ask vehicles [die] set dt .05 reset-ticks set-current-plot "Spacing standard deviation" clear-
plot set-current-plot "Acceleration rate" clear-plot set-current-plot "Trajectories" clear-plot
 create-vehicles nb-veh [set heading 90 set color white set size I set shape "car"]
 if initial-position = "Uniform" [ask vehicles[set xcor who * world-width / nb-veh]]
 if initial-position = "Perturbed" [ask vehicles[set xcor who * world-width / nb-veh] ask one-of
vehicles[fd(5)]]
 if initial-position = "Jam"
                              [ask vehicles[set xcor who * I]]
 if initial-position = "Random" [ask vehicles [set xcor random-xcor]]
 set veh0 [who] of one-of vehicles with-max [xcor]
 ask vehicles[
  ifelse any? vehicles with [xcor > [xcor] of myself]
   [set pred one-of ((vehicles with [xcor > [xcor] of myself]) with-min [xcor])]
   [set pred one-of (vehicles with-min [xcor])]
  set x xcor]
 ask vehicles [set speed V(spacing)]
end
to set-acc
 if model = "Pipes"
  [set acc ([speed] of pred - speed) / Tr]
 if model = "OVM"
  [set acc (V(spacing) - speed)/ Tr]
 if model = "FVDM"
  [set acc (V(spacing) - speed)/ Tr + ([speed] of pred - speed) / T]
```

```
let time-gap 20 if speed > 0 [set time-gap max(list .1 min(list time-gap ((spacing - I) /
speed)))]
  let T0 max(list T ((spacing - I) / V0))
  set acc ([speed] of pred - speed - (T0 * speed - max(list 0 (spacing - I))) / Tr) / time-gap
  if Speed-ATG-always-positive? [set acc max(list acc (- speed / dt))]]
end
to move
 tick
 ask vehicles [set-acc]
 ask vehicles [set speed speed + dt * acc + sqrt(dt) * sigma * random-normal 0 1
  fd(speed * dt) set x x + speed * dt set size I]
 if plot? [plot!]
 if cycle? and (ticks * dt) > Waiting-time [set mean-sd-tmp mean-sd-tmp + (sqrt(variance
[spacing] of vehicles)) set mean-sp-tmp mean-sp-tmp + (mean [speed] of vehicles) set nb-tmp
nb-tmp + 1]
 if cycle? and (ticks * dt) > Waiting-time + 200 [set current-exp current-exp + 1
  set mean-sd mean-sd + mean-sd-tmp / nb-tmp set mean-sp mean-sp + mean-sp-tmp / nb-
tmp set nb-tmp 0 set mean-sd-tmp 0 set mean-sp-tmp 0
  if current-exp = nb-exp [show "a" set-current-plot "SD Sigma" plotxy sigma (mean-sd / nb-
exp) set-current-plot "Mean-speed_Sigma" plotxy sigma (mean-sp / nb-exp) if create-file? [file-
print (word sigma " " (mean-sd / nb-exp) " " (mean-sp / nb-exp))]
    set mean-sd 0 set mean-sp 0 set current-exp 0 set sigma precision(sigma + .01) 5] set-up]
 if cycle? and sigma > 2 [file-close stop]
end
to plot!
 set-col
 set-current-plot "Spacing standard deviation"
 plotxy (ticks * dt) (sqrt(variance [spacing] of vehicles))
 set-current-plot "Acceleration rate"
 set-current-plot-pen "max" plotxy (ticks * dt) (max [acc] of vehicles)
 set-current-plot-pen "min" plotxy (ticks * dt) (min [acc] of vehicles)
 if ticks mod 2 = 0
  set-current-plot "Trajectories"
  set-plot-y-range precision precision (ticks * dt - 50) 0 5 precision (ticks * dt + 1) 0
  set-plot-x-range -105 105
```

Anhang

```
set-current-plot-pen "black" ask vehicles [plotxy xcor (ticks * dt) ]]
end
to-report V [s]
 report max(list 0 min(list V0 ((s - I) / T)))
end
to-report spacing
 ifelse who = veh0
  [report world-width + [x] of pred - x]
  [report [x] of pred - x]
end
to set-col
 ask vehicles [ifelse spacing < I [if not(color = "red") [set coll coll + 1] set color red][set color
white if who = 0 [set color cyan]]]
end
to-report stable?
 if model = "Pipes" [report false]
 if model = "OVM" [ifelse T >= 2 * Tr [report true][report false]]
 if model = "FVDM" [ifelse 1 / T <= 1 / (2 * Tr) + 1 / T [report true][report false]]
 if model = "ATG" [report true]
end
```