

Bergische Universität Wuppertal Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Bachelorthesis

im Studiengang Sicherheitstechnik beim Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

> zur Erreichung des akademischen Grades Bachelor of Science

Thema:	Untersuchung des Einflusses von Unsicherheiten auf die Robustheit des Adaptive-Time-Gap-Modells mittels dynamischer Sicherheitsanalyse
Autor:	Antoine Tymister, 1337440
Bearbeitungszeitraum:	01. Februar 2019 - 30. April 2019
Betreuer:	JunProf. Dr. Antoine Tordeux

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit, erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit (Bachelor/Master-Thesis) 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:

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich gerne bei Professor Antoine Tordeux für die Ermöglichung dieser Arbeit und die gewonnen Einblicke in die Thematik des autonomen Fahrens und insbesondere in das vom Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelte Adaptive-Time-Gap-Modell, danken. Ebenso will ich mich für seine großartige Unterstützung und seine ständige Hilfsbereitschaft bei der Betreuung bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei Frau Khelfa für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken.

Inhaltsverzeichnis

	Abk	kürzungsverzeichnis	I
	Abb	bildungsverzeichnis	II
	Tab	ellenverzeichnis	IV
1	Einl	leitung	1
2	Gru	Indlagen der Verkehrsflusstheorie	4
	2.1	Zustände des Verkehrs	4
		2.1.1 Fließender Verkehr	4
		2.1.2 Stauung	4
		2.1.3 Stau in Zahlen	5
		2.1.4 Ursachen von Stau	5
		2.1.5 Folgen von Stau	7
		2.1.6 Spontane Staubildung ("Stau aus dem Nichts")	7
		2.1.7 Sättigungsproblem	7
	2.2	Variablen des Verkehrsflusses	8
		2.2.1 Mikroskopische Variablen	8
		2.2.2 Makroskopische Variablen	9
	2.3	Fundamentaldiagramm	11
		2.3.1 Freiflussast	12
		2.3.2 Gestauter Ast	12
		2.3.3 Darstellung	12
	2.4	Trajektorien-Diagramm	13
	2.5	Kollektive Phänomene des Straßenverkehrs	14
		2.5.1 Schockwelle	14
		2.5.2 Verdünnungswelle	15
		2.5.3 Stop-and-Go-Wellen	15
	2.6	Messmethoden zur Beobachtung des Verkehrsflusses	16
3	Einf	führung in die Grundlagen des automatisierten Fahrens	17
	3.1	Definition automatisierten Fahrens	17
	3.2	Klassifizierung	17
	3.3	Vorteile des automatisierten Fahrens	19
	3.4	Elemente autonomer Fahrzeugführung	20
		3.4.1 Wahrnehmung	20
		3.4.2 Bewegungsplanung	20
		3.4.3 Ausführung	21
4	Abs	stand und Geschwindigkeitsregelung	22
-	4.1	Funktionsprinzip	22
		4.1.1 ACC (Automatic Cruise Control)	22^{-}
		4.1.2 Sensorik	22

Inha	ltsver	zeicl	hnis
mu	100,01		mino

		4.1.3	Detektion und Objektauswahl (Identifizieren des nachfolgenden Fahrzeugs	
			und Messung der Abstands- und Geschwindigkeitsdifferenz)	23
		4.1.4	Unsicherheiten	23
	4.2	Sicher	heitsstandards	23
		4.2.1	ISO Standard	24
		4.2.2	Richtlinien und Merkmale der ISO 15622	24
	4.3	Model	lklassen	25
	4.4	Adapti	ive-Time-Gap-Modell	26
	4.5	Erweit	erung des ATG-Modells	28
		4.5.1	Hinzufügen des Rauschens	28
		4.5.2	Beschränkung des Zeitabstands (Time gaps)	29
	4.6	Stabili	tät des Modells	29
		4.6.1	Lokale Stabilität	30
		4.6.2	Globale Stabilität	31
5	Dvn	amiecl	he Sicherheitsanalvse	30
5	5 1	Ermitt	lung der Grenzen für T	32
	5.1	Einfüh	$\begin{array}{c} \text{fung ucr Ofenzen fur } 1_{min} \\ \text{min} \\ \text{orbit} \\ \text$	32
	53	Simula	nung in NetLogo	33
	5.5	5 3 1	Bereich zur Initialisierung	34
		532	Bereich Local	35
		533	Bereich Clobal	35
		534	Definition der Darameter	36
		535		30
		536		27
	5 /	J.J.U Ablaut	feabritte der Simulation	37
	5.4	5 / 1	Factlagen der Darameter	38
		542	Durabführung der Simulation	20
		542	Auswortung der Daten	40
	55	J.4.J Dareta	Auswertung der Daten	40
	5.5	Answe	artung der Ergebnisse	42 17
	5.0	5 6 1	Porug der maximalan Goschwindigkeit zur Dichte	47
		562	Auswirkung der zufälligen Messungisherheiten	47
		5.0.2		49
6	Zus	ammer	nfassung und Ausblick	54
	Lite	raturve	erzeichnis	v

Abkürzungsverzeichnis

Adaptive Cruise Control
Adaptive Time Gap
Beispielsweise
Beziehungsweise
Comma seperated values
Elektronisches Stabilitätsprogramm
Full Speed Range ACC
Full Velocity Difference Model
Gegebenenfalls
International Organisation for Standardization
Mittlere
Millionen
Optimal Velocity Model
Personenkraftwagen
Society of Automotive Engineers
Straßenverkehrsgesetz
Straßenverkehrsordnung

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung des Übergangs von der Wunsch- zur Sollgeschwindig-	
	keit in Bezug auf die Verkehrsdichte [Eigene Darstellung].	5
2.2	Hauptursachen von Verkehrsstaus in den USA [9]	6
2.3	Dichte der Fahrzeuge bezogen auf eine definierte Fläche [3].	10
2.4	Geschwindigkeit v der Fahrzeuge [3].	10
2.5	Verkehrsfluss J der defnierten Strecke über eine bestimmte Zeit [3].	11
2.6	Fundamentaldiagramm [10],[3]	12
2.7	Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses in Abhängigkeit zur Dichte (a) und	
	der Geschwindigkeit zur Dichte (b) [10]	13
2.8	Darstellung eines Trajektorien Diagramms [12]	13
2.9	Idealisierte Trajektorien basierend auf den Variablen s_i und ω_i [3]	14
3.1	Stufen der Automatisierung [6].	18
3.2	Wirkung des Abstandsregelautomats auf kritische Situationen im Straßenverkehr	
	[6]	19
4.1	Elemente eines Longitudinalmodells [3]	27
4.2	Stabilitätslagen eines Systems [21].	30
5.1	Simulationsoberfläche im ruhenden Zustand [Eigene Darstellung]	34
5.2 5.3	Konfiguration der Parameter der Simulationen [Eigene Darstellung] Mittlere Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für	38
	die Zeitabstande T_{min} bei einer Anzahl von 500 werten pro Messreihe [Eigene Darstellung]	42
5.4	Standardabweichung der mittl. Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 500 Werten pro	
	Messreihe [Eigene Darstellung]	43
5.5	Standardabweichung der mittl. Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} unter Ausschluss der Werte für $T_{min} =$	42
5.6	Mittlere Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für	43
	die Zeitabstande I_{min} bei einer Anzani von 10.000 werten pro Messreine [Eigene Darstellung].	44
5.7	Standardabweichung der mittl. Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis	
	zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Massroihe [Figure Derstellung]	15
58	Standardahweichung der mittlere Geschwindigkeit & für 25 Eahrzeuge im Ver	45
5.0	hältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} unter Ausschluss der Werte für	
	$T_{min} = 0, 1$, bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Messreihe [Eigene Darstel- lung]	15
50	Mittlere Geschwindigkeit a für 5 Fahrzeuge im Verhöltnis zum Pauschen a für	43
5.7	die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Messreihe [Eigene	
	Darstellung].	46

Abbildungsverzeichnis

5.10	Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit v für 5 Fahrzeuge, im Ver-	
	hältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 10.000	
	Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung]	47
5.11	Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Zeit von 25 Fahrzeugen für die Pa-	
	rameter $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 9$ [Eigene Darstellung]	48
5.12	Trajektorien-Diagramm eines nicht homogenen Verkehrsflusses [Eigene Darstel-	
	lung]	51
5.13	Trajektorien-Diagramm eines homogenen Verkehrsflusses [Eigene Darstellung]	51

Tabellenverzeichnis

4.1	Verschiedene Typen von ACC Systemen	24
5.1	Definition der Parameter der Simulation	36

1 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Bedeutung und der Umsetzung des automatisierten Fahrens. Im Kern geht es um das vom Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelte Fahrzeugfolgemodell, mit dem das Ziel einer Autonomie im Straßenverkehr vorangetrieben und optimiert werden soll. Automatisiertes und autonomes Fahren haben zwei konkrete Ziele. Sie haben einerseits den Zweck, die Verkehrsflüsse im Straßenverkehr zu verbessern, um beispielsweise Staus zu vermeiden oder diese effektiv aufzulösen und andererseits deren Effizienz sowohl in zeitlicher, als auch in ökologischer Sicht weiter zu verbessern. Parallel zur Verkehrsflussoptimierung lässt sich ein deutlich erhöhter Komfort während des Fahrens beobachten. Damit kann die Zeit, die aktiv in Fahrzeugen verbracht wird, effektiv genutzt werden. Autofahren entfaltet somit einen Raum neuer Möglichkeiten. Dabei steht jederzeit der Sicherheitsaspekt im Vordergrund. Der Straßenverkehr ist auf Grund der vielen Individuen eine sehr komplexe Umgebung mit vielen Parametern, in der jährlich weltweit viele Personen durch schwere Unfälle nachhaltige körperliche bzw. geistige Schäden erleiden oder gar ihr Leben verlieren. Betroffen sind nicht lediglich Fahrer einschließlich Insassen, sondern alle Personen, die aktiv am Straßenverkehr teilnehmen. Alleine in Deutschland kam es im Jahr 2018 zu 2.643.100 gemeldeten Verkehrsunfällen, in deren Rahmen 390.300 Personen verletzt und 3.180 getötet wurden [1]. Automatisiertes und autonomes Fahren bieten die Chance, die Umgebung dank einer erheblichen

Verbesserung der Reaktionszeiten, sowie Vielzahl von Sensoren und Messgeräten, losgelöst von Tagesform oder physischen Abhängigkeiten, zu beobachten und in kritischen Situationen schnell und zuverlässig zu reagieren.

Eines der dafür maßgeblich verantwortlichen Systeme ist die hier vorgestellte ACC-Funktion oder genauer gesagt die FSR-ACC-Funktion eines Fahrzeugs. Die FSR-ACC-Funktion beherrscht im Gegensatz zur herkömmlichen ACC-Funktion, die Regulierung des gesamten Geschwindigkeitsbereich bis 0 km/h [2]. Darin wird das eigens dafür entwickelte und in dieser Arbeit betrachtete Modell mit dem Namen Adaptive-Time-Gap-Modell implementiert. Es dient dazu, die Geschwindigkeit von Fahrzeugen im Straßenverkehr flexibel dem vorausfahrenden Verkehr oder Geschwindigkeitsbegrenzungen anzupassen. Dabei soll es in der Lage sein, Unfälle und die Entstehung von

1 Einleitung

Staus zu vermeiden. Möglich macht das der durch das Modell regulierte Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, der sich adaptiv der Geschwindigkeit anpasst, um stets einen maximalen Grad von Sicherheit und Effizienz zu gewährleisten.

Hierzu muss das System robust und gegenüber Störungen unempfindlich sein. Eine dieser Störungen, auch "Rauschen" genannt, sind durch die Umwelt verursachte Messunsicherheiten der Messsysteme wie dem Radar oder dem Lidar, mit denen die Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen gemessen werden. Diese dürfen die Zuverlässigkeit des Systems bis zu einem Grad beeinflussen, bei dem die Sicherheit nicht beeinträchtigt wird. Ein bedeutender Parameter des Modells ist der lichte Zeitabstand. Dieser ist durch ISO-Normen definiert und gibt den Sicherheitsabstand vor, den ein Fahrzeug zum Vorausfahrende einhalten muss.

Zur Überprüfung der Robustheit des ATG-Modells gegenüber dem Rauschen und damit auch dem Kernthema dieser Arbeit, wird dessen Verhalten auf diesen Parameter hin auf Grund der zeitlichen Abhängigkeit, mittels dynamischer Simulationen analysiert. Dazu wurde das ATG-Modell um die Funktion des Rauschens erweitert. Das bedeutet, dass der vom ATG-Modell gemessene Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug während der Simulation durch zufällige Werte verfälscht wird. Hierbei soll, um das genaue Verhalten zu analysieren, das Rauschen verstellbar sein, sodass die Intensität dessen während der Simulation veränderbar ist. In Anlehnung dazu, wird das ATG-Modell um einen weiteren Aspekt erweitert, der es ihm ermöglicht, statt mit einem festen, mit einem flexiblen Zeitabstand arbeiten zu können. Dazu wird der Parameter T_{min} eingeführt, der eine untere Grenze des Zeitabstandes abbildet und es dem ATG-Modell damit erlaubt, den Zeitabstand zwischen der unteren Grenze T_{min} und dem Zeitabstand T während der Simulation variieren zu können.

Zur dynamischen Analyse des ATG-Modells, wird mittels zweier definierter Verkehrsszenarien Simulationen mit zuvor definierten Parametern durchgeführt, um damit eine Laborumgebung zu schaffen, mit der vergleichbare Werte ermittelt werden können. Hierzu wird mittels der Simulation ein zufälliges Rauschen simuliert, das auf die Fahrzeuge einwirkt. Ziel ist mit Hilfe des Modells einen homogenen und stabilen Verkehrsfluss zu erzeugen.

Durch dieses Verfahren soll ermittelt werden, ob und unter welchen Bedingungen das Rauschen einen Einfluss auf das System hat. Dazu werden Simulationen in zwei unterschiedlichen Szenarien mit unterschiedlichen Verkehrsdichten durchgeführt werden, um zu ermitteln, ob es bei einer hohen Verkehrsdichte zu messbaren Unterschieden gegenüber einer niedrigen Verkehrsdichte kommt. Ist dies der Fall, gilt es das Ausmaß der Auswirkungen zu ermitteln und zu bewerten, inwiefern diese tolerabel sind, um das System als stabil bezeichnen zu können.

1 Einleitung

Somit stellt sich auch die Frage, welchen Zustand der Verkehr annimmt, wenn das System nicht mehr stabil ist und ob es auf Grund des Rauschens zu Kollisionen kommt, die den Sicherheitsaspekt des Modells in Frage stellen.

2.1 Zustände des Verkehrs

2.1.1 Fließender Verkehr

Von fließendem Verkehr wird gesprochen, wenn sich alle Fahrzeuge auf einem definierten Straßenabschnitt nahe ihrer Wunschgeschwindigkeit bewegen, während ein Mindestabstand zu einem vorausfahrendem Fahrzeug stets eingehalten werden kann [3].

2.1.2 Stauung

Unter gestautem Verkehr wird eine Abschnitt definiert, in dem die Abweichung zur Wunschgeschwindigkeit von einer bestimmten Menge an Fahrzeugen um einen definierten Grad überschritten wird, damit der Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug weiterhin eingehalten werden kann. Grund dafür ist die Anzahl der Fahrzeuge die bezogen auf die Fläche, die optimale Dichte zum Einhalten der Wunschgeschwindigkeit überschreitet. In Abb. 2.1 wird dieser Verlauf schematisch dargestellt. Die Wunschgeschwindigkeit v_0 kann bis zu der Dichte φ_C unter Einhaltung des Sicherheitsabstandes erreicht werden. Ab diesem Punkt folgt mit jeder weiteren Zunahme der Dichte ein Abnehmen des Verkehrsflusses und der Geschwindigkeit, sodass die Fahrzeuge nur noch die aus der Dichte resultierende Sollgeschwindigkeit einhalten können. Erreicht die Dichte am Punkt φ_M ihr Maximum, so lautet die Geschwindigkeit v = 0 [3].



Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Übergangs von der Wunsch- zur Sollgeschwindigkeit in Bezug auf die Verkehrsdichte [Eigene Darstellung].

2.1.3 Stau in Zahlen

Die Anzahl der Staus nahm laut den veröffentlichten Daten des ADAC, in den letzten Jahren erheblich zu. Während es im Jahr 2011 zu 189.000 Staus mit 450.000 km Länge kam, waren es im Jahr 2017 bereits 723.000 Staus mit einer Gesamtlänge von 1.448.000 Kilometern. Dadurch ergibt sich seit dem Jahr 2013 eine Steigerung der gesamtem Anzahl an Staus im Jahr um 383% [4]. Die Länge der Staus beziffert sich im Jahr 2016 auf 30 Stunden pro Autofahrerinnen und Autofahrer, womit Deutschland im weltweiten Ranking in dem Jahr auf Platz 11 der Länder mit den meistens Staustunden pro Kopf pro Jahr kam [5].

2.1.4 Ursachen von Stau

Um die genauen Ursachen für die Zunahme der Staus zu verstehen, muss festgehalten werden, dass Staus in großen Teilen im urbanen Raum auftreten. Im Jahr 2007 wurde seit Anbeginn der Zeit, die höchste Zahl an Menschen, die in Städten leben, gemessen. Prognosen zufolge soll sich das Verhältnis zwischen dem Anteil der in der Stadt lebenden Menschen und derer auf dem Land bis 2050 auf 70:30 verschieben. Durch die verstärkte Urbanisierung wachsen vor allem die großen Städte und ihre Umgebungen immer weiter an und entwickeln sich langsam zu Mega-Städten.

Häufig arbeiten und wohnen die Menschen nicht in unmittelbarer Nähe zu ihrem Arbeitsplatz. Hohe Mieten und Platzmangel treibt die Menschen vermehrt in die umliegenden Städte, was dazu führt, dass sie täglich zwischen den Städten bzw. Stadtteilen pendeln müssen [6]. Ein weiterer Grund für das stetige Wachstum der Staus ist neben der zunehmenden Anzahl der Menschen in den Ballungsräumen die steigende Zahl der Fahrzeuge auf den Straßen. Im Jahr 2017 gab es 3,44 Mio. Neuzulassungen in Deutschland, während es im Jahr 2013 noch 2,95 Mio. waren [7]. Es könnte angenommen werden, dass durch eine höhere Anzahl an Fahrzeugen, die im Jahr abgemeldet werden, die Summe der angemeldeten Autos gleich bleibt. Die Zahl der Abmeldungen ist jedoch nicht proportional zu denen der Anmeldungen, sodass im Jahr 2018 in Deutschland 46,475 Mio. PKW gemeldet waren. Im Jahr 2013 waren es noch 43,431 Mio., was ein Wachstum von 7% ergibt [8]. Auf Grund dieser Werte wird schnell klar, dass aus der Kombination aus einer stetig wachsenden Bevölkerungsdichte in den Ballungsräumen und einer ebenfalls wachsenden Anzahl an Fahrzeugen die Dichte an Fahrzeugen immer weiter zunimmt und damit der Zeitpunkt der Sättigung des Straßennetzes, mit immer größer werdender Geschwindigkeit, erreicht wird. Staus resultieren wie in Abb. 2.2 abgebildet jedoch aus weiteren Faktoren. Die Abbildung stellt

den prozentualen Anteil der Faktoren dar, die in den Staus verursachen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Übersättigung der Infrastruktur, auch Bottlenecks gennant, mit 50% den mit Abstand größten Teil der Ursachen ausmacht. Gefolgt von den Verkehrsunfällen, die mit einem Viertel die zweithäufigste Ursache sind [9].



Abbildung 2.2: Hauptursachen von Verkehrsstaus in den USA [9].

2.1.5 Folgen von Stau

Staus bedingen nicht nur erheblichen Zeitverlust, sondern auch wirtschaftliche sowie ökologische Folgen. Im Jahr 2017 verbrachten die Autofahrer in Deutschland 457.00 Stunden im Stau [4]. Während dieser Zeit entstehen beträchtliche volkswirtschaftliche Schäden, da als Folge dessen beispielsweise der Güterverkehr deutlich länger braucht, um an seiner Ziel-Destination anzukommen, wodurch dem Logistikunternehmen automatisch zusätzliche Kosten entstehen. Ebenso steigt durch die Stop-and-Go-Fahrweise während eines Staus der Kraftstoffverbrauch an, der einen höheren CO_2 -Emission und Feinstaubausstoß mit sich bringt [6].

2.1.6 Spontane Staubildung ("Stau aus dem Nichts")

Für die spontane Staubildung, auch "Stau aus dem Nichts" genannt, ist hauptsächlich der Mensch verantwortlich. Bei diesem Phänomen ist das Ergebnis dasselbe wie bei einem gewöhnlichen Stau auch, jedoch gibt es dafür diesen keine offensichtlichen bzw. erkennbaren Grund. Genauer genommen ist das Fahrverhalten der Mensch die Schwachstelle. Durch einen Moment der Unaufmerksamkeit kommt es zu überraschenden Bremsreaktion.

Die Gründe für diese spontanen Reaktionen entstehen durch die Autofahrer, die sich von Ereignissen, wie einem Unfalls auf der Gegenfahrbahn, einer Baustelle oder von Objekten oder Ereignissen am Fahrbahnrand ablenken lassen [10]. Durch ein unachtsames Überholmanöver, bemerkt der überholende Autofahrer nicht, dass sich auf der Überholspur hinter ihm ein Fahrzeug nähert, das deutlich schneller fährt als er. Das löst eine Kettenreaktion aus, da der nachfolgenden Verkehr gezwungen ist seine Geschwindigkeit so weit zu reduzieren, dass er wieder den nötigen Sicherheitsabstand zum Vordermann einhalten bzw. erreichen kann. Dieses Übermäßige Bremsen setzt sich immer weiter fort, während es sich von Fahrzeug zu Fahrzeug weiter verstärkt, bis es zu einer Stauung des Verkehrs kommt [11].

2.1.7 Sättigungsproblem

Die Zunahme an Staus ist weltweit zu betrachten und resultiert aus der Übersättigung des Straßennetzes. Die Infrastruktur besitzt nur eine begrenzte Kapazität, die zu Stoßzeiten durch den Pendelund Güterverkehr, überlastet ist. Je höher der Sättigungsgrad, desto höher das Risiko eines Staus bzw. das Ausmaß eines Staus. Wird die Sättigung überschritten, so ist die direkte Folge ein Stau, da zu einem bestimmten Zeitpunkt x die Nachfrage größer als das vorhandene Angebot ist [11]. Lediglich die Kapazität der Straßen zu erhöhen, bietet sich als Lösung kaum an. In den Innenstädten ist der Platz aufgrund der dichten Besiedlung häufig knapp oder bereits ausgereizt. Auf

Autobahnen und Landstraßen hingegen sind Kapazitäten zum Ausbau häufig zwar größer. Ein ausbaubedingter Entlastungseffekt wäre aber lediglich von vorübergehender Dauer. Grund dafür ist das sogenannte "Down-Thomson-Paradox". Anfangs verringert demnach das gewonnene Platz-Potential den Sättigungsgrad, sodass es zu keiner Übersättigung mehr kommt und die Zahl der Staus nachlässt. Dieser Sachverhalt steigert aber wiederum die Attraktivität einer Route für solche Personen, die sie bis zu dem Zeitpunkt des Ausbaus gemieden haben. Die Folge ist, dass sie nun diese ihren bisherigen Routen oder gar dem Fahren mit Fahrrad, Bus oder Bahn vorziehen. Bereits nach kurzer Zeit ist das Verkehrsaufkommen wieder auf einem ähnlichen Niveau wie zu dem Zeitpunkt vor dem Ausbau [3].

2.2 Variablen des Verkehrsflusses

Die Variablen des Verkehrsflusses lassen sich in in zwei Aspekte unterteilen. Das sind auf der einen Seite die mikroskopischen Variablen und auf der anderen die makroskopischen Variablen. Sie dienen der Beschreibung und Analyse des Verkehrs bzw. der einzelnen Fahrzeuge und geben Rückschlüsse auf ihr Verhalten.

2.2.1 Mikroskopische Variablen

Die mikroskopischen Variablen dienen dazu, das Handeln eines einzigen Fahrzeugs zu beschreiben. Dazu zählen dessen individuelle Position, Bewegungen und Abstände zu anderen Fahrzeugen. Besagte Variablen werden verwendet, um die Bewegungen eines einzelnen Fahrzeugs zu analysieren, wie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Die Abstands- und Differentialvariablen lassen sich in vier verschieden Variablen unterteilen.

- Räumlicher Abstand
- Lichter Abstand
- Zeitlicher Abstand
- Lichter Zeitabstand

Der räumliche Abstand s zwischen zwei Fahrzeugen errechnet sich, wie in Gleichung (2.1) abgebildet, aus der Distanz der beiden Fahrzeuge zueinander. Dabei dienen die Mitten der Länge der Fahrzeuge als Anfangs- und Endpunkt der Geraden. Der räumliche Abstand wird hierbei in Metern angegeben.

$$s = \sqrt{x_2 - x_1} \tag{2.1}$$

Als lichter Abstand *d* wird die Distanz beider Fahrzeuge zueinander beschrieben, ausgehend von der Stoßstange des nachfahrenden bis zum Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs. Dieser ergibt sich, wie in Gleichung (2.2) zu sehen ist, aus der Differenz des räumlichen Abstandes und der Fahrzeuglänge und wird wie der räumliche Abstand ebenfalls in Metern angegeben. Dabei wird die Wagenlänge beider Fahrzeuge als identisch angenommen.

$$d = s - \ell \tag{2.2}$$

Der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen lässt sich über eine Distanz in [m], darüber hinaus auch als eine Zeit in Sekunden definieren. Dies geschieht mittels des zeitlichen Abstandes ω und des lichten Zeitabstandes T. Der zeitliche Abstand wird beschrieben als die Zeit, die der Mittelpunkt des nachfahrenden Fahrzeugs benötigt, um den Mittelpunkt des vorausfahrenden Fahrzeugs zu erreichen, wenn dieses plötzlich zum sofortigen Stillstand käme.

$$\omega = \frac{s}{v} \tag{2.3}$$

Der lichte Zeitabstand bildet sich aus der Division der Geschwindigkeit des nachfahrenden Fahrzeugs und dem lichten Abstand beider Fahrzeuge.

$$T = \frac{d}{v} \tag{2.4}$$

2.2.2 Makroskopische Variablen

Über die makroskopischen Variablen lässt sich das Verhalten bzw. der Zustand von Fahrzeugen innerhalb einer definierten Linie oder Fläche beschreiben. Dabei kommt es hier, anders als bei den mikroskopischen Variablen, nicht auf die Positionen und Abstände der einzelnen Fahrzeuge an, sondern auf das Verhalten der Fahrzeuge im gesamten Raum. Dabei werden folgende Variablen betrachtet:

- Dichte
- Geschwindigkeit
- Verkehrsfluss

Die Dichte ρ beschreibt die Menge an Fahrzeugen N im Bezug auf die definierte Linie x [m] oder der Fläche A [m^2], in der diese sich befinden (siehe Abb. 2.3). Daraus ergeben sich die fehlenden Messgrößen:

$$Linie: \ \rho \ = \frac{N}{m} \tag{2.5}$$

$$Flche: \ \rho \ = \frac{N}{m^2} \tag{2.6}$$



Abbildung 2.3: Dichte der Fahrzeuge bezogen auf eine definierte Fläche [3].

Aus der Distanz, die die Fahrzeuge in einer bestimmten Zeit innerhalb des definierten Raums zurücklegen, ergibt sich deren Geschwindigkeit v (siehe Abb. 2.4). Diese wir in der Regel in [m/s] oder [km/h] angegeben.



Abbildung 2.4: Geschwindigkeit v der Fahrzeuge [3].

Der Verkehrsfluss, auch Fluss genannt, gibt die Menge an Fahrzeugen wieder, die über die definierte Zeit hinweg den definierten Linien- bzw. Flächenabschnitt passiert haben (siehe Abb. 2.5). Die Angabe erfolgt in der Regel in [N/s] oder [N/h].



Abbildung 2.5: Verkehrsfluss J der defnierten Strecke über eine bestimmte Zeit [3].

Aus dem Verkehrsfluss und der Geschwindigkeit lässt sich darüberhinaus über die hydrodynamische Formel (siehe Gleichung (2.7)) die Verkehrsdichte ρ in [N/m] ableiten [12].

1

$$p = \frac{J}{V} \tag{2.7}$$

2.3 Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm dient der Charakterisierung des Verkehrs und stellt den Zusammenhang zwischen dem Strom J [N/s] und der Dichte ρ [N/m] her. Ein Fundamentaldiagramm wird, wie in Abb. 2.6 abgebildet, durch Datenpunkte aus empirischen Messungen dargestellt. Dabei spiegelt jeder Datenpunkt die Dichte und den Fluss in einem definiertem Zeitintervall wider. Bilden die Datenpunkte eine kollektive positive Steigung, so wird dieses Phänomen als der Freiflussast bezeichnet. Bildet sich jedoch eine kollektive negative Steigung ab, so wird diese als gestauter Ast bezeichnet [10].



Abbildung 2.6: Fundamentaldiagramm [10],[3].

2.3.1 Freiflussast

In dem Bereich des Freiflussastes kann sich jedes Fahrzeug annähernd mit seiner Wunschgeschwindigkeit fortbewegen. Durch die niedrige Verkehrsdichte, wie in Abb. 2.6 im Bereich des Freiflussastes erkennbar und dem daraus resultierenden Sicherheitsabstandes zwischen den einzelnen Fahrzeugen, ist eine Wechselwirkung zwischen den Fahrzeugen auszuschließen [10].

2.3.2 Gestauter Ast

Ab einer bestimmten Dichte werden die Sicherheitsabstände zwischen den Fahrzeugen kleiner. Dies hat eine zunehmende Wechselwirkung zwischen den Fahrzeugen zufolge. Dadurch nimmt der Verkehrsfluss, ebenso wie die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ab und entspricht demnach nicht mehr deren Wunschgeschwindigkeit. Das Resultat daraus sind Staus [10].

2.3.3 Darstellung

Es gibt zwei unterschiedliche Darstellungsformen der Fundamentaldiagramme. Erstere, in Abb. 2.7 a) abgebildet, stellt die Messdaten der Fahrzeuge in Abhängigkeit der Dichte ρ und des Verkehrsflusses *J* dar. Die zweite in Abb. 2.7 b) ist eine alternative Darstellungsform und zeigt die Dichte ρ_c in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit *v*. Hierbei wird deutlich, dass bis zum Punkt ρ_c der Fluss mit steigender Dichte wächst. Nach Überschreitung dieser Dichte nimmt der Fluss wieder ab. Das liegt daran, dass die Geschwindigkeit von der Dichte abhängt und mit steigender Dichte monoton fallend ist. Diese Feststellung lässt also darauf schließen, dass durch eine verminderte Geschwindigkeit der Fahrzeuge, trotz der hohen Dichte, der Verkehrsfluss weiter bis zum $\rho_m ax$ sinkt [10].



Abbildung 2.7: Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses in Abhängigkeit zur Dichte (a) und der Geschwindigkeit zur Dichte (b) [10]

2.4 Trajektorien-Diagramm

Das in Abb. 2.8 abgebildete Trajektorien-Diagramm, auch Raum-Zeit-Diagramm genannt, ist eine Methode, um die Positionen oder das Verhalten von Objekten im Bezug auf die Zeit zu erfassen [12]. Mit ihnen ist es möglich alle Variablen des Straßenverkehrs zu erfassen [3]. Bezogen auf das Verhalten von Fahrzeugen, stellt ein Diagramm die Bewegungen der Fahrzeuge einer oder mehrerer Fahrbahnen dar. Dabei besitzt jedes Fahrzeug seine eigen Trajektorienlinie [10].



Abbildung 2.8: Darstellung eines Trajektorien Diagramms [12].

Trajektorien sind Zeitreihen der Agentenpositionen $x_i(t)$, $x_{i+1}(t)$... für alle t. In Abb. 2.9 sind idealisierte Trajektorien zu sehen, an denen die Raumabstände s und der Zeitabstand ω bzw. die Dichte ρ und der Verkehrsfluss J mittels der Gleichungen (2.8) und (2.9) berechnet werden [3].

$$\rho = \frac{n}{\sum_{1}^{n} s_i} = \frac{1}{\overline{s}} \tag{2.8}$$

$$J = \frac{m}{\sum_{1}^{m} \omega_i} = \frac{1}{\overline{\omega}}$$
(2.9)



Abbildung 2.9: Idealisierte Trajektorien basierend auf den Variablen s_i und ω_i [3].

2.5 Kollektive Phänomene des Straßenverkehrs

2.5.1 Schockwelle

Bei einer Schockwelle handelt es sich um einen Dichtesprung, hervorgerufen durch zwei Bereiche mit unterschiedlichen Dichten. Dabei holt eine Welle mit großer Geschwindigkeit eine Welle mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit ein, die eine Schockwelle nach sich zieht. Dieses Phänomen wird ebenfalls im Fundamentaldiagramm dargestellt und ist als gestauter Ast zu erkennen [10].

Schockwellen und Verdünnungswellen gehen immer miteinander einher, da auf eine Schockwelle stets eine Verdünnungswelle folgen muss, es sei denn der Zustand der Schocks bleibt bestehen. Schockwellen sind ein ständiger Bestandteil des Straßenverkehrs und lassen sich anhand eines Beispiels aus Abschnitt 2.5.1 Spontane Staubildung veranschaulichen. Ausgelöst durch einen Impuls

gerät ein vorausfahrendes Fahrzeug ins Stocken, was analog dazu die darauf folgenden Fahrzeuge dazu zwingt zu bremsen, um den Sicherheitsabstand einhalten zu können; eine Kettenreaktion wird in Gang gesetzt. Die Folge: Die Dichte der Fahrzeuge nimmt zu; eine Stauung bildet sich, ausgelöst durch eine Schockwelle. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Verkehr zum Stehen kommt oder nur verlangsamt weiterfahren kann. Wichtig ist, dass die Fahrzeuge auf Grund des Dichtesprungs ihre Wunschgeschwindigkeit in Bezug auf den Sicherheitsabstand nicht mehr einhalten können. Schockwellen können in diesem Kontext auch als Stauwellen bezeichnet werden und durch Einflüsse wie Ampeln, Baustellen oder Fehler anderer Verkehrsteilnehmer hervorgerufen werden [3].

2.5.2 Verdünnungswelle

Die Verdünnungswelle bezeichnet die Zustandsänderung vom gestautem Verkehr in den fließenden, die im Fundamentaldiagramm als Freiflussast zu erkennen ist. Sie wird hervorgerufen durch das Aufheben des Auslösers der Schockwelle, beispielsweise durch einen Phasenwechsel der Ampel auf grün oder dem Beseitigen einer Baustelle oder eines Unfalls. Ist der Auslöser aufgehoben, bestrebt wieder jedes Fahrzeug seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, sodass sich die entstandene Stauung wieder auflöst [3].

2.5.3 Stop-and-Go-Wellen

Eine Stop-and-Go-Welle ist ein Phänomen, bei dem es durch eine Kettenreaktion, auf Grund von Instabilitäten im Verkehrsfluss oder der Reaktionszeit eines Fahrers bzw. durch die begrenzte Brems- und Beschleunigungsfähigkeit eines Fahrzeugs, zum Stillstand des Verkehrs kommt.

Die Voraussetzung hierfür ist eine Fahrzeugkolonne mit einer gewissen Dichte oder einer hohen Geschwindigkeitsanpassungszeit, die sich anfangs im Gleichgewicht befindet. Aus jedem erdenklichen Grund ist das vorderste Fahrzeug (Fahrzeug 1) dazu gezwungen abrupt zu bremsen. Um einen Unfall zu vermeiden, muss Fahrzeug 2 seine Geschwindigkeit der neuen Geschwindigkeit von Fahrzeug 1 anzupassen. Auf Grund der hohen Dichte oder Geschwindigkeitsanpassungszeit ist Fahrzeug 2 dazu gezwungen seine Geschwindigkeit auf $v_2 < v_1$ anzupassen. Fahrzeug 3 kann auf die Verzögerung von Fahrzeug 2 nicht unmittelbar reagieren, weshalb es seine Geschwindigkeit auf $v_3 < v_2$ anpassen muss. Diese Kettenreaktion verläuft immer weiter, bis eines der darauf folgenden Fahrzeuge zum Stillstand kommt, auch bezeichnet als Schockwelle. Bei sehr hohen Verkehrsdichten über große Distanzen hinweg kann es daher zu mehreren Stop-and-Go-Wellen in Folge kommen, bevor wieder ein stabiler Verkehrsfluss entsteht. Die Stauwelle löst sich erst zu dem Zeitpunkt auf, an dem die Anzahl der neueinfahrenden Fahrzeuge kleiner wird. Stop-and-Go-Wellen sind stets von der Dichte abhängig. Ist diese zu gering, kann keine Kettenreaktion entstehen oder weit genug weiter transportiert werden, damit es zum Stillstand einer oder mehrerer Fahrzeuge kommt [12].

2.6 Messmethoden zur Beobachtung des Verkehrsflusses

Um das Verkehrsaufkommen bzw. den Verkehrsfluss eines Verkehrsweges zu ermitteln bzw. beschreiben zu können, wird durch Beobachtungen bzw. Messungen die Anzahl der durch den Messbereich fahrenden Fahrzeuge bestimmt. Die hierzu verwendeten Detektoren lassen sich in Festdetektoren und Induktionsschleifen unterscheiden [10]. Die dabei verwendete Messmethode wird als die Querschnittsdetektion bezeichnet, mit der Messungen an einem festen Straßenquerschnitt durchgeführt werden können [12]. Zu den Festdetektoren gehören pneumatische Sensoren, Lichtschranken, Handys, Kameras oder Radar- bzw. Ultraschallmessgeräte [10]. Mit Hilfe dieser Geräte lassen sich die mikroskopischen Daten ermitteln, aus denen anschließend die makroskopischen Daten aggregiert werden können, durch welche der Verkehrsfluss am definierten Messort dargestellt werden kann. Die dabei verwendete klassische Form der Darstellung sind Trajektorien-Diagramme [12].

Die Darstellung des Verkehrsflusses geschieht jedoch nicht ausschließlich mit der Auswertung aktueller Messungen. Eine weitere wichtige Methode stellt die Durchführung von Simulationen mittels der Verwendung von Modellen dar. Anhand dieser Methode können bestimmte Situationen reproduziert werden, die in wirklichen Situationen nur spontan bzw. zufällig entstehen. Dieser Thematik widmet sich ebenfalls diese Arbeit, indem mittels des Fahrzeugfolgemodells dem Adaptive-Time-Gap-Modell, Verkehrsflüsse simuliert und ausgewertet werden.

3 Einführung in die Grundlagen des automatisierten Fahrens

3.1 Definition automatisierten Fahrens

Der Begriff der Automatisierung beschreibt in der Regelungstechnik einen Regelkreis, dessen Störeinflüsse auf ein Minimum reduziert werden soll, um sich immer weiter der Autonomie anzunähern [13]. Um in der Automobiltechnik zu definieren, ab welchem Grad ein Vorgang oder ein Prozess als automatisiert bezeichnet werden kann, hat die SAE International die seit Januar 2014 geltende Norm SAE J3016 festgelegt. Darin wurden Kategorisierungen festgelegt, in denen die Systeme und Anforderungen an straßengebundene Kraftfahrzeuge definiert wurden. Die Norm differenziert klar zwischen automatisierten und autonomen Fahren [14]. Als automatisiertes Fahren werden die Entwicklungsstufen bezeichnet, bei denen der Fahrer durch die assistenz- und teilautomatisierten Systeme unterstützt wird. Autonomes Fahren hingegen entbindet den Fahrer vollständig von seiner Verantwortung des Fahrens. In diesem Stadium ist das Fahrzeug stets in der Lage die Situation zu beherrschen, sodass der Fahrer niemals ins Geschehen eingreifen muss [15]. Die Rechtslage in Deutschland erlaubt die Kategorien 1 und 2 ohne Veränderungen der StVG seit jeher. Die Kategorie 3, das hochautomatisierte Fahren, darf erst seit dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr vom 23.06.2016 auf den Straßen angewendet werden. Vorausgesetzt, dass diese Funktionen bestimmungsgemäß verwendet werden [16]). Alle weiteren Kategorien sind zum aktuellem Zeitpunkt noch nicht rechtskonform.

3.2 Klassifizierung

Der Grade der Automatisierung eines Fahrzeugs wurden durch die SAE in sechs Kategorien bzw. Level (0-5) unterteilt, um die rechtlichen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene zu definieren. Diese unterscheiden vom Fahren ohne jegliche Automatisierung bis hin zu Hoch- und Vollautomatisierung und Autonomie. In den einzelnen Leveln werden nicht nur die Aufgaben bzw. Anforderungen an die Assistenzsysteme definiert, sondern auch die des Fahrers

3 Einführung in die Grundlagen des automatisierten Fahrens

und des Fahrzeugs. In Abb. 3.1 werden die Aufgaben der sechs Stufen der Automatisierung dargestellt und im Folgenden detailliert in Bezug auf Ihre Aufgaben und Anforderungen des Fahrzeugs, als auch des Fahrers erläutert [6].



Abbildung 3.1: Stufen der Automatisierung [6].

In der ersten Stufe (**Stufe 0**), gibt es keinerlei Systeme, die in das Fahrgeschehen eingreifen können. Das System kann den Fahrer lediglich beispielsweise durch Signale vor Gefahren warnen. In **Stufe 1** werden das Adaptive Cruise Control und der Spurhalteassistent eingeordnet. Diese Systeme unterstützen den Fahrer während des Fahrgeschehens bereits aktiv. Jedoch muss dieser die Längs- und Querführung des Fahrzeugs dauerhaft ausführen.

Stufe 2 wird als teilautomatisiertes Fahren bezeichnet, bei dem die vom Fahrer durchgeführte Längs- und Querführung des Fahrzeugs nicht mehr dauerhaft ausgeübt werden muss. Hier darf der Fahrer in gewissen Situationen das Steuern des Fahrzeugs an das Assistenzsystem übergeben, während er dieses dauerhaft überwacht.

Ab **Stufe 3** ist das Fahrzeug technisch bereits soweit fortgeschritten, dass es als hochautomatisiertes Fahren bezeichnet wird. Hierbei wird die Kontrolle über das Fahrzeug zeitweise vollständig vom System übernommen, ohne dass der Fahrer dieses dauerhaft überwachen muss. Dies ist beispielsweise in Situationen wie dem Fahren auf Autobahnen oder in Staus der Fall.

Mit **Stufe 4** wird, bis auf wenige Ausnahmen, bei denen die Grenzen des Systems erreicht werden, das Fahren vollständig vom System übernommen. In den besagten Ausnahmen schafft das System jedoch das Fahrzeug in eine sichere Ausgangssituation zu bringen, wie beispielsweise den Stillstand des Fahrzeugs auf dem Standstreifen. Dies ändert sich ab **Stufe 5**, ab dem die Fahrzeuge sich autonom und ohne Ausnahme fahrerlos fortbewegen können [6].

3.3 Vorteile des automatisierten Fahrens

Die Tatsache, dass der Ausbau von Straßen nicht zweckführend ist, führt zu der Schlussfolgerung, dass die Ausnutzung der Infrastruktur optimiert werden muss. An dieser Stelle spielt das autonome Fahren eine entscheidende Rolle. Der Mensch ist dabei das Risiko, das minimiert werden muss. Mittels des autonomen Fahrens kann, wie in Abb. 3.2 dargestellt, der Risikofaktor "Mensch" nicht vollständig eliminiert, jedoch deutlich reduziert werden. Durch die für das automatisierte und autonome Fahren verbesserten Eigenschaften der Fahrzeuge, wie präzise Sensoren, schnelle Erfassungszeiten und sekundenschnelle Reaktionszeiten, kann durch diese Fahrzeuge der Mindestabstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen signifikant reduziert und die Fahrzeugdichte deutlich erhöht werden. Darüber hinaus wird, wie in Abb. 3.2 dargestellt, das Risiko kritischer Situationen, die häufig aus Fahrfehlern durch Menschen resultieren, reduziert, sodass spontane Staubildungen oder Staus, die durch Unfälle verursacht werden, zahlenmäßig deutlich an Gewicht verlieren [6].

WIE ABSTANDSREGELTEMPOMAT UND AUFFAHRKOLLISIONSWARNUNG HELFEN			
Fahrzeugtyp	Straßenart	Anteil System eingeschaltet	Reduktion der kritischen Situationen
Pkw	Autobahn	51%	32-82%
Pkw	Landstraße	31%	32-45%
Pkw	innerorts	19%	32%
Lkw	Autobahn	42 %	14-36%

Abbildung 3.2: Wirkung des Abstandsregelautomats auf kritische Situationen im Straßenverkehr [6].

Die Reaktionszeit eines Menschen liegt bei ungefähr 500 ms. Die des Assistenzsystems liegt jedoch bei gerade mal 50 ms, was einen Unterschied von 1000% ergibt. Jedoch sind die Assistenzsysteme trotz dieser Überlegenheit weiterhin auf den Fahrer angewiesen, da die Auffassungsgabe und die Fähigkeit der Menschen zur Interpretation von Situationen, die von den Standardsituationen abweichen, des Menschen deutlich besser ist [17].

3.4 Elemente autonomer Fahrzeugführung

Die Elemente der Fahrzeugführung bilden auf Grund der dynamischen Umwelt und der autonomen Fahrzeuge, die sich wegen ihrer sich verändernden Position und der Zeitabhängigkeit der sich verändernden Faktoren einen ständig fortlaufenden Kreisprozess. Dieser besteht aus den drei folgenden Elementen [3]:

- Wahrnehmung
- Bewegungsplanung
- Ausführung

3.4.1 Wahrnehmung

Bei der **Wahrnehmung** geht es um das Erfassen aller von Sensoren stammenden Daten zur Modellierung der Umgebung, in der sich das Fahrzeug befindet. Dabei werden die Daten aller Sensoren wie bspw. des Radars, Lidars, GPS-Ortungssystems, Trägheitsnavigationssystems oder der Kameras zusammengeführt. Dabei ergänzen sich die Komponenten gegenseitig und kompensieren die Schwächen der anderen, um einen maximalen Grad an Sicherheit zu erzielen.

Diese Daten können mit weiteren Daten externer Kommunikationsgeräte, genannt V2V und V2I erweitert und kombiniert werden. Damit wird die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen untereinander, sowie mit der Infrastruktur bezeichnet. Mittels dieser Daten kann das Fahrzeug sich in seiner Umgebung zurechtfinden und fortbewegen. Jedoch muss dieses erst einmal ein Ziel haben. Dies geschieht in dem Element der Bewegungsplanung [3].

3.4.2 Bewegungsplanung

Die **Bewegungsplanung** wird in drei Stufen eingeteilt. Den Beginn macht die strategische Ebene. Hier werden Route und Abfahrtszeitpunkt berechnet bzw. festgelegt, um das gewählte Ziel zu erreichen. Dabei strebt das System stets an, sowohl die kürzeste, als auch die kostengünstigste Route zu wählen, auch genannt "kürzester-Weg-Problem". Anschließend folgt die taktische Ebene, in der das Fahrzeug Fahrsituationen richtig erkennt und interpretiert, Hindernissen ausweicht und so Staus vermeidet. In der letzten Ebene geht es um die Planung der Manöver die das Fahr-

3 Einführung in die Grundlagen des automatisierten Fahrens

zeug selbst ausführt, um die zuvor genannten Anforderungen zu erfüllen und dabei Kollisionen zu vermeiden [3].

3.4.3 Ausführung

Damit folgt das letzte Element der autonomen Fahrzeugführung; die **Ausführung** aller Bewegung (Lenkung) und der Regulierung der Geschwindigkeit [3].

4 Abstand und Geschwindigkeitsregelung

4.1 Funktionsprinzip

4.1.1 ACC (Automatic Cruise Control)

ACC steht für "Automatic Cruise Control", was auf Deutsch übersetzt "Automatische Abstandsregelanlage" bedeutet. Die ACC-Funktion ist eine Funktion, bei der das Fahrzeug eine vorgegebene Wunschgeschwindigkeit hält und bei vorausfahrendem Verkehr einen definierten angemessenen Mindestabstand einhält. Bei Bedarf wird die Geschwindigkeit gedrosselt, um den Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug weiter einzuhalten. Hierbei wird zwischen dem herkömmlichen ACC und dem FSR-ACC (Full-Speed-Range-ACC) unterschieden. Beide erfüllen die selben Aufgaben mit dem einzigen Unterschied, dass das einfache ACC-System, den begrenzten Geschwindigkeitsbereich bis 7 m/s (30 km/h) und das FSR-System den gesamten Geschwindigkeitsbereich bis 0 m/s unterstützt [18]. Das ACC System muss durch den Fahrer manuell aktiviert aktiviert werden. Bei Betätigen der Bremse wird dieses wieder sofort deaktiviert. Dabei erfolgt durch das ACC-System keine Abschwächung der Bremse, sodass der Fahrer stets die volle Kontrolle über die Bremsleistung des Fahrzeugs hat [19].

4.1.2 Sensorik

Um die ACC-Funktionen in einem Fahrzeug verwenden zu können, bedarf es einiger technischer Voraussetzungen. Ein wichtiger Bestandteil ist die ACC-Sensorik. Dabei handelt es sich nicht um ein autarkes System. Die Sensorik ist in das Fahrzeugsystem integriert und bildet mit der Antriebs-, der Getriebesteuerung, dem ESP und Sensoren wie dem Radarsensor, einen komplexen Systemverbund [20].

4.1.3 Detektion und Objektauswahl (Identifizieren des nachfolgenden Fahrzeugs und Messung der Abstands- und Geschwindigkeitsdifferenz)

Bei den für das ACC verwendeten Radarsensoren handelt es sich um einen Long-Range-Radarsensor. Dieser ist an der Front des Fahrzeugs befestigt, zur Erkennung und Lokalisierung relevanter vorauskommender Objekte. Mittels Radiowellen zwischen 76 ... 77 GHz mit einer Wellenlänge von 4 mm kann der Radarsensor Objekte in bis zu ca. 200 m Entfernung erkennen. Dabei muss das System das vorausfahrende Fahrzeug in Kombination mit der eigenen Fahrzeugbewegung präzise ermitteln. Hierfür bedient sich das ACC-System der Messdaten der Radarsensoren, als auch derer des ESPs. Die Schwierigkeit besteht darin, das richtige Zielfahrzeug zu lokalisieren. Wichtig ist dabei, dass das System erkennt, auf welcher Spur sich das Zielfahrzeug befindet. Erschwert wird die Erkennung von Fahrzeugen durch die geringe seitliche Auflösung ($\pm 8^\circ$) in Kurven. Aus den Messdaten werden Abstand, Relativgeschwindigkeit und Winkellage errechnet [20].

4.1.4 Unsicherheiten

Während der Detektion von Objekten bzw. Hindernissen kann es in realen Verkehrssituationen immer wieder zu Messunsicherheiten, auch Rauschen genannt, kommen. Beim Suchen des Radarsensors nach Objekten ist es möglich, dass dieselben Objekte ein unterschiedlich starkes Signal reflektieren, sodass es schwierig sein kann, das Objekt als dasselbe zu erkennen bzw. andere mit diesen Signalen nicht zu verwechseln. Eine weitere Unsicherheit ergibt sich durch die Zeit-Differenz, die sich durch das Senden und erneute Empfangen des Signals ergibt. Durch die große Reichweite von 200 m kann es auf die Distanz zur Veränderung des Signals kommen. Zu den Faktoren, die eine Veränderung des Signals hervorrufen, zählen das Wetter, Interferenzen mit anderen Signalen oder auch Teilchen, die sich in der Luft befinden. Daher ist es wichtig, dass das ACC-System unempfindlich gegenüber dem Rauschen ist, damit zu jeder Zeit ein sicherer Betrieb ermöglicht wird [20].

4.2 Sicherheitsstandards

ISO-Normen werden international durch die Internationale Organisation für Normung erarbeitet. Sie geben Richtlinien und Merkmale vor, die die weltweiten aktuellen Ergebnisse und den Stand der Wissenschaft und Technik widerspiegeln, damit alle Unternehmen auf derselben Basis arbeiten können. Somit werden die Zusammenarbeit und der Warenaustausch vereinfacht.

4.2.1 ISO Standard

Die Standards der Funktion des ACC (Automatic Cruise Controls) werden durch die ISO-Normen ISO 15622 und die ISO 22179 festgelegt. Ziel ist es, durch einheitliche Richtlinien und Merkmale für die ACC-Funktion festzulegen, die dem aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft entsprechen [19]. Die ISO 15622 definiert die sogenannte Standard-ACC-Funktion, wobei die ISO 22179 die ACC-Funktion um die Funktionalität für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich (FSR-ACC) ergänzt [18].

4.2.2 Richtlinien und Merkmale der ISO 15622

Die ISO-Norm 15622 trägt die Bezeichnung "Intelligent transport systems – Adaptive Cruise Control systems – Performance requirements and test procedures", wurde im Jahr 2010 veröffentlicht und enthält die Richtlinien für die Leistungs- und Prüfverfahrensanforderungen an das ACC-System. Es gibt vier Typen von ACC Systemen, die sich je nach Funktionsumfang voneinander unterscheiden. Hierbei wird zwischen zwei Merkmalen unterschieden: Die Erforderlichkeit einer manuellen Kupplungsbetätigung und der aktiven Bremsunterstützung.

	Erfoderlichkeit einer manuellen	Aktiver Bremsassistent
	Kupplungbetätigung	
1a	ja	nein
1b	nein	nein
2a	ja	ja
2b	nein	ja

Tabelle 4.1: Verschiedene Typen von ACC Systemen.

Des Weiteren ist es zwingend notwendig, dass das ACC System in der Lage ist, die Geschwindigkeit in den folgenden Situationen kontrollieren zu können:

- Freie Fahrt
- Folgefahrt
- Annäherung an langsamere oder stehende Fahrzeuge
- Das Fahrzeug zum Stehen zu bringen und aus dem Stand wieder loszufahren (gilt nur für FSR-ACC)

Freie Fahrt bedeutet, dass das Fahrzeug die Wunschgeschwindigkeit hält, ohne dass es ein vorausfahrendes Fahrzeug zur Orientierung gibt. Gibt es eines, so muss es dazu fähig sein, diesem zu folgen, während es stets den Sicherheitsabstand einhält. Die Annäherung an langsame oder stehende Fahrzeuge meint, dass das Fahrzeug beherrscht, die Geschwindigkeit zu kontrollieren, während es sich einem langsameren oder stehenden Fahrzeug annähert. Dabei muss es jederzeit den Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhalten und bei wiederkehrender Möglichkeit zu der definierten Wunschgeschwindigkeit zurückzukehren [12].

Bei der Einhaltung des Mindestabstandes während der Fahrt zum vorausfahrenden Fahrzeug wird statt der räumlichen die zeitliche Beziehung verwendet [18]. Daher wird der Mindestabstand über die Fahrgeschwindigkeit in [m/s] und die Zeit [s] definiert und als lichter Zeitabstand bezeichnet. Dabei wird der kleinste lichte Zeitabstand mit $\tau_{min} \ge 0, 8 \ s$ definiert. Wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit dem kleinsten lichten Zeitabstand, wie in Gleichung (4.1) dargestellt, multipliziert, so erhält man den Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Der lichte Zeitabstand kann nach Wunsch, auch größer definiert werden, damit sich der Mindestabstand vergrößert. Hierbei sollten dem Fahrer Zeitabstände von 0,8 s - 2,2 s zur Auswahl stehen, wobei der Fahrer zusätzlich die Wahl haben sollte ein Zeitabstand von 1,5 s und 2,2 s auswählen zu können [19].

$$d_{min} = \tau_{min} \cdot v \tag{4.1}$$

Die Norm beschreibt ebenfalls die Beschleunigung von Fahrzeugen, die während der Fahrt maximal erreicht werden sollten. Dabei wird zwischen einer Momentbeschleunigung und einer zeitlich längeren Beschleunigung unterschieden. Erstere ist für einen Zeitraum von 2 Sekunden auf $a = 3,5 \text{ m/s}^2$ begrenzt. Anschließend sollte der Beschleunigungswert $a \le 2,0 \text{ m/s}^2$ nicht überschritten werden.

Die Funktionsgrenzen der ACC-Funktion, die in der ISO 15622 definiert werden, beschreiben, dass die ACC-Funktion nur bis zu einer Geschwindigkeit von 7 m/s bzw. 30 km/h agieren kann. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten wird die Kontrolle über das Fahrzeug wieder an den Fahrer übergeben. Für Geschwindigkeiten, die darunter liegen werden die Richtlinien in der ISO 22179 beschrieben. Diese definiert, dass die FSR-ACC-Funktion den gesamten Geschwindigkeitsumfang ab 0 km/h beherrscht und das Fahrzeug ohne äußere Hilfe in einen sicheren Haltezustand versetzen kann [18].

4.3 Modellklassen

Um die Abstand- und Geschwindigkeitsregelung (ACC und FSR-ACC) zu realisieren, wird zusätzlich zu der Hardware (Sensoren) auch eine Software benötigt, die diese Daten interpretiert und auswertet, um anschließend das Verhalten des Fahrzeugs zu steuern. Hauptbestandteile dieser Software sind Fahrzeugfolgemodelle. Diese gehören zu den relevanten mikroskopischen Verkehrsmodellen und enthalten die wesentlichen Elemente der mikroskopischen Verkehrsmodellierung. Je nach Einfluss des Fahrers auf die Aktionsmöglichkeiten wird zwischen dem Modell der Längsdynamik (Longitudinalmodelle) und dem Modell der Querdynamik (Spurwechselmodelle) unterschieden. Die Longitudinalmodelle dienen zur Modellierung von Beschleunigungs- und Bremsmanövern, wohingegen die Spurwechselmodelle Lenkmanöver unter Umständen in Kombination mit einem Beschleunigungsmanöver realisieren [12].

Für die Regelung der Längsdynamik wurden mit der Zeit verschiedenste Fahrzeugmodelle entwickelt, unter anderem das in dieser Arbeit behandelte Adaptive Time Gap Modell. Um die unterschiedlichen Fahrzeugmodelle besser differenzieren zu können, lassen diese sich in die drei folgenden Gruppen einteilen [3]:

- Geschwindigkeits-basierte Modelle
- Abstands-basierte Modelle
- Abstands- und Geschwindigkeits-basierte Modelle

Das Abstand- und Geschwindigkeitsmodell bezieht sowohl die Geschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs, als auch den räumlichen Abstand mit ein. Dadurch ist der Abstand proportional zur Geschwindigkeit. Hinzu kommt, dass diese Modelle durch das Halten einer Reaktionszeit ein realistisches Verhalten aufweisen und dazu in der Lage sind Stop-and-Go-Wellen kollisionsfrei zu bewältigen [3].

4.4 Adaptive-Time-Gap-Modell

Das in dieser Arbeit behandelte Adaptive-Time-Gap-Modell ist ein Longitudinalmodell, das den vollen Geschwindigkeitsumfang der FSR-ACC umfasst und zu den Abstand- und Geschwindigkeitsbasierten Modellen gehört. In Abb. 5.1 werden die Parameter dargestellt, derer sich dieses Modell bedient. 4 Abstand und Geschwindigkeitsregelung



Abbildung 4.1: Elemente eines Longitudinalmodells [3].

Zu seinen Stärken gehört, dass es die Geschwindigkeit des Fahrzeugs adaptiv zu der des Vorausfahrenden regelt. Dabei bezieht und passt es den lichten Zeitabstand, unter Berücksichtigung des definierten Sollzeitabstandes ein bzw. an. Um dies zu bewerkstelligen, wird mittels der Fahrzeugpositionen x_i und x_{i+1} sowohl die Geschwindigkeit \dot{x} , als auch die Beschleunigung \ddot{x} ermittelt. Wird die Fahrzeuglänge hinzugezogen, kann damit sowohl der räumliche Abstand d_i , als auch der zeitliche Abstand T bestimmt werden. Auf Grund dessen, dass das ATG-Modell die Geschwindigkeit \dot{x} und die Beschleunigung \ddot{x} berücksichtigt, wird bei diesem von einem Modell zweiter Ordnung gesprochen.

Das ATG-Modell berechnet den lichten Zeitabstand $T_i(t)$ mittels des Zeitabstands $T_i(t)$, des Sollzeitabstands T_s und der Anpassungszeit T^r unter der Verwendung der Konstanter-Zeitabstand-Strategie. In Gleichung (4.2) wird die Ableitung des lichten Zeitabstandes berechnet. Diese bildet sich aus dem Kehrwert der Anpassungszeit, multipliziert mit der Differenz des Sollzeitabstands und dem zu Zeitpunkt t vorhandenen lichten Zeitabstand $T_i(t)$. Die Ableitung des lichten Zeitabstands $\dot{T}_i(t)$ dient dazu im Falle einer Abweichung so verändert zu werden, dass sie der vorhandenen Abweichung entspricht.

$$\dot{T}_{i}(t) = \frac{1}{T^{r}} [T_{s} - T_{i}(t)]$$
(4.2)

Der dazu benötigte lichte Zeitabstand $T_i(t)$ berechnet sich aus der Division der Differenz der Positionen des vorausfahrenden und des nachfahrenden Fahrzeugs x_i und x_{i+1} , der Länge der Fahrzeuge und der Geschwindigkeit $\dot{x}_i(t)$ des nachfahrenden Fahrzeugs (siehe Gl. (4.3)).

$$T_{i}(t) = \frac{x_{i+1}(t) - x_{i}(t) - \ell}{\dot{x}_{i}(t)}$$
(4.3)

4 Abstand und Geschwindigkeitsregelung

Um die Differentialgleichung der Beschleunigung \ddot{x} zu erhalten, wird der lichte Zeitabstand $T_i(t)$ wie folgt abgeleitet:

$$\dot{T}_{i}(t) = \frac{(\dot{x}_{i}(t) - \dot{x}(t))\dot{x}(t) - \ddot{x}(t)(x_{i}(t) - x(t) - \ell)}{(\dot{x}_{i}(t))^{2}}$$
(4.4)

Die Ableitung des lichten Zeitabstands aus Gleichung (4.2) setzt den Bezug zum Zeitabstand T, dem Soll-Zeitabstand T_s und der Anpassungszeit T^r . Die Ableitung des lichten Zeitabstands aus Gleichung (4.2) hingegen bezieht Geschwindigkeit, Position und Beschleunigung der Fahrzeuge ein. Werden diese nun miteinander gleichgesetzt (siehe Gleichung (4.5)) und anschließend umgeformt, ergibt sich die Differentialgleichung der Beschleunigung \ddot{x} (siehe Gleichung (4.6)).

$$\frac{(\dot{x}_i(t) - \dot{x}(t))\dot{x}(t) - \ddot{x}(t)(x_i(t) - x(t) - \ell)}{(\dot{x}_i(t))^2} = \frac{1}{T^r} [T_s - T_i(t)]$$
(4.5)

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

4.5 Erweiterung des ATG-Modells

4.5.1 Hinzufügen des Rauschens

Um das ATG-Modell weiter zu optimieren und den Einflüssen der Realität weiter anzupassen wird der Funktion des lichten Zeitabstands $T_i(t)$ das bereits in Kapitel 4.5.1 beschriebene Rauschen σ hinzugefügt. Das Rauschen bzw. die Messunsicherheit ist ein Abstand, der zu dem lichten Zeitabstand addiert wird. Begleitet wird das Rauschen von der Variable ξ , die eine normalverteilte Zufallsvariable darstellt.

$$T_{i}(t) = \frac{x_{i+1}(t) - x_{i}(t) - \ell + \sigma\xi}{\dot{x}_{i}(t)}$$
(4.7)

Die Variable σ kann individuell angepasst werden. Dabei gilt: Je höher der Wert des Rauschens, desto größer die Abweichung zum realen Zeitabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.

Die Größe der Zufallsvariable σ ist von dem gewählten σ abhängig. Je kleiner der Wert ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese einen großen Wert annimmt. Im Umkehrschluss ist es umso wahrscheinlicher, dass auch große Werte für ξ angenommen werden, je größer der Wert für σ definiert wird. Somit ist unter allen Bedienungen theoretisch jeder Wert möglich, jedoch unterscheidet sich die Wahrscheinlichkeit für diese in Abhängigkeit von σ .

Angemerkt sei überdies, dass das Rauschen sowohl positive, als auch negative Werte annehmen kann.

4.5.2 Beschränkung des Zeitabstands (Time gaps)

Zusätzlich zu dem Rauschen wurde dem ATG-Modell, um den Sollzeitabstand für gewisse Szenarien flexibler zu machen, eine untere Beschränkung T_{min} des Zeitabstands T hinzugefügt, sodass sich eine neue Gleichung (4.8) für den Zeitabstand $\widetilde{T}_i(t)$ ergibt.

$$\widetilde{T}_{i}(t) = max \left\{ T_{min}, \frac{x_{i}(t) - x(t) - \ell + \sigma\xi}{\dot{x}(t)} \right\}$$
(4.8)

Die Beschränkung des Zeitabstands unterliegt, um eine homogene Lösung und ein realistisches Verhalten zu erhalten, der Bedingung, dass $T_{min} < T_s$ ist. Wie bereits in Kapitel 4.2.2 erläutert, darf der Zeitabstand laut der ISO 15622 einen Wert zwischen 0,8 ... 2,0 s annehmen. Somit gilt immer $\{0, 8 \leq T_{min} \leq 2, 0\}$. Wird ein Wert für T_{min} definiert, ermöglicht es dem ATG-Modell, abhängig von der Situation, flexibel einen Zeitabstand innerhalb dieses und des Sollzeitabstands T_s zu wählen. Dies kann sich bei Szenarien wie beispielsweise Stop-and-Go-Wellen als hilfreich erwiesen, um diese ggf. schneller aufzulösen.

Wird $T_i(t)$ nun in der Gleichung (4.9) durch $\tilde{T}_i(t)$ ersetzt und anschließend eingesetzt, ergeben sich die folgenden Gleichungen:

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

$$\ddot{x}_{i}(t) = \frac{\dot{x}_{i}(t)}{T^{r}} \left[1 - \frac{T_{s}}{\max\left\{T_{min}, \frac{x_{i}(t) - x(t) - \ell + \sigma\xi}{\dot{x}(t)}\right\}} \right] + \frac{1}{\max\left\{T_{min}, \frac{x_{i}(t) - x(t) - \ell + \sigma\xi}{\dot{x}(t)}\right\}} \left[\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_{i}(t)\right]$$
(4.10)

4.6 Stabilität des Modells

Jedes technische Gerät besitzt eine Reaktionszeit, um sich neuen Bedingungen anzupassen. Bei Fahrzeugfolgemodellen spielt dieser Aspekt eine wichtige Rolle. Auf Grund dieser Verzögerung entfaltet sich die Wirkung einer Störung von ihrem Ursprung aus zeitversetzt. Diese Zeit ist abhängig vom System, da jedes seine eigene Reaktionszeit besitzt. Fahrzeugmodelle sollen stabil verlaufen, werden jedoch auf Grund äußerer Einflüsse bzw. Störungen beeinflusst. Der dynamische Prozess der Anpassung bzw. Regelung muss stabil sein. Um ein Modell auf seine Fähigkeit der Anpassung durch Instabilitäten hin zu prüfen, müssen dynamische Analysen durchgeführt werden. Im störungsfreien Betrieb befindet sich ein System in einem stationären Zustand, der auch als

Ruhelage bezeichnet wird. Die Abb. 4.2 stellt die unterschiedlichen Stabilitätssituationen eines solchen Systems dar [21].



Abbildung 4.2: Stabilitätslagen eines Systems [21].

Im Allgemeinen wird zwischen stabilen und instabilen System gesprochen. Ein stabiles System bzw. Modell zeichnet sich aus, indem es sich nach Störungen bzw. Auslenkungen zurück in die Ruhelage versetzt. Zur Verbildlichung dessen werden in Abb. 4.2 die stabilen Systeme als Kugeln, die sich in den Tälern befinden, dargestellt. Werden diese angestoßen so kehren sie stets in die stabile Ruhelage zurück. Instabile Systeme hingegen verhalten sich gegenteilig zu den stabilen Systemen. Diese werden als Kugeln, die sich auf den Bergspitzen befinden, dargestellt. Werden diese ausgelenkt, so schaffen sie es nicht sich in eine stabile Ruhelage zurückzuversetzen [21]. In der Thematik der Fahrzeugmodelle wird zwischen lokaler und globaler Stabilität differenziert. Instabile Modelle neigen häufig zu Schwingungen, die eine Störung der homognen Lösung zur Folge haben [3]. In der Realität bilden diese sich bspw. als Stop-and-Go-Wellen ab [12].

4.6.1 Lokale Stabilität

Bei einem lokal stabilen Modell folgen ein bis wenige Fahrzeuge in einem homogenen Verkehrsfluss einem vorausfahrendem Fahrzeug mit vorgeschriebener Geschwindigkeit. Kommt es durch Störungen zu Abstands- und Geschwindigkeitsschwankungen, die sich auf Grund der Reaktionszeit der einzelnen Fahrzeuge verzögert aufschaukeln, wird dieses Phänomen als lokale Instabilität bezeichnet. Kommt es jedoch zu keinen Oszillationen, ist das Modell lokal stabil [12]. Ein solches Fahrzeugfolgemodell ist das von Louis A. Pipes, dass zwar auf lokaler Ebene stabil, jedoch auf globaler instabil ist. Häufig hängt die Leistungsfähigkeit solcher Modelle von den Anfangsbedingungen ab [3].

4.6.2 Globale Stabilität

Im Vergleich zur lokalen Stabilität, in der nur ein oder wenige Fahrzeuge einem vorausfahrenden Fahrzeug folgen, wird unter globaler Stabilität eine Fahrzeugkolonne definiert, die in einer endlosen Bahn oder einem Kreis zirkuliert [3]. Dabei gilt die Fahrzeugkolonne als stabil, wenn diese sich auch bei einer beliebig langen Kolonne, durch den Einfluss von Störungen nicht aufschaukelt und stets in ihre Ruhelage zurückkehrt. Gelingt es dem Modell jedoch nicht sich in die Ruhelage zurückzuversetzen, so gilt dieses als instabil. Als Kolonneninstabilität wird bspw. ein Verkehrsfluss bezeichnet, der sich dauerhaft in einem Stop-and-Go-Fluss fortbewegt und es nicht schafft in einen homognen Verkehrsfluss überzugehen [12].

Der große Unterschied zwischen lokaler und globaler Stabilität ist der, dass die globale Stabilität deutlich strengeren Regeln folgt. Ein Modell, bei dem die Schwingungen bei einer Folgefahrt schnell abklingen oder das vollkommen Schwingungsfrei verläuft, kann trotz dessen einen instabilen Verkehrsfluss haben [12]. Modelle wie das Optimal-Velocity-Modell (OVM) oder Full-Velocity-Diffrence-Modell (FVDM) sind nur unter beschränkten Stabilitätsbeschränkungen sowohl lokal, als auch global stabil. Das Adaptive-Time-Gap-Modell hingegen ist für beide Fälle beschränkungsfrei stabil [3].

5 Dynamische Sicherheitsanalyse

5.1 Ermittlung der Grenzen für T_{min}

Technische Systeme und damit auch Fahrzeugfolgemodelle können wie bereits beschrieben (siehe Kapitel 4.6) sowohl lokal, als auch global stabil sein. Beide dieser Aspekte treffen auf das ATG-Modell ohne Erweiterungen beschränkungsfrei zu. Um das ATG-Modell den realistischen Bedingungen etwas näher zu bringen, wurde diesem ein zufälliges Rauschen hinzugefügt, dass Messstörungen, die während des Verkehrsflusses auftreten können, simulieren soll. Um das ATG-Modell dem Rauschen gegenüber unempfindlich zu machen, wurde diesem zusätzlich der Parameter für die untere Grenzer des lichten Zeitabstandes T_{min} hinzugefügt. T_{min} dient dazu, dass das ATG-Modell flexibler mit dem lichten Zeitabstand umgehen kann, um sich so bei einfallenden Messunsicherheiten besser anpassen zu können, damit der Sicherheitsabstand stets eingehalten werden kann.

Durch die Veränderungen des Modells kann es möglich sein, dass die ständige Stabilität nicht mehr für alle T_{min} -Werte gewährleistet wird. Für die globale Stabilität wird ein dynamisches System vorausgesetzt. Da in der Realität die Bedeutung der globalen Stabilität überwiegt, muss für die Überprüfung der Stabilität eine dynamische Sicherheitsanalyse durchgeführt werden, die mittels Simulationen durchgeführt wird.

Ziel ist es in Abhängigkeit der Stärke des Rauschens einen Definitionsbereich für Tmin zu ermitteln, um eine Aussage über die Stabilität des Systems zu treffen. Der lichte Zeitabstand T hat laut ISO 15622 einen Definitionsbereich von $\{0, 8 \le T \le 2, 2\}$. Für die dynamische Analyse wird jedoch für T_{min} ein Definitionsbereich von $\{0, 1 \le T_{min} \le 1, 4\}$ festgelegt. Da der lichte Zeitabstand im Vorfeld auf T = 1, 5 festgelegt wurde, muss die obere Grenze auf Grund der Bedingung, dass $T_{min} < T$ sein muss, $T_{min} = 1, 4$ lauten. Die untere Grenze des Definitionsbereichs wurde trotz des in der ISO 15622 vorgegebenen Wertes von $T_{min} \ge 0, 8 \ s$ auf $T_{min} \ge 0, 1 \ s$ festgelegt. Grund dafür ist die Annahme, dass sich ein geringerer lichter Zeitabstand, zum Einen bei niedrigen Geschwindigkeiten positiv auf den Verkehrsfluss auswirken könnte. Zum Anderen dazu führen könnte, dass sich Stop-and-Go-Wellen schneller auflösen, ohne dabei die Sicherheit zu zu vernachlässigen. Des Weiteren sind ISO Normen nicht bindend, womit der Definitionsbereich für T somit nur einen Richtwert vorgibt.

Um das Verhalten des erweiterten Modells nun auf seine Stabilität hin zu prüfen, werden mittels NetLogo Simulationen mit durchschnittlichen Parameterkombinationen für σ und T_{min} durchgeführt. Für einen breiten Ergebnisumfang, werden für jeden T_{min} -Wert jeweils 10 Messungen durchgeführt mit den Werten für Sigma $\{0, 1 \le \sigma \le 1, 0\}$ in Abständen von i = 0, 1. Der Wert $\sigma = 0$ wird hierbei absichtlich ausgelassen, da eine Messung mit diesem Wert einer Messung ohne Rauschen gleichen und somit einer Messung des ATG-Modells ohne Erweiterung entsprechen würde. Damit die Ergebnisdarstellung später detailreiche Informationen liefern kann, darf der Wert für den Zeitschritt dt nicht zu klein gewählt werden. Für die folgenden Simulationen wurde dt = 0,05 definiert. Ein zu großer dt-Wert hätte eine zu niedrige Auflösung zur Folge, mit der zu viele Informationen verloren gehen würden, sodass keine eindeutige Aussage über die Stabilität des Modells getroffen werden könnte.

5.2 Einführung in NetLogo

NetLogo ist ein freies und quelloffenes Programm, das von Uri Wilensky entwicht wurde. Es basiert auf einer Multi-Agenten-Programmiersprache und wurde im Jahr 1999 veröffentlicht. Diese findet häufig in den Naturwissenschaften Anwendung, da mit ihr insbesondere emergente Phänomene und dynamische Wechselwirkungen unter kontrollierten Laborbedingungen erforscht und nachgewiesen werden können. NetLogo bietet viel Spielraum bei der Anwendung von Simulationen und ist darauf aus, einerseits einen geringen Schwierigkeitsgrad für Einsteiger zu bieten und andererseits die Anforderungen von fortgeschrittenen Entwicklern zu erfüllen [22].

5.3 Simulation des ATG-Modells mittels NetLogo

Alle durchgeführten Simulationen wurden mit der im März 2019 aktuellen Version von NetLogo (Version 6.0.4.) durchgeführt. Die Simulation selbst basiert auf dem Programmcode von Dr. Antoine Tordeux und beinhaltet das von Ihm entwickelt ATG-Modell.

In Abb. 5.1 ist die Oberfläche der Simulation im ruhenden Zustand dargestellt. Diese lässt sich in vier Bereiche einteilen. Der Bereich 1 dient rein zum Initialisieren bzw. Starten und Pausieren der Simulation. Die Bereiche 2 für lokale Simulation und Bereich 3 für globale Simulationen sind dazu da, die einzelnen Parameter unabhängig voneinander und aktiv vor und während der Simulation zu definieren und zu verändern. Der 4. Bereich dient zur Darstellung der während der Simulation errechneten Ergebnisse, bezogen auf die unterschiedlichen zu betrachtenden Parameter.

5 Dynamische Sicherheitsanalyse



Abbildung 5.1: Simulationsoberfläche im ruhenden Zustand [Eigene Darstellung].

5.3.1 Bereich zur Initialisierung

Um eine Simulation zu beginnen, muss vorerst entschieden werden, ob eine lokale oder eine globale Simulation durchgeführt werden soll. Mittels des Dropdown-Listenfelds kann zwischen den beiden Optionen gewählt werden. Im ruhenden Zustand der Simulation werden durch das Betätigen der Schaltfläche "Setup" die bereits eingestellten Parameter vollständig auf die Simulation übertragen. Die meisten Parameter können während des Simulationsvorgangs aktiv verändert werden. Jedoch ist es zur genauen Betrachtung eines oder mehrer bestimmter Parameter eines bestimmten Definitionsbereich, für genaue Ergebnisse häufig zielführend die Parameter zum Zeitpunkt t = 0zu definieren. Durch ein anschließendes Betätigen der Schaltfläche "Move" wird die Simulation gestartet. Ein erneutes Betätigen dieser Schaltfläche pausiert die Simulation. Die Simulation kann selbstverständlich durch ein weiteres Betätigen an der zuvor pausierten Stelle fortgesetzt werden. Der Vorgang ist unendlich oft wiederholbar und kann zur längeren Betrachtung eines Zeitpunktes bzw. Ereignisses sehr hilfreich sein.

Der Verlauf einer Simulation wird in Zeitschritten definiert. Dabei wird durch den von NetLogo ausgeführten Programmcode jeweils pro Zeitschritt eine Berechnung durchgeführt. Ein Zeitschritt entspricht hierbei einer Sekunde. Die Größe der Zeitschritte, in denen jeweils eine Berechnung durchgeführt wird, kann mittels des Schiebereglers "dt" variabel verändert werden. Eine Verkleinerung des Zeitschrittes hat demnach nicht eine Beschleunigung der Simulation zur Folge, sondern liefert einen detaillierteren Ergebnisbereich dieser.

5.3.2 Bereich Local

Der Bereich 2 dient zur Simulation des ATG-Modells mit nur zwei Fahrzeugen. Das blau gefärbte stellt das vorausfahrende und das weiß gefärbte das nachfolgende Fahrzeug dar. Während dieses Szenarios kann die Distanz d - ini zwischen dem vorausfahrenden und dem nachfahrenden Fahrzeug zu Beginn der Simulation eingestellt werden und die Geschwindigkeit v - ini des vorausfahrenden, als auch des nachfahrenden Fahrzeugs v1. Um jedoch ein realistisches Szenario und damit die Grenzen des Systems bei hohen Fahrzeugdichten, sowie die dadurch steigende Komplexität nachbilden zu können, bedarf es einer höheren Anzahl Fahrzeuge und damit einhergehend einer Vielzahl an Parametern, die zu berücksichtigen und zu betrachten sind. Hierbei ist zu erwähnen, dass die sich in Bereich 3 befindlichen Parameter keinen Einfluss auf eine lokale Simulation haben.

5.3.3 Bereich Global

Der dritte Bereich unterscheidet sich in seinem Umfang in großen Teilen zu dem zweiten, der lediglich für die Berechnung einer lokalen Simulation dient. Die globale Simulation ermöglicht es mehr Fahrzeuge einzubeziehen und damit höhere Fahrzeugdichten zu erzeugen. Des Weiteren werden mehr variable Parameter mit einbezogen, die dabei helfen, tiefer ins Detail und Problemen besser auf den Grund gehen zu können. Diese spielen in einem realen Verkehrsfluss eine tragende Rolle, weshalb das Verhalten der Fahrzeuge und die Folgen deren Handelns mit der Betrachtung bestimmter Parameter analysiert werden können. So lässt sich das ATG-Modell weiter optimieren und die möglichen Grenzen dessen besser erforschen, damit ein sicheres und optimales Fahrverhalten in allen Situationen stets gewährleistet wird.

5.3.4 Definition der Parameter

Für die Durchführung der Simulationen werden die im Folgenden beschriebenen Parameter aus dem Bereich 3 verwendet.

Initial-Position:	Mittels der Schaltfläche "Initial Position", wird die Anordnung der Fahrzeu-
	ge auf der Achse der Fahrbahn zu Beginn der Simulation festgelegt. Hierbei
	kann innerhalb der Dropdown-Listenfeldes zwischen vier verschiednen Va-
	rianten gewählt werden.
	- Uniform
	Derturbed
	• Terturbed
	• Random
	Mit dem Punkt "Uniform" ordnen sich die Fahrzeuge alle mit dem selben
	Abstand zueinander an. Perturbedërzeugt die Verschiebung eines einzelnen
	zufällig gewählten Fahrzeugs um einen im Programmcode definierten Wert
	zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die Auswahl "Jam" simuliert deuten lässt,
	einen Stau. Dabei ist das blaue Fahrzeug das letzte der Fahrzeugschlange.
	Mit der Auswahl "Random" werden alle Fahrzeuge zufällig auf der x-Achse
	verteilt. Dabei kann es sein, dass sich Fahrzeuge überlagern, was in der Rea-
	lität nicht möglich ist.
nb-vehicles:	"numbers of vehicles" bzw. Anzahl der Fahrzeuge [N]
V0:	Ziel- bzw. Wunschgeschwindigkeit [m/s]
1:	Länge der Fahrzeuge [m]
T:	Wunschzeitabstand [s]
T^r :	Der Parameter T^r [s] legt die Anpassungszeit der Fahrzeuge fest. Das ist
	die Zeit, die ein Fahrzeug benötigt, um auf die Aktion des vorausfahrenden
	Fahrzeugs zu reagieren bzw. sich anzupassen.
Sigma:	Mit Sigma (σ) [m] wird das Rauschen bzw. werden die Messunsicherheiten,
	die während des Fahrens auftreten können, simuliert.
T_{min} :	Untere Begrenzung des Zeitabstandes [s]

Tabelle 5.1: Definition der Parameter der Simulation

5.3.5 Darstellungsbereich

Der Darstellungsbereich befindet sich in dem mit der 4 gekennzeichneten Bereich in Abb. 5.1. Der Verlauf des Fahrverhaltens der Fahrzeuge während der Simulation wird in dem schwarzen Balken dargestellt. Entlang diesem bewegen sich die Fahrzeuge, wobei sie sich immer vorwärts bewegen, von links nach rechts. Diese Fahrbahn stellt eine auf linearer Ebene kreisförmige Strecke dar, sodass Fahrzeuge, die rechts augenscheinlich die Fahrbahn verlassen, auf der linken Seite der Fahrbahn wieder auftauchen. Werden diese während der Simulation veränderlichen Parameter geändert, so lässt sich basierend auf diesen, ein guter Eindruck des Fahrverhaltens der Fahrzeuge machen.

Die während der Simulation berechneten Werte spiegeln sich nicht nur anhand des Verhaltens der verbildlichten Fahrzeuge auf der Fahrbahn wider, sondern auch durch die Darstellung der Verläufe einiger bestimmter Parameter. Daher werden die errechneten Daten in Diagrammen dargestellt. In dem Diagramm "Trajectories" wird der Abstand zwischen den Fahrzeugen in Abhängigkeit der Zeit in [s] dargestellt. Anhand dieser Darstellung lässt sich der sich verändernde Abstand eines Fahrzeugs zum nächsten abbilden. Für jedes Fahrzeug wird dementsprechend jeweils eine Funktion dargestellt.

Die vier weiteren Diagramme bilden die Parameter der Beschleunigung $[m/s^2]$ ("Acceleration rate"), der Geschwindigkeit [m/s] ("Speed"), des Zeitabstands [s] ("Time gap") und des Längenabstands [m] ("Space") in Abhängigkeit der Zeit [s] ab.

5.3.6 Datenerfassung

Um die während der Simulation berechneten Daten über die in NetLogo dargestellten Diagramme hinaus erfassen und diese im weiteren Schritt auswerten zu können, ist es nötig im Programmcode die Funktion zum Exportieren der Daten zu definieren. Hierzu bietet NetLogo die Möglichkeit der Implementierung des Befehls "export-plot" an, um die Messdaten während oder nach ihres Erfassungszeitraums zu exportieren. Dafür muss der Befehl für jeden einzelnen Graphen definiert werden, ebenso wie der Dateipfad, an dem die Datei abgespeichert werden soll, sowie ihr Name. Daraus resultiert, dass für jeden Graphen eine separate Datei erstellt wird. Die Datei strukturiert sich so, dass in den ersten Zeilen die für die Simulation definierten Parameter abgebildet und anschließend die ermittelten Werte für jeden einzelnen Zeitschritt wiedergegeben werden.

NetLogo beherrscht das Erstellen von Text- (.txt) und CSV-Dateien. Auf Grund der besseren Kompatibilität von CSV-Dateien mit großen Datenmengen wird dieses als das geeignetere Datenformat verwendet. CSV steht für "comma-sperated-values", was übersetzt bedeutet, dass alle sich in einer Zeile befindlichen Werte, durch Kommata getrennt, in Reihe ausgegeben werden. Ein Nachteil ist, dass die einzelnen Werte zur Auswertung voneinander getrennt und in separate Zellen verwiesen werden müssen. Mit dem Textkonvertierungs-Assistenten von Microsoft Excel lässt sich das mit genau dem gewünschten Ergebnis umsetzen und im nächsten Schritt als Excel-Datei (.xlsx) für die anschließende Auswertung abspeichern.

5.4 Ablaufschritte der Simulation

Die Durchführung einer Simulation lässt sich in die folgenden drei Schritte unterteilen:

- 1 Festlegen der Parameter
- 2 Durchführen der Simulation
- 3 Auswertung der Daten

5.4.1 Festlegen der Parameter

Die Durchführung einer Simulation beginnt am Anfang mit dem Festlegen der Parameter. Denn um das betrachtete Problem behandeln zu können, müssen zu allererst Standardbedingungen festgelegt werden, um die durch die Simulation ermittelten Werte vergleichbar zu machen.

Um realistische Bedienungen zu erzeugen, damit die Ergebnisse später im Feld angewandt werden können, ist es notwenig alle relevanten Parameter einzubeziehen. In dieser verwendeten Simulation gelingt dies mit der Konfiguration einer globalen Simulation.

Im weiteren Schritt werden die nun durch die globale Konfiguration freigeschalteten Parameter, wie in Abb. 5.2 dargestellt, festgelegt. In dieser sind alle Parameter, die für eine global konfigurierte Simulation relevant sind, bereits mit ihren definierten Werten abgebildet.



Abbildung 5.2: Konfiguration der Parameter der Simulationen [Eigene Darstellung].

Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge wird mit einer Geschwindigkeit von 20 m/s (72 km/h) angenommen [3]. Es wird auf Grund stetig wachsender Fahrzeuglängen und zur besseren Veranschaulichung die Annahme einer PKW-Länge von 5 m getroffen [3]. Das Fahrzeugsystem muss laut ISO 15622:2010 in der Lage sein, einen lichten Zeitabstand zwischen 0,8 - 2,0 s einhalten zu können. Auf Basis dessen wird der Zeitabstand *T* auf 1,5 s definiert (ISO15622). Die Anpassungszeit ergibt sich aus dem Kehrwert des Lamda-Wertes. Der Lamda-Wert von 0,2 und die sich daraus ergebende Anpassungszeit von 5 s ergibt sich aus statistischen Schätzungen und gibt die ungefähre Anpassungszeit eines Menschen wieder [23]. Die Anpassungszeit autonomer Fahrzeuge ist verglichen zu der des Menschen deutlich geringer und liegt bei ca. einer Sekunde.

Diese vier Parameter sind für die Simulationsreihe mit diesen Werten festgelegt und werden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, nicht verändert. Die Parameter für σ und T_{min} werden im Verlauf sukzessiv verändert.

Es gilt zu beachten, dass die Parameter nicht jeden erdenklichen Wert annehmen können. T_{min} darf auf Grund der mathematischen Gegebenheiten des ATG-Modells nicht gleich 0 sein, da es ansonsten zu fehlerhaften Ergebnissen kommt. Ebenfalls ist es T_{min} nicht möglich, einen Wert größer oder gleich dem Zeitabstand anzunehmen.

Als Anfangszustand wird der gestaute Zustand "Jam" in der Simulation ausgewählt.

5.4.2 Durchführung der Simulation

Der gesamte Prozess der Untersuchung wird mit zwei unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Das erste Szenario wird mit einer hohen und das zweite mit einer niedrigeren Fahrzeugdichte durchlaufen. Die Fahrzeugdichte ergibt sich aus der Länge der Fahrbahn und der Anzahl der Fahrzeuge. Für eine hohe Dichte im ersten Szenario wird die Anzahl der Fahrzeuge N = 25 festgelegt. Daraus ergibt sich mittels der Gleichung (2.5) eine Fahrzeugdichte von 0,124 Fahrzeugen/m. Zusätzlich wird die definierte Länge der Fahrzeuge miteinbezogen, sodass sich ein Abstand von 3,04 m zwischen den Fahrzeugen ergibt. Für das zweite Szenario wird für das Verhalten der Fahrzeuge bei einer geringeren Dichte eine Anzahl von fünf gleichzeitig fahrenden Fahrzeugen simuliert. Daraus ergibt sich bei derselben Strecken- und Fahrzeuglänge eine Dichte von 0,0249 Fahrzeugen/m und ein Abstand von 35 m zwischen den Fahrzeugen.

Der Bewegungszustand der Fahrzeuge, der beobachtet werden soll, ist der fließende Verkehrszustand. Die Fahrzeuge starten in der Simulation immer aus einer Stausituation heraus, die auch als stationärer Zustand beschrieben werden kann. Zuvor durchgeführte Testläufe haben erwiesen, dass es auf Grund des gestauten Anfangszustands der Simulation in Kombination mit der hohen Fahrzeugdichte zu Stop-and-Go-Wellen kommt. Ist die Simulation gestartet, benötigen die Fahrzeuge eine gewisse Zeit, um den Stop-and-Go-Kreislauf zu durchbrechen und in einen fließenden Verkehrsstrom überzugehen. Bei der Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen den T_{min} -Werten und den Geschwindigkeiten in Bezug auf zufällige Messunsicherheiten σ fällt auf, dass abhängig dieser Parameter der Übergang in einen fließenden Verkehrszustand eine variable Dauer hat. Bei der Analyse soll, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen, dieser Übergangsprozess und damit die Oszillationen nicht in die Datenerfassung einfließen. Zu diesem Zweck wurde ein weiterer Schieberegler implementiert, der in Abb. 5.1 mit dem Titel "Wartezeit" abgebildet wird. Mit diesem kann der Zeitpunkt, an dem der Erfassungszeitraum beginnen soll, festgelegt werden. Auf Grund der zuvor durchgeführten Testläufe wurde dieser Wert für t = 1500 s definiert. Wieviele Zeitschritte bzw. wieviele Werte aufgezeichnet werden sollen, kann über den Schieberegler "Laufzeit" bestimmt werden.

5.4.3 Auswertung der Daten

Die während der Simulation erstellten CSV-Dateien erhalten jeweils stets den Dateinamen, der in dem Befehl zum Exportieren der Ergebnisse definiert wurde. Der Einfachheit halber tragen die Dateien den Namen des Parameters, dessen Verhalten sie in Abhängigkeit zur Zeit beschreiben. Dieser Sachverhalt ist ein Nachteil, da bei der Durchführung von zwei oder mehr Simulationen hintereinander die während zuvor durchgeführter Simulationen erstellten Dateien durch die neuen Dateien, die sich beim Starten einer neuen Simulation automatisch mit dem demselben Dateinamen erstellen, überschrieben werden. Dies führt dazu, dass nach jedem erfolgreichem Abschluss einer Simulation die Dateien an einem anderem Ordnerpfad abgelegt oder der Dateiname aller verändert werden müssen.

Nach Abschluss aller erforderlichen Simulationen gilt es diese nun auszuwerten. Für die Auswertung der Daten wird das Microsoft Office 2019 zugehörige Programm Excel 2019 verwendet. Um die großen Datenmengen verwalten zu können, wird das in Excel implizierte Tool Power Query für die Datenverarbeitung verwendet. Dadurch müssen nicht alle Daten manuell in Excel-Tabellen kopiert werden. Über Power Query wird zunächst der Ordnerpfad geöffnet, in dem sich alle für die Auswertung relevanten Daten befinden. Dabei können sich die gewünschten Dateien ebenfalls in Unterordnern befinden, da auch diese von dem Tool Power Query durchsucht werden. Das Programmfeature bietet nun, bevor die Daten in eine Excel-Tabelle geladen werden, die Möglichkeit die Dateien auszufiltern.

Eine Messreihe besteht aus zehn Simulationen, die sich alle auf denselben T_{min} Wert beziehen. Der Unterschied besteht in dem sich verändernden σ -Wert. Der Parameter σ umfasst den Wertebereich $\{0, 1 \le \sigma \le 1, 0\}$ in Abständen von 0,1.

Damit die Dateien im nächsten Schritt durch Power Query geladen, zusammengeführt und in eine Excel-Tabelle kopiert werden können, muss jede Datei denselben Aufbau haben bzw. dieselben Spaltenüberschriften besitzen. NetLogo speichert in den ersten Zeilen der CSV-Datei die für die Simulation verwendeten Parameter. Der Aufbau hierbei ist zwar immer identisch, jedoch enthält jede Messung einen anderen σ -Wert, sodass die ersten Zeilen nicht vollständig identisch sind. Um dies zu ändern, werden zuvor in allen Dateien alle Zeilen bis zu den Messwerten entfernt, sodass der Bereich bis zu diesen identisch ist.

Nun können die Messwerte in der Voransicht betrachtet werden. NetLogo speichert über die für diese Auswertung relevanten Messwerte hinaus auch noch weitere Daten. Somit können auch Spalten mit den nicht relevanten Daten in der Voransicht entfernt werden, mit dem Ergebnis, dass am Ende nur noch die relevanten Daten in die Excel-Tabelle kopiert werden.

Der große Vorteil an diesem Verfahren ist, dass die für die erste Messreihe gesetzten Filter für die darauf folgenden Messreihen übernommen werden können, was die Auswertung deutlich beschleunigt. Sollten des Weiteren möglicherweise Fehler in den Messwerten einer Simulation vorliegen, kann diese wiederholt werden und die alte Datei ersetzen. Anschließend müssen die Daten erneut über Power Query in die Excel-Tabelle geladen werden und die alten Werte werden automatisch durch die Neuen ersetzt.

5.5 Darstellung der Ergebnisse

Die Abb. 5.3 stellt den Mittelwert jeder Messreihe der jeweils 500 Messwerte für alle T_{min} -Werte in Abhängigkeit von σ dar. Für jeden T_{min} -Wert wird der mittlere Geschwindigkeitsverlauf von $\{0, 1 \leq \sigma \leq 1, 0\}$ abgebildet. Es ist deutlich zu sehen, dass bei $\sigma < 0, 3$ das Rauschen, unabhängig vom T_{min} -Wert, nur einen sehr geringen Einfluss auf die als gestrichelte schwarze Linie dargestellte maximale Geschwindigkeit hat. Ab $\sigma > 0, 3$ ändert sich dies. Die T_{min} -Kurven fangen an unterschiedliche Geschwindigkeitsverläufe anzunehmen. Zu erkennen ist, dass sich die Verläufe von $\{0, 1 < T_{min} < 0, 9\}$ mit steigendem Sigma-Wert zunehmend negativ auf die Sollgeschwindigkeit auswirken. $T_{min} = 1, 1$ behält über den gesamten Verlauf als einziges eine konstante Geschwindigkeit bei. Die Parameter $T_{min} = 1, 3$ und $T_{min} = 1, 4$ weisen im Gegensatz zu den anderen Werten eine positiv verlaufende Entwicklung auf und schaffen es, trotz die durch den lichten Zeitabstand beschränkte Geschwindigkeit v = 2,0267 m/s, eine etwas höhere Geschwindigkeit anzunehmen.



Abbildung 5.3: Mittlere Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 500 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].

Im Zusammenhang mit dieser Simulationsreihe, bildet Abb. 5.4 die Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit der Kurven aus Abb. 5.3 ab. Diese fällt bis $\sigma = 0, 6$ sehr gering aus und nimmt für alle mit steigendem Rauschen weiter zu. Der Verlauf für $T_{min} = 0, 1$ fällt hierbei am deutlichsten aus. Dieser nimmt bis $\sigma = 0, 9$ verhältnismäßig stark zu und flacht anschließend wieder leicht ab. Auf Grund der großen Abweichung des Parameters $T_{min} = 0, 1$ kann der Verlauf der anderen T_{min} -Parameter in dieser Darstellung nur schwer erfasst werden. Für eine bessere Darstellung wurden die Werte für $T_{min} = 0, 1$ entfernt, um so eine verbesserte Skalierung zu erzeugen, siehe Abb. 5.5. Anhand dieser Abbildung ist zu erkennen, dass es dennoch deutliche Unterschiede zwischen den Verläufen der einzelnen Parameter gibt. Je größer der Parameter für T_{min} ist, desto geringer ist die Abweichung der Geschwindigkeit.



Abbildung 5.4: Standardabweichung der mittl. Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 500 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].



Abbildung 5.5: Standardabweichung der mittl. Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} unter Ausschluss der Werte für $T_{min} = 0, 1$, bei einer Anzahl von 500 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].

Die Simulation wird unter denselben Bedingungen ein weiteres Mal durchgeführt, mit dem Unterschied, dass sie dieses Mal mit 10.000 Zeitschritten durchgeführt wird. Die Ergebnisse des Geschwindigkeitsverhaltens der Fahrzeuge werden in Abb. 5.6 veranschaulicht. Die Ergebnisse spiegeln die Ergebnisse ähnlich wie in Abb. 5.3 wider und unterscheiden sich nur minimal von ihnen. Ein einziger augenfälliger Unterschied ist im Verlauf für $T_{min} = 0, 1$ zu erkennen. Hier nimmt die Geschwindigkeit erst ab einem Wert von $\sigma = 0, 8$ stärker ab gegenüber der Messung mit nur 500 Zeitschritten.



Abbildung 5.6: Mittlere Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].

Selbiges spiegelt sich in der Standardabweichung der Messwerte in Abb. 5.7 wider. Hier sind auf den ersten Blick ebenfalls abgesehen von dem Parameter $T_{min} = 0, 1$ keine großen Unterscheide zu erkennen. Wie auch in der Darstellung der mittleren Geschwindigkeit ist auch hier erst für $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 8$ mit dem Abfall der Geschwindigkeit ein deutlicher Abfall der Abweichung zu beobachten.

Um auch an dieser Stelle eine verbesserte Skalierung und Darstellung für die Parameter $\{0, 3 \le T_{min} \le 1, 4\}$ zu ermöglichen, werden in Abb. 5.8 die Werte für $T_{min} = 0, 1$ ausgelassen. Im Gegensatz zu den Diagrammen zur Darstellung der Geschwindigkeit, hat hier eine deutliche Glättung der Messwerte der Standardabweichung stattgefunden. Diese weisen nun einen konstanteren Verlauf mit deutlich weniger Schwankungen auf, wodurch sich die Verläufe untereinander nicht mehr schneiden. Wie zuvor nehmen die Abweichungen zur Sollgeschwindigkeit mit einer

5 Dynamische Sicherheitsanalyse

Erhöhung des Rauschens immer weiter zu. Mit dem Unterschied, dass die maximale Abweichung bei allen Werten für $\{0, 3 \le T_{min} \le 1, 4\}$ etwas höher ist.



Abbildung 5.7: Standardabweichung der mittl. Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].



Abbildung 5.8: Standardabweichung der mittlere Geschwindigkeit v für 25 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} unter Ausschluss der Werte für $T_{min} = 0, 1$, bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].

Um das Verhalten der Fahrzeuge bei niedriger Verkehrsdichte als Vergleich zu dem mit hoher Dichte (25 Fahrzeuge) heranzuziehen, wurde unter denselben Bedienungen die Simulationen mit nur fünf Fahrzeugen durchgeführt. Die zu diesem Zweck gemessenen Werte werden in Abb. 5.9 und Abb. 5.10 dargestellt. Abb. 5.9 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf bei zunehmendem Rauschen für vier T_{min} -Werte. Hierfür werden wieder aus einer Menge von 10.000 Zeitschritten pro Datensatz die Mittelwerte errechnet. Der Verlauf der Kurven ist nahezu linear und sinkt, je stärker das Rauschen wird. Sowohl bei geringem Rauschen, als auch bei maximaler Rauschintensität weichen die Werte kaum von der Sollgeschwindigkeit v = 20 m/s ab. Ab dem Wert $\sigma = 0, 5$ zeichnen sich zwischen den einzelnen T_{min} -Werten leichte Unterschiede ab. Dabei fällt wieder auf, dass die Abweichung zur Sollgeschwindigkeit mit sinkenden T_{min} -Wert zunimmt.

Die Standardabweichungen der Messungen werden in Abb. 5.10 dargestellt. Diese verlaufen ebenfalls fast linear. Ebenso wie bei der Abb. 5.9, weisen alle Verläufe der Werte für T_{min} Ähnlichkeiten auf und gehen ab einem Wert von $\sigma = 0, 5$ auseinander.



Abbildung 5.9: Mittlere Geschwindigkeit v für 5 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].



Abbildung 5.10: Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit v für 5 Fahrzeuge, im Verhältnis zum Rauschen σ für die Zeitabstände T_{min} bei einer Anzahl von 10.000 Werten pro Messreihe [Eigene Darstellung].

5.6 Auswertung der Ergebnisse

5.6.1 Bezug der maximalen Geschwindigkeit zur Dichte

Die Abb. 5.11 stellt den aus der Simulation stammenden Graphen des Geschwindigkeitsverlauf von 25 Fahrzeugen (hohe Dichte) für $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 9$ dar. Die Zeit wird hierbei in Sekunden und die Geschwindigkeit in m/s angegeben. Die schwarze mittig liegende und parallel zur x-Achse verlaufende Gerade stellt die Geschwindigkeit dar, die die Fahrzeuge im homogenen Verkehr maximal erreichen können. Für den oben genannten Fall liegt diese bei v = 2,0267 m/s, obwohl die Sollgeschwindigkeit laut den in Kapitel 5.4.1 definierten Parametern bei 20 m/s liegt.

5 Dynamische Sicherheitsanalyse



Abbildung 5.11: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Zeit von 25 Fahrzeugen für die Parameter $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 9$ [Eigene Darstellung].

Die Ursache liegt in der Abhängigkeit des Soll-Zeitabstandes zur Geschwindigkeit des Fahrzeugs und damit der Fahrzeugdichte. Die maximale mittlere Geschwindigkeit v lässt sich wie folgt ermitteln:

$$v = \frac{\frac{L}{N} - \ell}{T}$$
(5.1)

Werden die definierten Werte der Parameter eingesetzt, so ergibt sich folgender Term:

$$v = \frac{\frac{201 m}{25} - 5 m}{1,5 s} \approx 2,0267 \frac{m}{s}$$
(5.2)

Anhand dieser Gleichung wird gezeigt, dass auf Grund der hohen Dichte der Abstand zwischen den Fahrzeugen zu gering ist, um mittels des gewählten lichten Zeitabstandes T = 1,5 s eine höhere Geschwindigkeit zu erreichen, um die Sicherheit weiterhin zu gewährleisten. Anders sieht es, wie in Gleichung (5.3) veranschaulicht, bei einem Szenario mit geringerer Ver-

Anders sieht es, wie in Gleichung (5.3) veranschaulicht, bei einem Szenario mit geringerer Verkehrsdichte aus.

$$v = \frac{\frac{201 m}{5} - 5 m}{1, 5 s} \approx 23,467 \frac{m}{s}$$
(5.3)

Wie zu erkennen ist, kann bei einer Anzahl von fünf Fahrzeugen der lichte Zeitabstand bis zu einer Geschwindigkeit von bis zu 23,467 m/s eingehalten und somit die definierte Wunschgeschwindigkeit von 20 m/s erreicht werden. Daher sind bei geringeren Dichten auch noch weitaus höhere Geschwindigkeiten, unter Einhaltung des Sicherheitsabstandes bzw. des lichten Zeitabstandes, möglich.

5.6.2 Auswirkung der zufälligen Messunsicherheiten

Die Messwerte aus Abb. 5.3 und Abb. 5.6 zeigen einen deutliches Bild für $\{0, 1 \le T_{min} \le 1, 1\}$. Mit zunehmender Größe des Rauschens, nimmt auch die Abweichung zur Sollgeschwindigkeit zu. Dieses Verhalten ist dem Parameter σ geschuldet, der mit größer werdenden Werten eine wachsende Wahrscheinlichkeit für größere zufällige Veränderungen des realen Abstands hervorruft. Ebenfalls ist zu erkennen, dass je kleiner die untere Begrenzung der Zeitlücke T_{min} ist, desto größer die Auswirkungen der Abweichungen der Sollgeschwindigkeiten auf Grund des Rauschens ist. Ein größerer Spielraum des Zeitabstandes wirkt sich für das Modell also schlussfolgernd negativ aus. Besonders auffallend ist die Beobachtung, dass die Begrenzung der unteren Zeitabstände $T_{min} = 1, 3$ und $T_{min} = 1, 4$ zur Folge haben, dass die Geschwindigkeit mit zunehmendem Rauschen ebenfalls zunimmt und größer der Sollgeschwindigkeit ist. Das lässt den Schluss zu, dass sich der Einfluss des Rauschens ab $T_{min} > 1, 1$ nicht mehr negativ auf die Sollgeschwindigkeit auswirkt.

Es stellt sich jedoch im laufe der praktischen Arbeit heraus, dass der zuvor für die Wartezeit angenommene Wert t = 1500 s für die Bedingungen $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 8$ nicht immer ausreichend ist. Nach mehreren Testläufen fiel auf, dass diese bestimmte Parameterkombination sich in dieser Beziehung auffällig wechselhaft verhält. Nach weiteren Messungen stellte sich heraus, dass der Zeitpunkt in einen homogenen Verkehrsstrom einen Zeitraum von 1200 - 9900 Zeitschritten annehmen kann.

Grund dafür sind die zufälligen Messunsicherheiten bzw. σ -Werte, die zur Folge haben, dass es in diesem Zusammenhang von Fall zu Fall unterschiedlich lange dauert, bis der Verkehr einen homogenen bzw. stabilen Zustand annimmt. Dieses Phänomen lässt sich beobachten, wenn die Messergebnisse für $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 8$ in den Abb. 5.3 und Abb. 5.6 miteinander verglichen werden. In Abb. 5.3 wurde auf Grund dieses Phänomens und der Annahme einer zu kurzen Wartezeit kein fließender bzw. kein durchgängig fließender Verkehrszustand aufgezeichnet, sodass die gemittelte Geschwindigkeit für diese Parameter deutlich niedriger ist, verglichen zu der in Abb. 5.6.

Eine weitere Folge aus den zufälligen Messunsicherheiten ist, dass Simulationsdurchläufe nicht reproduzierbar sind, da diese immer unterschiedlich verlaufen. Um diese Abweichung kompensieren zu können, werden alle Simulationen bis zu einer möglichst hohen Anzahl an Messwerten durchgeführt. Dadurch werden die Ergebnisse geglättet und erhalten eine höhere Genauigkeit. Mittels der Standardabweichung werden die Streuungen innerhalb des Simulationsdurchlaufs ermittelt, da der Mittelwert ansonsten gute Werte vortäuschen könnte. Dies lässt sich an den Messergebnissen für das Fahrzeugverhalten bei hoher Dichte zeigen, die sowohl mit 500, als auch mit 10.000 Zeitschritten durchgeführt wurden. Werden die Standardabweichungen der beiden Simulationsdurchläufe mit Auslassen der Werte für $T_{min} = 0, 1$, wie in Abb. 5.5 und Abb. 5.8 dargestellt, miteinander verglichen, wird die Auswirkung der Glättung der Werte deutlich. Auf Grund der wenigen Messwerte in Abb. 5.5 verlaufen die Messergebnisse allgemein betrachtet in die richtige Richtung, jedoch ist deren Verlauf als unstetig zu bezeichnen. Diese Feststellung ist in gewisser Weise als positiv zu betrachten, da sie zeigt, dass die Ergebnisse des Modells wie in Abb. 5.5 stark variieren, sondern, dass durch die Veränderung der Parameter eine logische Entwicklung der Ergebnisse folgt und sich von den Ergebnissen anderer Parameterekombinationen sichtbar unterscheiden.

Auf Grund der starken Wechselwirkungen der Parameter-Konfigurationen $T_{min} = 0, 1$ bei $\sigma = \{0, 9; 1, 0\}$ ist kein Übergang in einen homogenen Verkehrsfluss möglich. Das bedeutet, dass der Stop-and-Go-Kreislauf nicht durchbrochen werden kann. Diese Beobachtung unterstützen ebenfalls die Abbildungen Abb. 5.3 und Abb. 5.4 bzw. Abb. 5.6 und Abb. 5.7.

Noch deutlicher wird der Stop-and-Go-Kreislauf, wenn die Zeitschritte bezogen auf ihre Geschwindigkeit aufgetragen werden, siehe Abb. 5.11. Das Diagramm stammt aus dem von Net-Logo während der Simulation skizzierten Graphen. Die schwarze mittig liegende und parallel zur x-Achse verlaufenden Gerade bildet die Sollgeschwindigkeit ab; in diesem Fall v = 2,0267 m/s. Der blaue Kurvenverlauf stellt den Geschwindigkeitsverlauf dar. Dieser liegt von der Sollgeschwindigkeit aus leicht nach unten versetzt, was die in Abb. 5.6 zu erkennende geringe mittlere Geschwindigkeit v < 2,0267 ebenfalls erklärt. Die Geschwindigkeit verläuft in periodischen Intervallen, was ein weiteres Indiz für einen Stop-and-Go-Verkehr hindeutet. Wird der Mittelwert aller Messwerte für die Parameter aus Abb. 5.11, für v > 2,0267 m/s berechnet, so ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit $v \approx 2,783$ m/s.

Einen weiteren Hinweise darauf liefert Abb. 5.12, die das Trajektoriendiagramm der Parameter $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 9$ darstellt. Die Trajektorienlinien beschreiben den Abstand *s* bezogen auf die Zeit. Hier verlaufen die Trajektorien nicht linear, sondern wellenförmig, da es durch die Stop-and-Go-Wellen zu periodisch größer und wieder kleiner werdenden Abständen zwischen den Fahrzeugen kommt.

5 Dynamische Sicherheitsanalyse



Abbildung 5.12: Trajektorien-Diagramm eines nicht homogenen Verkehrsflusses [Eigene Darstellung].

Zum Vergleich wird in Abb. 5.13 das Trajektoriendiagramm der Parameter $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 6$ dargestellt. Hier verlaufen die Trajektorienlinien linear, statt periodisch wellenförmige Bewegungen darzustellen, da es sich hierbei um einen homogenen Verkehrszustand handelt.



Abbildung 5.13: Trajektorien-Diagramm eines homogenen Verkehrsflusses [Eigene Darstellung].

Die Ursache für dieses Phänomen stammt aus dem Stop-and-Go-Verlauf des Verkehrs, auf Grund dessen es zu Geschwindigkeitsschwankungen kommt, resultierend aus dem ständigem Beschleunigen und Bremsen. Zu dem Zeitpunkt, an dem die meisten Fahrzeuge auf Grund der zu hohen Dichte nah beieinander stehen bleiben müssen, ergibt sich im selben Moment durch das neue Platzangebot für eines der Fahrzeuge eine größere Lücke, in der es wieder anfahren kann. In dem Moment ist für dieses Fahrzeug der vorausliegende Abstand zum nächsten Fahrzeug größer, als der mittlere Abstand aller Fahrzeuge, bezogen auf die Länge der Straße, auf die sich die Sollgeschwindigkeit von v = 2,0267 m/s beruht. Aus diesem neuen Abstand, der verglichen zum mittleren Abstand, deutlich größer ist, ergibt sich eine neue Sollgeschwindigkeit $v_{neu} > v_{alt}$. Diese führt dazu, dass das Fahrzeug für einen kurzen Moment eine deutlich höhere Geschwindigkeit, als die von der Dichte abhängigen Geschwindigkeit, erreichen kann. Aus den großen Geschwindigkeitsdifferenzen von stehenden zu fahrenden Fahrzeugen ergibt sich für die Parameter $T_{min} = 0, 1$ bei einem Rauschen von $\sigma = 0, 9$ und $\sigma = 1, 0$ ein hoher Ausschlag der Standardabweichung (siehe Abb. 5.4). Dennoch ist bei diesen beiden Parameterkonfigurationen eine starke negative Abweichung zur Sollgeschwindigkeit zu erkennen. Diese resultiert daraus, dass der prozentuale Anteil an Fahrzeugen deren Geschwindigkeit $v \ge 2,0267$ m/s beträgt. Dadurch ergibt sich bei $T_{min} = 0, 1$ und $\sigma = 0, 9$ eine durchschnittliche Geschwindigkeit von v = 1,466 m/s und bei $\sigma = 1,0$ eine durchschnittliche Geschwindigkeit von v = 1,345 m/s.

Gelöst werden könnte dieses Problem, indem Beschleunigungswerte der Fahrzeuge im Modell begrenzt werden würden. Das Modell erreicht bei der Beschleunigung Werte, die die Richtwerte der ISO 15622 um ein Maß überschreiten, dass diese nicht immer realistisch sind. Eine Begrenzung der Beschleunigung hätte zur Folge, dass die Fahrzeuge trotz der im Moment des Anfahrens möglichen Sollgeschwindigkeit von v > 2,0267, diese Geschwindigkeit nicht erreichen würden. Der über die Fahrt hinweg langsam kleiner werdende Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, würde eine neue maximal mögliche Sollgeschwindigkeit ergeben, die das Fahrzeug daran hindern würde eine zu hohe Geschwindigkeit anzunehmen. Möglicherweise wäre dann auch ein Durchbrechen des Stop-and-Go-Flusses nach einer gewissen Zeit realistisch.

Infolge der hohen Anzahl an Daten und der hohen Genauigkeit der gesamten Messreihen durch die hohe Auflösung, resultierend aus einem niedrigen Wert für dt, kann eine zuverlässige Aussage über die Stabilität des erweiterten ATG-Modells getroffen werden. Für die Werte bei hoher Dichte $\{0, 3 \leq T_{min} \leq 1, 4\}$ ist das Modell für alle Werte $\{0, 1 \leq \sigma \leq 1, 0\}$ als global stabil zu bezeichnen, da keine Anzeichen von Störungen vorliegen. Dies gilt nicht für alle Werte σ für $T_{min} = 0, 1$. Für den Bereich $\{0, 8 \leq \sigma \leq 1, 0\}$ ist das Modell bedingt durch das Rauschen instabil, da es auf Grund der Störungen nicht fähig ist in eine Ruhelage zu gelangen und in einen homogenen Verkehrsfluss überzugehen. Bei geringen Dichten ist das ATG-Modell für alle Werte T_{min} und

5 Dynamische Sicherheitsanalyse

 σ stabil. Werden die Ergebnisse der hohen Dichte mit denen der niedrigen Dichte verglichen, so kann die Aussage getroffen werden, dass das ATG-Modell bei niedrigen Dichten, auf Grund der Abdeckung des gesamten Definitionsbereich für T_{min} deutlich stabiler ist. Ebenso deswegen, weil die erzielten Geschwindigkeiten trotz starkem Rauschens deutlich näher an der Sollgeschwindigkeiten lagen, als die Verläufe der mittleren Geschwindigkeiten aus Abb. 5.6 und Abb. 5.9 sowie die Abweichung aus Abb. 5.7 und Abb. 5.10 beweisen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde untersucht, wie sich die Stabilität des ATG-Modells durch die Erweiterungen von Messunsicherheiten und einem flexiblen Zeitabstand zwischen den Fahrzeugen in der Theorie mittels Simulationen verhält. Dabei waren die Bedingungen, unter denen die Simulationen stattfanden, von großer Bedeutung, da diese große Unterschiede deutlich machten. Dazu gehörte, dass das ATG-Modell schwierigen Voraussetzungen, wie dem Simulieren von hohen Verkehrsdichten im Zusammenhang mit starkem Rauschen, ausgesetzt wurde. Im Gegenzug wurden auch Simulationen mit niedrigen Verkehrsdichten unter denselben Bedingungen des Rauschens und somit der gesamten Bandbreite an Situationen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigten teils überraschende und teils zu erwartende Ergebnisse. Eines der unerwarteten Ergebnisse lieferte die allgemeine Feststellung, dass eine kleine untere Grenze und somit eine große Flexibilität des Zeitabstands zur Folge hat, dass das Modell mit zunehmendem Rauschen die größte negative Abweichung zur Sollgeschwindigkeit aufweist. In Anlehnung dazu wurde festgestellt, dass das System für alle Zeitabstands-Untergrenzen T_{min} , bis auf die niedrigste $T_{min} = 0, 1$, stabil ist. Dieser Wert ist lediglich für die drei letzten Stufen des Rauschens instabil. Er zeigt bei allen anderen Werten des Rauschens ebenfalls ein stabiles Verhalten, jedoch mit den am größten gemessenen negativen Geschwindigkeitsabweichungen. Für die drei bereits erwähnten Werte des Rauschens, in denen das ATG-Modell keinen homogenen Verkehrsfluss erreicht, schafft es $\sigma = 0.8$ nicht immer konsequent in eine stabile Ruhelage zurückzukehren. Grund dafür sind die zufälligen Werte, die das Rauschen simulieren sollen und den realen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug beeinflussen. Für die anderen beiden Werte ist das Modell $\sigma = \{0, 9, 1, 0\}$ instabil und schafft es nicht in einen homogenen Verkehrsfluss überzugehen. Die Folge daraus ist ein kontinuierlicher Stop-and-Go-Fluss. In diesem Zusammenhang fiel auf, dass das Modell für diese Parameterkombinationen Beschleunigungswerte erreichte, die unrealistisch waren. Dies ist einer der Gründe für die kontinuierliche Instabilität. Eine Begrenzung der Beschleunigung könnte unter Umständen dazu beitragen, dass das ATG-Modell für den gesamten Definitionsbereich von T_{min} stabil werden kann.

Eine weitere Auffälligkeit ist die Tatsache, dass das Rauschen nicht nur eine negative Abweichung

der Sollgeschwindigkeit, sondern für $\{1, 3 \leq T_{min} \leq 1, 5\}$ ebenfalls eine positive Abweichung der Sollgeschwindigkeit zu Folge haben kann. Dabei gilt wie bei der negativen Abweichung, dass die positive Abweichung mit steigendem Rauschen weiter zunimmt. Im Hinblick auf die Abweichungen der mittleren Geschwindigkeiten kann zusammengefasst werden, dass eine negative Abweichung als ineffizient bewertet werden kann, da die Fahrzeuge langsamer fahren als es theoretisch möglich ist und somit der Verkehrsfluss unnötig abnimmt. Im Gegenteil fördert eine positive Abweichung den Verkehrsfluss, kann aber als Risiko für die Gewährleistung der Sicherheit betrachtet werden. Obwohl an dieser Stelle betont werden muss, dass es unter allen Messergebnissen der Simulationen zu keinen Kollisionen unter den Fahrzeugen gekommen ist und somit der Sicherheitsaspekt stets gewährleistet wurde. Werden nochmals alle Ergebnisse betrachtet, steht fest, dass sich die untere Grenze des Zeitabstands im Bereich $\{1, 1 \leq T_{min} \leq 1, 3\}$ befinden muss.

Eine weitere Beobachtung war, dass infolge des gestauten Zustands, in dem sich die Fahrzeuge zu Beginn einer Simulation befanden, zwangsläufig nach dem Start ein Stop-and-Go-Fluss vorlag. Auffällig war dabei, dass die Fahrzeuge abhängig der Parameter unterschiedlich lang brauchten, bis es ihnen gelang in einen homogenen Verkehrsfluss überzugehen. Tatsache ist, dass mit der Stärke des Rauschens die Übergangszeit vom Stop-and-Go in einen homogenen Verkehrsfluss zugenommen hat. Die Ursache dafür ist, dass das System Zeit benötigt, um zu reagieren. Daraus lässt sich die Hypothese ableiten, dass eine Verbesserung der Reaktivität die Übergangszeit verkürzen könnte und womöglich das System gegenüber dem Rauschen unempfindlicher macht. Außerdem könnte es ggf. dazu beitragen, dass das ATG-Modell für alle T_{min} -Werte stabil wird und dadurch kontinuierliche Stop-and-Go-Wellen verhindert.

Die Ergebnisse der Simulationen mit einer geringen Fahrzeugdichte hingegen führten zu dem vermuteten, aber dennoch positiven Ergebnis, dass das ATG-Modell für alle Parameter kontinuierlich stabil blieb. Die Intensität des Rauschens gekoppelt mit den Untergrenzen des Zeitabstandes hatten ähnliche Verläufe wie die Ergebnisse der Simulationen mit hoher Verkehrsdichte. Die Abweichungen zur Sollgeschwindigkeit waren jedoch nur im hundertstel Bereich zu messen und damit zu vernachlässigen.

Insgesamt war die Arbeit sehr aufschlussreich und hat ein gutes Bild über die Stabilität des ATG-Modells im jetzigen Zustand wiedergegeben. Sie hat ebenfalls dazu beigetragen zu zeigen, dass ein fester Zeitabstand zu unflexibel und eine untere Grenze des Zeitabstands sinnvoll ist, um das ATG-Modell gegen das Rauschen robuster und damit insgesamt stabiler zu machen. Am Ende dieser Arbeit und der daraus hervorgebrachten Ergebnisse, darf nicht vergessen werden, dass es sich hierbei immer noch um eine Simulation handelt, die mit der Realität nur bedingt überein-

6 Zusammenfassung und Ausblick

stimmt, wie auch die Beschleunigungswerte zeigten. Jedoch konnte durch die Implementierung des Rauschens der Bezug zur Realität und den dort herrschenden Bedingungen dem ATG-Modell ein Stück näher gebracht werden, sodass es diesem mit weiterer Entwicklung möglich sein wird, vollständig stabil zu werden und seinen Teil zur Entwicklung und Umsetzung des hochautomatisierten und autonomen Fahrens zu leisten und damit neue Standards zu setzen.

Literaturverzeichnis

- Statistisches Bundesamt (Destatis). Verkehrsunfälle. 2018. URL: https://www.destatis. de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/_inhalt. html (visited on 03/23/2019).
- [2] GCC Standardization Organization. ISO 22179:2009. 2009. URL: https://www.iso. org/standard/40753.html (visited on 03/29/2019).
- [3] Dr. Antoine Tordeux. Vorlesungsskript: Grundlagen des automatisierten Fahrens. 2018.
- [4] ADAC e.V. "Staubilanz 2017". In: (2018). URL: https://www.adac.de/_mmm/ pdf/statistik_staubilanz_231552.pdf (visited on 03/12/2019).
- [5] INSTITUT FUER MOBILITAET. INRIX Traffic Scorecard 2017. 2018. URL: https: //www.institut-mobilitaet.de/studien/inrix-2017-trafficscorecard (visited on 09/03/2019).
- [6] Verband der Automobilindustrie e.V. "Automatisierung Von Fahrassistenzsystemen zum automatiserten Fahren". In: (2015), pp. 3–23. URL: https://www.vda.de/dam/ vda/publications/2015/automatisierung.pdf (visited on 03/11/2019).
- [7] KBA. Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2008 bis 2017 nach ausgewählten Kraftstoffarten. 2018. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/ Neuzulassungen/Umwelt/n_umwelt_z.html (visited on 03/11/2019).
- [8] KBA. Bestand an Pkw in den Jahren 2009 bis 2018 nach ausgewählten Kraftstoffarten.
 2018. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ Umwelt/b_umwelt_z.html (visited on 03/11/2019).
- [9] Jaime Netzer. Infographic: What Actually Causes Traffic Jams. Ed. by The Zebra. Sept. 5, 2014. URL: https://www.thezebra.com/insurance-news/474/whatactually-causes-traffic-jams/ (visited on 03/11/2019).
- [10] Andreas Schadschneider. Physik des Straßenverkehrs. Apr. 23, 2004, 8–13; 19. URL: http: //www.thp.uni-koeln.de/~as/Mypage/PSfiles/verkehr.pdf (visited on 03/12/2019).

- [11] Martin Randelhoff. Die drei Haupttheoreme der Stauforschung: Der Schmetterlingseffekt, unsichtbare Wellen (= Phantomstau) und die Tragik des Zufalls. Ed. by Zukunft Mobilität. Mar. 18, 2011. URL: https://www.zukunft-mobilitaet.net/3344/ analyse/wie-entstehen-staus-phantomstau/ (visited on 03/12/2019).
- [12] Martin Treiber und Arne Kesting. Verkehrsdynamik und -simulation Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer-Verlag, 2010, pp. 7–9; 32–35; 75–77;
 211–212. URL: https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-05228-6 (visited on 03/02/2019).
- [13] Prof. Dr. Olaf Simanski. "Automatisierung und Autonomisierung". In: VDE-Expertenbericht Biomedizinische Technik (2015), pp. 9–10. URL: https://www.vde.com/resource/ blob/788750/f4aa589a9b1212443106afc9aad8e888/expertenberichtbiomedizinische-technik-data.pdf (visited on 03/12/2019).
- [14] Hubertus Bardt. "Autonomes Fahren: Eine Herausforderung fuuer die deutsche Autoindustrie". In: Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung, Jg. 43 (2016). URL: https://www.econstor.eu/handle/10419/157228 (visited on 03/12/2019).
- [15] Bundestag Fachbereich WD 7. "Autonomes und automatisiertes Fahren auf der Straße - rechtlicher Rahmen". In: (2018), pp. 4–6. URL: https://www.bundestag.de/ resource/blob/562790/c12af1873384bcd1f8604334f97ee4b9/wd-7-111-18-pdf-data.pdf (visited on 03/12/2019).
- [16] Bundestag Fachbereich WD 2. "Aenderung des Wiener Uebereinkommens vom 8. November 1968 ueber den Straßenverkehr". In: (Sept. 29, 2016). URL: https://www. bundestag.de/resource/blob/478076/17128cdc1e877496a454de411b27a8af/ wd-2-131-16-pdf-data.pdf (visited on 03/12/2019).
- [17] Metin Ersoy und Stefan Gies. Fahrwerkhandbuch. Springer Vieweg, 2017, pp. 964–967. URL: https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-658-15468-4 (visited on 03/02/2019).
- [18] Hermann Winner; Stephan Hakuli; Gabriele Wolf. Handbuch Fahrassistenzsysteme. Vieweg +Teubner Verlag, 2012. Chap. 32, pp. 478 –516. URL: https://link.springer. com/book/10.1007%2F978-3-8348-8619-4 (visited on 03/09/2019).
- [19] GCC Standardization Organization. ISO 15622:2010. 2010. URL: https://www.iso. org/standard/50024.html (visited on 03/29/2019).

- [20] Konrad Reif. Fahrstabilisierungssysteme und Fahrassistenzsysteme. Vieweg +Teubner Verlag, 2010, pp. 130–143; 158–175. URL: https://link.springer.com/book/10. 1007%2F978-3-8348-9717-6 (visited on 03/17/2019).
- [21] Juergen Bechtloff. Regelungstechnik. Vogel Buchverlag, 2012. Chap. 12, p. 183. URL: https: //ebookcentral.proquest.com/lib/ubwuppertal-ebooks/detail. action?docID=3445540 (visited on 03/17/2019).
- [22] Daniel Kornhauser; William Rand; Uri Wilensky. "Visualization tools for agent-based modeling in Netlogo". In: (Nov. 15, 2007). URL: http://ccl.northwestern.edu/ papers/2007/Kornhauser-Agent-2007.pdf (visited on 03/19/2019).
- [23] Antoine Tordeux; Sylvain Lassarre; Michel Roussignol. "An adaptive time gap car-following model". In: *Transportation Research Part B* (2010). URL: https://www.journals. elsevier.com/transportation-research-part-b-methodological (visited on 03/24/2019).