

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades des

Bachelor of Science (B.Sc.)

Im Studienfach Sicherheitstechnik

**Grundlagen der Verkehrswissenschaften und eine vergleichende
Gegenüberstellung der Open Source Simulationsprogramme SUMO und CARLA**



Vorgelegt am Lehrstuhl Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit

Bergische Universität Wuppertal

Jun.-Prof. Antoine Tordeux

Calvin Bruhn

1822650

Abgabedatum: 09.12.2022

Erklärung des Verfassers

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen 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.

Langenfeld, den

Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Erklärung des Verfassers	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Zusammenfassung	VIII
Summary	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung.....	3
2 Einführung in die Verkehrswissenschaft.....	5
2.1 Wissenschaftliche Arbeitsweise	5
2.2 Der Straßenverkehr in der Übersicht.....	6
2.3 Die Verkehrsflusstheorie	12
2.4 Beobachtung, Messung und Datenerfassung	15
2.5 Verkehrsflussmodelle und Phänomene im Straßenverkehr	22
3 Automatisiertes und vernetztes Fahren	27
3.1 Einführung.....	27
3.2 Funktionsweise	31
3.3 Sicherheit im autonomen Fahren	41
3.4 Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen	45
4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation	52
4.1 Was können Verkehrssimulationsprogramme?.....	52
4.2 Das Open Source Simulationsprogramm SUMO	64
4.3 Einführung in CARLA	72

Inhaltsverzeichnis

5 CARLA und SUMO im Vergleich	83
5.1 Allgemeines und Verwendungszweck.....	83
5.2 Installation und Programmeinstieg	87
5.3 Anwendungen im Detail und Simulationsmöglichkeiten	94
6 Resümee und Ausblick	102
Literaturverzeichnis	X
Anhang	XXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf der klassischen wissenschaftlichen Arbeitsweise	6
Abbildung 2: Stau auf der Autobahn. Im täglichen Berufsverkehr ein häufig anzutreffendes Bild.	9
Abbildung 3: Der Zusammenhang Geschwindigkeit-Anhalteweg graphisch dargestellt.	11
Abbildung 4: Unterscheidung einer makroskopischen, mesoskopischen und mikroskopischen Ansicht.	14
Abbildung 5: Bruce Greenshields Fundamentaldiagramm, in der Gegenüberstellung von Fahrzeuggeschwindigkeit und Verkehrsdichte.	17
Abbildung 6: Grundsätzliche Zusammenhänge im Straßenverkehr.	17
Abbildung 7: Entstehung verschiedener Verkehrsflussmodelle ausgehend von der ersten Erkenntnissen Greenshields.	18
Abbildung 8: Verschiedene Ausprägungen des Fundamentaldiagramms und der fundamentalen Beziehung.	19
Abbildung 9: Funktionsweise eines Induktionsschleifendetektors. Das Befahren führt zu einem Spannungsabfall und wird als Messsignal registriert.	20
Abbildung 10: Ein nicht-uniformer Verkehrsfluss, angelehnt an eine Straßenrealität. ...	21
Abbildung 11: Makroskopisches Fundamentaldiagramm der Innenstadt von Zürich.	23
Abbildung 12: Stilisierte Darstellung des autonomen Fahrens in der Zukunft	30
Abbildung 13: Automatisierungsstufen im System Fahrzeug übersichtlich dargestellt. .	33
Abbildung 14: Übersichtsdarstellung aller von Mercedes Benz verbauten Komponenten für das Autonome Fahren der Stufe 3.	34
Abbildung 15: Grobdarstellung des Ablaufplans im autonomen Fahren.	35
Abbildung 16: Fail-Operational Safety Ansatz in einer Steuerungsarchitektur	43
Abbildung 17: Nach Sicherheit und Bekanntheit gegliederter Ereignisraum, Bereich 3 wird von SOTIF abgedeckt.	44
Abbildung 18: Simple Geschwindigkeitsbasiertes Modell, die Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht der des vorausfahrenden Fahrzeuges	47
Abbildung 19: Fahrzeugfolgemodell von Louis A. Pipes (1953)	48
Abbildung 20: Detaillierteres Fahrzeugfolgemodell, mehr Störfaktoren werden berücksichtigt.	48
Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung einer Optimal-Velocity Funktion	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 22: Eine Vereinigung des Abstands- und Geschwindigkeitsbasierten Modells, das Full-Velocity-Difference Modell	50
Abbildung 23: Beispielsequenz im Nagel-Schreckenberg-Modell, jede Ziffer stellt ein Fahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit dar	51
Abbildung 24: Typische Situation im Stadtverkehr mit unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern	53
Abbildung 25: Schematische Darstellungen verschiedener neuronaler Netze	56
Abbildung 26: Beispielhafte Anwendung eines Neuronalen Netzes	57
Abbildung 27: Das gefaltete neuronale Netz in einer vereinfachten Darstellung.	58
Abbildung 28: Systemarchitektur des PilotNet von NVIDIA	60
Abbildung 29: Spielszene aus Grand Theft Auto V mit implementierter Objekterkennung und Entfernungsmessung.....	62
Abbildung 30: Ansicht der schwedischen Stadt Göteborg und nach Importierung des Kartenmaterials in SUMO.	66
Abbildung 31: Schaubild zum Ablauf der Erstellung einer Simulationskarte in SUMO ..	68
Abbildung 32: Die graphische Oberfläche von SUMO, hier: Befahren einer Kreuzung, Fahrzeuge nach ihren CO ₂ -Emissionen eingefärbt	71
Abbildung 33: Graphische Oberfläche von CARLA, typische Simulationsumgebung mit zahlreichen Gestaltungsobjekten.....	73
Abbildung 34: Ansicht einer urbanen Umgebung in CARLA mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen.....	75
Abbildung 35: Auswertung der verschiedenen Lernmethoden, zielorientierte Navigation, steigende Schwierigkeit der Aufgaben.	81
Abbildung 36: Schematische Darstellung einer Fahraufgabe für die autonomen Steuerungssysteme	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl mikroskopischer und makroskopischer Variablen zur Beschreibung eines Verkehrsflusses, Seite 22

Tabelle 2: Vergleichende Gegenüberstellung von CARLA und SUMO anhand maßgebender Attribute, Seite 101

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
ABS	Antiblockiersystem, Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control (Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
AfGBV	Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung
API	Application Programming Interface
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CARLA	Car Learning to Act
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	europäische Normen
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm, elektronisches Stabilitätsprogramm
etc.	et cetera (und so weiter)
FC	Floating-Car
FuSi	Funktionale Sicherheit
FZV	Fahrzeug-Zulassungsverordnung
GPS	Global Positioning System
ISO	International Standards Organization
IT	Informationstechnik, informationstechnisch
KI	Künstliche Intelligenz
Lidar	Light Detection and Ranging
LKW	Lastkraftwagen
PID	Proportional-Integral-Derivative
PKW	Personenkraftwagen
Radar	Radio Detection and Ranging
S.	Seite
SAE	Society of Automotive Engineers
sog.	sogenannte
SOTIF	Safety Of The Intended Functionality
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SUMO	Simulation of Urban Mobility
SUV	Sports Utility Vehicle
UE4	Unreal Engine 4
US	United States (of America)
vgl.	vergleiche
XML	Extensible Markup Language
z.B.	zum Beispiel

Zusammenfassung

Die beiden Open Source Simulationsprogramme SUMO und CARLA stellen mit ihren technischen Möglichkeiten in der realitätsnahen Simulation von Straßenverkehr und autonomem Fahren einen wichtigen Beitrag für die Erforschung und Erprobung des automatisierten und vernetzten Fahrens dar. Anders als das Training von Erkennungssystemen und Steuerungsalgorithmen im alltäglichen Straßenverkehr können in den Simulationen umfangreiche Einstellungen vorgenommen und jede erdenkliche Situation abgespielt werden. Der Aufwand dafür ist erheblich geringer und die Nachbildung auch kostengünstiger als vergleichbare Trainings in der Realität. Weiterhin entstehen beim Prüfen und Validieren autonomer Fahrsysteme in Simulatoren auch keine unübersichtlichen Sicherheitsrisiken für beteiligten Fahrzeuginsassen und Fußgänger, etwa wenn die Sensoren und Radarsysteme die Person auf dem Zebrastreifen nicht erkennen und es zu einer Kollision kommt. Im Programm würde lediglich eine Fehlermeldung erzeugt und die Simulation gestoppt werden, im alltäglichen Straßenverkehr dagegen könnte es bei einer solchen Situation zu Verletzten oder gar Toten kommen. Damit dieser spätere Situationstransfer von der virtuellen Umgebung auf die reale Straße funktioniert und die an die CARLA- oder SUMO-gewöhnten Umgebung gewohnten Algorithmen auch hier jeden Fußgänger und jedes vorausfahrende Fahrzeug erkennen, muss die Realität möglichst genau nachgebildet werden. In dieser Thesis werden die beiden erwähnten Simulatoren ausführlich beschrieben und ihre technischen Gegebenheiten und Anwendungsprofile vergleichend gegenüber gestellt und auch bewertet. Für das bessere Verständnis der Softwareprogramme bilden die Fachgrundlagen der Verkehrswissenschaften einen großen Bestandteil der Thesis. Begleitend dazu nimmt auch das autonome Fahren mit seiner Unterteilung und der Erläuterung der Funktionsweise einen bedeutenden Teil ein. Vor allem die dazu gehörigen Abstands- und Fahrzeugfolgemodelle, welche auch unter dem Trivialnamen ACC-Systeme bekannt sind. Einen Einstieg in diesen großen Themenkomplex bildet zusätzlich ein Blick auf Zahlen und Fakten rund um das Thema Straßenverkehr.

Summary

With their technical capabilities in the realistic simulation of road traffic and autonomous driving, the two open source simulation programs SUMO and CARLA represent an important contribution to the research and testing of automated and connected driving. Unlike the training of recognition systems and control algorithms in everyday road traffic, extensive settings can be made in the simulations and every conceivable situation can be replayed. The effort required for this is considerably lower and the simulation is also more cost-effective than comparable training in reality. Furthermore, when testing and validating autonomous driving systems in simulators, there are also no unclear safety risks for vehicle occupants and pedestrians involved, for example if the sensors and radar systems fail to detect a person on a crosswalk and a collision occurs. In the program, only an error message would be generated and the simulation stopped; in everyday road traffic, however, such a situation could result in injuries or even fatalities. In order for this later situation transfer from the virtual environment to the real road to work and for the algorithms used to the CARLA or SUMO environment to recognize every pedestrian and every vehicle driving ahead, the reality must be simulated as accurately as possible. In this thesis, the two simulators mentioned are described in detail, their technical characteristics and application profiles are compared and evaluated. For a better understanding of the software programs, the technical basics of transport sciences form a large part of the thesis. Accompanying this, autonomous driving with its subdivision and the explanation of its functioning also takes a significant part. Above all the distance and vehicle following models belonging to it, which are also known under the trivial name ACC systems. An introduction to this large complex of topics is provided by a look at facts and figures related to road traffic.

1 Einleitung

Seit der Erfindung des Automobils vor etwa 130 Jahren ist es dem Menschen möglich, jederzeit bequem fast jeden beliebigen Ort auf der Welt zu erreichen. Dabei ist er weder auf seine eigene Muskelkraft, noch auf die Verfügbarkeit von Pferden als Zugtiere angewiesen, welche zur Zeit des ersten Automobils Ende des 19. Jahrhunderts noch Stand der Technik waren. Gegenüber der damals schon existenten Eisenbahn mit ihren Dampflokomotiven konnten Automobile die Vorteile ins Feld führen, dass der Fahrer selbst entscheiden konnte, wann und wohin er fahren würde und dabei auch nicht auf das Vorhandensein von Eisenbahnschienen angewiesen sein würde. Ein Automobil konnte sich auf den für Postkutschen und Reitern geschaffenen Straßen und Wegen zwischen den Städten und Dörfern bewegen, während sich ein weitreichendes und leistungsfähiges Schienenverkehrsnetz noch im Aufbau befand. Die Einführung der Fließbandfertigung durch Henry Ford in seinem Werk im Jahr 1914 ließ die Preise des ersten in Serienproduktion gefertigten Automobils, des Ford Model T, drastisch sinken und machte es so für große Bevölkerungsteile erschwinglich, vgl. [1]. Das Ende des Zweiten Weltkriegs im Jahr 1945 und das sich daran anschließende sog. Wirtschaftswunder führten dann auch in West- und Mitteleuropa zu einer einsetzenden Massenmotorisierung und der steigende gesellschaftliche Wohlstand führte in den folgenden Jahren zu vielen Millionen Automobilen auf deutschen, britischen und französischen Straßen und Autobahnen. Auch diese wurden nach Kriegsende stark ausgebaut und erweitert, um der Idee einer autogerechten Gesellschaft gerecht zu werden. Folgen dieses starken Anstiegs der zugelassenen Fahrzeuge auf den Straßen waren zunehmende Verkehrsprobleme, steigende Unfall- und Verkehrstotenzahlen, Umweltverschmutzung durch Verbrennungsabgase sowie Flächenversiegelung und Abtrennung der Lebensräume verschiedenster Wildtierarten. Wetterphänomene wie der saure Regen Ende des 20. Jahrhunderts in Deutschland waren Folge des starken Autoverkehrs. Außerdem brachte die Umgestaltung der Städte zugunsten einer autofreundlichen Verkehrspolitik Nachteile für andere Verkehrsträger, wie etwa den öffentlichen Personennahverkehr. Vor allem Fußgängern und Fahrradfahrern wurde nur wenig Platz eingeräumt und an stark befahrenen Straßen und Kreuzungen wurden sie sogar in Tunnel und auf Brücken verlegt. Wissenschaft und Gesellschaft begannen sich mit dem Aufkommen der Umweltbewegungen und einem fortschreitenden

1 Einleitung

gesellschaftlichen Bewusstsein für Erderwärmung und Umweltverschmutzung mit dem Thema Verkehr auseinanderzusetzen und erste Forschungen durchzuführen. Auch der durch Verkehrsstauungen entstehende volkswirtschaftliche Schaden führte zur wissenschaftlichen Betrachtung des Straßenverkehrs und von Staus. Im Laufe der Zeit entwickelten Wissenschaftler und Forscher Maßnahmen zur Reduzierung von Systemüberlastungen wie etwa eine Anpassung der Ampelsteuerung, das Umgestalten der Straßenarchitektur oder auch die Automatisierung des Individualverkehrs auf der Straße, eine noch relativ neuer Lösungsansatz. Trotzdem hat sich dieser Ansatz in den letzten Jahren zu einem wichtigen Forschungsgebiet im Bereich der Verkehrswissenschaften entwickelt. Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen, im Englischen als auch ACC-Systeme bezeichnet, stellen eine wichtige Teilkomponente im automatisierten und vernetzten Fahren dar und durch ihre regelungstechnischen Aufgaben ist das autonome Fahren besser auf reale Fahrsituationen umsetzbar. Üblicherweise werden Steuerungsalgorithmen und Regelungssysteme vor dem Einbau in Testfahrzeuge umfangreiche Simulationen in speziell dazu erstellten Programmen unterzogen, in denen mögliche Verkehrsszenarien auf Straßen und Autobahnen dargestellt werden können, um in einer kontrollierten Testumgebung Systemfehler aufdecken und abstellen zu können, ohne dass dabei womöglich Personen zu Schaden kommen könnten. In diese Bachelorthesis soll es dabei um die Open Source Simulationsprogramme CARLA und SUMO gehen, welche im Bereich des autonomen Fahrens bzw. der Verkehrssimulation Modelle abbilden und Simulationen durchführen können. Neben der Vermittlung von theoretischen Grundlagen von automatisiertem und vernetztem Fahren sowie der Verkehrsflusstheorie sollen dem Leser auch die Simulationsprogramme vorgestellt und ihre Fähigkeiten aufgezeigt werden.

1.1 Problemstellung

Der Straßenverkehr hat in den letzten Jahren und Jahrzehnten immer weiter zugenommen und damit auch die Unfallzahlen, Ausfallzeiten durch Staus sowie damit einhergehende Umweltbelastungen mit Verbrennungsabgasen. Als Reaktion auf diese negativen Folgen der Massenmotorisierung in den Industrie- und Schwellenländern der Erde untersuchten Forschung und Wissenschaft den Straßenverkehr und suchten nach Lösungen für die gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen. Neben dem Umgestalten der Verkehrsflächen war auch eine teilweise bis vollständige Automatisierung des straßengebundenen Individualverkehrs ein möglicher Lösungsansatz. Diese kann in

1 Einleitung

Realsituationen mittels technischen Einrichtungen wie Kameras und Sensoren zur Umfelderkennung, Übertragungseinheiten zum Informationsaustausch sowie Steuerungselektronik zur Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit in Abhängigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug, auch als Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage bekannt, umgesetzt werden. Vollständig erprobt und im alltäglichen Straßenverkehr anerkannt und bewährt sind die autonomen agierenden Systeme allerdings noch nicht, weder seitens der Hersteller, noch seitens des Gesetzgebers. Teilautonome Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung des Fahrers sind aber schon im Einsatz und heutzutage in vielen Neufahrzeugen zu finden. Neben einer Erprobung im Feld und auf ausgewiesenen Teststrecken abseits der öffentlichen Straßen werden die Bestandteile der Fahrzeugsteuerungssysteme im Vorhinein einer ausgiebigen Prüfung in Simulationsprogrammen unterzogen. Dies gilt insbesondere für mathematische Steuerungsalgorithmen und Berechnungsmodelle, welche die Grundlage für das selbstständige Bremsen und Beschleunigen des Fahrzeuges im fließenden Verkehr bilden. Dabei ist gerade die Einbeziehung von gesammelten Informationen zu Geschehnissen um das Fahrzeug herum von großer Bedeutung, um den Algorithmus stets aktuellen Geschehnissen anzupassen. Alle diese komplexen Anforderungen an das mathematische Grundgerüst werden in Simulationsprogrammen einer Prüfung unterzogen und es werden alltagsnahe Situationen aus dem Straßenverkehr nachgestellt und die Reaktion des Computers analysiert und bewertet. Ein mögliches Programm im Bereich der Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen ist die Open Source Anwendung CARLA. Diese ist dem Lehrstuhl aber noch nicht großartig bekannt und es sind mit ihr noch keine nennenswerten Versuche und Simulationen durchgeführt worden. Aus diesem Grund soll sich diese wissenschaftliche Arbeit mit dem Simulationsprogramm beschäftigen und mit den im Programm vorhandenen Bewegungsalgorithmen Versuche im Bereich der Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen durchführen.

1.2 Zielsetzung

Diese Bachelorthesis soll dem Leser einen Einblick in die Verkehrswissenschaften und den dabei verwendeten Simulationsprogrammen bieten. Speziell die Open Source Simulationsprogramme CARLA und SUMO zur Modellbildung und Simulation im autonomen Fahren bzw. das Abbilden großer Verkehrsnetzwerke in Städten werden hier behandelt. Zum besseren Verständnis der Simulationsprogramme sowie der

1 Einleitung

Verkehrsflusstheorie mit ihren Modellen und Eigenheiten beginnt diese Thesis mit einem einleitenden Kapitel in die Verkehrswissenschaft und der aktuellen Situation und Entwicklungen auf den Straßen und Autobahnen der Bundesrepublik Deutschland. Die Auseinandersetzung mit diesem Themenkomplex ist auf eine Weise aufgebaut, die von allgemein zu speziell reicht, aber stets einen Bezug zu dem Hauptthema dieser Thesis herstellt. Mit einem Blick auf den Stand der aktuellen Fahrzeugzahlen und Statistiken über Stau und Straßenverkehrsunfälle hierzulande soll dem Leser eine Entwicklung aufgezeigt werden, auf der das autonome Fahren und die damit einhergehenden technischen Neuerungen aufbaut. Zum Verständnis der Maßnahmen müssen aber auch die theoretischen Grundlagen zum Straßenverkehr und der Verkehrsflusstheorie vermittelt werden. Es werden grundlegende Definitionen eingeführt und die unterschiedlichen Betrachtungsweisen auf den Verkehr in verschiedenen Detaillierungsstufen erläutert. Anschließend geht es an die Beobachtung, Messung und Auswertung von Verkehr und die damit verbundenen Phänomene. Straßenverkehr kann in verschiedene Phasen unterteilt und diese Phasen voneinander abgetrennt werden. Gerade die Wechsel zwischen den Phasen sind hier besonders interessant. Auf dieser Thematik aufbauend soll dem Leser im nächsten Kapitel das automatisierte Fahren in seinen verschiedenen Formen und Facetten näher gebracht werden. Das große Gesamtsystem wird auf diesen Seiten Stück für Stück einer logischen Reihenfolge nach erklärt und die einzelnen Teilbereiche miteinander verknüpft, von der Definition über die Geschichte bis hin zur Funktionsweise auf der theoretischen Ebene. Den Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen wird sich in einem eigenen Kapitel gesondert gewidmet. Mit diesem Wissen zu Abstands-basierten Fahrzeugfolgmodellen und der Aufteilung der Module Wahrnehmung, Bewegungsplanung und Ausführung dreht sich das vierte Kapitel um Simulationsprogramme für das autonome Fahren. Die Softwareanwendungen bilden einen wichtigen Part in der Entwicklung und Erprobung autonomer Fahrsysteme, welcher gesondert hervorgehoben wird. Mit einem Bogen über die Einsetzbarkeit von Videospielen bei der Erprobung der Steuerungsalgorithmen werden die beiden Open Source Simulationsprogramme CARLA und SUMO vorgestellt und ihre Arbeitsweisen und technischen Möglichkeiten im vierten und fünften Kapitel ausgeführt und vergleichend gegenübergestellt. Dabei werden auch Aspekte wie Bedienerfreundlichkeit und Anwendungsflexibilität eine Rolle spielen.

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

Dieses Kapitel bildet den fachlichen Einstieg in die Bachelorarbeit. Dem Leser sollen hier die Verkehrswissenschaft und die Verkehrsflusstheorie erläutert werden und in Vorbereitung auf die Arbeit mit dem Simulationsprogramm Begriffe wie Fundamentaldiagramm, Fahrzeugfolgemodelle oder Autonomes Fahren nähergebracht werden. Außerdem wird hier klargestellt, weshalb wissenschaftliche Untersuchungen und Forschungen im Bereich des Straßenverkehrs durchgeführt werden.

2.1 Wissenschaftliche Arbeitsweise

Wissenschaft und Gesellschaft begannen sich mit dem Aufkommen der Umweltbewegungen und einem fortschreitenden gesellschaftlichen Bewusstsein für Erderwärmung und Umweltverschmutzung mit dem Thema Verkehr auseinanderzusetzen und erste Forschungen durchzuführen. Auch der durch Verkehrsstauungen entstehende volkswirtschaftliche Schaden führte zur wissenschaftlichen Betrachtung des Straßenverkehrs und von Staus. Die Kernfrage war dabei, wie sich Einschränkungen und Störungen des Verkehrsflusses wirksam verhindern lassen. Phänomene und Prozesse im Straßenverkehr sollten beobachtet und dokumentiert werden, um daraus Modelle, Gesetzmäßigkeiten und Theorien ableiten zu können. Dieses Vorgehen entspricht einer klassischen wissenschaftlichen Arbeitsweise, welches auch in anderen Fachgebieten wie z.B. der Biologie, der Psychologie oder auch in der Physik Verwendung findet. Auf eine Beobachtung folgen Analyse bzw. Modellbildung, Validierung und eine abschließende Simulation zur weiteren Vorhersage, vgl. [1], S. 37. Auf die Beobachtung eines Phänomens bzw. Durchführung eines Experimentes folgen die Analyse des Beobachteten und der erste Versuch einer Modellbildung, welches der Vorhersagbarkeit eines Phänomens gelten soll. Dazu gehört auch das Definieren von Begriffen und Festlegen von Unterscheidungen. Zur Verbesserung eines Modells werden im Folgenden fortwährend Kalibrierungen und Validierungen zur besseren Abbildung der Realität vorgenommen. Dies ist ein kontinuierlicher Prozess und erstreckt sich parallel zu den weiteren Forschungsarbeiten. Abschließend wird das ausgearbeitete Modell einem Simulationsprozess unterzogen und es wird versucht, das beobachtete Phänomen bzw. die Störung im System durch Gegenmaßnahmen abzustellen. Beispiel für eine Gegenmaßnahme wäre im Straßenverkehr unter anderem das automatisierte Fahren.

Durch dieses Vorgehen können Problemstellen in einem Verkehrssystem ausgemacht und verschiedene Gegenmaßnahmen im Simulationsprogramm auf ihre Wirksamkeit getestet werden. Aus diesem einfachen Ablaufschema haben sich so im Laufe der Zeit die heute in der Verkehrswissenschaft bekannten und verbreiteten Theorien und Modelle sowie letztendlich auch anerkannte und erprobte Simulationsprogramme entwickelt. Die nachfolgende Abbildung stellt die für sämtliche Forschungsdisziplinen klassische Vorgehensweise graphisch dar und zeigt die klaren und logischen Strukturen der wissenschaftlichen Arbeit auf.



Abbildung 1: Ablauf der klassischen wissenschaftlichen Arbeitsweise

2.2 Der Straßenverkehr in der Übersicht

Um die Relevanz von korrektiven Maßnahmen im Straßenverkehr nachvollziehen zu können ist es wichtig, über die Situation des motorisierten Individualverkehrs in Deutschland und in anderen Teilen der Welt informiert zu sein. Dazu gehören auch die mittelbaren und unmittelbaren Folgen des Autoverkehrs. Seit dem Jahr 1991 nimmt der Kraftfahrzeugbestand in Deutschland kontinuierlich zu. Zum Stichtag 01.01.2022 waren in Deutschland 48,5 Millionen PKW registriert, im Vergleich zum Jahr 2007 ein Anstieg von etwa 18 Prozent. Vor allem der Bestand der LKW hat mit seinem Plus von 51 Prozent in einem Zeitraum von 15 Jahren deutlich erhöht, trotz vermehrter Debatten um Verkehrswende und Klimawandel, vgl. [2]. Teilt man den gesamten PKW-Bestand nach Kraftstoffart auf, so entfallen im Jahr 2021 etwa 31 Prozent auf den Dieselmotor, mehr als 63 Prozent auf Fahrzeuge betrieben mit Ottokraftstoff und der Rest enthält vor allem elektrisch betriebene Fahrzeuge, zu denen auch Hybridmodelle zählen. Deren Bestand hat sich im Zeitraum von 2020 bis 2021 sogar verdoppelt, ist aber im Vergleich zu den konventionell betriebenen Fahrzeugen sehr gering. Zudem werden vermehrt große Fahrzeugmodelle wie SUVs oder Geländewagen nachgefragt, welche im Vergleich zu Fahrzeugen der Kompakt- und Mittelklasse mehr Platz im Verkehrsraum einnehmen und auch über einen erhöhten Kraftstoffverbrauch verfügen. Ihr Anteil erhöhte sich in den vergangenen zehn Jahren um 87 Prozent und beläuft sich auf im Jahr 2021 auf 28 Prozent am Gesamtbestand, vgl. [2]. Der Motorisierungsgrad in der Bevölkerung, also

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

die PKW-Dichte im Verhältnis zur Einwohnerzahl lag im Jahr 2019 bei 575 Fahrzeugen pro 1.000 Einwohnerinnen und Einwohnern. Damit liegt die Bundesrepublik Deutschland über dem Schnitt der Europäischen Union (569 Fahrzeuge pro 1.000 Bürgerinnen und Bürgern) und im weltweiten Vergleich auf sehr hohem Niveau, deutlich höher als in Entwicklungs- und Schwellenländern, vgl. [3]. Die Bundesrepublik Deutschland verfügt über ein sehr dichtes Autobahnnetz, von 1995 bis 2019 wurde es um 18 Prozent auf circa 13.100 Kilometer erweitert, womit es fast sechsmal so dicht wie das Schienenstreckennetz hierzulande ist. Nach der Wiedervereinigung wurden besonders in den neuen Bundesländern viele Autobahnen neugebaut und erweitert, um ein mit den alten Bundesländern vergleichbares Niveau zu erreichen, vgl. [4]. Steigender Wohlstand im einsetzenden sog. Wirtschaftswunder nach Ende des Zweiten Weltkriegs führten auch zu einer Änderung des Mobilitätsverhaltens in der deutschen Bevölkerung. Im Bundesland verließen Im Jahr 2000 etwa 54 Prozent der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer ihre eigene Gemeinde, um zu ihrem Arbeitsort zu gelangen, 2018 waren es bereits 60 Prozent. Weiterhin müssen 12,6 Millionen Beschäftigte sogar den Land- bzw. Stadtkreis wechseln, auch hier war die Wert im Jahr 2000 noch geringer, er betrug damals knapp 9,3 Millionen. Insgesamt pendelten 2018 19,3 Millionen Menschen in Bayern zur Arbeit (2000: 14,94 Millionen). Mehr Menschen legen also auf ihrem täglichen Weg zur Arbeit größere Entfernungen zurück, vgl. [5]. Dieser Trend hat sich in den darauffolgenden Jahren noch weiter verstärkt. Mieten in Innenstädten werden immer teurer und Neubauprojekte mit Reihen- und Einfamilienhäusern versprechen ein Wohnen im Grünen außerhalb der Stadt. Größere Distanzen konnten mit Autos auf Autobahnen bequem und schnell überbrückt werden. Falls der öffentliche Personennahverkehr auf vergleichbarer Strecke nicht konkurrenzfähig war, wurde vielfach das Auto bevorzugt.

Deutlichste Folge von vielen Fahrzeugen auf den Straßen sind die Unfallzahlen. Die Zahl der polizeilich erfassten Straßenverkehrsunfälle lag im Jahr 2021 bei 2.314.938 und damit rund 300.000 über dem Wert von 1990, vgl. [6]. Gegenläufig dazu entwickelt sich die Zahl der Verkehrstoten, sie ist seit Jahren stark rückläufig und belief sich 2021 auf 2.562 im Straßenverkehr tödlich verunglückte Personen, der niedrigste Wert seit Beginn der Aufzeichnungen. Nach wie vor waren die meisten Getöteten Insassen von Kraftfahrzeugen, vgl. [7]. Gründe dafür sind unter anderem rechtliche Regelungen, verbesserte Fahrzeugtechnik und Insassenschutz sowie straßenbauliche Maßnahmen.

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

Zur verbesserten Fahrzeugtechnik werden auch Fahrassistenzsysteme wie Tempomaten, ACC-System und Spurhaltesysteme gezählt. Verkehrsunfälle und Staus führen auch zu Zeitverlusten der davon betroffenen Fahrerinnen und Fahrern. Laut einer Analyse des Verkehrsdatenanbieters Inrix erlitten deutsche Auto-Pendler im Jahr 2021 einen durchschnittlichen Zeitverlust von hochgerechnet 40 Stunden pro Jahr. Deutschlandweit ist der Arbeitsweg für Pendler nach München am zeitaufwändigsten. Etwa 79 Stunden werden durch Stau auf dem Weg zur Arbeit oder nach Hause verloren, bei einer Wochenarbeitszeit von 40 Stunden entspricht dies fast zwei vollen Arbeitswochen, wobei diese Zeit im Stau häufig zu Lasten der Freizeit geht und deshalb beispielsweise morgens früher losgefahren wird. Im weltweiten Vergleich liegt London mit durchschnittlich 148 Stunden Zeitverlust an erster Stelle. In dieser Zeit kann nicht produktiv gearbeitet werden und dies kostet Unternehmen und letztendlich auch den Staat Geld, vgl. [8]. Betrachtet man zusätzlich noch die typischen Ursachen von Verkehrsstauungen, so entfallen 50 Prozent auf ein zu hohes Verkehrsaufkommen, bzw. ein Sättigungsproblem. Jede Art von Straße, sei es eine Autobahn, Landstraße oder Allee, hat immer nur eine begrenzte räumliche Kapazität zur Aufnahme von Fahrzeugen. Bei einer idealen Geschwindigkeit von 80 bis 100 Kilometer pro Stunde ist die Kapazität größtmöglich, wird schneller oder langsamer gefahren ist die Kapazität geringer. Ist die Nachfrage nach Straßenraum durch die Fahrzeuge jetzt größer als der vorhandene Platz, kommt es zu einer Überlastung des Verkehrssystems und damit zu einem Stau. Hinzu kommt noch die problematische Situation, dass die Straßenkapazität normalerweise nicht kurzfristig erhöht werden kann, vgl. [9]. Würde man diese Straße jetzt ausbauen und damit ihre Kapazität erhöhen, würde vermehrt Autofahrer die Strecke befahren und somit für erneute Staus sorgen. Dem kann nur Abhilfe geschaffen werden, wenn dadurch alternative Verkehrsträger wie der öffentliche Personennahverkehr, das Fahrrad oder die Fußgänger nicht beeinträchtigt werden und sie ebenfalls Erweiterungen und Investitionen erfahren. Dieses Phänomen wird in der Verkehrswissenschaft als „Downs-Thomson Paradoxon“ bezeichnet und es beschreibt den gegenteiligen Effekt der Erweiterung eines Straßensystems, vgl. [10]. Weitere wichtige Stauursachen sind Baustellen, welche durch den Wegfall einer Fahrspur oder ähnlichem eine Kapazitätsverringerung zur Folge haben und Unfälle, welche vermehrt bei starker Belastung eines Verkehrssystems auftreten. Besonders das Fahrverhalten der Autofahrer ist in der Entstehung entscheidend, etwa 90 Prozent der Unfallursachen

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

können auf personenbezogenes Verhalten zurückgeführt werden, vgl. [1], S. 12. Schlechte Witterungs- und Straßenverhältnisse sowie Hindernisse auf der Fahrbahn stellen den restlichen Teil der Ursachen.



Abbildung 2: Stau auf der Autobahn. Im täglichen Berufsverkehr ein häufig anzutreffendes Bild. Nicht außer Acht zu lassen bei der Beschreibung und Bewertung der Situation des Straßenverkehrs in Deutschland sind zudem die dadurch entstehenden Umweltbelastungen bzw. Schadstoffemissionen. Dabei sind Schädigungen durch die Flächenversiegelung, lokale Schäden durch Luftverschmutzung, globale Schäden durch Treibhausgase sowie Lärmemissionen zu unterscheiden. Zu den Schädigungen durch Flächenversiegelung zählen auch die damit verbundene Abholzung von Wäldern und Zerstörung von natürlichem Lebensraum, vgl. [11], S. 744. Des Weiteren trägt der motorisierte Individualverkehr auch zum Ausstoß von Treibhausgasen bei. In den verkehrsbedingten Emissionen in der Europäischen Union hat der Straßenverkehr einen Anteil von 71,6 Prozent am Gesamtverkehr, wovon 60,6 Prozent auf Personenkraftwagen entfallen. Allerdings ist der Kohlenstoffdioxid-Ausstoß neuer Personenkraftwagen von 2010 bis 2019 um etwa 18 Gramm CO₂ pro Kilometer gesunken, vgl. [12]. Allerdings nahm die Gesamtanzahl an Autos in den letzten Jahren zu, was diesem Trend entgegenwirkt. Alle diese Informationen sind wichtig beim Verständnis des Straßenverkehrs und inwieweit erdachte Maßnahmen der Verkehrswissenschaft bei der Vermeidung von Unfällen, bei der Reduzierung von Verkehrsstauungen und bei der Verringerung von Emissionen helfen können. Vor allem das automatisierte und autonome Fahren kann menschliche Fehler im Straßenverkehr

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

verhindern und durch intelligenten und vernetzten Verkehr Unfälle, Staus, Umweltverschmutzungen und Zeitverluste verringern.

Eine allgemeingültige Definition für den Straßenverkehr ist die Bewegung von Fahrzeugen auf dafür vorgesehenen und errichteten Strecken und Wegen. Personen, die sich im Straßenverkehr bewegen sind die sogenannten Verkehrsteilnehmer und ihr Fahrverhalten ist neben der Kapazität der Straße entscheidend für die Belastung des Systems Straßenverkehr. Das Fahrverhalten ist im Normalfall auf die Minimierung der Fahrzeit ausgelegt und es kommt durchgehend zu Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern sowie der Verkehrsinfrastruktur. In beiden Fällen ist das Vermeiden von Personen- und Sachschäden oberstes Gebot, aus diesem Grund sind Fahrzeuge und Infrastruktur auf ein möglichst hohes Sicherheitsniveau ausgelegt. Limitiert ist das angestrebte möglichst optimalste Fahrverhalten der Autofahrerinnen und Autofahrer einerseits durch eine beschränkte Kapazität der Verkehrsinfrastruktur und andererseits durch eine beschränkte dynamische Kapazität der Fahrzeuge, wie etwa eine technisch limitierte Beschleunigungs- und Bremsleistung, vgl. [1], S. 6. Dazu kommen noch äußere, witterungsbedingte Einflussgrößen wie Regen (Aquaplaning), Wind und Temperaturen um und unterhalb des Gefrierpunktes (Glätte durch Schnee und Eis). Außerdem sind auch sämtliche Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer in ihrer Wahrnehmung und Reaktionszeit von Natur aus beschränkt. Einer Studie der Universität Heidelberg zur Folge steigt in einer untersuchten Aufgabe die durchschnittliche mentale Verarbeitungsgeschwindigkeit bis zum Alter von 30 Jahren an und bleibt dann bis zum Alter von etwa 60 Jahren der Probanden stabil. Bei älteren Teilnehmern war eine Abnahme der Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung im Gehirn zu beobachten, vgl. [13]. Auch können im Alter ab etwa 60 Jahren Seh- und Hörfähigkeit sowie Konzentrations- und Aufmerksamkeitsleistung abnehmen und die Beweglichkeit eingeschränkt sein. Zahlen des statistischen Bundesamtes zufolge sind ältere Menschen an 13,4 Prozent aller Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden beteiligt, womit sie anteilmäßig vor den jungen Fahrern bzw. Fahranfängern liegen, vgl. [14]. Weiterhin können auch die Nutzung von Mobiltelefonen am Steuer und das Konzentrieren auf andere Ereignisse auf der Straße die Wahrnehmung verschlechtern und die Reaktionszeit deutlich verlängern. Wird mit zu hoher Geschwindigkeit gefahren, dann ist im Falle eines plötzlichen Abbremsens ein deutlich verlängerter Anhalteweg zu erwarten. Dieser setzte

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

sich aus Reaktionsweg und Bremsweg zusammen. Je schneller gefahren wird, desto länger auch der Reaktionsweg, da die Reaktionszeit bei einer Person immer etwa gleichbleibend lang ist. Allerdings wird bei höherer Geschwindigkeit dabei eine längere Strecke zurückgelegt. Der Bremsweg ist von Bremsleistung, der Fahrbahnbeschaffenheit sowie von der Kraft, mit der sie betätigt wird, abhängig und nimmt in Relation zur Geschwindigkeit quadratisch zu, nicht etwa linear, vgl. [15]. Dieser mathematische Zusammenhang ist in der folgenden Abbildung deutlich am Kurvenverlauf zu erkennen. Während der orangefarbene Graph den Anhalteweg bei einer normalen Bremsung beschreibt, zeigt der blaue Graph diesen Zusammenhang bei einer Gefahrenbremsung, also mit deutlich erhöhter Bremskraft. Dementsprechend verringert sich auch der Anhalteweg deutlich.

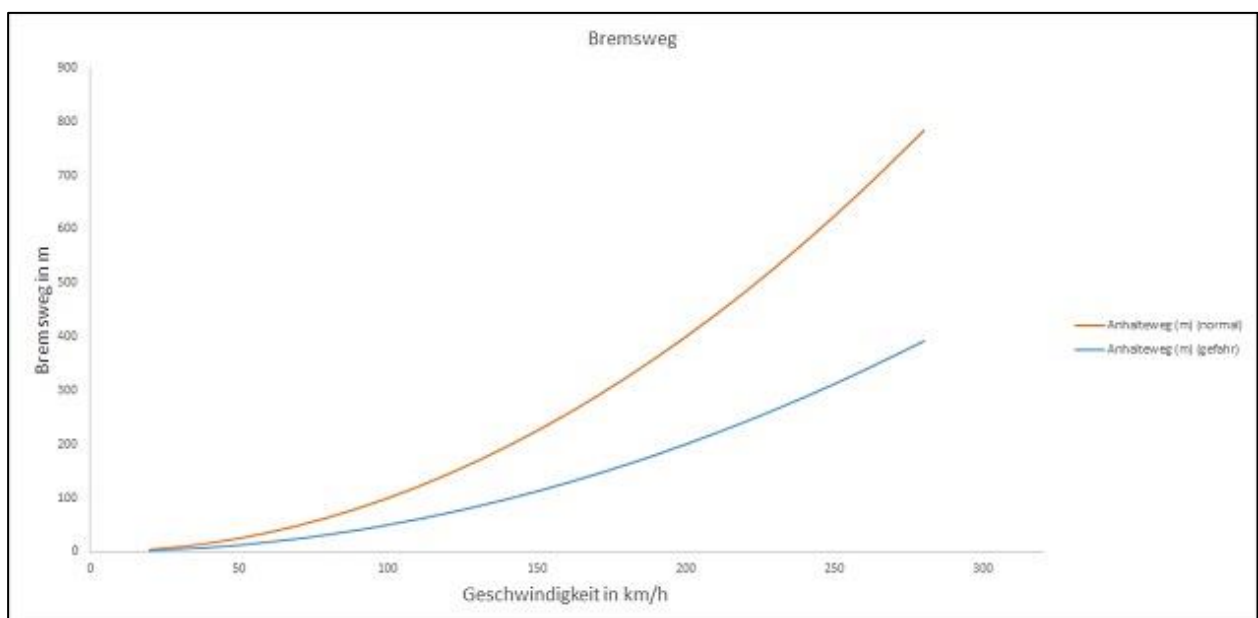


Abbildung 3: Der Zusammenhang Geschwindigkeit-Anhalteweg graphisch dargestellt.

Zur Kompensation von einem möglicherweise zu langem Anhalteweg, der beschränkten Kapazitäten von Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugen, witterungsbedingten Einflussgrößen sowie individuellen Voraussetzungen der Verkehrsteilnehmenden wurden Verkehrsregeln eingeführt, welche dem Verkehrsgeschehen Struktur verleihen und einen unmissverständlichen Leitfaden für die Teilnahme am Verkehr bieten sollen. In Deutschland bildet die Straßenverkehrsordnung (StVO) einen umfassenden Regelkatalog, unterstützt durch weitere Gesetzestexte wie etwa die Straßenverkehrs-Zulassung-Ordnung (StVZO) oder die Fahrzeug-Zulassungsverordnung (FZV), welche bereits vor der Teilnahme am Straßenverkehr Fahrern und Automobilen

Zulassungsbeschränkungen und Nachweis von Kenntnissen und Sicherheitseinrichtungen auferlegen, vgl. [16]. Dadurch soll die Verkehrssicherheit erhöht werden. Diese wird in der Fachwelt in die beiden Teilbereiche aktive und passive Sicherheit unterteilt. Aktive Verkehrssicherheit beinhaltet das aktive Vermeiden von Verkehrsunfällen. Im Straßenverkehr geschieht dies einerseits durch das in den Fahrschulen erlernte und vermittelte gefährdungsbewusste Fahren und andererseits zur Unterstützung durch technische Systeme wie das Antiblockiersystem (ABS) oder das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP). Außerdem soll auch die Verkehrsinfrastruktur mit den möglichen Fahrsituationen entsprechender Beleuchtung und Verkehrsführung sowie den staatlich festgelegten Verkehrsregeln die Möglichkeit von Unfällen so weit wie möglich reduzieren. Passive Verkehrssicherheit beschäftigt sich mit dem Abmildern von Unfallfolgen, kommt also erst nach der aktiven Verkehrssicherheit bzw. im Moment des Eintretens einer Unfallsituation zum Einsatz. Dabei geht es vor allem um konstruktive Sicherheitsmaßnahmen wie etwa Sicherheitsgurte, Airbags und Deformationszonen im Auto, welche bei einer Kollision auftretende Energien durch Verformung absorbieren und so Insassen schützen, vgl. [17].

2.3 Die Verkehrsflusstheorie

Straßenverkehr hat die Eigenheit nur schwer vorhersagbar zu sein, auch wenn Raumbedarf der Fahrzeuge und vorhandene Straßenkapazität bekannt sind. Es ist ein komplexer, dynamischer Prozess, welcher wiederum von räumlichen und zeitlichen Zuständen anderer Teilsysteme abhängig ist. Vom Grundsatz her ist die Komplexität von nichtlinearen, also ungleichmäßigen und zusammenhanglosen, Interaktionen zwischen drei verschiedenen Ereignissen im Straßenverkehr abhängig. Diese sind das Reiseentscheidungsverhalten, welches Aussage über die allgemeine Nachfrage nach Reisemöglichkeiten macht, das sog. Routing bzw. die Routenwahl von Fahrzeugen in einem Verkehrsnetz sowie die Überlastung in einem Verkehrsnetz, welche den freien Fluss der Fahrzeuge verhindert. Alle drei Einflussgrößen stehen auch miteinander in Beeinflussung, beispielsweise kann eine Person wegen einer lokalen Überlastung im Verkehrsnetz einen anderen Verkehrsträger wie etwa den Zug wählen oder eine andere Route zu seinem Reiseziel wählen. Außerdem kann dadurch auch das Reiseentscheidungsverhalten der Person beeinflusst werden.

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

Die Wissenschaft sieht im Fahren einen Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Sicherheit. Mit Leistungsfähigkeit ist als Ziel die Maximierung der Geschwindigkeit gemeint, Sicherheit beschreibt das Ziel der Kollisionsvermeidung mit der Infrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern. Für das Bewegen eines Fahrzeuges im Straßenverkehr gilt weiterhin, dass insbesondere im Stadtverkehr Fahrsituationen zahlreich und verschieden sind, das Fahrverhalten stark vom Fahrer abhängt und nur schwach strukturiert ist. Außerdem benötigt es für jede Erfassung einer Situation inklusive nötiger Entscheidung eine bestimmte Reaktionszeit des Fahrers und zusätzlich eine sich daran anschließende mechanische Reaktionszeit, also die Zeitspanne, die das technische System zum Ausführen des vom Fahrer gegebenen Befehls benötigt, vgl. [1], S. 35. Trotz der schweren Prognostizierbarkeit von Straßenverkehrsnetzen sind Modellbildung, Analyse und Simulation der Verkehrsflüsse notwendig. Diese Eigenschaften sind prägend für die Verkehrsflusstheorie und als interdisziplinärer Fachbereich werden Modelle, Erkenntnisse und Annahmen unter anderem aus der Physik, aus der Mathematik oder der Informatik entnommen und zur Beschreibung des Straßenverkehrs und seiner Eigenheiten genutzt, vgl. [1], S. 37.

Wie bereits herausgestellt wurde wirkt sich das Verhalten der Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer stark auf den sich daraus ergebenden Verkehr aus. Sollen Verkehrsflüsse als Modell beschrieben werden, kann dabei zwischen zwei verschiedenen Ansätzen gewählt werden: dem mikroskopischen und dem makroskopischen Ansatz. Den Namen nach zu urteilen unterscheiden diese beiden Ansätze die Betrachtungshöhe und der Detailgrad. Während mit dem einen Modellierungsansatz das Gesamtbild betrachtet werden kann, sind mit dem anderen Ansatz Detailansichten möglich und die Beobachtung lokaler Phänomene kann hiermit besser durchgeführt werden. Der mikroskopische Ansatz sieht Verkehrsflüsse als komplexe, dynamische Systeme mit mehreren beteiligten Akteuren. Das System enthält viele Freiheitsgrade, also veränderliche Parameter ohne festen Wert und trotz des räumlich begrenzten Betrachtungsmaßstabes können bestimmte lokale Ereignisse die Entstehung von weiträumig wirkenden Phänomenen begünstigen, wie z.B. eine Engstelle im Verkehrssystem, welche zwar nur lokal besteht, aber durch einen potenziellen Rückstau ein ganzes Verkehrssystem zum Erliegen bringen kann, auch wenn die restliche Verkehrsinfrastruktur für eine höhere Verkehrsbelastung ausgelegt ist, vgl. [1], S. 36. Auf einer makroskopischen Ebene betrachtet ähneln Verkehrsflüsse

physikalischen Strömungen, wie etwa Wasser oder eine andere Flüssigkeit in einer Rohrleitung. Die Dichte der Strömung hängt dabei von der Geschwindigkeit ab. Beiden Modellierungsansätzen können zudem auch Variablen zugeordnet werden, welche Aussage über den Zustand des Modells treffen können. Auf der mikroskopischen Ebene kann jedes Fahrzeug individuell mit Position, Distanz und dynamischen Daten wie Geschwindigkeit und Beschleunigungsrate beschrieben werden. Je nach Fahrzeug unterscheiden sich die Daten. In der makroskopischen Betrachtungsweise von größeren Verkehrsnetzwerken wird die insgesamt anfallende Verkehrssituation durch Variablen wie etwa Dichte, durchschnittlicher Geschwindigkeit und Durchflussrate beschrieben, angelehnt an Theorien und Modelle aus der Strömungsdynamik, vgl. [1], S. 36. Zur Verdeutlichung des Unterschiedes zwischen Makroskopie und Mikroskopie kann die Mesoskopie als Zwischenschritt im veränderten Detaillierungsgrad herangezogen werden. Abstrakt lässt es sich als eine Art „Heranzoomen“ beschreiben.

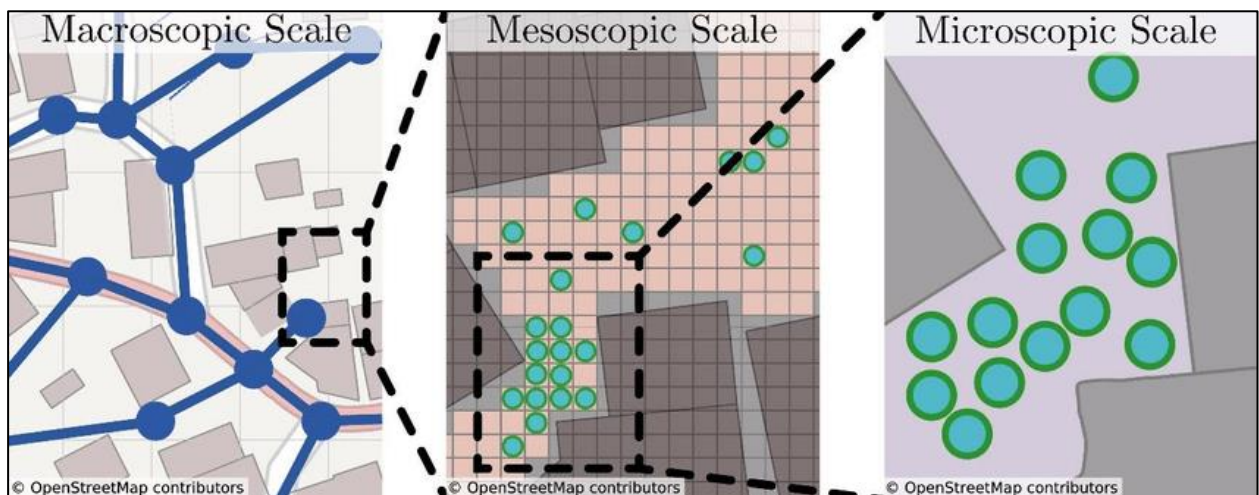


Abbildung 4: Unterscheidung einer makroskopischen, mesoskopischen und mikroskopischen Ansicht.

Wichtige Grundlage zur Bildung von Verkehrsmodellen und Aufstellung von Theorien über den Straßenverkehr ist die Verkehrsmessung, in der Größen wie Geschwindigkeit, Dichte und Abstand zwischen den Fahrzeugen miteinander in Verbindung gesetzt werden. Heutzutage gibt es viele verschiedene Mittel und Wege zur Verkehrsmessung. Es können reale Straßen und Verkehrssituationen beobachtet werden, Laborexperimente können durchgeführt werden, welcher gegenüber Realsituationen leichter reproduzierbar sind und ungewollte Einflüsse begrenzt werden können und

alternativ kann der Verkehrsfluss auch virtuell in Simulatoren beobachtet werden. Dabei werden Simulationsmodelle des Verkehrs verwendet und die Durchführung ist erst seit dem Aufkommen leistungstarker Rechner möglich, vgl. [18], S. 7. Die Verkehrsflusstheorie als gesamter Forschungsbereich erstreckt sich, angefangen von der Messung des Verkehrsflusses und Bestimmung von Variablen zur quantifizierbaren Beschreibung der Autofolgen, über die Modellierung der einzelnen Verkehrsphasen bis hin zu Simulations-Anwendungen und Fahrzeugfolgmodellen, mit denen der Verkehr bis zu einem gewissen Grad vorhersagbar und auch kontrollierbar wird. Alle diese Teilaspekte stehen unter dem grundlegenden Begriff der Verkehrsflusstheorie und sie sollen in den nachfolgenden Kapiteln der wissenschaftlichen Reihenfolge nach erläutert werden. Dies geschieht stets im Hinblick auf das Hauptthema dieser Thesis, dem Fahrzeugfolgmodell im Simulationsprogramm CARLA und eine Einordnung in den Gesamtkontext stellt den Zusammenhang zu dieser Thematik her.

2.4 Beobachtung, Messung und Datenerfassung

Wichtiger Anhaltspunkt zur Bezifferung von Variablen mikroskopischer und makroskopischer Art ist die Beobachtung des Verkehrsflusses und das Zählen von Fahrzeugen. Pionierarbeit auf diesem Gebiet lieferte der US-amerikanische Ingenieur Bruce Greenshields, welcher in den 1930er-Jahren erste Testreihen zur Messung des Verkehrsflusses, der Verkehrsdichte und der Geschwindigkeit durchführte, unter Zuhilfenahme von fotografischer Messmethoden. Er verwendete eine 16 Millimeter Filmkamera, welche angetrieben durch einen Elektromotor in konstanten Zeitabschnitten Fotoaufnahmen erstellte. Das Intervall variierte zwischen 1,5 bis 2 Sekunden und wurde mit Hilfe einer Stoppuhr genau überprüft. Pro Durchgang wurden 40 bis 100 Aufnahmen erstellt und durch den Sekundenzeiger eines Foto-Timers auf den Aufnahmen überprüft, er wurde jedes Mal mit abgelichtet. Zum ordnungsgemäßen Ablauf der Messung musste ein fahrendes Auto in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Fotografien abgebildet sein. Aus diesem Grund war ein Aufnahmefeld erforderlich, dessen Länge doppelt so groß wie die pro Zeitintervall zurückgelegte Strecke war. Zur Vermeidung eines Verwischens des sich bewegenden Fahrzeuges musste die Kamera mindestens 300 Fuß (entspricht circa 91 Metern) von der beobachteten Straße entfernt stehen. Daraus resultierten Aufnahmen von einer Straßenbreite von etwa 125 Fuß (ungefähr 38 Meter). Ein schneller schließender Verschluss in der Kamera verminderte den Effekt noch weiter. Zu Beginn jeder

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

Aufnahme wurde eine Tafel mit wichtigen Informationen wie etwa Datum, Uhrzeit, Zeitintervall und Verschlussöffnungszeit abgelichtet. Zur Bestimmung der Skalierungsdistanz wurden nachträglich vertikale Linien in das Bild eingezeichnet. Im Normalfall hat die gemessene Entfernung zwischen Kamera und Straße in Verbindung mit den Eigenschaften der Videokamera und ihrer korrekten Positionierung im rechten Winkel zur Straße ausgereicht, um die Dimensionen korrekt abbilden zu können. Trotzdem hat Bruce Greenshields in seinen Feldbeobachtungen stets die Distanzen von der Kamera zur Straße und die Entfernungen zwischen auf den Bildern erkennbaren Objekten wie Leitungsmasten oder Zaunpfählen angegeben. Falls Straßenabschnitte ohne Orientierungspunkte beobachtet wurden, legte man ein 100 Fuß (entspricht etwa 30,5 Meter) Maßband entlang der Fahrbahn aus und nach jedem 10 Fuß Abschnitt wurde eine Aufnahme des darüber gehaltenen Markierstabes erstellt, wodurch ein eindeutiger Maßstab für die Aufnahmereihe vorhanden war. Greenshields Annahme bei der Durchführung der Versuchsreihen war eine lineare Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte. Ausgehend von dieser Vermutung und durch Verwendung des folgenden Verhältnisses:

$$\text{Verkehrsfluss} = \text{Verkehrsdichte} * \text{Geschwindigkeit}$$

wird die lineare Funktion zu einer Parabelförmigen mathematischen Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsfluss, vgl. [19], S. 1-4.

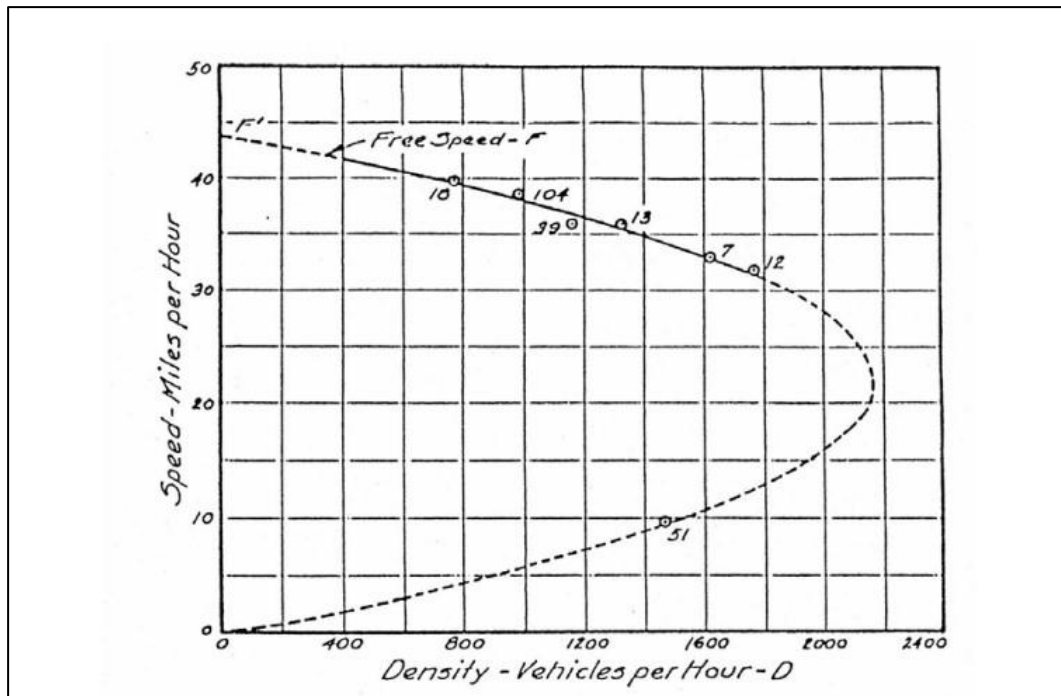


Abbildung 5: Bruce Greenshields Fundamentaldiagramm, in der Gegenüberstellung von Fahrzeuggeschwindigkeit und Verkehrsdichte.

Die Darstellung kann als erstes Fundamentaldiagramm der Verkehrswissenschaften gesehen werden und zeigt charakteristische Eigenheiten des Verkehrsflusses auf. Der größt-mögliche Verkehrsfluss kann bei einer bestimmten Geschwindigkeit erfolgen und darunter und darüber ist ein bestimmter Verkehrsfluss zwei Geschwindigkeiten zugeordnet, was der Charakteristik einer Parabel-Funktion entspricht. Die Arbeit von Bruce Greenshields brachte die heute grundlegende fundamentale Beziehung hervor. Sie stellt einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges und dem räumlichen Abstand zu den anderen Verkehrsteilnehmern her. Greenshields untersuchte ursprünglich nur diesen Zusammenhang, das Verhältnis ist aber auch auf andere Variablen im Straßenverkehr anwendbar, etwa durch die Dichte und den (Verkehrs-)Fluss, vgl. [20], S. 448.

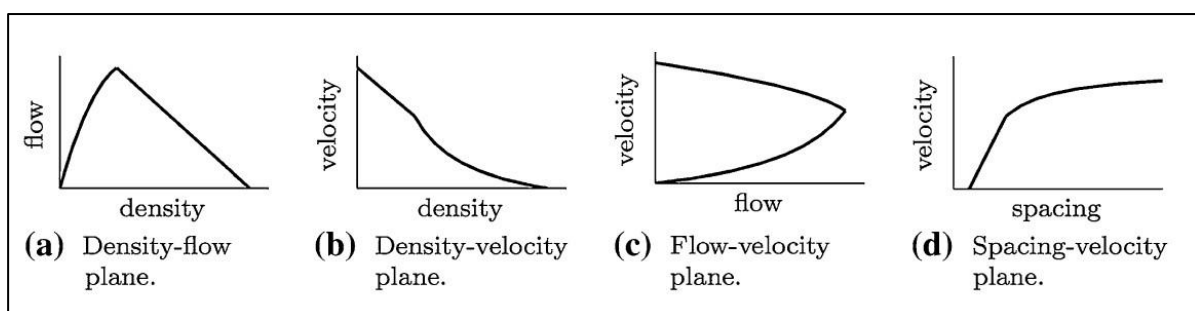


Abbildung 6: Grundsätzliche Zusammenhänge im Straßenverkehr

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

Gemeinsam bilden sie die sogenannten Verkehrsflussmodelle. Seit der Pionierarbeit von Bruce Greenshields werden diese zum Verständnis, zur Beschreibung und zur Vorhersage des Verkehrsflusses zu Rate gezogen. Alle seit den 1930er-Jahren entwickelten Verkehrsflussmodelle haben die fundamentale Beziehung zum Grundsatz. Ein Baummodell verdeutlicht diese entscheidende Gemeinsamkeit aller wissenschaftlich relevanten Modelle und lässt auch die Evolution einiger Modelle aus ihren Vorgängern heraus erkennen, vgl. [20], S. 446.

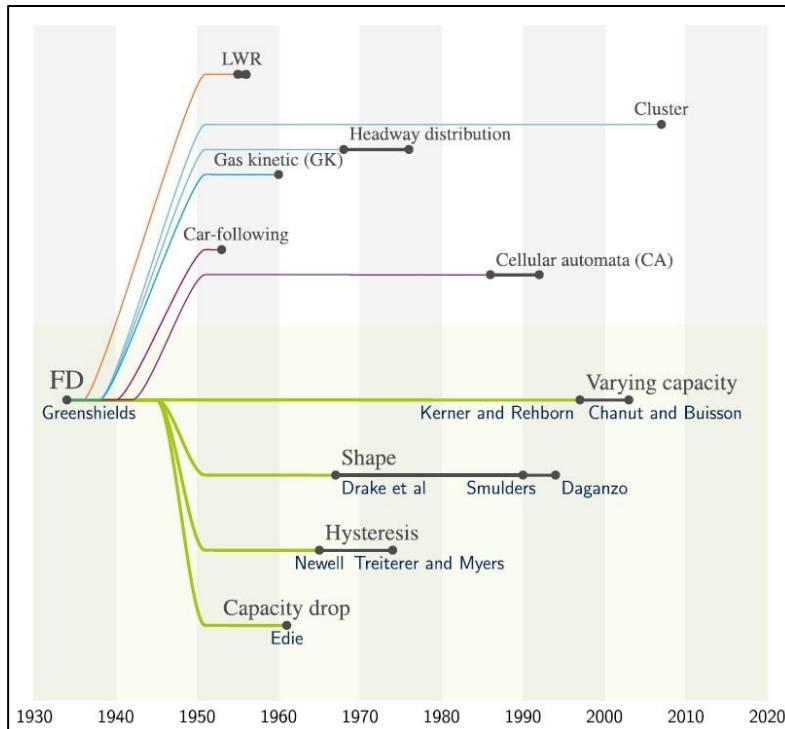


Abbildung 7: Entstehung verschiedener Verkehrsflussmodelle ausgehend von den ersten Erkenntnissen Greenshields

Analog zu den in der Verkehrswissenschaft verwendeten Variablen können auch Verkehrsflussmodelle in eine mikroskopische und eine makroskopische Darstellungsansicht unterteilt werden. Der Unterschied ist bereits bekannt, mikroskopische Verkehrsflussmodelle (Gegenüberstellung Abstand und Geschwindigkeit) stellen das Fahrverhalten eines einzelnen Fahrzeuges dar, makroskopische Modelle (Gegenüberstellung Dichte und Verkehrsfluss bzw. Geschwindigkeit) das Verhalten einer Fahrzeuggruppe und entsprechend bedient sich ein solches Modell auch aggregierten Variablen zur Beschreibung des Kollektives, vgl. [20], S. 446.

Je nach Modell und Verkehrswissenschaftler können die abgeleiteten Zusammenhänge zwischen Verkehrsfluss, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit auch unterschiedliche Formen annehmen und ergeben als graphische Funktionen unterschiedliche Verläufe und Funktionsgleichungen. (S. 449)

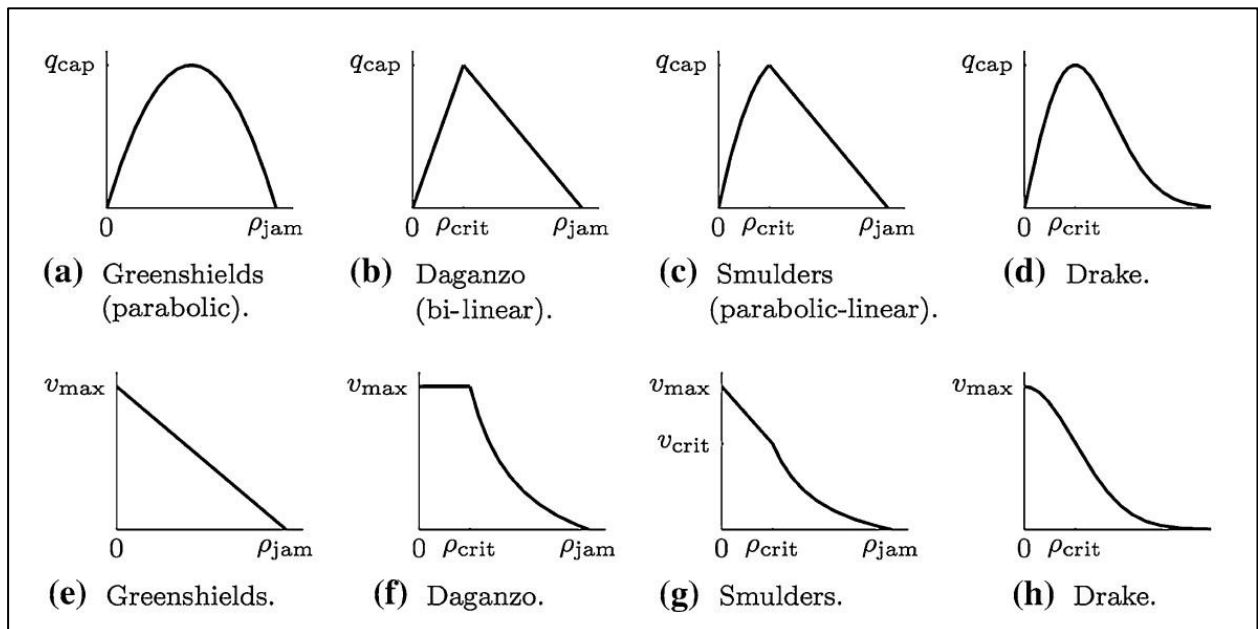


Abbildung 8: Verschiedene Ausprägungen des Fundamentaldiagramms und der fundamentalen Beziehung.

Bei der Erfassung oder Detektion von Fahrzeugen wird zwischen einer Querschnittsdetektion, also der Fahrzeugerkennung auf einem bestimmten Straßenabschnitt und einer Detektion eines gesamten Verkehrsraumes unterschieden. Der technische Fortschritt den 1930er-Jahren brachte neben dieser Frühform der Kamera von Bruce Greenshields noch weitere Werkzeuge für die Verkehrsflussmessung hervor. Außerdem kann nicht nur gemessen werden, sondern auch direkt sogenannte Trajektorien bestimmt werden. Problem beim Verfahren von Greenshields war eine begrenzte Kapazität der Methode. Bei vielen schnell aufeinander folgenden Fahrzeugen hätte die Messung von einer Person alleine nicht mehr bewältigt werden können. Auch bei mehrspurigen Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen wäre das Erfassungssystem an seine Grenzen gestoßen. Das Überführen der Beobachtung mit der Kamera in das Diagramm, also eine mathematisch verwertbare Form, musste von einem Menschen übernommen werden. Einige Jahrzehnte später wurden diesem Problem in Form von Sensoren und Meldern Abhilfe geschaffen. Beispiel dafür ist eine Induktionsschleife, die für eine Querschnittsdetektion eingesetzt werden kann. Mehrere

kombinierte Schleifen können aber auch einen gesamten Verkehrsraum überwachen und Fahrzeugbewegungen messen. Dies funktioniert bei einer Induktionsschleife mittels der Detektion von metallischen Bestandteilen eines Automobils beim Überfahren einer im Boden eingelassenen Erfassungsapparatur. Das sich kurz über der Messeinrichtung befindliche Metall erhöht die Induktivität im Stromkreis und lässt die anliegende Spannung sinken. Daraus erkennt der Computer das Befahren der Schleife durch ein Fahrzeug.

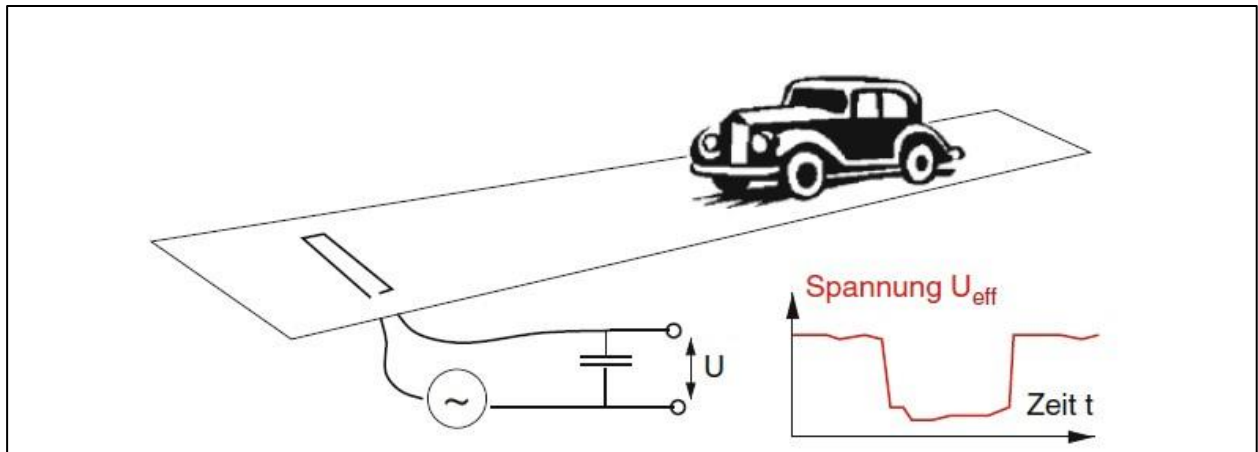


Abbildung 9: Funktionsweise eines Induktionsschleifendetektors. Das Befahren führt zu einem Spannungsabfall und wird als Messsignal registriert.

Eine einzelne Induktionsschleife misst die Anzahl der überquerenden Fahrzeuge in Kombination zu ihrem jeweiligen Zeitpunkt. Die Fahrzeuggeschwindigkeit hingegen kann mit zwei in einem bekannten Abstand zueinander angeordneten Induktionsschleifen bestimmt werden. Mit der gemessenen Überquerungszeit und dem bekannten Abstand kann daraus die momentane Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt werden, vgl. [21], S. 13-14. Alternativ können auch pneumatische Sensoren, also Messverfahren über die Druckdifferenz, Lichtschranken und Drehkreuze zum Einsatz kommen. Bei den bereits erwähnten Trajektorien handelt es sich um die Positionsbeschreibungen der Fahrzeuge über eine bestimmte Zeitspanne. Die Daten erlauben eine direkte Bestimmung der Verkehrsdichte, also das Verhältnis zwischen Verkehrsfluss und gefahrener Durchschnittsgeschwindigkeit. Bei der Messung von Trajektorien kommen auch Kamerasysteme zum Einsatz, welche mit Hilfe spezieller Softwareprogramme auf Fahrzeugbewegungen untersucht werden. Mit GPS-Ortungssystemen ausgestattete Fahrzeuge können auch individuelle Trajektorie-Daten sammeln und anonymisiert an die Hersteller übermitteln, vgl. [18], S. 6. Einzelne

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

Fahrzeuge können weiterhin auch sogenannte Floating-Car-Daten (FC-Daten) erfassen. Sie fahren im Verkehrsstrom mit und zeichnen dabei ihre Geschwindigkeit in Verbindung zu ihrem Standort auf, vgl. [21], S. 7. Wird dies zu verschiedenen Tageszeiten auf der gleichen Strecke mehrmals durchgeführt, erhält man ein aussagekräftiges Bild über die Verkehrsbelastung des Straßenabschnitts, was die Grundlage für Verbesserungsmaßnahmen bildet. Alle aufgezeigten Messverfahren weisen Vor- und Nachteile auf, wobei es dabei häufig um die Abwägung Kostenaufwand zu Nutzen der Messdaten geht.

Je nach eingesetztem Messverfahren können in einer Verkehrssituation im Straßenverkehr unterschiedliche Werte ermittelt werden, welche in ihrer Gesamtheit die Eigenschaften des Verkehrs charakterisieren. Diese Werte werden auch als Variablen bezeichnet und je nach Detailgrad der untersuchten Situation werden mikroskopische und makroskopische Variablen unterschieden. Mikroskopische Variablen beschreiben einzelne Fahrzeuge mit individuellen Eigenschaften, etwa die Position, die Geschwindigkeit oder die Abstände zu vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeugen, vgl. [18], S. 10. Diese mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten können über feste Zeitintervalle zu Mittelwerten zusammengeführt werden und ergeben die makroskopischen Variablen. Beispiele sind Dichte, mittlere Geschwindigkeit sowie der Fluss auf einem Raumquerschnitt. Ihre Werte beziehen sich immer auf eine Fläche oder eine Linie, vgl. [21], S. 15. Im alltäglichen Verkehrsfluss dargestellt sehen die mikroskopischen und makroskopischen Variablen folgendermaßen aus:

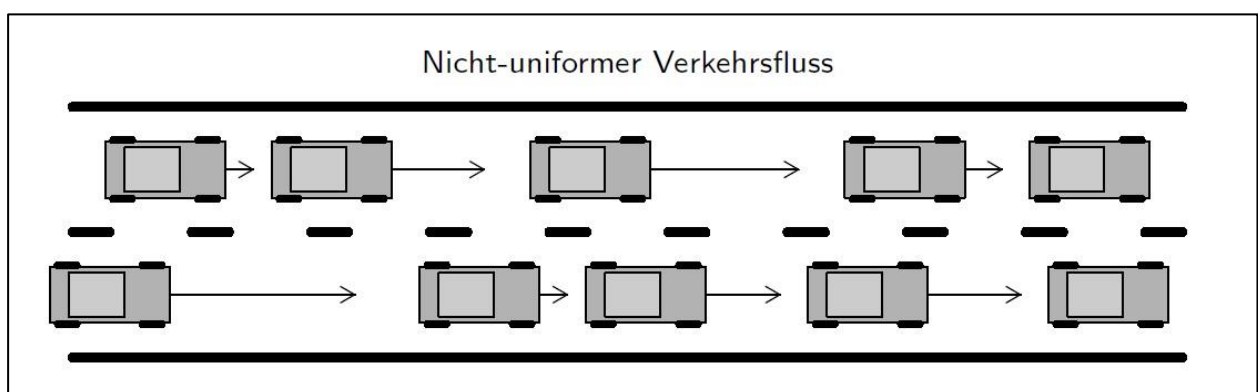


Abbildung 10: Ein nicht-uniformer Verkehrsfluss, angelehnt an eine Straßenrealität.

In einem uniformen Verkehrsfluss hätten die Fahrzeuge die gleiche Geschwindigkeit und den gleichen Abstand zueinander. Der hier abgebildete Verkehrsfluss entspricht eher der Realität und es sind unterschiedliche Geschwindigkeiten und damit auch

unterschiedliche Fahrzeugabstände zu finden. Die Darstellung gibt sowohl die mikroskopischen, als auch die makroskopischen Verkehrsgrößen wieder. Position, Geschwindigkeit, Fahrzeuglänge und räumlicher Abstand eines einzelnen Fahrzeuges sind aus der Darstellung leicht zu entnehmen. Für die Bestimmung von makroskopischen Größen wie etwa eine Durchflussrate, eine Dichte oder eine mittlere Zeitgeschwindigkeit sind weitergehende mathematische Verfahren erforderlich.

Auswahl wichtiger Variablen	
mikroskopisch	makroskopisch
Position x	Dichte ρ
Geschwindigkeit v	Durchflussrate J
Zeitlicher Abstand ω	Bulk-Geschwindigkeit V

Tabelle 1: Auswahl mikroskopischer und makroskopischer Variablen zur Beschreibung eines Verkehrsflusses

Die Dichte dieses nicht-uniformen Verkehrsflusses wird auf eine bestimmte Zeitspanne hin als die Anzahl der Fahrzeuge pro Längeneinheit gesehen, die Durchflussrate als eine gezählte Fahrzeuganzahl, welche einen bestimmten Messpunkt durchfahren hat, auch hier auf eine Zeiteinheit bezogen, vgl. [18], S. 20. Diese Werte können für jede Fahrspur einzeln oder für mehrspurige Straßen und Autobahnen auch insgesamt bestimmt werden und ermöglichen so eine Vergleichbarkeit von verschiedenen Verkehrswegen und ihren Belastungszahlen, aber auch Kapazitätswerten.

2.5 Verkehrsflussmodelle und Phänomene im Straßenverkehr

Im alltäglichen Straßenverkehr können Fundamental- und Verkehrsflussdiagramme Aussage über die Belastungsfähigkeit einer Straße treffen. Beispielsweise kann für mehrere innerstädtische Straßen (Annahme hier: Größe und Spuranzahl vergleichbar) ein zusammengefasstes, makroskopisches Fundamentaldiagramm erstellt werden. Damit kann die Gesamtkapazität des Straßensystems ermittelt werden und daraus abgeleitet auch maßregelnd in das Verkehrsgeschehen eingreifen zu können. In einem Innenstadtbereich würde sich beispielsweise eine Zufahrtsbeschränkung anbieten. Auch eine Bewertung bereits bestehender Verkehrsmanagementsysteme kann hiermit durchgeführt werden. Makroskopisch in diesem Fall, weil der Zusammenhang von Verkehrsfluss und Verkehrsdichte gegenüber gestellt wird.

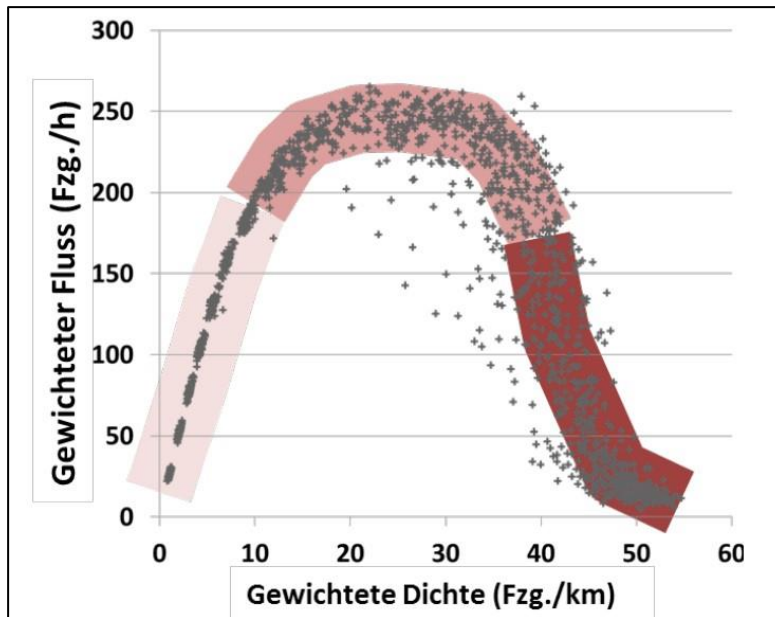


Abbildung 11: Makroskopisches Fundamentaldiagramm der Innenstadt von Zürich.

Anhand des Diagramms lassen sich drei verschiedene Phasen im Verkehrsgeschehen ausmachen: freier Fluss, gesättigter Verkehr und Stau. Im freien Verkehrsfluss können die Fahrzeuge mit der von ihnen gewählten Wunschgeschwindigkeit fahren. Die Verkehrsdichte ist ausreichend gering und daher die Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen vernachlässigbar klein. Mit zunehmender Fahrzeugzahl auf der Straße steigt die Durchflussrate annähernd linear an. Eine erhöhte Anzahl von Fahrzeugen führt zwangsläufig aber auch zu einer erhöhten Rate von Fahrzeuginteraktionen, beispielsweise Spurwechsel und Abbremsen zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsabstands zum Vordermann. Dies hat eine Abnahme der Fahrzeuggeschwindigkeit im freien Verkehr zur Folge und somit auch eine Verringerung der Durchflussrate. Bei einer bestimmten Fahrzeugdichte erreicht der Fluss sein Maximum. Ab diesem Punkt stören sich die Verkehrsteilnehmer gegenseitig in ihren Fahrmanövern derartig stark, dass die Flussrate erstmals abnimmt. Mit zunehmender Fahrzeugdichte verstärkt sich dieses Phänomen noch, bis der Verkehr schließlich vollständig zum Erliegen kommt, es hat sich ein Stau gebildet, vgl. [22], S. 2. Jetzt liegt die Durchflussrate bei annähernd 0. Der Scheitelpunkt wird auch als kritische Dichte bezeichnet. Bei einer hohen Verkehrsbelastung einer Straße mit entsprechend geringem Abstand zwischen den Fahrzeugen kann bereits ein stärkeres Bremsmanöver oder ein knapp bemessenes Einscheren auf eine andere Fahrspur eine Staubildung verursachen, ohne dass der Verursacher etwas davon mitbekommt.

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

In dem hier beschriebenen, überlasteten Verkehrssystem können verschiedene Staumuster und systemspezifische Eigenheiten beobachtet werden, welche als Phänomene der Selbstorganisation zu sehen sind und sich aus der Interaktion der einzelnen Verkehrsteilnehmer untereinander ergeben, vgl. [23], S. 35. Der Gesamtbegriff dazu ist das überlastete Verkehrssystem. In Abtrennung zum freien Verkehrsfluss mit individueller Geschwindigkeitswahl zeichnet sich dieser Systemzustand durch zwei verschiedene Verkehrsfronten am räumlichen Anfang und Ende des überlasteten Bereichs aus. Beim Einfahren in diesen Bereich kommen die Fahrzeuge aus einem freien Fluss und müssen ihre Geschwindigkeit reduzieren, beim Verlassen des überlasteten Bereiches kann wieder beschleunigt werden, bis der Systemzustand des freien Flusses wieder erreicht ist. Diese zwei grundlegenden Systemzustände können unterschieden werden: freier Fluss und überlastetes Verkehrssystem. Eine häufig auftretende Ausprägung des überlasteten Verkehrssystems ist der sogenannte Wanderstau. Dieser bewegt sich in Richtung des Verkehrsflusses und zeichnet sich durch eine niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit in Verbindung mit einer hohen Fahrzeugdichte aus. Die zuvor beschriebenen Verkehrsfronten am Anfang und Ende des Staus sind auch hier zu finden und zwingen die Autofahrer zum Abbremsen und anschließendem Beschleunigen, vgl. [24], S. 14-15. In der Verkehrswissenschaft werden diese Stauwellen auch als Verdünnungswelle und Schockwelle bezeichnet. Die Schockwelle beschreibt den Zustandswechsel vom freien Fluss in den gestauten Systemzustand, die Verdünnungswelle entsprechend den Wechsel vom Stau zurück in den freien Fluss, vgl. [23], S. 24. Innerhalb der beiden Staufronten kann es im Vergleich zum restlichen Verkehrsbereich zu abrupten Geschwindigkeits- und Dichteänderung führen. Diese Art von Stau kann meist auf ein ungünstiges Fahrmanöver bei hohen Verkehrsdichten zurückgeführt werden, schon ein einzelner Autofahrer kann ausreichend sein, um einen Zusammenbruch des Systems herbeizuführen. Interessant anzumerken ist hier die Tatsache, dass eine solche Art von Verkehrsstau ohne eine Änderung der Fahrbahnapazität auftreten kann, also ohne ein Verringerung der Spuranzahl oder ähnliches. Ein geläufiger Ausdruck für einen solchen Wanderstau ist eine Stop-and-Go Welle, welche wie bereits beschrieben auch ohne direkt ersichtlichen Grund auftreten können (Phantom-Stau). Sie treten automatisch bei hohen Fahrzeugdichten mit instabilen Zuständen auf, vgl. [23], S. 28. Ihre Ursache ist größtenteils in der menschlichen Fahrweise gepaart mit hohem Verkehrsaufkommen zu

finden. Ein zu dichtes Auffahren auf das vorausfahrende Fahrzeug führt zu allgemein und unerwartet auftretenden, abrupten Abbremsmanövern, welche sich bei mehreren hintereinander fahrenden Fahrzeugen entgegen der Fahrtrichtung verstärkt, also der zweite Autofahrer stärker bremsen muss als der erste und immer so weiter. In Kombination dazu ist noch das zu schnelle Aufschließen auf das vorausfahrende Fahrzeug und ein häufiger Spurwechsel zu nennen. Bei einer hohen Verkehrsdichte führt ein Spurwechsel automatisch zu einer Verringerung oder sogar Unterschreitung des vom Menschen gewählten Sicherheitsabstandes und zwingt das hintere Fahrzeug zum Bremsen, was wiederum zu stärkeren Bremsmanövern führen kann, vgl. [25], S. 3. Dem Leser dürfte dieser Effekt auf der Autobahn schon begegnet sein. Folgen dieses Stauphänomens sind schlechterer Fahrkomfort, niedrigeres Sicherheitsniveau sowie ein erhöhter Schadstoffausstoß durch eine ungleichmäßige Fahrweise. Mögliche Gegenmaßnahmen könnten eine Reduzierung der Durchschnittsgeschwindigkeit und eine Vergrößerung des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug sein. Auch ein ACC-System kann in dieser Situation Abhilfe schaffen.

Stop-and-Go Wellen können allerdings auch durch ein Hindernis auf der Straße auftreten, welches Einfluss auf die Fahrzeugkapazität hat. Neben einer Ampelanlage kann dies auch z.B. ein Engpass bzw. Reißverschluss sein, also eine Spur fädelt in die danebenliegende ein. Dieser Effekt wird Verkehrszusammenbruch bzw. Capacity drop genannt. Dieser Wechsel des Systemzustands kann oftmals sehr abrupt ablaufen und auch zu Auffahrunfällen führen. Bei einer Fahrbahnverengung von drei auf zwei Fahrspuren ist der Verkehrsfluss aus dem Stau kleiner als die Kapazität der zuvor dreispurigen Straße. Bleibt nun der Zufluss in die Verengung gleichbleibend hoch, ist der entstehende Stau von Stabilität und Dauerhaftigkeit geprägt, vgl. [24], S. 16-17. Diese Charakteristik wird auch als Flussreduktion bezeichnet. Ein weiteres, im realen Straßen- bzw. Autobahnverkehr beobachtetes Phänomen ist die sogenannte Hysterese. Sie besagt, dass ein Verkehrssystem nach dem Zusammenbruch durch eine zu hohe Verkehrsdichte und anschließender Entspannung einen geringeren Verkehrsfluss hat als vor dem Zusammenbruch, trotz niedrigerer Straßen- bzw. Autobahnbelegung. Außerdem ist die kritische Verkehrsdichte bei Entstehung und Auflösung von Stop-and-Go nicht identisch. Sie ist beim Staueintritt höher als bei der Auflösung, vgl. [24], S. 17. Die potenziellen Gründe dafür liegen wohl in der menschlichen Verhaltensweise am Steuer beziehungsweise auch an den technischen Grenzen eines Automobils. Es ist

2 Einführung in die Verkehrswissenschaft

technisch in der Lage, schneller abzubremsen als zu beschleunigen. Die Autofahrer sind nicht in der Lage, den genauen Dichtezeitpunkt kurz vor dem Zusammenbruch des Verkehrsflusses zu bestimmen und erhöhen so unwissentlich immer weiter die Fahrzeugdichte, bis es schließlich nicht mehr höher geht und eine Bremswelle durch den Fahrzeugstrom rollt. Ist der Stau nun in Begriff sich aufzulösen und die Verkehrsdichte nähert sich der kritischen Dichte von oben aus an, beschleunigen die Verkehrsteilnehmer meist nur zögerlich, in Erwartung einer weiteren Stop-and-Go Welle. Sie können nicht wissen, was vor ihnen liegt und auch nicht den genauen Dichtezeitpunkt zum gemeinsamen Beschleunigen abpassen. Außerdem können durchschnittliche Automobile kurz gesagt nicht so schnell beschleunigen wie sie in der Lage sind zu bremsen.

Trotz oder eben gerade wegen dieser Vielseitigkeit von Stau und den verschiedenen Möglichkeiten des Auftretens eines Staus sollte der Vermeidung hohe Beachtung beigemessen werden. Dazu stehen auch eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Das dritte Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen des autonomen Fahrens. Für die Analyse des Einflusses einer Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage in einer Verkehrssituation ist es wichtig zu wissen, wie ein solches ACC-System funktioniert und welche Stellung es im automatisierten und vernetzten Fahren einnimmt.

3.1 Einführung

Eine der besonders hervorstechenden Fähigkeiten des Menschen sind das kombinierte Wahrnehmen, Erkennen und Verstehen seiner Umgebung binnen kürzester Zeit. Die Augen können als hochauflösende Kameras in beliebigen Umgebungen unter anspruchsvollen Lichtbedingungen unzählige Gegenstände, Situationen und Anforderungen erkennen, die Informationen über schnell leitende Datenverbindungen an das Gehirn weiterleiten und dieses kann als Archiv, Schaltzentrale und kreativem Zentrum des menschlichen Körpers alle übermittelten Informationen verarbeiten und davon abgeleitete Schlüsse ziehen, welche letztendlich als exakte Anweisungen an unsere motorischen Einheiten weitergegeben werden. Der Mensch ist in der Lage sich anzupassen und bestimmte Verhaltensweisen zu erlernen und situationsbedingt zu handeln, also intelligent zu agieren, vgl. [26], S. 1-2. Auf diese Weise ist es dem Menschen gelungen, die heute bekannte moderne und technologisch bestimmte Zivilisation aufzubauen. Dazu gehören auch Automaten und Maschinen in zahlreichen Formen und Arten. Allerdings sind diese Maschinen, Programme und Abläufe nur so „intelligent“, wie sie vom Erschaffer konstruiert worden sind. Sie können nicht etwa selbständig Probleme lösen oder situationsbedingt handeln, sondern müssen dafür speziell konfiguriert und geschult werden. Im übertragenen Sinne gilt dies auch für Automobile, eine Maschine für die bequeme Fortbewegung des Menschen. Sitzt keine Fahrerin oder kein Fahrer am Steuer, muss das Auto sich selbstständig fortbewegen und am Straßenverkehr teilnehmen. Seit der Erfindung des Automobils vor etwa 150 Jahren wurden mit der Zeit immer mehr Systeme und Einrichtungen zur Unterstützung des Fahrers entwickelt und serienmäßig implementiert. Dazu gehören unter anderem das Antiblockiersystem (ABS), welches bereits in den 1930er-Jahren von Robert Bosch zum Patent angemeldet wurde, das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) und im Zeitalter der Computer leistungsstarke Navigationssysteme. Die ganzheitliche

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Fahrzeugautomatisierung ist schließlich innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte stark vorangeschritten. Ein mehrmals Anfang der 2000er-Jahre abgehaltenes Rennen mit unbemannten Fahrzeugen durch die kalifornische Wüste zeigte einen Trend der stetigen Erhöhung der Fahrzeuganzahl, welche das Rennen erfolgreich beenden konnten. Im Jahr 2010 gelang der technischen Universität Braunschweig die Absolvierung einer etwa 2,5 Kilometer langen Strecke mit einem automatisierten Fahrzeug eine Bewährungsprobe auf öffentlichen Straßen und bereits sieben Jahre später fuhren Taxis ohne Fahrer durch einen Vorort der US-amerikanischen Stadt Arizona. Trotz immer komplizierter werdender Systeme zur Umfelderkennung und Steuerung der Fahrzeuge war die Entwicklung rasant und hält bis heute an. Anhand eines Zahlenbeispiels kann der betriebene Aufwand für diese komplexen Systeme quantifiziert werden, denn während das Langstreckenflugzeug Boeing 787 etwa 6,5 Millionen Zeilen Programmcode in sich trägt, beherbergen moderne Fahrzeuge in ihren Steuerungseinheiten ca. 100 Millionen Zeilen Code, vgl. [27], S. 1-2 und das Flugzeug ist dazu in der Lage, durch Regelung von Anstellwinkel und Triebwerksschub im dreidimensionalen Raum der Flugroute zu folgen und bis zu einem gewissen Grad „autonom“ zu fliegen, vgl. [28].

Eine der Hauptmotivationen für die Entwicklung von Assistenzsystemen und letztendlich auch autonomem Fahren ist der Anteil menschlicher Fehler an Unfallursachen. Untersuchungen in diesem Bereich haben ergeben, dass etwa 90 Prozent aller Unfälle im Straßenverkehr auf Fahrfehler zurückgehen, die größten Anteile entfallen dabei auf Erkennungsfehler (41 Prozent) sowie Entscheidungsfehler (33 Prozent). Straßensysteme könnten durch verringerte Reaktionszeiten und verkürzte Abstände effizienter genutzt werden und bei vollständig autonomen Fahren erhalten auch Personen ohne Fahrerlaubnis (alte Menschen, körperlich oder geistige Personen) Zugang zu Mobilität und die Fahrzeit kann für andere Dinge genutzt werden und wird nicht „verschwendet“. In dicht besiedelten Gebieten können fahrerlose Fortbewegungsmittel gemeinsam genutzt werden und bei Bedarf einfach vor die Haustür bestellt werden. Weiterhin führt das sogenannte geglättete Fahren, also ein gleichmäßiges Bremsen und Beschleunigen, zu einem verminderten Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß, da der Verkehr homogen abläuft und seltener stockt, vgl. [29], S. 6.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Trotz der zahlreichen Vorteile des Einsatzes von automatisiertem und vernetztem Fahren bringt die Technologie auch Nachteile mit sich. Einer davon ist die sogenannte Roboterisierung, das Ersetzen menschlicher Arbeitskräfte in der Personen- und Güterbeförderung und den davon abhängigen Wirtschaftszweigen. Konkret sind dies vor allem Stellen in der Personenbeförderungsbranche, von denen in den Vereinigten Staaten ungefähr 250.000 wegfallen würden. Unklar ist, ob diese Beschäftigten an anderer Stelle für andere Berufe eingesetzt werden können, wobei auch Ausbildung und Berufsqualifikation entscheidende Rollen spielen. Neben den Menschen in der Personenbeförderungsbranche sind auch Personen in der Berufskraftfahrt Leidtragende dieser technischen Revolution, vgl. [30], S. 40. Lenk- und Ruhezeiten sind in Deutschland rechtlich festgelegt und dürfen nicht überschritten werden. Die regelmäßige Arbeitszeit ist pro Tag auf 9 Stunden begrenzt und in einer Woche darf maximal 48 Stunden gearbeitet werden, durch Ausnahmeregelungen sind über kürzere Zeiträume auch 10 Stunden pro Tag und 60 Stunden in der Woche Lenkzeit möglich, vgl. [31]. Damit sollen Aufmerksamkeit und Reaktionsvermögen des Kraftfahrers sichergestellt werden. Ein automatisierter und vernetzter LKW braucht hingegen keine Ruhepausen und kann theoretisch rund um die Uhr an sieben Tagen in der Woche durchgehend fahren. Würden viele Kraftfahrerstellen durch automatischen Betrieb ersetzt werden, hätte dies weiterhin auch Auswirkungen auf die für die Fahrer ausgerichteten Raststätten, Tankstellen und Beherbergungsbetriebe. Die Kosten eines autonom fahrenden Autos oder eben Lastkraftwagens liegen in der Anfangsphase deutlich über denen eines vergleichbaren, teilautomatisierten Fahrzeuges, denn logischerweise müssen Hersteller für die Entwicklung, Erprobung und Produktion von AutoPilot-Systemen finanzielle Mittel aufbringen und diese Investition durch den Verkauf der Systeme refinanzieren, vgl. [30], S. 42-43. Im Laufe der Zeit werden diese von den Herstellern aufgerufenen Preise durch größere Produktionskapazitäten und gemeinsame Nutzung von Automatisierungstechnologien aber sinken. Ein weiterer Kritikpunkt an dieser hohen Technologiesierung von Automobilen ist der Datenschutz. Fahrerassistenzsysteme mit hohem Automatisierungsgrad erzeugen große Mengen personenbezogener, sensibler Daten über Fahrweise, Fahrwege und Standorte eines Fahrzeugs. Dazu kommen noch Sensordaten der Umfelderkennung mit Gesichtern und unter Umständen auch privaten Grundstücken. Durch die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander und mit ihrer Umgebung ist auch ein Zugriff von außen auf

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

das System möglich. Hersteller und Gesetzgeber müssen in diesen Belangen den genauen Rahmen im Umgang diesen Daten festlegen und dabei ein transparentes Vorgehen ermöglichen, vgl. [30], S. 46-47. Nicht zuletzt geht es einigen Autofahrern auch um den Fahrspaß und das Gefühl von Unabhängigkeit und Freiheit. Dieses Gefühl kann durch das autonome Fahren mit geringeren Geschwindigkeiten und Beschleunigungswerten schnell verloren gehen, kann aber durch den Einbau umfangreiche Unterhaltungs- und Beschäftigungsangebote kompensiert werden.



Abbildung 12: Stilisierte Darstellung des autonomen Fahrens in der Zukunft

Zukünftige Herausforderung bei der Etablierung des autonomen Fahrens wird vor allem die Akzeptanzerhöhung in der Gesellschaft sein. Den uns heute bekannten Autofahrer, der bestimmt wie schnell man fährt und auf welchem Weg man zum Reiseziel kommt, wird es in einigen Jahrzehnten wohl nicht mehr geben, er wird zum Fahrgast und Zuschauer degradiert und hat keinen Einfluss mehr auf das Verkehrsgeschehen, vgl. [30], S. 69. Gerade bei einer neu aufkommenden Technologie ist das Misstrauen ihr gegenüber naturgemäß oft sehr hoch und kann nur durch wissenschaftliche Aufklärung und Bewährung in Realsituationen verbessert werden. Dabei kann auch eine finanzielle Unterstützung beim Kauf eines solchen Automobils helfen. In Bezug auf Haftungsfragen

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

bei Schäden verursacht von autonomen Fahrzeugen wird rechtliches Neuland betreten und diese Fragen sind bis heute weitestgehend unbeantwortet. Das Wiener Übereinkommen von 1968 hat für Deutschland und die Europäische Union festgelegt, dass jedes sich in Bewegung befindliche Fahrzeug einen Fahrzeugführer bzw. Fahrer haben muss, um eine durchgehende Beherrschbarkeit des Fahrzeuges in jeder Verkehrslage garantieren zu können. Eine Änderung des Übereinkommens von 2014 erlaubt zumindest den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen, welche aber einschlägigen technischen Regelungen entsprechen und ein Eingreifen des Fahrzeugführers zu jeder Zeit garantieren müssen. Ein dauerhaftes Entfernen des Fahrers von den Steuerungsmechanismen eines Automobils ist bis dato noch nicht möglich, vgl. [32]. Beim automatisierten und vernetzten Fahren nicht außer Acht zu lassen ist zudem die grundlegende Entscheidungsethik in Extremsituationen. Berühmtes Beispiel ist dabei die Entscheidung zwischen dem Tod verschiedener Menschen. Eine Maschine verfolgt bei seinen Handlungen keiner bestimmter Ethik oder Entscheidungsphilosophie, sondern handelt stets nach den ihr auferlegten Programmabfolgen und Algorithmen, vgl. [33]. Auch dieser Sachverhalt muss im rechtlichen Rahmen Beachtung finden und von den Automobilkonzernen aufgegriffen werden.

3.2 Funktionsweise

Grundsätzlich ist das autonome Fahren in sechs verschiedenen Stufen eingeteilt, in denen der Automatisierungsgrad von Level 0 (keine Automation) bis hin zu Level 5 (vollständige Automatisierung) immer weiter zunimmt und dem Fahrer bzw. der Fahrerin fortwährend Fahraufgaben abgenommen werden oder sie zumindest bei der Erfüllung unterstützt werden. Die gemeinnützige Organisation SAE International, welche sich mit dem Fortschritt der Mobilitätstechnologie beschäftigt, hat zu Zwecken der Übersichtlichkeit und Normierung eine Abstufung des autonomen Fahrens in Form von fünf unterschiedlichen Level erstellt:

Automatisierungsstufe 0: Es sind keine technischen Assistenzsysteme im Fahrzeug verbaut, mechanische wie etwa das Antiblockiersystem können hingegen vorhanden sein. Der Fahrer nimmt über das Zusammenspiel von Lenkung, Gas und Bremse nach bestem Wissen und Gewissen am Straßenverkehr teil.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Automatisierungsstufe 1: Der Autofahrer hat zu jedem Zeitpunkt der Fahrt die vollständige Kontrolle über sein Fahrzeug und muss das Verkehrsgeschehen um das Fahrzeug herum stets im Blick behalten. Die einzige Rückfallebene im Fehlerfall stellt der Fahrer selbst dar. Assistenzsysteme wie etwa ein Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage, auch automatischer Abstandsregeltempomat genannt, oder ein Spurhalteassistent unterstützen den Fahrer und sollen die Sicherheit erhöhen, erfordern aber eine ständige Überwachung. In dieser Automatisierungsstufe übernehmen Mensch und System die ununterbrochene Längs- und Quersteuerung des Fahrzeugs.

Automatisierungsstufe 2: In der Verkehrswissenschaft auch als Teilautomatisiertes Fahren bezeichnet. Ab dieser Stufe ist das System in bestimmten Fahrsituationen für die Längs- und Quersteuerung verantwortlich, der Fahrer fungiert als eine Rückfallebene im Fehlerfall oder bei Systemstörungen. Dafür muss das Verkehrsgeschehen jederzeit im Blick behalten werden, darf aber nach Aufforderung der Assistenzsysteme die Hände vom Lenkrad nehmen. Beispiele für Stufe 2 sind Überholassistent und automatisches Einparken.

Automatisierungsstufe 3: Diese Stufe markiert den Beginn der selbstständigen Absolvierung definierter Fahraufgaben ohne die menschliche Einflussnahme oder Kontrollfunktion. Diese kann vom System aber durch eine Warnton oder vergleichbare Signaleinrichtung angefordert werden, in diesem Fall ist das Steuer umgehend zu übernehmen. Aber abseits davon darf der Fahrer während der Fahrt sogar Zeitung lesen und sich vollkommen von der Straße abwenden.

Automatisierungsstufe 4: Das vollautomatisierte Fahren. Ein schnelles Eingreifen des Fahrzeugführenden darf nicht mehr erwartet werden, die gesamte Fahraufgabe wird vom System übernommen. In dieser Zeit wird der Fahrer zum Beifahrer. Die Anwendbarkeit dieser Stufe der Automatisierung ist allerdings auf bestimmte Fahrsituationen wie Parkhaus oder auf der Autobahn beschränkt, also auf Verkehrssituationen, die von der Anzahl der sicherheitsgefährdenden Unbekannten her überschaubar sind. Werden Grenzen dieser Situationen erreicht und der Fahrer ist nicht in der Lage zu übernehmen, manövriert das Fahrzeug sich selbsttätig in einen sicheren Zustand, indem beispielsweise auf einem Parkplatz Halt gemacht wird. Theoretisch muss innerhalb dieser Situationen auch kein Fahrer mehr im Auto sein.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Automatisierungsstufe 5: Der höchstmögliche Grad der Fahrzeugautomatisierung, das vollständig autonome Fahren. Dauerhaft und bedingungslos erfüllt das Automobil die Fahraufgabe, selbst komplexe Situationen im Stadtverkehr im Umgang mit Fußgängern und Fahrradfahrern. Im Normalfall gibt es keinen Fahrer mehr und die Fahraufgabe kann nicht mehr übergeben werden. Allerdings ist das manuelle Steuern des Fahrzeuges im Notfall noch möglich, aber normalerweise nicht vorgesehen.

Vgl. [34], S. 25-26 + 28-29 sowie [35].

Das Stufensystem in einer kompakten Übersicht:

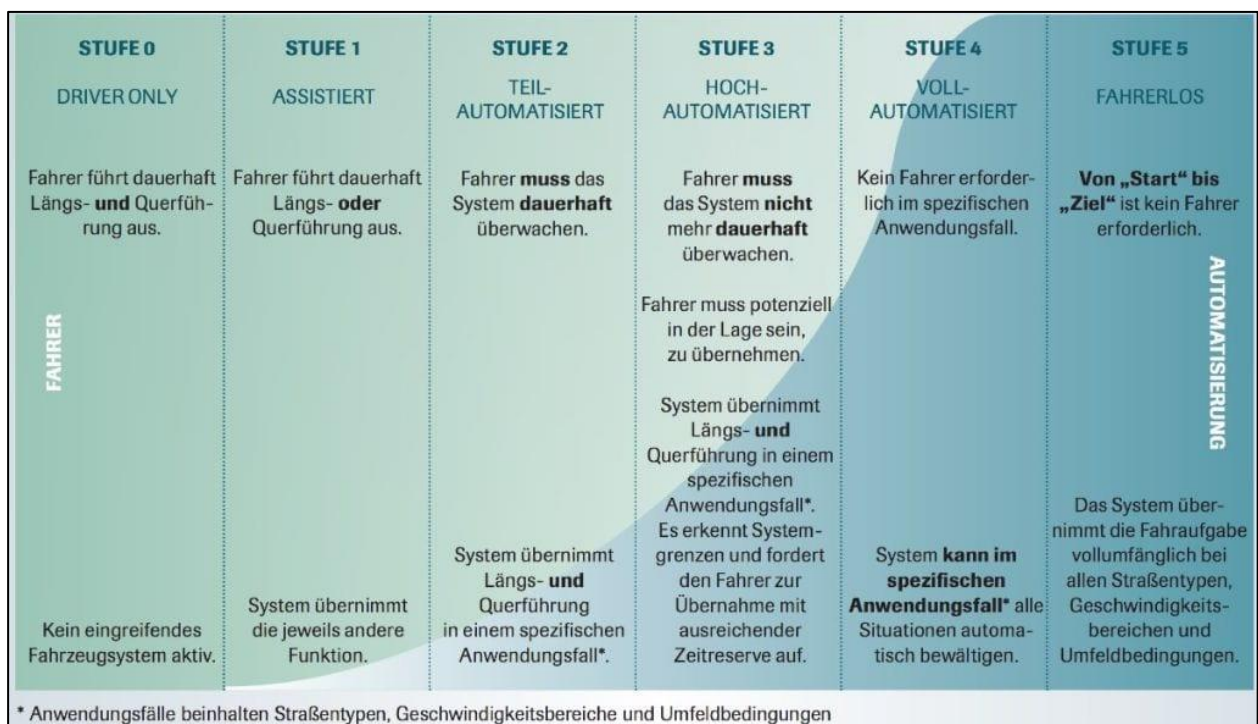


Abbildung 13: Automatisierungsstufen im System Fahrzeug übersichtlich dargestellt.

Das Stufensystem soll einer sinnvollen Einteilung der Fahrzeugautomation dienen und dem Gesetzgeber eine schrittweise Überführung in die Straßengesetzgebung ermöglichen. Stand September 2022 ist der Einsatz des hochautomatisierten Fahrens (Level 3) für bestimmte Fahrsituationen freigegeben. Aktivierungen des Assistenzsystems werden in einem Datenspeicher erfasst und zur Aufklärung möglicher Haftungsfragen bei Unfällen herangezogen. Zusätzlich zur rechtlichen Freigabe durch den deutschen Staat existiert seit Anfang des Jahres 2021 eine Bauart-Vorschrift für einen Autobahn-Staupiloten, eine für das Level 3 Fahren zugelassene Verkehrssituation, vgl. [36]. Als weltweit erster Hersteller hat Mercedes Benz eine

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Zulassung für den Verkauf dieses Systems erhalten und seit der ersten Jahreshälfte 2022 kann die S-Klasse sowie das EQS Modell mit dem sogenannten Drive Piloten als Sonderausstattung ausgerüstet werden, ist also zunächst auf die hochpreisigen Oberklasse-Modelle beschränkt. Kunden müssen für das Assistenzsystem knapp 6.000 bzw. 8.800 Euro bezahlen, vgl. [37]. Für den Einsatz des vollautomatisierten bzw. autonomen Fahrens wurden bereits erste rechtliche Weichen gestellt. Ein Gesetzentwurf, welcher sich mit Änderungen im Straßenverkehrsgesetz, sowie im Pflichtversicherungsgesetz befasst, wurde vom deutschen Bundestag am 20. Mai 2021 beschlossen, vgl. [38] und ein knappes Jahr später verabschiedete der Bundesrat die Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung (AFGBV). Der Text befasst sich mit Betriebsbereichen von Level-4-Fahrzeugen und stellt technische Anforderungen an Bau, Beschaffenheit und Ausrüstung. Der Parlamentsbeschluss erlaubt außerdem die Fortbewegung eines Fahrzeuges ohne einen physisch anwesenden Fahrer im Regelbetrieb, beschränkt auf festgelegte Betriebsbereiche. Für die Absicherung der vollautomatisierten Systeme muss eine natürliche Person den Betriebsablauf überwachen und eine strafrechtliche Verantwortung für jeden einzelnen Fall bewertet werden, vgl. [39].

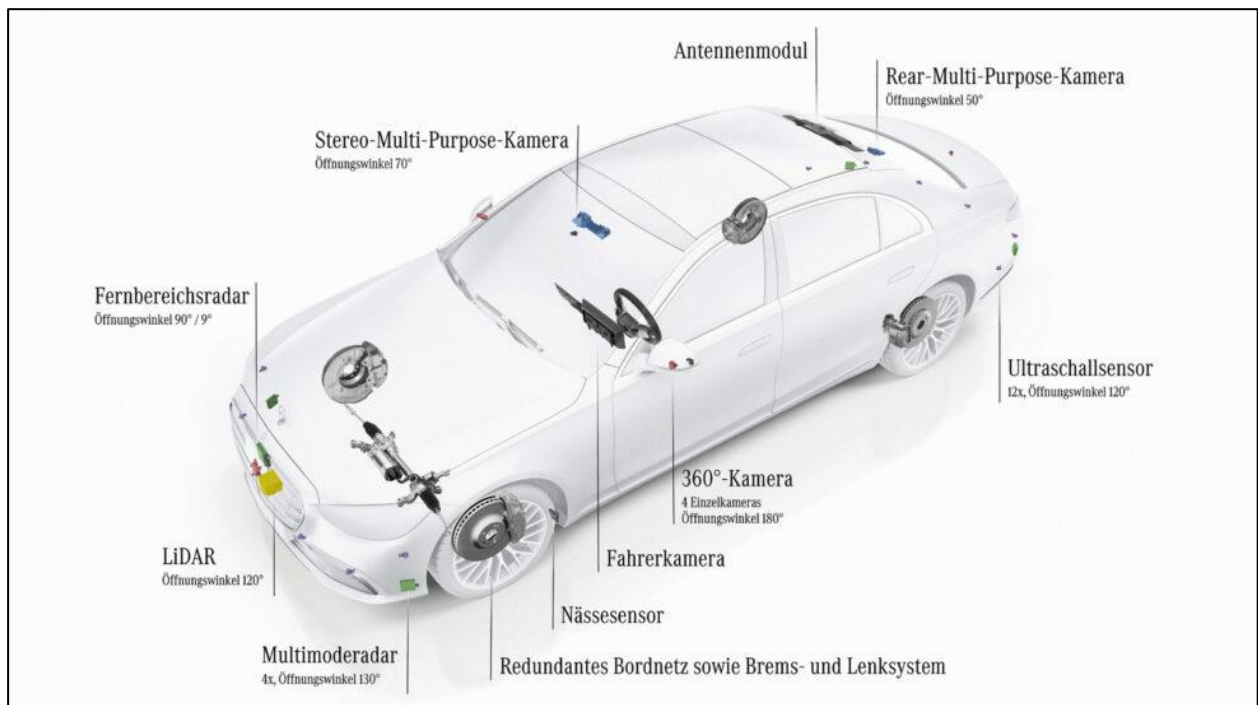


Abbildung 14: Übersichtsdarstellung aller von Mercedes Benz verbauten Komponenten für das Autonome Fahren der Stufe 3.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Grundvoraussetzung für voll-, hochautomatisiertes sowie autonomes Fahren ist die Fähigkeit des Fahrzeugs seine Umgebung zu jeder Zeit zu erfassen, interpretieren und sichere Handlungen ableiten zu können. Die technische Realisierung findet im Rahmen eines aufeinander aufbauenden Stufenmodells statt, in dem einzelne Verarbeitungsmodule miteinander verschaltet sind und auftragsbasiert, also nach Aufforderung des vorherigen Systems, arbeiten. Die Module Wahrnehmung, Bewegungsplanung und Ausführung bilden als funktionale Architektur die klassischen Elemente autonomer Fahrzeugführung, vgl. [29], S. 12. Analog zum Menschen als Fahrzeugführer kann die maschinelle Wahrnehmung als die Sinnesorgane des Menschen (Augen, Ohren, Tastsinn etc.) bezeichnet werden, Situationsverstehen und Handlungsplanung werden durch das mit den Sinnesorganen verbundene Gehirn verarbeitet und letztendlich an Hände und Füße zur Bahnführung bzw. Steuerung des Fahrzeuges weitergegeben.

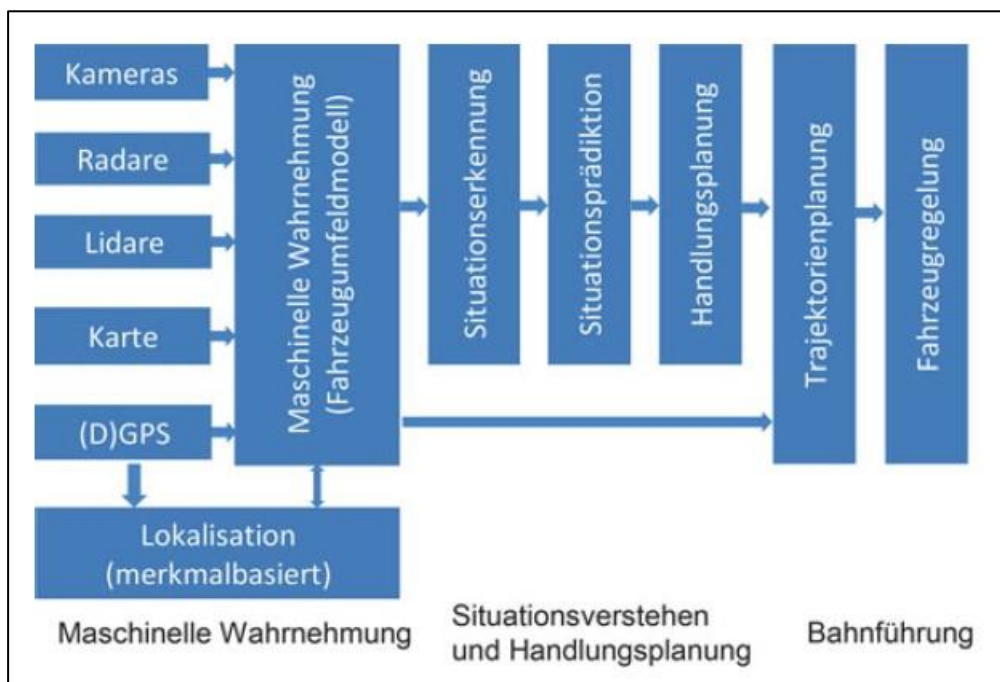


Abbildung 15: Grobdarstellung des Ablaufplans im autonomen Fahren.

Folgt man der Analogie mit den Bestandteilen des menschlichen Körpers sind im Fahrzeug Sensoren, Kamerasysteme, Kommunikationsgeräte und GPS-Module die Sinnesorgane zur Umgebungsumfassung. Ihre gemeinsame Aufgabe ist das Erkennen aller für das automatisierte und autonome Fahren relevanten Verkehrsteilnehmer. Erkennen bedeutet in erster Linie den Einsatz von Sensoren verschiedenster Art. Es kommen Kamera-, Radar-, Lidar-, sowie Ultraschalltechnologien zum Einsatz. Eine

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Rundum-Sicht um das Fahrzeug, der Spurhalteassistent, die Erkennung von Verkehrszeichen und zusätzliche Videoansichten für Parkmanöver werden von Kamerasystemen bereitgestellt. Ihre hochauflösenden zweidimensionalen Darstellungen in Farbe oder Grauabstufungen können mit Hilfe spezieller Erkennungsprogramme ausgewertet und für das Fahrzeug wichtige Objekte und Orientierungsmarken auf den Bildsequenzen erkannt werden, vgl. [40], S. 422. Oftmals sind diese Computerprogramme an sogenannte neuronale Netze gekoppelt und können nach langwierigen Trainings- und Validierungsprozessen andere Verkehrsteilnehmer (Autos, Motorräder, Fußgänger), Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen und Hindernisse auf Verkehrswegen erkennen und identifizieren. Im nachfolgenden Kapitel 4.1 wird beispielhaft der Einsatz eines Bilderkennungsprogramms inklusive neuronalem Netz gezeigt und auch die Funktionsweise eingehend erläutert. Die zum sicheren Navigieren unerlässliche Entfernungsmessung wird durch den Einsatz von Radar- und Lidarsensoren sichergestellt. Radarsensoren funktionieren mittels des Aussendens eines Signals in verschiedene Richtungen vom Fahrzeug weg. Treffen die ausgesendeten Signale auf ein Objekt, wird ein Teil der Leistung zurückgeworfen und vom Sensor als ein Echosignal empfangen werden. Durch eine periodisch durchgeführte Frequenzänderung im Sendesignal hat das Echo eine abweichende Frequenz und mittels Frequenzverschiebung und Zeitspanne zwischen Aussenden und Empfang kann die Entfernung zum angestrahlten Objekt bestimmt werden, vgl. [41]. Lidarsensoren funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip, mit dem Unterschied, dass hier Wellen im Bereich des Lichts zum Einsatz kommen, beziehungsweise Laserstrahlen. Aber auch hier können mittels des zurückgeworfenen Anteils umliegende Objekte detektiert werden, vgl. [42]. Auf diese Weise werden dreidimensionale Informationen in umfassender Menge erstellt und in Kombination mit der zweidimensionalen Objekterkennung ergibt sich der umgebende Verkehrsraum als präzise vermessene und abgesuchte Zone. Die Radar- und Lidartechnologie ist nämlich nur unzureichend zur Objekterkennung geeignet und liefert zudem keinerlei Informationen zur Textur und Art des erkannten Objektes, vgl. [40], S. 422. Radar- und Lidarsysteme kommen im Fahrzeug bei der adaptiven Geschwindigkeitsregelung und zur Erkennung von Notbremsungen und potenziellen Kollisionen auf langer Strecke zum Einsatz und zur Erkennung von Querverkehr mit speziell für kürzere und mittlere Distanzen ausgelegten Radarsystemen. Darüber hinaus verfügen automatisierte und

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

autonome Fahrzeuge über zusätzliche Ultraschallsensoren im Nahbereich von Front und Heck für den Parkassistenten, welche vor allem auf kurze bis sehr kurze Entfernungen einsetzbar sind und der Kollisionsvermeidung dienen. Neben dem Abstand von Objekten und Hindernissen zum Fahrzeug werden auch die Abmessungen der erfassten Elemente als Quadermodell erfasst, ihre Position absolut in der erfassten Umgebung und relativ zum Fahrzeug sowie bei sich bewegenden Objekten Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte, vgl. [29], S. 16. Mit Hilfe der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation können sogar Abschätzungen über den Kurs und die nächsten Fahrmanöver getroffen werden, was den Verkehr ein Stück weit kontrollierbarer macht.

Beim Vergleich zwischen dem menschlichen Auge und Erkennungssystemen autonomer Fahrzeuge wird deutlich, dass ein menschlicher Fahrer vor allem bei widrigen Witterungseinflüssen, Dunkelheit und in der Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern Schwächen offenbart, während der kombinierte Einsatz von Kamera- und Radartechnologie zumindest in der Theorie in allen untersuchten Performance Aspekten gut abschneidet. Daraus wird der potenzielle Nutzen dieser fortschrittlichen Technologie für die allgemeine Verkehrssicherheit ersichtlich, auch schon in Kombination mit dem Menschen als Assistenzsystem, vgl. [29], S. 17.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der maschinellen Umgebungswahrnehmung stellen Module zur Fahrzeugkommunikation dar. Bei diesen steht neben der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation auch ein Austausch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur im Vordergrund, sofern diese mit entsprechender Technologie ausgestattet ist. Grundgedanke ist dabei, dass Fahrzeuge durch kontinuierlichen Informationsaustausch ihr Fahrverhalten besser aufeinander abstimmen können und dadurch ein Verkehrsweg noch effektiver mit mehr Fahrzeugen gleichzeitig befahren werden kann. Außerdem können Messsysteme und Verkehrszähler am Straßenrand ihre Messwerte beispielsweise an alle im Umkreis befindlichen Fahrzeuge melden und somit auch Ausweichrouten empfohlen werden. Für die Ermittlung von Beschleunigung und Drehung des Fahrzeuges werden weiterhin auch Navigationssysteme für die Trägheit verbaut. Dabei handelt es sich um Apparaturen, welches mittels Auslenkungen Beschleunigungswerte und Rotationsverhalten messen können.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Zur Unterstützung der Objektidentifizierung und generellen Orientierung im Straßenverkehr kommen auch digitale Kartenwerke zum Einsatz, in denen sämtliche Objekte der Verkehrsinfrastruktur möglichst genau verzeichnet sind und die Fahrzeuge mittels GPS-Ortung ihre Position so präzise wie möglich bestimmen und damit den Gesamtüberblick noch weiter verbessern. Die Sensorik muss lediglich das bloße Vorhandensein der kartierten Objekte bestätigen und es dient als eine Absicherung im Fehlerfall. Probleme bei diesem Verfahren sind allerdings die genaue Lokalisation der Fahrzeuge, bei denen herkömmliche GPS-Systeme, beispielsweise in Navigationssystemen, nicht ausreichen. Genauere Ortsbestimmungen sind auch aufgrund des militärischen Nutzens nicht komplett möglich. Des Weiteren muss die Karte stets auf einem aktuellen Stand gehalten werden und jede kleine Veränderung umgehend vermerkt und die Karte aktualisiert werden. Aus diesem Grund gibt es Meinungen in der Fachwelt, die die Entwicklung von Verfahren ohne den Einsatz Zentimetergenauer Ortungssysteme und hochgenauer, aktueller Karten für möglich halten, also allein von der kameragebundenen Objekterkennung und –klassifizierung, vgl. [40], S. 423-424.

Letztendlich erstellt das Fahrzeug aus allen gesammelten Umgebungsinformationen ein Fahrumgebungsmodell, in dem alle für die Fahrsituation relevanten Objekte und Elemente der Infrastruktur im Umkreis vom Fahrzeug in zeitlich und örtlich korrekter Abfolge dynamisch dargestellt sind. Die Erfassung wird fortlaufend aktualisiert. Je nach Fahraufgabe fällt das Modell unterschiedlich komplex aus. Eine mögliche Art der Darstellung ist gitterbasiert und die Umwelt wird hier ortsfest in gleich große Zellen eingeteilt. Während der Bewegung über dieses Gitternetz geben die Sensoren Auskunft darüber, ob die eingeteilten Bereiche frei sind oder sich Hindernisse in ihnen befinden. Positiv ist bei diesem Ansatz die Robustheit gegenüber Modellfehlern herauszustellen und es werden keine Hypothesen über zu erwartende Objektklassen benötigt. Allerdings können hiermit nur statische, also unbewegliche Hindernisse und Fahrszenarien dargestellt werden, als Beispiel wäre hier die Abbildung des Straßensystems mit Fahrbahnmarkierungen, Bordsteinkanten und Lichtzeichenanlagen zu nennen, vgl. [40], S. 424-425.

Nach abgeschlossener maschineller Umgebungswahrnehmung wird eine detaillierte Beschreibung des Umfelds an den nächsten großen Aufgabenbereich des automatisierten und autonomen Fahrens weitergegeben, die Bewegungsplanung.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Untergliedert ist sie in drei Bereiche, von allgemein zu spezifisch. Angefangen beim Routing, über eine Verhaltensebene bis hin zur letztendlichen lokalen Planung. Analog dazu können auch die Begriffe strategisch, taktisch und operational verwendet werden, mit einem steigenden Spezialisierungsgrad, vgl. [29], S. 20-21. Ihre erste Herausforderung findet die Bewegungsplanung in der Wahl des Verkehrsweges, bei der kurze Reisezeiten und hohe Kraftstoffeffizienz gleichermaßen Berücksichtigung finden sollen. Abstrakt dargestellt ist diese erste strategische Routenwahl ähnlich dem Finden eines Weges aus einem Labyrinth. Neben einem Zugang zu aktuellen Verkehrsdaten potenziell möglicher Routen könnte das für die Bewegungsplanung zuständige Computersystem auch auf Kartenwerke mit den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten aller Straßen und ihrem maximalen Fassungsvermögen zugreifen. Auch eine Angabe eines Koeffizienten für Stau auf diesen Verkehrswegen ist denkbar. Zur Verfügung gestellt werden könnten diese Karten von den Herstellern oder von den betreffenden Kommunen, Bund und Ländern, den Eigentümern der Straßen in Deutschland. Auf diese Weise hat das System Anhaltspunkte für die Routenwahl und in Verbindung mit Verkehrsdaten können auch Alternativrouten bestimmt werden. Weiterhin können auch Hauptrouten im Straßennetz bestimmt werden, welche bevorzugt zu befahren sind, etwa aus Lärmschutzgründen für die Anwohner. Hinter den Verfahren und Programmen zur Verkehrswegewahl verbergen sich komplexe mathematische Verfahren und Modelle. Etwa kann die Monte-Carlo Technik als ein Stichprobenbasiertes-Verfahren verwendet werden, vgl. [29], S. 23. Ist eine optimale Route für das Reiseziel gefunden, wird auf der taktischen Ebene, also dem sogenannten Verhaltenslayer, über Fahrmanöver und Spurwahl entschieden. Ein Teil dieser Arbeit kann bereits vor Fahrantritt in der Vorberechnungsphase erfolgen, aber im Zusammenspiel mit vielen anderen Fahrzeugen können sich geplante Fahrmanöver kurzfristig ändern. Andernfalls wäre der Berechnungsaufwand zu groß. Folgen, Spurhalten und Überholen sind dabei wichtige Fahroperationen, die als kategorische Fahrsituationen bzw. als manöverbasierte Elemente Verwendung finden. Zur Reduzierung der Datenmenge und des Berechnungsaufwandes kommen bei der Manöverplanung auch Heuristiken zum Einsatz, Bewertungsverfahren zur Problemlösung in möglichst kurzen Zeiträumen. Auf Basis verfügbarer Informationen werden Entscheidungsverzweigungen bewertet und sich für eine entschieden und das Ergebnis damit angenähert, vgl. [29], S. 25. Auch die lokale Planung wird durch die Anwendung mathematischer Modelle und Verfahren

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

bestimmt, Hauptaugenmerk liegt hier auf der Kurvenplanung, Kollisionsvermeidung und Geschwindigkeitsregelung in Abhängigkeit der vorausfahrenden Fahrzeuge (-> ACC-Systeme), vgl. [29], S. 30. Eine beispielhafte Trainingsübung für Systeme des autonomen Fahrens drei unterschiedlicher Ansätze bei der Routenfindung ist in der Einführung zum Simulationsprogramm CARLA zu finden.

Bei der gesamten Bewegungsplanung spielen die bereits erläuterten Trajektorien zur Bewegungsbeschreibung eine bedeutende Rolle und diese sind es schlussendlich auch, welche der Bewegungsausführung als drittem Aufgabenbereich des autonomen Fahrens übergeben werden.

Neben der eigentlichen Steuerung des Fahrzeuges und der Kontrolle von Gas- und Bremspedal, also der mechanischen Fahrzeugkontrolle, umfasst die Bewegungsausführung auch Feedback-Mechanismen für etwaige Anpassungen der Bewegungsplanungsprozesse sowie Stabilitätsanalysen. Ziel bei der Fahrzeugsteuerung ist ein möglichst hoher Fahrkomfort für die Fahrzeuginsassen, vgl. [29], S. 32. Wichtig sind dabei etwa das Abbremsen vor dem Befahren einer Kurve und das Befolgen von Verkehrsregeln und Verhaltenskonventionen. Das Gebot einer „menschenähnlichen Fahrweise“ sollte hier vorgegeben sein, also auch möglichst vorrausschauend. Dabei kann es allerdings zu Konflikten zwischen dem zeitlichen Planungshorizont und den Berechnungszeiten von Verfahren kommen, es gilt einen sinnvollen Mittelweg einzuschlagen. Dies gilt sowohl für die Bewegungsplanung als auch für ausführende Steuerungsoperationen.

In der praktischen Ausführung kommen sogenannte PID-Regler zum Einsatz. Der Begriff PID steht für proportional-integral-derivative controller und dieser kann eine Anwendung einem Wert oder einem Pfad reibungslos folgen lassen. Die drei in ihm zusammengeführten Parameter P, I und D müssen richtig aufeinander abgestimmt werden. Sie sind im Einzelnen folgendermaßen zu beschreiben: P bringt die Anwendung bzw. das Programm in den Zielzustand und stellt die Hauptkraft dar, I dient als Überwachungsmechanismus des Weges und korrigiert im Fehlerfall, D ist ebenfalls zur Überprüfung eingesetzt und führt für P Gegenmessungen durch. Alle drei Teilbereiche zusammen ergeben in Summe die Steuerungsoperation des Prozesses. Außerdem ist auch eine Rückkopplungsschleife implementiert, welche die Ergebnisse an den Prozessanfang rückmeldet, vgl. [43].

3.3 Sicherheit im autonomen Fahren

Automatisiertes Fahren der Stufen drei, vier und fünf rückt den Menschen als Fahrzeugführenden immer weiter in den Hintergrund und das System muss selbständig mit Einschränkungen und Fehlermeldungen umgehen können. Dazu zählt vor allem das Erreichen eines sicheren Zustandes, wie z.B. das Abfahren von der Autobahn auf einen Rastplatz oder das Parken am Straßenrand. Auch in den Übergabezeiten, welche in Stufe 3 und Stufe 4 auftreten können und oft länger als 5 Sekunden dauern können, muss das Fahrzeug weiterhin einen sicheren Betrieb garantieren können und bis zur vollständigen Kontrollübergabe zurück an den Menschen sicher fahren, vgl. [40], S. 420. Dabei sind Kollisionen die größte Risikoquelle im Straßenverkehr, auch wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit gering ist und stark von der Geschwindigkeitsdifferenz und dem Kollisionstyp abhängt, vgl. [29], S. 35. Zur Sicherstellung eines möglichst hohen Sicherheitsniveaus im automatisierten und autonomen Fahren wurden standardisierte Normenwerke für die unterschiedlichen Fachbereiche erstellt. Beispielsweise existieren zahlreiche Normen im Bereich der Funktionalen Sicherheit. Unter Funktionaler Sicherheit, kurz FuSi, versteht man den Schutz vor Fehlfunktionen eines Geräts oder einer Anlage. Dabei ist sie Teil der Gesamtsicherheit und wacht über das maschinelle Handeln bzw. Ausführen von Operationen. Die sogenannten Sicherheitsfunktionen sollen Mensch und Umwelt vor Fehlfunktionen schützen, vgl. [44]. Systematische Fehler sollen vermieden und auf zufällige Fehler möglichst schnell reagiert werden. Durch den Einsatz neuartiger Technologien mit immer komplexeren und zusehens vernetzten Systemen und Prozessen steigt gleichzeitig auch die Wahrscheinlichkeit für Systemfehler und unvorhersehbare Komplikationen immer weiter an. Übergeordnete Norm für die Funktionale Sicherheit in programmierbaren Steuerungen und Systemen ist die DIN EN 61508, welche sämtliche sicherheitsbezogene Systeme erfasst, die im Schadensfall eine Gefahr für Mensch und Umwelt bedeuten können. Von der Planung, Entwicklung und Realisierung zur Inbetriebnahme, Instandhaltung und Modifikation bis hin zur abschließenden Außerbetriebnahme erstreckt sich das Normenwerk und dadurch soll die Funktionale Sicherheit in jeden System- und Anlagenbereich vordringen können. Oberstes Ziel ist dabei das kontinuierliche Analysieren, Standardisieren und Optimieren der Prozesse, vgl. [45]. Für den Automobilbereich gibt es mit der ISO 26262 eine Normenreihe der Funktionalen Sicherheit speziell für dieses Technikgebiet. Das Vorgehen ist ähnlich dem aus der DIN EN 61508, für jede

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Fahrsituation gibt es zunächst Gefahrenanalyse und Risikobewertung, dann ein funktionales und abschließend noch ein technisches Sicherheitskonzept. Diese Konzepte müssen für alle risikoreichen Ereignisse und Fahrsituationen vorab festgelegt werden, sehr selten auftretende oder gänzlich unbekannte Gefahrensituationen können also nicht enthalten sein und vom System auch nicht korrekt behandelt werden. In dem von der Norm ISO 26262 beschriebenen Ablaufschema für eine gut funktionierende Funktionale Sicherheit wird zunächst das Fahrsystem systematisch zerlegt und charakteristische Kenngrößen wie Straße und Umgebung erfasst. Anschließend ordnet eine andere Programmkomponente das Risiko in Klassifikationsstufen ein, den sogenannten ASIL-Levels, bestehend aus Schadensausmaß, Expositionswahrscheinlichkeit und Kontrollierbarkeit der Gefahren, vgl. [46]. Das daraus entstehende Gesamtrisiko kann in Schadensmatrizen bewertet und daraus entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden. Diese sind in den funktionalen und technischen Sicherheitskonzepten vorhanden. Beispiele können ein Notfallprotokoll sein, welches bei Systemausfall die notwendigen Gegenmaßnahmen einleitet, Fahrsituationen können analysiert werden und es können Redundanzen im System geschaffen werden, also die mehrfache Ausführung sicherheitsrelevanter Steuerungen und Bauteile. Neben multiplen und voneinander unabhängigen Signalverarbeitungseinheiten können Systeme auch selbst Fehler diagnostizieren und sich im Fehlerfall auch selbst abschalten und neu hochfahren, vgl. [29], S. 45. Ein Anwendungsbeispiel einer solchen Schaltungsarchitektur kann in der folgenden Abbildung betrachtet werden, gut zu erkennen sind die mehrfache Ausführung von Recheneinheiten und Steuerungselementen, welche unabhängig voneinander Signale aussenden können.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

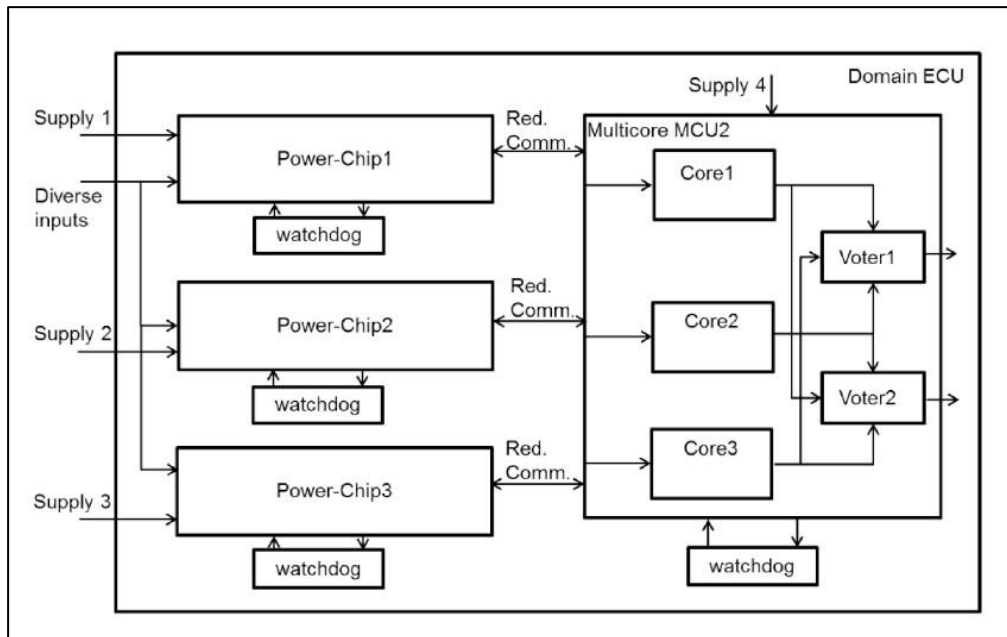


Abbildung 16: Fail-Operational Safety Ansatz in einer Steuerungsarchitektur

Darüber hinaus behandelt die ISO 21448 das Thema SOTIF, Safety Of The Intended Functionality, also die Sicherheit einer Sollfunktion. In Abgrenzung zur ISO 26262, in der ein elektronisches Steuerungssystem für ein Kraftfahrzeug per Definition frei von Fehlern sein muss, beschäftigt sich diese Norm mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten gefährlicher Ereignisse und versucht diese auf ein möglichst niedriges Niveau zu bringen. Stellt man alle im Straßenverkehr möglichen Ereignisse in einem Mengendiagramm dar und nimmt eine Unterteilung nach bekannten/unbekannten sowie sicheren/unsicheren Systemzuständen vor, behandelt SOTIF die unbekannten und gleichzeitig auch unsicheren Ereignisse. Ziel ist dabei eine möglichst genaue Definition und Spezifikation der Sollfunktion, also den von dem System übernommenen Aufgaben, vgl. [47], S. 9.

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

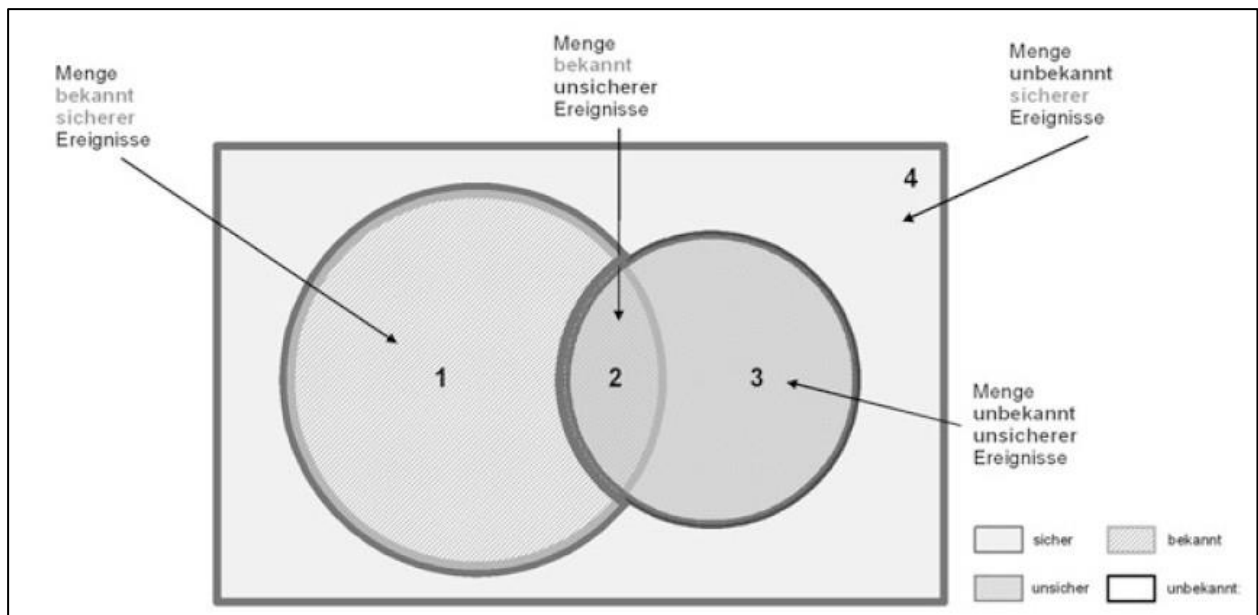


Abbildung 17: Nach Sicherheit und Bekanntheit gegliederter Ereignisraum, Bereich 3 wird von SOTIF abgedeckt.

An diese für die Systemsicherheit unabkömmliche Aufgabe schließt sich noch die Reduzierung der durch SOTIF bekannt gewordenen und unsicheren Gefährdungen an. Im Grunde genommen soll damit bisher Unsichtbares sichtbar und damit auch beherrschbar gemacht werden. Ein unerwartetes Systemverhalten soll so frühzeitig wie möglich durch gezielte Maßnahmen offenbart werden. In Zeiten von aufkommenden elektronischen Steuerungssystemen sehr komplexer Natur für das autonome und automatisierte Fahren wird gerade die möglichst genaue Spezifikation der Aufgaben und Sollfunktionen des Systems immer wichtiger. Die strukturierte Betrachtung eines Systemverhaltens ist der erste Schritt dazu. Bei der Bewertung des Verhaltens der Systeme wird auch auf die aus der ISO 26262 bekannten sogenannten Sicherheitsintegritätsstufen (ASIL-Level) zurückgegriffen, vgl. [47], S. 10-11. Die Norm ISO 21448 hält für das SOTIF ein folgendermaßen aufgebauten Vorgehens-Prozess bereit: Nach Erstellen der Funktions- und Systemspezifikationen mit der Beschreibung der für diese Funktion beabsichtigten Ziele werden die SOTIF-Risiken identifiziert. Die Bewertung kann analog zum Vorgehen der ISO 26262 erfolgen. Anschließend soll eine Analyse gezielt die Schwächen des Systems offenbaren bzw. die gefährlichen Anwendungsfälle. Neben nicht korrekt implementierten Sensoren und Algorithmen kann auch der Mensch als nicht bestimmungsgemäßer Anwender Probleme hervorrufen. Nach Abschluss der Identifikation der Risiken werden diese im nächsten Schritt abgestellt und der Prozess anschließend in Phasen der Verifikation und Validierung auf

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

seine ordnungsgemäße Funktion hin überprüft. Idealerweise erfolgt diese Schrittfolge ab den ersten Entstehungsprozessen und kann so bereits früh Systemfehler aufdecken und abstellen, vgl. [47], S. 15-16.

Für Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen existiert noch die ISO 15622, eine Norm, welche sich mit grundlegenden Regelungsstrategien, Basiselementen und Mindestanforderungen an das Verfahren beschäftigt. Es wird zwischen zwei verschiedenen Arten von ACC-Systemen unterschieden und auf die jeweiligen Unterschiede eingegangen. Auch hier sollen Vorgaben für einen einheitlichen Aufbau und Funktionsweise der ACC-Systeme sorgen und durch diese Architektur Fehler frühzeitig erkennbar und vor allem vermeidbar machen. Neben zahlreichen Voraussetzungen für die ACC-Systeme behandelt die Norm auch Methoden zur Ermittlung der Leistung der Systeme, sogenannte Performance Tests, vgl. [48].

Im folgenden Kapitel werden die Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen noch einmal im Detail vorgestellt und auch Aufbau und Funktionsweise erläutert.

3.4 Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen

Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, gehören Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen in den Bereich der Bewegungsplanung im automatisierten und autonomen Fahren, genauer gesagt in die unterste der drei Ebenen, die operationale Ebene mit lokalen Interaktionen. Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen, oder auch ACC-Systeme (Adaptive Cruise Control, auf Deutsch: Adaptive Geschwindigkeitsregelung oder Abstandsregeltempomat) haben vom Grundsatz her drei für die Sicherheit beim autonomen Fahren unabdingbare Aufgaben zu erfüllen. Zum einen sollen vorausfahrende Fahrzeuge erkannt sowie Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz ermittelt werden. Aus diesen Daten kann der Computer anschließend die richtige Geschwindigkeit bestimmen, auch mit Hilfe sogenannter Fahrzeugfolgemodelle. Dieses Vorgehen wird auch als longitudinale Bewegungsplanung bezeichnet und hat schlussendlich auch entscheidend Einfluss auf die Kontrolle des Fahrzeuges mit Brems- und Beschleunigungsoperationen, vgl. [49], S. 5. Als Basis von ACC-Systemen dienen die schon seit vielen Jahren bekannten und in Fahrzeugen verbauten Geschwindigkeitsregelanlagen bzw. Tempomaten. Allerdings erkennt das System hier ein vorausfahrendes Fahrzeug und passt seine Geschwindigkeit und seinen Sicherheitsabstand diesem an. Zur

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Fahrzeugwahrnehmung werden Systeme zum Aussenden und Empfangen von Wellen benötigt, wie etwa Radar oder Laserstrahlen. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit und gemessener Zeit bis zum Eintreffen der reflektierten Strahlung kann die Entfernung berechnet werden. Je näher sich ein Objekt am Sender befindet, desto höher ist die Frequenz der reflektierten Welle. Mit zunehmender Entfernung verringert sich die Frequenz. Physikalisch wird dieses Phänomen als der Dopplereffekt bezeichnet, vgl. [50] und durch kontinuierliche Messungen mit kurzen Zeitintervallen können Entfernungsveränderungen genau bestimmt und in Fahrzeugmanöver umgewandelt werden. Befindet sich kein Fahrzeug im Erfassungsbereich, wird die vorab eingestellte Geschwindigkeit gehalten oder erneut eingenommen. Je nach ACC-System kommen unterschiedlich viele Radarstrahlen für die Objekterfassung zum Einsatz. Sie sind in verschiedenen Verhältnissen zueinander nach vorne angeordnet und bilden so einen Erfassungskegel nach vorne auf die Fahrbahn, vgl. [51]. Weiterhin bestehen auch Unterschiede im Grad der Vernetzung und Automatisierungsstufe einer Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage im normalen Fahrzeugbetrieb, vom Halten einer konstanten Zeitlücke zum Vordermann bis hin zu vernetzten Fahrzeugen mit übergeordneter Geschwindigkeitsregelung und Dauerbetrieb des Systems bis zum vollständigen Fahrzeugstillstand und erneutem Anfahren, vgl. [49], S. 8. Gerade ein weitreichender Informationsaustausch ist für einen optimierten Betrieb von ACC-Systemen vieler Fahrzeuge von großer Bedeutung, denn eine ungünstige Straßenführung mit engen Kurvenradien oder der Spurwechsel auf die Autobahnabfahrt können zu nicht der Situation angepassten Brems- und Beschleunigungsmanövern führen. Wenn das Fahrzeug stets über die bevorstehenden Aktionen und den genauen Standort der anderen Fahrzeuge informiert ist, können solche Situationen vermieden werden.

Zur besseren Bestimmung und Vorhersagbarkeit von Abstand und Geschwindigkeit kommen auch Fahrzeugfolgemodelle zum Einsatz. Es wird also versucht, die Bewegungsplanung des Fahrzeuges als mathematische Funktion zu modellieren, unter Einbeziehung von Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug. Das daraus entstehende Modell basiert auf Differentialgleichungen und soll ein möglichst realistisches Fahrverhalten abbilden, sprunghafte Geschwindigkeitsänderungen sollen vermieden werden. Differentialgleichungen entstammen der Mathematik und zeichnen sich dadurch aus, dass sie für eine oder

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

mehrere Variablen Ableitungen der gesuchten Funktion enthalten, die durch die Gleichung bestimmt werden soll, vgl. [52]. Sie steht im Grunde genommen auch in Abhängigkeit zu sich selbst. Wesentliches Element der Gleichungen ist, dass der Mindestabstand zum Vordermann proportional, also im gleichen Verhältnis stehend, zur gefahrenen Geschwindigkeit sein soll. Dadurch entstehen Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen, welche in den Modellen Berücksichtigung finden müssen und weitreichende Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben können. Fahrzeugfolgemodelle werden zwischen der Abbildung von Brems- und Beschleunigungsoperationen und Spurwechseldynamiken differenziert. Entscheidend sind hierbei die Aktionsmöglichkeiten des Fahrers. In diesem Kapitel geht es aber nur um eine relative simple Darstellung der Längsdynamik, also Bremsen und Beschleunigen in Abhängigkeit vom vorausfahrenden Fahrzeug. Zur möglichst genauen Abbildung der Fahrrealität werden beide Aspekte miteinander kombiniert und es wird versucht, menschliches Fahrverhalten möglichst genau nachzustellen, vgl. [21], S. 139. Die Modelle der Längsdynamik lassen sich zusätzlich noch in geschwindigkeits- und abstands-basierte Modelle unterteilen. Das simpelste geschwindigkeitsbasierte Modell wäre die Gleichsetzung der Reisegeschwindigkeit von zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen.

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

Abbildung 18: Simple Geschwindigkeitsbasiertes Modell, die Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht der des vorausfahrenden Fahrzeuges

Abgesehen von der Anfangsbedingung, also die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs, verfügt dieses Modell über keinerlei Parameter oder sonstige Variablen. Auf die Realität anwendbar ist dieses Modell allerdings nicht, es wird weder ein Sicherheitsabstand zum Vordermann, noch eine Systemreaktionszeit berücksichtigt, vgl. [49], S. 19. Der Abstand findet keinerlei Berücksichtigung, was bei hohen Geschwindigkeiten zu Kollisionen führen kann. Bei mehreren Verkehrsteilnehmern mit diesem Fahrzeugfolgmodell kann es außerdem schon frühzeitig zu Verkehrsstauungen führen. Eines der ersten veröffentlichten Fahrzeugfolgemodelle ist das Modell von Louis A. Pipes aus dem Jahr 1953. Neben der Einführung einer Reaktionszeit, welche der Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs angerechnet wird

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

und einer Linearisierung zwecks einer besseren Berechnung, ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{T_r} [\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_i(t)]$$

Abbildung 19: Fahrzeugfolgmodell von Louis A. Pipes (1953)

Es handelt sich um ein Modell der zweiten Ordnung, denn mathematisch entspricht die Ableitung einer Geschwindigkeit dem zu diesem Zeitpunkt gültigen Beschleunigungswert. Allerdings findet auch hier der Abstand keine Berücksichtigung, vgl. [49], S. 21. Ein anderes Modell bestimmt die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges in Abhängigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Dabei werden auch zahlreiche weitere Aspekte wie etwa die Position des Fahrzeuges zu einem bestimmten Zeitpunkt, eine Reaktionszeit des ACC-Systems sowie bestimmte Verhaltensschwankungen des Fahrzeuges berücksichtigt, vgl. [53], S. 20.

$$\ddot{x}_n(t+T) = \frac{v_n^0 + \xi_n(t) - \dot{x}_n(t)}{\tau_n} + f_{n,(n-1)}(t)$$

mit $x_n(t)$ = Position von Auto n zum Zeitpunkt t
 $\dot{x}_n(t)$ = Geschwindigkeit von Auto n zum Zeitpunkt t
 $\ddot{x}_n(t)$ = Beschleunigung von Auto n zum Zeitpunkt t
 T = Reaktionszeit
 v_n^0 = Wunschgeschwindigkeit von Auto n
 $\xi_n(t)$ = Verhaltensschwankung von Auto n zum Zeitpunkt t
 τ_n = Relaxationszeit von Auto n
 $f_{n,(n-1)}(t)$ = Abstoßung zwischen Auto n und $n-1$
zum Zeitpunkt t

Abbildung 20: Detaillierteres Fahrzeugfolgmodell, mehr Störfaktoren werden berücksichtigt

Andere Modelle dieser Art verwenden Differenzialgleichungen und bringen weitere Verhaltensparameter oder Sensitivitätskonstanten in die Berechnung ein, um eine bessere Realitätsnähe implementieren zu können. Die Gleichungen geben allerdings nur physikalische Zusammenhänge wieder und führen zu teilweise äußerst unrealistischen Verhaltensweisen der Fahrzeuge. Besonders zu hohe Brems- und

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Beschleunigungswerte können von Autos nicht geleistet werden und können zu Auffahrunfällen führen, vgl. [53], S. 20-21. Das Modell von Pipes kann unter idealisierten Bedingungen auch mit mehreren Verkehrsteilnehmern zu einem flüssigen Verkehrsgeschehen führen.

Abstandsasierte Modelle verfolgen die Strategie eines konstanten räumlichen Abstandes zum Vordermann, welcher proportional zur Geschwindigkeit festgelegt wird. Der ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobilclub) beispielsweise gibt diesen lichten Zeitabstand mit 1,8 Sekunden an. Kernaussage des abstandsasierten Fahrzeugfolgmodells ist, dass die sogenannte Optimal-Velocity-Funktion die Fahrzeuggeschwindigkeit als Funktion des Fahrzeugabstands beschreibt. Besonderheiten dieser Funktion sind ihre Beschränktheit außerhalb zweier Abstandswerte sowie annähernd durchgehend linearen Beziehung zwischen Abstand und Geschwindigkeit, vgl. [49], S. 25. Eine Optimal-Velocity-Funktion kann beispielsweise so aussehen: Gut zu erkennen ist die systembedingte Beschränktheit in Abhängigkeit des Fahrzeugabstandes sowie der Geschwindigkeit.

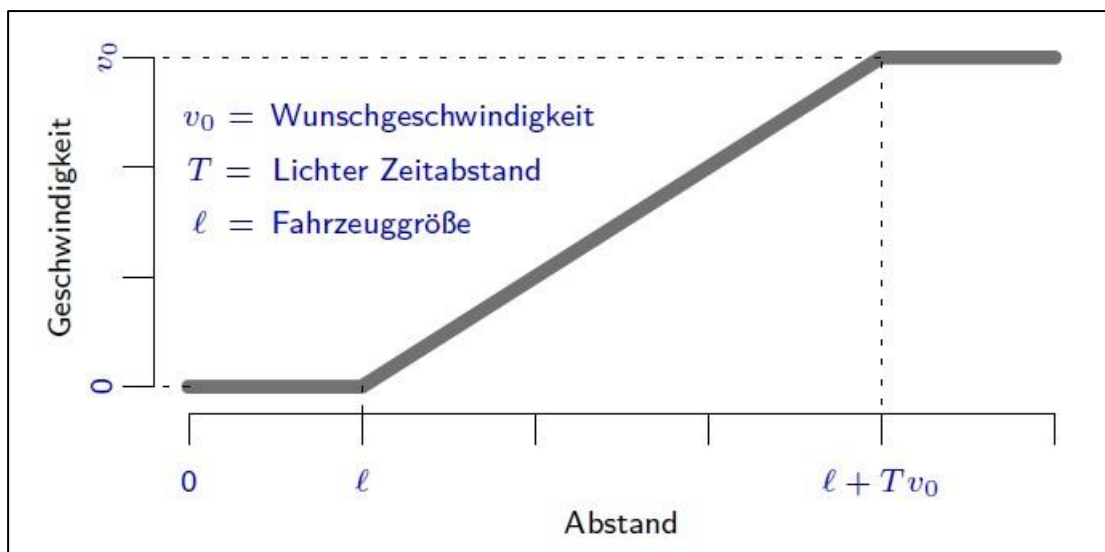


Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung einer Optimal-Velocity Funktion

Auch das abstandsasierte Modell gibt es als Geschwindigkeits- (Erste Ordnung) oder Beschleunigungsmodell (Zweite Ordnung). Ein Unterschied zwischen den beiden Modellierungen besteht im Einfügen einer Reaktionszeit in das Modell der ersten Ordnung mit anschließender Linearisierung. Daraus ergibt sich das sogenannte Optimal-Velocity-Modell, welche seine Beschleunigungsstrategie durch das Anpassen an die abstandsabhängige optimale Geschwindigkeit realisiert. Das Modell enthält

3 Automatisiertes und vernetztes Fahren

allerdings keine Bremsstrategie und modelliert Beschleunigungs- und Bremsabläufe auf eine symmetrische Weise. Teilweise werden bei der Arbeit mit dem Modell auch unrealistisch starke Bremsmanöver dargestellt, was zu Auffahrunfällen führen kann. Dahingehend muss das Modell optimiert und Parameter passend gewählt werden, vgl. [54], S. 107.

Üblicherweise werden also abstand- und geschwindigkeitsbasierte Fahrzeugfolgemodelle zusammengelegt, um die Schwächen beider Ansätze gegenseitig auszugleichen. Beispiel dafür wäre das Full-Velocity-Difference-Modell, welches die Modelle von Louis A. Pipes und das Optimal-Velocity-Modell miteinander kombiniert. Es werden sowohl Geschwindigkeit als auch räumlicher Abstand betrachtet und kann somit ein realistisches Verkehrsverhalten abbilden, vgl. [49], S. 31.

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{T_r} [V(x_{i+1}(t) - x_i(t)) - \dot{x}_i(t)] + \frac{1}{T_2^r} [\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_i(t)]$$

Abbildung 22: Eine Vereinigung des Abstands- und Geschwindigkeitsbasierten Modells, das Full-Velocity-Difference Modell

Ein weiteres Beispiel für ein Fahrzeugfolgmodell ist das sogenannte Nagel-Schreckenberg-Modell, welches aber einen anderen Ansatz als die zuvor beschriebenen Modelle zur Basis hat. Das Modell zielt auf die Simulation großer Fahrzeugmengen mittels einfacher Verhaltensregeln ab. Dabei kommen zelluläre Automaten zum Einsatz, ein Verbund aus vielen Einzelrechnern, die in einem Gitter angeordnet sind und allesamt das gleiche Programm ausführen. Inhalt dieses Programms ist ein Automat mit einer bestimmten Anzahl von Zuständen und die Zellen bzw. die Programme können mit ihren Nachbarzellen kommunizieren. Wenn ein Verkehrssystem oder z.B. ein Straßenabschnitt mit dem Nagel-Schreckenberg-Modell simuliert werden soll, wird das Gesamtsystem in die genannten Zellen unterteilt. Jede Zelle kann bestimmte Zustände annehmen, welche über eine sogenannte Zustandsübergangsfunktion in Abhängigkeit des aktuellen Zustandes bestimmt wird, vgl. [53], S. 24-25. Mit Hilfe von im Modellhintergrund ablaufender Berechnungsalgorithmen kann so Straßenverkehr abstrakt mit Zahlen in den Zellen dargestellt werden. Eine einfache Darstellung lässt jede Zelle zwei verschiedene Zustände annehmen: 0 (leer) oder 1 (belegt). Folgezustände der Zellen ergeben sich

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Simulationsprogramme für virtuelle Verkehrssimulation bilden einen wichtigen Beitrag für Forschung und Entwicklung autonomer Fahrsysteme. Wie wichtig dieser Anteil ist und wie ausgewählte Programme arbeiten, zeigt das nachfolgende Kapitel.

4.1 Was können Verkehrssimulationsprogramme?

Nach wie vor stellt die sensomotorische Steuerung eine große Herausforderung für die Robotik und das maschinelle Lernen im dreidimensionalen Raum dar. Eine Ausprägung dieses Problems ist die Entwicklung von autonom operierenden Landfahrzeugen, wohingegen bei Luftfahrzeugen bereits Autopiloten existieren und zahlreiche Schienenverkehrsmittel im Nah- und Fernverkehr selbst und ohne Fahrer unterwegs sind. Der Unterschied zum Verkehr in der Luft und auf der Schiene ist aber, dass gerade in urbanen Räumen komplexe Verkehrssituationen mit vielen einzuplanenden Faktoren auftreten können. Beispiele dafür sind die Beobachtung zahlreicher anderer Verkehrsteilnehmer wie Autofahrer, Fußgänger und Radfahrer, das Einhalten der gültigen Verkehrsregeln sowie die Beachtung der Verkehrsregeln und Einplanung eher selten auftretender Ereignisse wie Bauarbeiten oder Personen, die plötzlich auf die Fahrbahn treten. Zusätzlich dürfen die darauf getroffenen Maßnahmen des autonomen Fahrzeugs nicht andere Verkehrsteilnehmer gefährden, wie etwa zu starkes Bremsen für den Hintermann, vgl. [55], S. 1. Im schlimmsten Fall kann dies sogar alles noch parallel ablaufen. Die potenziell simpelste bzw. unbekanntesten Form des Straßenverkehrs ist der Verkehr auf Autobahnen und autobahnähnlich ausgebauten Schnellstraßen. Sie zeichnen sich durch zwei baulich voneinander getrennte Richtungsfahrbahnen aus und nur bestimmte Arten von Verkehrsträgern dürfen eine Autobahn benutzen. In der deutschen Straßenverkehrs-Ordnung ist eine bauartlich bestimmte Höchstgeschwindigkeit von mehr 60 Kilometer pro Stunde erforderlich. Weiterhin sind das Halten, Wenden, Rückwärtsfahren verboten und nur an speziell gekennzeichneten Anschlussstellen ist das Auf- und Abfahren gestattet. Außer Automobilen, Motorrädern und Lastkraftwagen ist das Befahren von Autobahnen nicht gestattet, dies gilt also u.a. auch für Fußgänger und Radfahrer, welche im normalen Stadtverkehr vorkommen und viele unbekannte Variablen in das Verkehrsgeschehen einbringen, vgl. [56]. Meist sind auch Fahrstreifen breiter und die Fahrbahndecke in einem besseren Zustand als auf Stadtstraßen, was der höheren gefahrenen

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Geschwindigkeit geschuldet ist. An diesen Faktoren lässt sich erkennen, dass der Einsatz automatisierter und vernetzter Fahrzeuge auf Autobahnen und autobahnähnlich ausgebauten Schnellstraßen mit bedeutend weniger potenziellen Risiken verbunden ist und eine praktische Umsetzung damit realistischer erscheint.



Abbildung 24: Typische Situation im Stadtverkehr mit unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern

Problematisch für den Einsatz autonom operierender Fahrzeuge sind außerdem hohe Infrastrukturkosten und logistische Probleme bei Testreihen und Erprobungsfahrten im realen Straßenverkehr. Bereits ein einzelnes dieser Fahrzeuge benötigt für Einrichtung und Betrieb große Ressourcen an Geld, Zeit und hochqualifizierten Arbeitskräften und wenn nur eine geringe Anzahl von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen des höchsten Levels im alltäglichen Straßenverkehr unterwegs sind und Daten zur Erprobung sammeln, ist dies schlicht nicht ausreichend, um damit die verschiedenen Fahr- und Steuerungsalgorithmen „füttern“ zu können. Vor allem sog. Deep-Learning-Verfahren gelten dabei als besonders datenhungrig. Sehr selten auftretende Ereignisse können so eventuell nicht erfasst werden und der Algorithmus damit auch nicht darauf eingestellt werden, was zu zusätzlichen Gefahren im Straßenverkehr führen kann. Aus diesem Grund ist der Einsatz eines autonomen Fahrzeuges im realen Straßenverkehr für viele Forscherteams von Universitäten und Unternehmen schlicht nicht durchführbar. Ein Blick in die Medien offenbart etwa, dass nur große Automobilkonzerne oder bedeutende High-Tech Unternehmen derartige Feldversuche in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Hochschulen abhalten.

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Bedingt durch den schnell voranschreitenden technischen Stand in der Informatik und der Computer-Technologie ist der Einsatz von Simulationsprogrammen in den letzten Jahren zu einem wichtigen Bestandteil in der Entwicklung des autonomen Fahrens bzw. von Systemen und Algorithmen zur Steuerung der Fahrzeuge in Abhängigkeit seiner Umwelt geworden, schon seit Beginn der Forschungsarbeit im Bereich des autonomen Fahrens werden Simulationen eingesetzt. Die Entwicklung von leistungsfähigen Steuerungsalgorithmen und Datenverarbeitungssystemen war also stets mit dem Aufkommen leistungsstarker Computersysteme verbunden. Simulationsarbeit mit Programmen beinhaltet neben dem Trainieren und Validieren von Fahrstrategien auch das Durchspielen bestimmter Szenarien, welche im realen Straßenverkehr in der Durchführung zu hohe Gefährdungen aufweisen, beispielsweise ein Fahrradfahrer, welcher an einer Kreuzung die Vorfahrtsregeln missachtet oder ein anderes Fahrzeug, welches plötzlich in den Gegenverkehr steuert. Problematisch für den Einsatz der Simulationsanwendungen ist allerdings die Tatsache, dass gerade der sehr vielseitige und variablenreiche Stadtverkehr nicht mit den stets begrenzten Kapazitäten eines Computerprogramms vollständig abgedeckt werden kann. Es bestehen grundlegende Unterschiede zwischen Programmen für die Rennsimulation und Softwareanwendungen für die Abbildung von Verkehr in urbanen Räumen, an dem nicht nur Automobile oder Motorradfahrer teilnehmen.

Neben den üblichen Simulationsanwendungen zu Forschungszwecken kommen auch vermehrt Rennsimulatoren aus der Videospiel- und Unterhaltungsbranche in der Erprobung und Bewertung neuer Ansätze im automatisierten und vernetzten Fahren zum Einsatz. Einerseits werden zum Testen und Trainieren automatisiert arbeitender Erkennungssysteme benutzerdefinierte Simulationsaufbauten eingesetzt und andererseits können realitätsnahe Daten statt aus wissenschaftlichen Simulationsprogrammen auch aus Videospielen gewonnen werden. Dabei stehen Erkenntnisse für die Verbesserung visueller Wahrnehmungssysteme im Vordergrund und der Vergleich der einzelnen Systeme untereinander. Interessierten an diesen Spielen ist es stets wichtig, ein möglichst genaues Abbild der Realität zu erleben, um so in diese virtuelle Welt eintauchen zu können. Die Bandbreite an Spielen, in denen vom Spiel selbst gesteuerte Fahrzeuge zum Einsatz kommen ist sehr groß und reicht von sogenannter Open World Action wie die Grand Theft Auto Reihe über Rennspiele und Simulatoren bis hin zu ganzen Städtebausimulationen, in denen die Spielerin oder der

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Spieler die Geschicke einer Stadt mit ihren gesamten Facetten lenken muss und neben der ausreichenden Bereitstellung von Dienstleistungen, der Versorgung der Bewohner mit Strom und Wasser auch die Steuerung des Verkehrsgeschehens beeinflussen muss, um einen möglichst reibungslosen Ablauf gewährleisten zu können. Alle diese Spiele verfügen über selbstfahrende bzw. autonom operierende Fahrzeuge, welche über ein bestimmtes Fahrverhalten verfügen, ein bestimmtes Fahrziel haben und bei Fahrtantritt eine Routenwahl durchführen. Diese Faktoren sind auch im autonomen Fahren des realen Straßenverkehrs von hoher Bedeutung. Als Beispiel für den Nutzen kommerziell vertriebener Videospiele für die Entwicklung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge ist das Spiel Grand Theft Auto V zu nennen. Es bietet mit seiner hochauflösenden Grafik, wechselnden Verkehrsdichten und Wetterbedingungen sowie teilweise irrationalen Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer eine fundierte Grundlage zum Erstellen und Testen eines selbst erstellten autonomen Fahrzeuges. Ein solcher Versuch wurde vom Ingenieur Alzaib Karoualia durchgeführt. Grundlage bildeten dabei sogenannte neuronale Netzwerke, welche mit im Spiel erfassten Datensätzen ausgebildet werden. Neuronale Netze sind im Grunde genommen ein abstrahiertes Modell miteinander verbundener Neuronen, also elektrisch erregbarer Zellen zur Informationsaufnahme, -verarbeitung und -weitergabe. Durch eine spezielle Anordnung und Verknüpfung der Neuronen lassen sich Anwendungsprobleme aus verschiedenen Bereichen der Wissenschaft computerbasiert lösen, allerdings müssen sie vorher auf das Lösen von Problemen trainiert werden. Sie sind in ihrem Aufbau dem Gehirn des Menschen und vieler Tierarten nachempfunden. Auch der Mensch kann durch das wiederholte Durchlaufen eines bestimmten Vorgangs eine Problemstellung erkennen und zu einem Lösungsansatz kommen. Das neuronale Netz in seinem Gehirn stellt mit der Zeit neue Verbindungen zwischen den Neuronen her, um das Problem mittels Training schließlich lösen zu können, wobei sich auch die Struktur des Gehirns an die neuen Anforderungen anpasst. Vom Grundsatz her ist die Anzahl von Neuronen in einem künstlich erzeugten neuronalen Netz unbegrenzt, allerdings erhöht sich mit der Anzahl der miteinander verknüpften Neuronen auch die Rechenleistung für Training und Betrieb. Unterscheiden lassen sich neuronale Netze in die Feedforward-Struktur und die rekurrente Struktur. Feedforward-Netze weisen ausschließlich einen, am Namen bereits erkennbaren, vorwärtsgerichteten Informationsfluss auf, von den Input-Neuronen über die Hidden-Neuronen zu den Output-Neuronen. Die Begriffe Input, Hidden und Output

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

beziehen sich auf die Funktionen der einzelnen Neutronen. Bei rekurrenten Netzen hingegen existieren Verbindungen, die auch einen rückwärtigen Informationsfluss zulassen und deshalb als Feedback- oder rückgekoppelte neuronale Netze bezeichnet werden. Diese beiden unterschiedlichen sind in der untenstehenden Abbildung gegenüber gestellt und der rückwärtige Informationsfluss farblich gekennzeichnet.

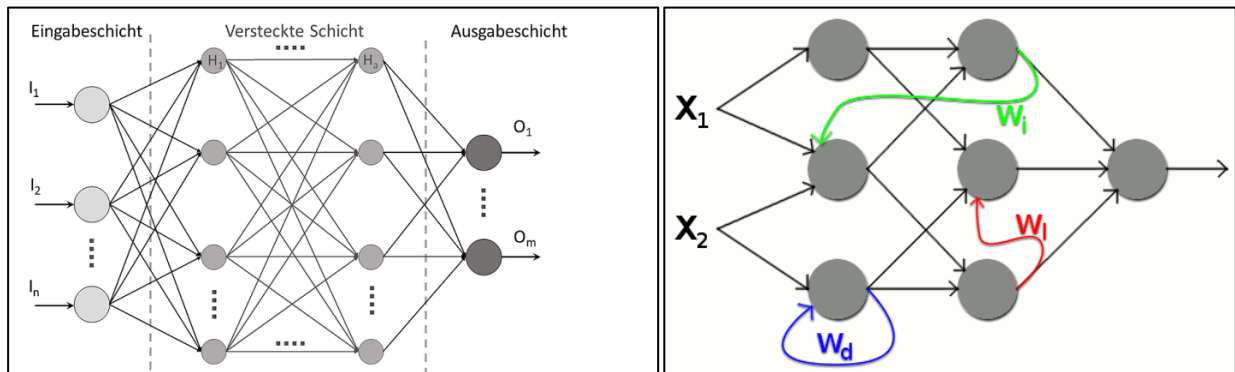


Abbildung 25: Schematische Darstellungen verschiedener neuronaler Netze

Anwendungen finden neuronale Netze unter anderem in der Erkennung von Bildern, Sprachen und Schriften, aber auch in der Steuerung und Prognostizierung komplexer Systeme sowie in Frühwarnsystemen. Sie kommen vor allem dort zum Einsatz, wo großen Mengen von Eingabeinformationen zu einem konkreten Ergebnis verarbeitet werden müssen und nur wenig dazu nötiges Lösungswissen vorliegt. Das Training eines neuronalen Netzwerkes wird auch als „Tiefes Lernen“ bezeichnet und findet mittels Zuteilung von Anfangsgewichtungen an die einzelnen Neuronen statt. Ist ein konkretes Ergebnis für die Eingabemöglichkeiten vorgegeben, kann dem Netz nach jedem Durchlauf mitgeteilt werden, ob von den eingegebenen Daten richtig auf das beabsichtigte Ergebnis geschlossen wurde. Auf diese Weise bildet sich eine „Intelligenz“ des neuronalen Netzes heraus und es „weiß“ irgendwann, welches Ergebnis auf eine gegebene Vorgabe folgen muss, vgl. [58].

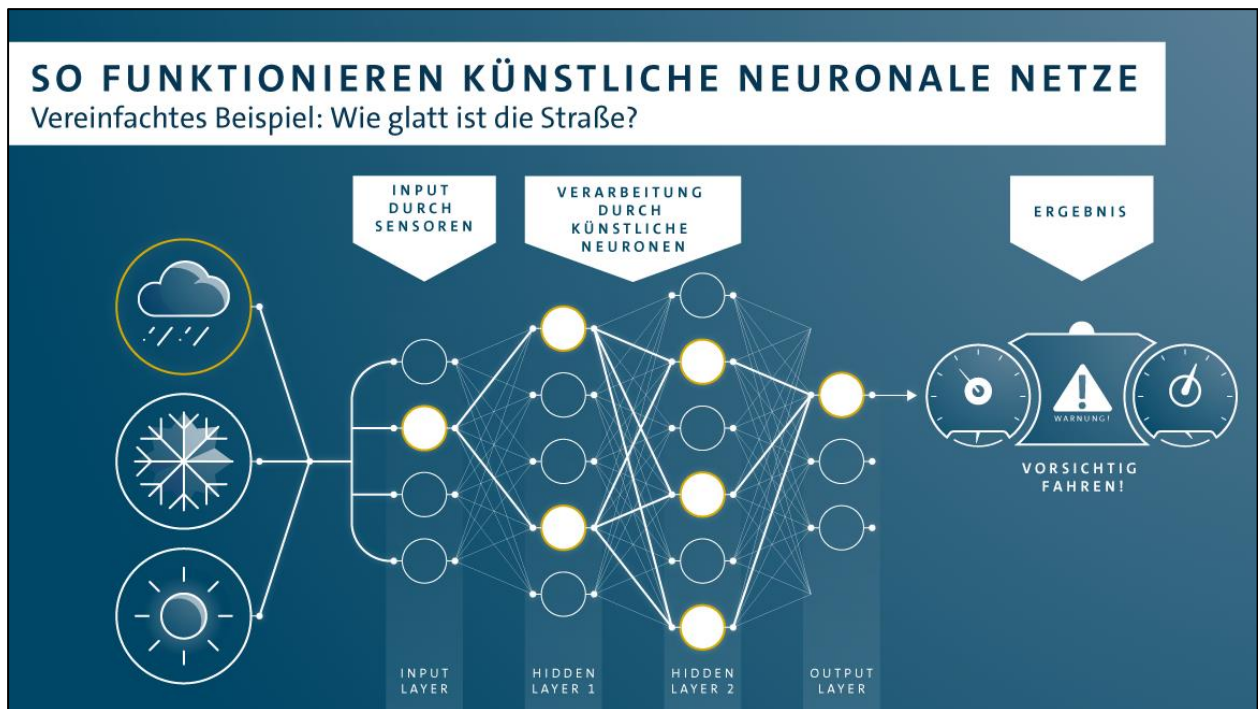


Abbildung 26: Beispielhafte Anwendung eines Neuronalen Netzes

Neben den neuronalen Netzen wurde ein Algorithmus zur Erkennung und Lokalisierung von Objekten integriert, um Längs- und Quersteuerung des Fahrzeuges zu ermöglichen. Zur Bewältigung des dafür nötigen hohen Rechenaufwandes wurden die in Python verfassten Skripte über einen Webbrowser ausgeführt, um Zugang zu freien Rechenressourcen zu erhalten. Das vom Autoren selbst gesteckte Ziel bestand in der Entwicklung eines in der Spielwelt autonom fahrenden Automobils, welches sich durch Erkennung von Objekten und Fahrzeugen im Straßenverkehr fortbewegen kann. Dazu wurden spezielle gefaltete neuronale Netzwerke (Convolutional Neural Network), eine zum maschinellen Lernen besonders geeignete Sonderform des neuronalen Netzes verwendet, welche mit einem vom Autor selbst erfassten Datensatz bestückt wurden und zusätzlich wurde ein Algorithmus zur Erkennung und Lokalisierung von Objekten integriert. Eine Längs- und Quersteuerung des Fahrzeuges muss zum selbstständigen Fahren vorhanden sein. Gefaltete Schichten im neuronalen Netzwerk erkennen in Bildern Muster und gemeinsame Merkmale, vgl. [59]. Dazu wird jedes Bild in seine kleinsten Bestandteile, die Pixel, zerlegt. Jeder Pixel weist bei einem Schwarzweiß-Bild eine spezifische Dichte zwischen den Werten 0 und 255 auf, 0 steht für schwarz und 255 für weiß, die Zwischenwerte beschreiben Grauabstufungen. Mathematisch beschrieben ist das Schwarzweiß-Bild mit einer Länge, einer Breite und einer Tiefe, die in diesem Fall einskalig ist und demnach den Wert 1 innehat. Farbbilder hingegen

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

haben eine Bildtiefe von 3. Grund dafür ist die Darstellung jeder beliebigen Farbe bei Computern aus den drei Farben Rot, Grün und Blau. Das menschliche Auge beherbergt mit den Blau-, Grün- und Rotrezeptoren drei verschiedene Zapfentypen, welche als Fotorezeptoren je nach Aktivierung dem Menschen das Farbsehen ermöglichen. Auf diese Weise kann ein einzelnes Bild in eine dreidimensionale Matrix umgewandelt werden. Die Tiefe ergibt sich aus den unterschiedlichen Anteilen von Rot, Grün und Blau für das Bild und die Pixel. Verarbeitet wird diese Matrix im Anschluss im sogenannten Faltungsfiler mit einer Kernel Matrix. Beim Faltungsvorgang wird diese spezielle Matrix über die Matrix eines jeden Pixels gehalten und eine Multiplikationsoperation durchgeführt. Dadurch entstehen neue Matrizen mit spezifischen Informationen.

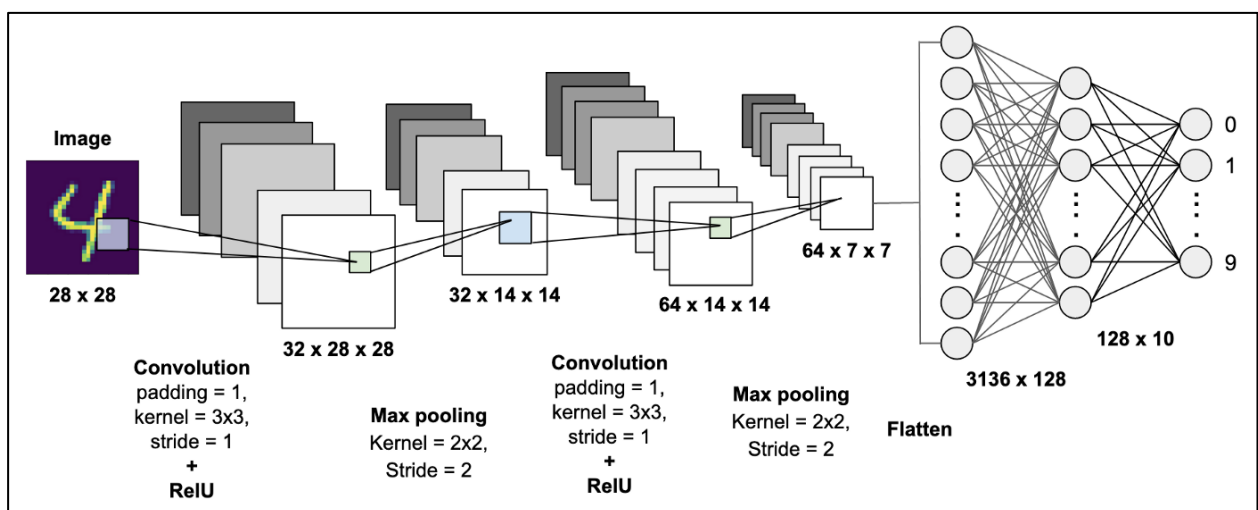


Abbildung 27: Das gefaltete neuronale Netz in einer vereinfachten Darstellung.

Je nach Kernel-Matrix können unterschiedliche Zahlenwerte und damit Bildinformationen extrahiert werden. Prioritätswerte der einzelnen Kernels können während des Trainingsprozesses vergeben werden. Ein weiterer wichtiger Schritt in der Bildverarbeitung ist das Einfügen einer nichtlinearen Funktion als Aktivierungsfunktion im neuronalen Netz. Diese ist für die weitere Verarbeitung der Bildinformationen von Bedeutung. Auf die Faltungsschichten zur Informationsextraktion folgt eine Schicht zur Verringerung der Komplexität des Modells. Die wichtigsten Informationen aus der Faltungsextraktion bleiben dabei erhalten. Wie auch schon der Faltungsfiler funktioniert das sogenannte Pooling mittels des Einsatzes von Kernel-Matrizen, woraus neue, komprimierte Werte berechnet werden. Nach Abschluss der Extraktions- und Kompressions-Prozesse wird das entstandene Ergebnis in eine Abfolge miteinander

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

verbundener Neuronen gegeben. Jedes Neuron ist mit allen Neuronen der nachfolgenden Schicht verbunden und die Informationsgabe zur weiteren Bearbeitung erfolgt durch eine austarierte Gewichtung der einzelnen Verbindungen. Das in diesem Versuch verwendete neuronale Netz stammt vom IT-Unternehmen NVIDIA und wurde speziell zur Auswertung von Bildern aus Sicht des Fahrers, also aus der Motorhauben-Ansicht entwickelt. Es besteht aus neun Lagen; fünf zur Faltungsfilterung, drei vollständig verknüpfte Schichten sowie eine weitere Lage zur Normalisierung und Normierung des Bilds als Eingabe. Informationsextraktion erfolgt über verschieden große Kernel-Filter und daran schließt sich das eben bereits benannte neuronale Netz an, an dessen Ende die resultierende Steuerungs-Aktion des Fahrzeuges steht, vgl. [59]. Das PilotNet von NVIDIA wurde auf Grund seiner kurzen Berechnungszeit für diese Aufgabe ausgewählt. Trainiert und kalibriert wurde das Netz mit Aufnahmen der Straße aus der Fahrerperspektive in Verbindung mit dem zugehörigen Stellwinkel des Lenkrades unter verschiedenen Wetter- und Verkehrsbedingungen. Nach erfolgter Kalibrierung seitens NVIDIAs kann der Nutzer Bildsequenzen aus der Motorhauben-Ansicht eingeben und als Ausgabe den dazu passenden Stellwinkel des Lenkrades erhalten. Nachzuvollziehen ist der Aufbau in der folgenden Abbildung.

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

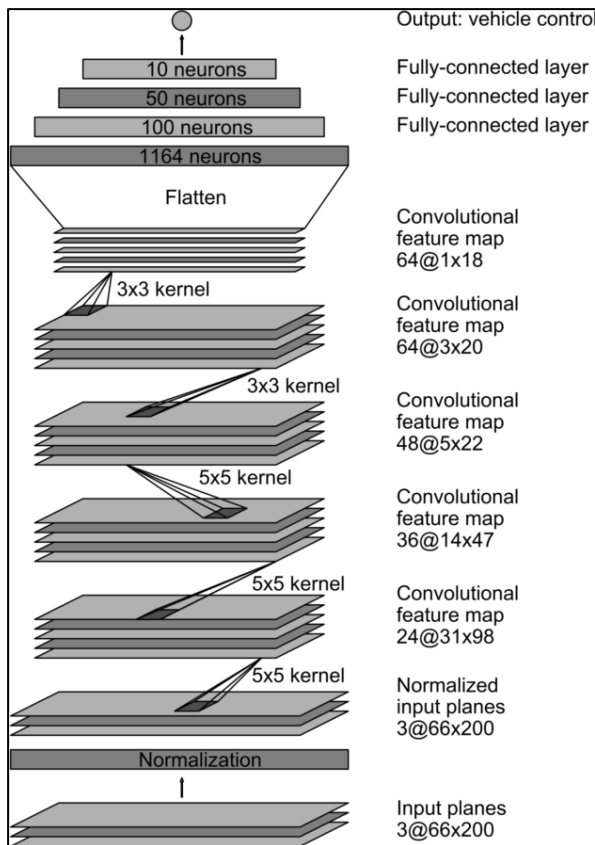


Abbildung 28: Systemarchitektur des PilotNet von NVIDIA

Die Datenerfassung in Verbindung mit Lenkradstellung (-1 bis 1) und Beschleunigungswert (-1 bis 1) erfolgte in einer mehrstündigen Fahrt über die Spielkarte mit wechselnden Verkehrsdichten, Straßensituationen und Witterungsbedingungen. Wegen der begrenzten Kapazitäten an Arbeits- und Massenspeicher wurden Schwarzweiß-Aufnahmen mit einer Auflösung von 160 x 120 Pixeln erstellt. Insgesamt wurden etwa 100.000 Bilder aufgenommen. Zur besseren Kalibrierung des Algorithmus wird der Datensatz im Anschluss bearbeitet und letztendlich eine Verteilung ähnlich der einer Gauß-Kurve bei Lenkwinkeln und Beschleunigungswerten erreicht. Es verbleiben rund 40.000 Bilder im Datensatz. Im nächsten Schritt werden alle vorhandenen Aufnahmen des Straßenverkehrs entlang der Horizontalachse gespiegelt und der zugehörige Lenkwert mit dem Faktor -1 multipliziert. Dadurch kann die Größe des Datensatzes verdoppelt und das neuronale Netz noch besser kalibriert werden. Zur besseren allgemeinen Verwendbarkeit der Anwendung werden im Lernprozess immer wieder zufällige Verschiebungen, Helligkeitswechsel und Vergrößerungen im Bild eingestreut, vgl. [59]. Bildlich vorstellbar ist das Kalibrieren eines faltbaren neuronalen Netzes als das Finden des globalen Minimums der

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Verlustfunktion. Im zweidimensionalen Raum startet man dabei an einer zufällig ausgewählten Stelle der Funktion und berechnet die Steigung an diesem Punkt. Ist die Steigung in diesem Punkt positiv, wird ein neuer Messpunkt links von der vorherigen Stelle ausgewählt. Ist die Steigung hingegen negativ, wird rechts davon ein neuer Messpunkt ausgemacht. So wird mit der Zeit ein Punkt mit keiner Steigung ausfindig gemacht, also das Minimum der Funktion. Problematisch ist hierbei aber die Tatsache, dass es sich bei der ausfindig gemachten Stelle um ein lokales Minimum handelt und nicht um das globale Minimum. Im dreidimensionalen Raum ist die Vorgehensweise ähnlich, berücksichtigt aber die abweichenden dimensional Gegebenheiten. Jetzt kann das Fahrzeug bereits selbstständig fahren und lenken, allerdings noch keine Objekte und Hindernisse erkennen. Dazu wird ein weiterer Algorithmus zur Detektion und Lokalisierung in die Steuerungssoftware implementiert. Hintergrundgedanke ist dabei, dass wenn das Fahrzeug die exakten Positionen von Fußgängern, anderen Fahrzeugen und Hindernissen wie Laternenpfählen und Ampeln kennt, können Steuerungsentscheidungen besser abgestimmt werden und es soll auch die Orientierung auf der Straße verbessern. In diesem Projekt wurde das von Facebook Artificial Intelligence Research entwickelte System zur Objekterkennung YOLOv3 (You Only Look Once in der dritten Version) verwendet. Kennzeichnend für diese Anwendung ist die Vereinheitlichung verschiedener Erkennungsmethodiken in einem neuronalen Netz. Das eingegebene Bild wird mit einem Gitternetz überzogen und in viele kleine Quadrate eingeteilt. In jedem Zentrum der Quadrate bildet das Programm jetzt Rahmen zur Objekterkennung und vier Koordinaten zur mathematischen Beschreibung des Rahmens. Mit einem Gleichungssystem und den Koordinaten werden nun Breite und Höhe des Rahmens sowie der Standort des Mittelpunktes des Rahmens berechnet. Jede vom Programm erstellte Rahmenbegrenzung wird mit einer Bezeichnung sowie einem sogenannten confidence score versehen, mit dem das Programm über die geschätzte Richtigkeit der Angabe informiert. Ist dieser Wert unterhalb einer nutzerdefinierten Grenze, wird dieses Begrenzungsrechteck verworfen. Zusätzlich zum Erkennen eines Objektes ist auch die Entfernungsmessung von hoher Wichtigkeit, um das Fahrzeug entsprechend bremsen oder beschleunigen zu lassen. Mit Hilfe der Höhe und der Breite des Erkennungsrahmens kann die diagonale Länge des Rechtecks mit dem Satz des Pythagoras bestimmt werden. Dabei gilt: Je größer der Wert der diagonalen Länge ist, desto näher ist das Objekt dem autonomen

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Fahrzeug. Wann ein Objekt zu nah oder weit genug entfernt ist, kann vom Anwender festgelegt oder durch Experimente angepasst werden. Denkbar ist hier auch eine Regulierung in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit. Aus der nachfolgenden Abbildung kann als Leitsatz abgeleitet werden, dass das erzeugte Rechteck umso größer ist, je näher sich das Fahrzeug bzw. das erkannte Objekt am gesteuerten Fahrzeug befindet. Die Farbe des Rechtecks verdeutlicht die räumliche Entfernung.



Abbildung 29: Spielszene aus Grand Theft Auto V mit implementierter Objekterkennung und Entfernungsmessung.

Im Laufe der durchgeführten Testreihen mit dem ganzheitlichen System zur Fahrbahn- und Fahrzeugerkennung, Entfernungsmessung und Steuerung des Automobils wurde es zum Problem, dass auch Fahrzeuge in benachbarten Spuren, im Gegenverkehr oder auch parkende Autos am Straßenrand als zu nah erkannt wurden und das Auto deshalb abbremste. Zur Lösung dieses Problems wurde der Erfassungsbereich auf einen schmaleren Streifen direkt vor der Motorhaube verengt, vgl. [59]. Der Versuch zeigt, dass es möglich ist, ein autonom steuerndes Auto nur mit automatischer Umgebungserkennung und neuronalen Netzen zu realisieren. Allerdings ist gerade in den Videosequenzen des Experimentes zu erkennen, dass das Fahrzeug beim Fahren nur zwischen den Fahrstreifenbegrenzungen hin und her wandert und bis zu einer realistischen Fahrweise noch viel Optimierungsarbeit liegt. Die von den Entwicklern in das Spiel integrierte selbst fahrenden Fahrzeuge überzeugen beispielsweise deutlich besser in ihren Fahreigenschaften und im Verhalten im Straßenverkehr.

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Verbesserungspotenzial gibt es laut dem Autor noch in einer höheren Auflösung der eingegeben Bilder mit mehr Fahrten außerhalb der Autobahnen sowie eine weitere Funktion zur temporären Abspeicherung vollführter Fahrmanöver. Dadurch könnten die Fahreigenschaften realistischer gestaltet werden.

Allerdings sind auch diese Programme in ihrer Anwendbarkeit für die Forschung begrenzt. Dies gilt auch für Grand Theft Auto V, welches zwar die städtische Umgebung detailgetreu simuliert, aber zum Beispiel keine Anwendung und aussagefähige Vergleiche für verschiedene Fahrstrategien ermöglicht und auch keine Rückmeldung bei Verletzung der Verkehrsregeln oder Verursachen eines Unfalls liefert. Weiterhin erlaubt das Spiel nur geringe Anpassungsmöglichkeiten für die Simulationsumgebung und für das Durchlaufen von spezifischen Skripts, also von außen zugeführte Listen mit Befehlen oder Szenarien. Sensoren an den Fahrzeugen für die Umgebungserkennung oder den gegenseitigen Informationsaustausch (falls dieser in der Programmierung überhaupt vorgesehen ist) sind ebenso wenig konfigurierbar, vgl. [59]. Gründe für die begrenzten Simulationsmöglichkeiten sind in der allgemeinen Zielsetzung der Entwickler für dieses Spiel zu finden, in der es um das Erschaffen einer der Realität nachempfundenen Spielwelt mit einem darin angesiedelten komplexen Handlungsstrang ähnlich dem einer Kinoproduktion ging und nicht um die Programmierung eines Simulationsprogramms für die Ertüchtigung des autonomen Fahrens. Den Großteil der Spieler dürfte es eher um die Kombination aus Umgebung, Gameplay und Handlung gegangen sein. Nichtsdestotrotz ist mir das Fahrverhalten der computergesteuerten Fahrzeuge im Spiel als sehr realistisch in Erinnerung geblieben. Zwar erlebte ich beim Spielen immer wieder Auffahrunfälle ohne erfindlichen Grund und mitunter irrationale Verhaltensweisen der Fahrerinnen und Fahrer, aber gemessen an Größe und Detailgrad der Spielwelt mit weitläufigen städtischen und ländlichen Abschnitten ließen die vielen Automobile, Lastkraftwagen und Motorräder die Spielwelt deutlich lebendiger und einladender wirken. Auch der Verkehr auf mehrspurigen Straßen und Autobahnabschnitten funktionierte meiner Erfahrung nach glaubhaft und realitätsnah.

Die Verwendung von synthetischen Daten aus Videospielen und Simulationsprogrammen stellt eine wichtige Ergänzung zu den Feldversuchen mit automatisierten und vernetzten Fahrzeugen dar. Entwicklung und Kalibrierung künstlicher Intelligenz für autonome Fahrzeuge benötigt große Mengen an Daten, in

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Zahlen gefasst muss das Auto und damit die Erkennungs- und Steuerungsalgorithmen mehrere Millionen Kilometer und knapp eine Millionen Terabyte Verkehrsdaten durchlaufen, um auf jede denkbare Verkehrssituation vorbereitet zu sein und auch in schwierigen Situationen richtig reagieren zu können. Bei den Daten ist es außerdem wichtig, dass diese variieren und die gleichen wie die Trainingsdaten sind. Ansonsten kann das System beim Einsatz in einer neuen Umwelt mitunter einen Totalausfall erleiden und Menschenleben gefährden. Dieses hohe Trainings- und Kalibrierungspensum stellt für die Entwickler und Hersteller solcher Fahrzeuge und Systeme eine große Herausforderung dar. Auch können im normalen Straßenverkehr schlicht nicht alle denkbaren Extremsituationen nachgestellt werden, ohne dabei Menschenleben oder hohe Sachschäden zu riskieren. In diesen Situationen muss das Auto einfach funktionieren und darf sich keinen Fehler erlauben. Mit synthetischen Daten kann diesem Problem Abhilfe geschaffen werden, in Kombination mit „natürlich“ erzeugten Datensätzen aus dem Straßenverkehr. Anwendungen mit fotorealistischer Grafik und realistischem Fahrverhalten können zahlreiche Fahrsituationen risikofrei darstellen. Durch das Training in verschiedenen Spielen und Anwendungen kann außerdem die Datenvariation erhöht werden und das System in vielen unterschiedlichen Umgebungen einsetzbar machen, vgl. [57]. Gerade das Spiel Grand Theft Auto V wird in diesem Zusammenhang oft in der Fachliteratur erwähnt. Allerdings bestehen Unterschiede zwischen den Spielen in Anwendbarkeit für die Forschung. Beim Training autonomer Fahrzeuge gilt der Grundsatz, je mehr Daten und je mehr Variation, desto besser. Beim Einsatz synthetischer Daten ist aber darauf zu achten, mit Umweltänderungen, wechselnder Einsatz von Objekten und Lichteinflüssen für ausreichend Abwechslung zu sorgen und die Erfassungssysteme und das damit verbundene neuronale Netz vor stetig wechselnde Anforderungen zu stellen. In Verbindung mit echten Daten kann dies eine wirkliche Unterstützung sein, auch aus Kosten- und Aufwandsgründen.

4.2 Das Open Source Simulationsprogramm SUMO

Ein Beispiel für eine Anwendung zur Verkehrssimulation ist die Simulation of Urban Mobility, kurz SUMO, welche vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt und im Jahr 2002 erstmals veröffentlicht wurde und seitdem kontinuierlich betreut und optimiert wird. Rückblickend hat es damals zwei Gründe gegeben, welche für eine Veröffentlichung des Programms als Open Source Software, also frei verfügbar, gesprochen haben. Zum einen wollte das Institut eine kostenlose Anwendung für die

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

zahlreichen Menschen herausbringen, welche sich mit der Verkehrssimulation beschäftigen. Es sollte so ausgelegt werden, dass die Nutzer auch eigene Algorithmen in das Programm implementieren können. Zwar gab es zu dieser Zeit schon andere Open Source Programme zur Verkehrssimulation, aber wurden diese im Rahmen von Studien- oder Abschlussarbeiten erstellt und nach Beendigung des Projektes nicht mehr weiter unterhalten. Außerdem fehlte eine Möglichkeit zum Vergleich der implementierten Simulationsalgorithmen und –modelle und damit der einzelnen Programme untereinander. Andererseits wollte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt mit der Open Source Idee Unterstützung für die Anwendung von anderen Lehrstühlen und Instituten erhalten, welche sich ebenfalls mit der Thematik der Verkehrssimulation beschäftigen und dem Programm neue Werkzeuge und Module hinzufügen können, vgl. [60], S. 128. Seit der Veröffentlichung der ersten Version hat sich SUMO zu einem umfassenden Programm für die Verkehrsmodellierung entwickelt. Kategorisiert werden kann die Simulation of Urban Mobility als eine mikroskopische Simulationsplattform. Mikroskopisch beschreibt im Kontext der Verkehrssimulation den höchsten Detaillierungsgrad mit dem Abbilden einzelner Fahrzeuge oder Fußgänger und der Betrachtung ihrer Interaktionen untereinander. Im Gegensatz dazu steht die makroskopische Simulation, in der nur komplette Verkehrsströme ohne einzelne Teilnehmer abgebildet werden und auf diese Weise große, zusammenhängende Netze betrachtet werden können.

Neben dem Verkehrsmanagement und der Fahrzeugkommunikation kann die Software bei einer Vielzahl von Forschungsthemen eingesetzt werden. Mittlerweile enthält SUMO eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen und Applikationen zur Erweiterung der Simulationsmöglichkeiten, dazu gehören unter anderem eine Schnittstelle zur Implementierung von Straßenkarten, leistungsstarke Simulationskapazitäten für einzelne Kreuzungen und Knotenpunkte sowie Nachfrageerzeugung und Routenwahlprogramme. Im Grunde genommen stellt das Programm mehr als nur eine bloße Verkehrssimulation dar, sondern vielmehr Anwendungen für Vorbereitung und Durchführung von Simulationen. Angefangen bei der Generierung und Darstellung von Straßennetzen, dem Grundstein eines jeden Simulationsprogrammes. Sie können entweder mit der im Programm enthaltenen Anwendung „netgenerate“ erstellt oder alternativ als digitale Straßenkarte beliebigen Formates importiert werden, diese Anwendung trägt den Namen „netconvert“. Dies ist vor allem bei der Abbildung und

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Simulation von Verkehrsflüssen real existierender Städte interessant. Netgenerate kann mit Gitternetzen, Spinnennetzähnlichen und zufällig generierten Netzen drei verschiedene Arten von abstrakten Strukturen erstellen, welche mit einer Reihe von optionalen Einstellungen weitergehend konfiguriert werden können. Ob aus anderen Verkehrssimulatoren (MATSim, VISUM etc.) oder gängige digitale Formate für Straßennetze, Netconvert ist zum Import von Straßennetzen im Stande. Wie anhand der nachfolgenden Abbildungen erkennbar ist, kann SUMO die Karte der schwedischen Stadt Göteborg sehr detailliert von der OpenStreetMap-Karte in das Programm übertragen, vgl. [60], S. 128-129.

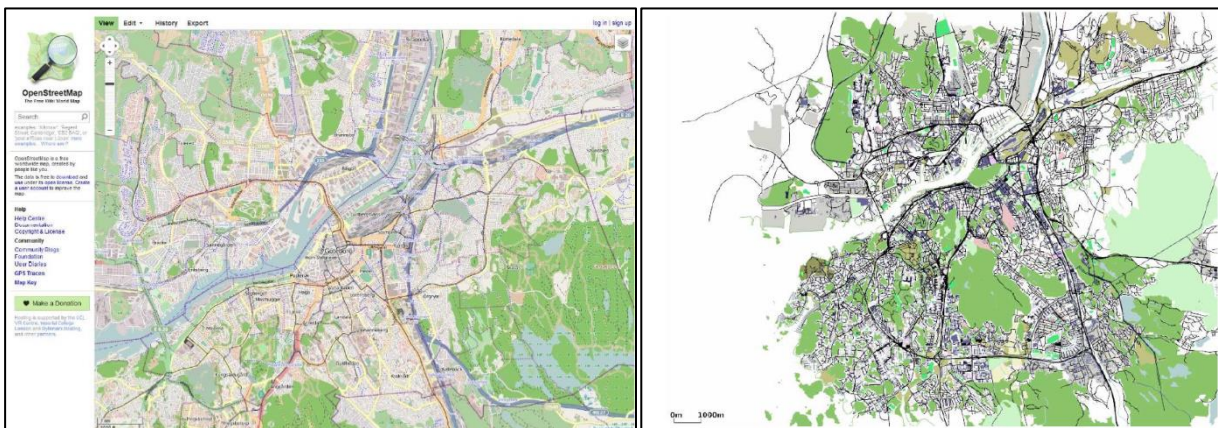


Abbildung 30: Ansicht der schwedischen Stadt Göteborg und nach Importierung des Kartenmaterials in SUMO.

Die Darstellung von Straßen und Kreuzungspunkten erfolgt in der Anwendung graphisch über Geraden und Knoten. Jeder Kreuzung sind eine genaue Position, eine Form und die jeweils gültigen Vorfahrtsregeln zugeordnet. Diese können alternativ auch durch eine Ampel ersetzt werden. Straßenabschnitte stellen Verbindungen zwischen diesen Knoten her und zeichnen sich durch eine spezifische Anzahl von Fahrspuren aus. Wie auch die Kreuzungen verfügt jede Fahrspur über Informationen zur Geometrie, also zu ihrer Form und Positionierung im Verhältnis zu den Knotenpunkten, zu den erlaubten Fahrzeugklassen sowie zur erlaubten Höchstgeschwindigkeit. Bei der Nachbildung einer realen Stadt müssen diese Daten vom Nutzer selbst eingetragen werden. Diese Darstellung ist üblich im Bereich der Verkehrssimulationsprogramme. Über dieses Grundformat hinaus gibt es Netzpläne mit sämtlichen verzeichneten Ampelanlagen und an Kreuzungen zusätzlich eingezeichnete Spurverbindungen, mit denen das Befahren der Kreuzung, abhängig von der gewählten Fahrspur, nachvollziehbar ist. Bei der Übertragung vom Dateiformat in die Anwendung hinein wird

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

außerdem eine SUMO-spezifische Darstellung des Straßennetzes erzeugt, die sogenannte „plain“ XML-Darstellung, also eine ebene Darstellung ohne Höhenstufen. Diese erlaubt den höchsten Detaillierungsgrad für die Beschreibung eines Straßennetzes in SUMO und ist in fünf verschiedene Dateitypen untergliedert, welche jeweils andere Bestandteile des Netzes beschreiben: Straßen, Kreuzungen, optionale Straßendaten, Verbindungen (die zuvor erwähnten Spurverbindungen) und Ampelpläne. Mit diesen Dateitypen lässt sich das Straßennetz für SUMO so genau wie möglich beschreiben und ermöglicht den für die mikroskopische Verkehrssimulation notwendigen Detaillierungsgrad. Bei Karten mit unvollständigen Eingaben für die fünf Dateitypen werden annäherungsweise bestimmte Werte verwendet. Das Zusammenführen mehrerer eingegebener Dateiformate ist ebenso möglich wie das Bearbeiten der Netzkonfiguration mit Fahrbahn- und Kreuzungsparametern. Der notwendige Detaillierungsgrad auf mikroskopischer Ebene fehlt allerdings den meisten digital verfügbaren Straßenkarten, beispielsweise werden auf OpenStreetMap nicht jede Ampelanlage und bei jeder Straße die Anzahl der Fahrspuren eingetragen, da diese nur zur Navigation gedacht ist, vgl. [60], S. 129. Aus diesem Grund müssen solche Karten meist vor Verwendung mit speziellen Programmen und Annäherungsverfahren überarbeitet werden und fehlende Informationen abgeschätzt werden. Dies hat eine zeitaufwändige Kontrolle durch den Nutzer sowie ein manuelles Verbessern zur Folge, gerade bei ungewöhnlichen Straßenführungen und komplexen Kreuzungssystemen mit mehrspurigen Straßen und Ampelschaltungen. Für diese zwangsläufig anfallenden Arbeiten wurde das Werkzeug „netedit“ entwickelt, welches statt der Vorbereitung der XML-Eingabedateien die graphische Bearbeitung direkt im Straßennetz ermöglicht. Damit werden die Netzgenerierung und die Überprüfung mit Netconvert in einem Schritt vereinigt.

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

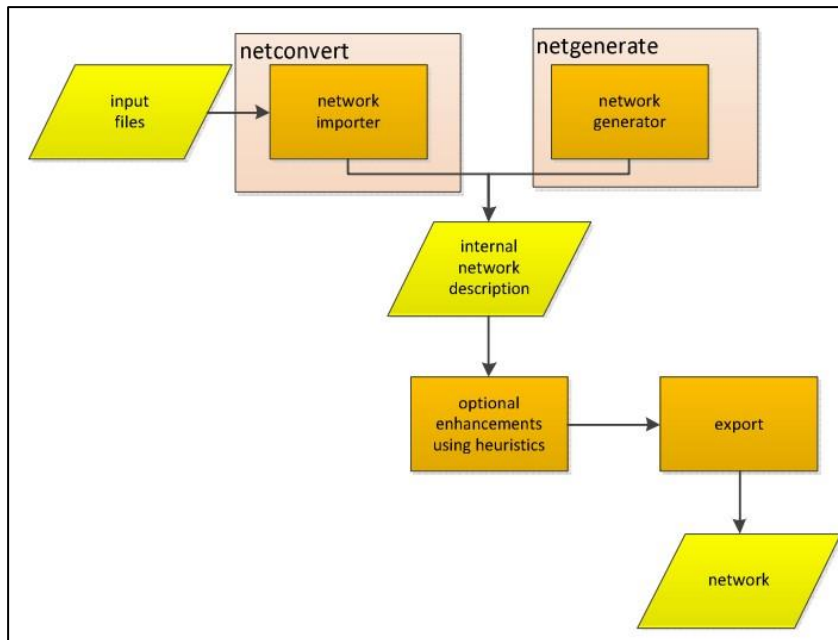


Abbildung 31: Schaubild zum Ablauf der Erstellung einer Simulationskarte in SUMO

Nach der Erstellung eines geeigneten Straßennetzes oder der Abbildung eines real existierenden geht es jetzt an das Einbringen von Fahrzeugen und ihren dazugehörigen Fahrzielen. Durch die mikroskopisch angelegte Simulationsweise ist jedes Auto im Programm erkennbar und somit auch immer Kennung, Abfahrtszeit und das Fahrziel mit entsprechender Route vermerkt. Die Route wird in SUMO anhand einer Liste der miteinander verbundenen Kanten bzw. Straßen festgelegt, welche über die Knoten miteinander verbunden sind. Zusätzlich kann das Programm sogar genau sagen, welche Spuren vom Fahrzeug befahren werden müssen, mit welcher Maximalgeschwindigkeit es unterwegs sein darf und wo auf der Straßenkarte es sich gerade befindet. Neben der Simulation von Verkehrsstauungen können auch Lärm- und Schadstoffemissionen jedes Fahrzeugs verfolgt und aufgezeichnet werden. Zur Bestimmung der Nachfrage nach Verkehrsfläche bzw. den sich daraus ergebenden Belastungen für das Straßen- und Autobahnnetz gibt es mehrere Möglichkeiten, deren Einsatz sich nach der Größe der untersuchten Stadt richtet. Dazu stellt SUMO dem Nutzer eine Reihe von Werkzeugen zur Verfügung, welche allesamt mit Hilfe mathematischer Verfahren funktionieren, vgl. [60], S. 130. In großen Verkehrsnetzwerken mit vielen beteiligten Fahrzeugen können sogenannte Start/Ziel Matrizen zum Einsatz kommen. Zwischen vom Softwareanwender installierten Verkehrsanalysezonen können Fahrzeugbewegungen pro Zeiteinheit erfasst werden. Da jedes Fahrzeug im Programm mit einer speziellen Kennung erfasst ist, können diese

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

beim Durchfahren der Zonen gezählt werden. Allerdings müssen zur Erfassung der tageszeitlichen Variation der Verkehrsströme, etwa morgens kurz vor Arbeitsbeginn und nachmittags kurz nach Feierabend, mehrere Datenabgleiche pro Tag stattfinden.

Nur eine gesamte Zählung am Tag kann keine Schwankungen in der Flussrate abbilden und kann auch zu Fehlinterpretationen des Verkehrsgeschehens führen, eine Zählung jede Stunde würde mehr Sinn ergeben. Mit diesen genauen Ergebnissen kann das Programm auch Start- und Zielzonen in der Stadt ausweisen und den Verkehrsfluss in der Simulation dynamisch verändern. Damit SUMO aus den Verkehrsdaten auch eine vollständige Abbildung in der virtuellen Stadt erstellen kann, muss das Programm auch den genauen Weg zwischen den gesetzten Verkehrsanalysezonen kennen, also eine vollständige Liste aller abgefahrenen Kanten auf der Karte. Mit einem iterativen Prozess, also ein mehrfaches Wiederholen zur Annäherung an eine Lösung, zum Finden des kürzesten Weges unter Berücksichtigung verschiedener Kostenfunktionen als Einschränkungen, ermittelt das System den sinnvollsten Weg zwischen den Analysezonen. Einem Computer ist es beispielsweise nicht einfach so möglich auf einem Stadtplan den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten zu ermitteln, sondern er muss mittels Längenangaben, den zulässigen Geschwindigkeiten und mit Hilfe der Daten aus den Verkehrsanalysezonen durch mathematische Verfahren auf eine optimale Route kommen. Bei diesem Routenfindungsprozess kommen zusätzlich noch prozentuale Werte der Abbiegevorgänge an Kreuzungen und Zählungen von Querschnittsdetektoren wie zum Beispiel Induktionsschleifen zum Einsatz, welche bei der Bewertung einzelner Straßenabschnitte und von Autobahnen sinnvoll sind. Zentrales Problem bei der Simulation von Straßenverkehrsnetzen in Städten und urbanen Räumen bleibt aber die schlechte Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Datensätze realer Straßennetze für den freien Zugang, vgl. [60], S. 130. Deshalb können gesamtheitliche Modelle oftmals nur mit groben Werten oder Annahmen kalibriert werden und somit die Wirklichkeit nur begrenzt wiedergeben. Abhilfe sollen Tools zur Steuerung der Verkehrsnachfrage und Erzeugung von Nachfragequellen schaffen, allerdings ist diese Generierung des Wunsches nach Mobilität auch nur eine Annäherung an die Wirklichkeit und kann aussagekräftige Datensätze nicht ersetzen.

Über die Simulation of Urban Mobility gibt es zu wissen, dass sie zeitdiskret mit einer Standardschrittlänge von 1 Sekunde durchgeführt wird, also werden die Variablen jede Sekunde neu berechnet. Der Begriff zeitdiskret beschreibt in diesem Zusammenhang

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

das Betrachten der Änderungen eines Systemzustandes zu bestimmten Zeitpunkten. In der dazwischenliegenden Zeit wird der Zustand des Systems und damit der einzelnen Variablen als unverändert angenommen. Neuberechnungen finden nur an den festgelegten Zeitpunkten statt, auf diese Weise kann eine relativ genaue Abbildung eines Systems mit verhältnismäßig geringem Rechenaufwand dargestellt werden.

Die Zeit wird vom Programm immer in Mikrosekunden als ganzzahlige Werte erfasst, um Kommazahlen bzw. Dezimalzahlen zu vermeiden. Durch die in der Programmierung verwendete Dateigröße für den Zahlenwert sind 49 Tage die Maximaldauer eines Simulationsszenarios.

Passend zur Aufgabestellung dieser Bachelorthesis kommt auch im Simulationsprogramm SUMO ein Fahrzeugfolgemodell zur Steuerung der Autos bzw. zur Regulierung der Geschwindigkeit zum Einsatz, in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit, des Abstandes zum Vordermann sowie zu seiner Geschwindigkeit. Bekannt sind Fahrzeugfolgemodelle bereits aus Kapitel 3.4. In der Simulation of Urban Mobility implementierten die Entwickler eine Weiterentwicklung des stochastischen Fahrzeugfolgmodells. Die Simplizität des Modells in Verbindung mit seiner hohen Berechnungs- und Ausführungsgeschwindigkeit waren ausschlaggebend für die Wahl der Entwickler. Schwächen des standardmäßig implementierten, erweiterten stochastischen Fahrzeugfolgmodells sind die Festlegung von Lückengrößen beim Spurwechsel und eine auf die Simulationsabstände angepasste Skalierung der Simulation. Aus diesen genannten Gründen können dem Programm über eine Schnittstelle auch andere Fahrzeugfolgemodelle implementiert werden, vorausgesetzt sie kommen auch mit dem Einsatz in komplexen Verkehrsumgebungen mit hoher Verkehrsdichte und begrenztem Verkehrsraum zurecht. SUMO kann sogar mit der Zuweisung bestimmter Parameter an jedes Fahrzeug individuelle Fahrverhalten abbilden, da nicht jeder Autofahrer oder jede Autofahrerin gleich fährt und unterschiedliche Vorstellungen von Geschwindigkeit, Abstand und defensivem Fahren hat. Dieses Verhalten kann von Land zu Land ebenfalls stark abweichen und bedarf einer Berücksichtigung in der Simulation, vgl. [60], S. 131. Neben der Abbildung einer gesamten Verkehrssituation kann das Programm auch Modelle von Geräusch- und Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbräuchen erstellen. Diese sind in Zeiten von Klimawandel, Energie- und Verkehrswende von großer Bedeutung und eng mit dem Fahrverhalten bzw. der Simulationsleistung verknüpft, bei einer gleichmäßigen

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Fahrweise ohne viel Bremsen und Beschleunigen wird weniger Kraftstoff verbraucht und weniger Lärm und Abgase emittiert.

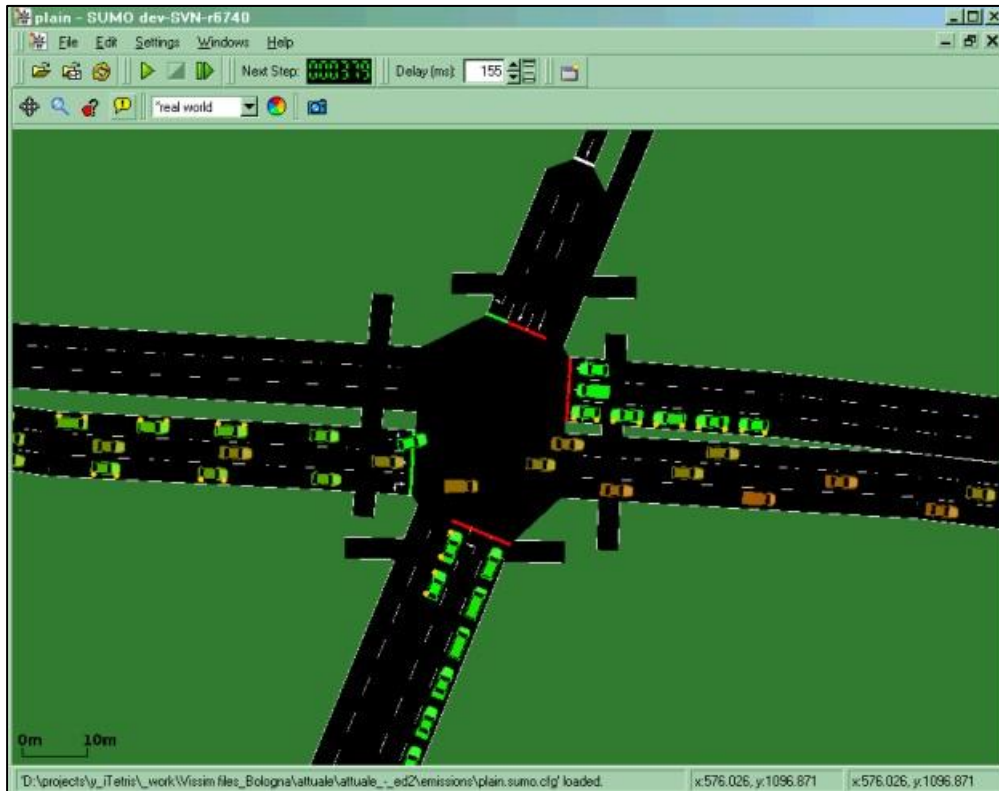


Abbildung 32: Die graphische Oberfläche von SUMO, hier: Befahren einer Kreuzung, Fahrzeuge nach ihren CO₂-Emissionen eingefärbt

Anwendung fand die Simulation of Urban Mobility beispielsweise schon in Forschungsarbeiten zu Kommunikation zwischen Fahrzeugen und ihrer umliegenden Infrastruktur. Das Programm dient hierbei der Erzeugung sogenannter Kommunikationsknoten als Ausgabe in einem bestimmten Dateiformat. Auf diese Weise können Anwendungen zur Abbildung von Kommunikationsabfolgen mit realistischem Fahrzeugverhalten bestückt werden. Immer ist eine kombinierte Simulation von Kommunikation und Verkehr notwendig. Die Verbesserung der Fahrzeugkommunikation erhöht die Verkehrssicherheit, denn bisher sind Programme wie SUMO nicht in der Lage, Kollisionen zu vermeiden und bei einem drohenden Zusammenstoß etwa eine Vollbremsung einzuleiten. Deshalb ist die Kommunikation der beiden Bereiche sinnvoll und wichtig für das autonome Fahren, vgl. [60], S. 136. Des Weiteren kann das Programm wegen seiner hohen Ausführungsgeschwindigkeit bei der Untersuchung von Routenwahl und dynamischer Navigation in verkehrsbelasteten Straßennetzwerken eingesetzt werden und auch die Bewertung spezieller Algorithmen zur

belastungsorientierten Steuerung von Ampelschaltungen lässt den Einsatz von SUMO zu. Auch andere Bereiche im System Straßenverkehr können durch das Programm evaluiert und verbessert werden und in Zukunft soll das Programm kontinuierlich erweitert und verbessert werden, um auch weiterhin zur Forschung und Entwicklung im Straßenverkehr und im autonomen Fahren beitragen zu können.

4.3 Einführung in CARLA

Der Begriff CARLA ist eine Abkürzung für „Car Learning to Act“ und ist ein frei im Internet verfügbares Simulationsprogramm für Forschungsarbeiten im Bereich des autonomen Fahrens und wurde von Grund auf zur Unterstützung von Entwicklung, Training und Validierung von autonomen, städtischen Fahrsystemen entwickelt. Charakteristiken der Anwendung sind ein frei und kostenlos zugänglicher Programmcode und dazugehörige Protokolle, welche alle zum Datenaustausch notwendigen Regeln, Parameter und Eigenschaften definieren. Des Weiteren werden dem Nutzer digital vorgefertigte Objekte wie Gebäude, Fahrzeuge und Stadtgrundrisse zur Verfügung gestellt und flexible Spezifikationen von im Programm implementierten Sensoren und Umweltbedingungen ermöglicht, wodurch der Anwender realistische Simulationsumgebungen schaffen und Alltagssituationen treffend nachbilden kann. Außerdem werden dem Nutzer wichtige Daten zur Prozessüberwachung geliefert. Dazu gehören GPS-Koordinaten der simulierten Fahrzeuge, die jeweiligen Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte sowie Informationen zu Kollisionen und Verletzungen der Verkehrsregeln. CARLA kann zur Erprobung von drei unterschiedlichen Ansätzen des Autonomen Fahrens verwendet werden. Mit dem Simulationsprogramm können die Entwicklungsansätze in kontrollierten Szenarien mit veränderbaren Umgebungsbedingungen erprobt und bewertet werden, vgl. [55], S. 1-2.

Bei der Programmierung von CARLA wurde viel Wert auf Realismus und Flexibilität in der Wiedergabe und der Physiksimulation gelegt. Grundlage des Programms bildet die Unreal Engine 4, eine Anwendung speziell für komplexe Berechnungen und Simulationen. CARLA baut quasi als eine Open Source Schicht auf dieser Basis auf und ermöglicht so Erweiterungen seitens der Nutzer, etwa zum Hinzufügen weiterer Objekte oder Erstellen von Modifikationen zur Verbesserung der Fahrphysik oder der Verkehrssimulation. Wie auch CARLA selbst ist auch die Nutzung der Unreal Engine 4 kostenlos, unter der Voraussetzung einer nicht-kommerziellen Nutzung. Aufgebaut ist

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

die Anwendung als ein sogenanntes Server-Client-System. Dieses System zeichnet sich dadurch aus, dass auf dem Rechner des Nutzers nur ein Client installiert wird und dieser mit dem Server bzw. dem Zentralrechner kommuniziert. Der Client sendet Befehle wie Lenken, Bremsen oder Beschleunigen an den Server und dieser führt Simulation und Wiedergabe der Szenen durch und sendet dem Client darausfolgende Messwerte von Sensoren zurück. Meta-Befehle sind von der Wertigkeit höher als Standardbefehle und steuern das Verhalten des Servers. Anwendungsbeispiele sind das Zurücksetzen der Simulation oder die Änderung der Umgebungs- oder Sensoreigenschaften.



Abbildung 33: Graphische Oberfläche von CARLA, typische Simulationsumgebung mit zahlreichen Gestaltungsobjekten

Die Umweltsimulation von CARLA besteht maßgeblich aus einer Vielzahl unterschiedlicher statischer und dynamischer dreidimensionaler Modelle. Bei der Erstellung der verschiedenen Objekte wurde auf visuellen Realismus Wert gelegt und es wurde ein variabler Detaillierungsgrad ermöglicht. Außerdem verfügen alle 3D-Modelle über einen einheitlichen Maßstab und sind in ihren Abmessungen den realen Vorbildern identisch. Eine Momentaufnahme der Bibliothek ergab 40 verschiedene Gebäude, 16 animierte Fahrzeugmodelle und 50 animierte Modelle von Fußgängern. Urbane Umgebungen wurden anhand einer festen Schrittfolge erstellt. Das Anlegen von Straßen und Bürgersteigen legt die grundlegende Struktur der Stadt fest. Häuser,

Vegetation, Geländemodifikationen und Verkehrsinfrastruktur erhöhen den Detailgrad der Stadt. Abschließend können noch sogenannte Spawnpunkte festgelegt werden, an denen Fußgänger oder Autos, also dynamische Objekte, erscheinen bzw. „spawnen“ können. Die Gestaltung des Verhaltens von Fußgängern und Autofahrern war eine Herausforderung im Entwicklungsprozess der Anwendung. Fahrzeuge, welche nicht durch den Nutzer gesteuert werden, erhielten das UE4 Fahrzeugmodell, ein Standard-Steuerungsmodell in Simulationsprogrammen. Zusätzlich wurde von den Entwicklern ein Controller zur gezielteren Steuerung der auf den Karten verkehrenden Fahrzeuge implementiert, vgl. [55], S. 3. Spurhaltung, Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen, Beachtung von Ampeln und Entscheidungsverhalten an Kreuzungen, all dies soll möglichst realitätsnah ablaufen. Fußgänger und Fahrzeuge folgen nicht nur einem bloßen Bewegungsskript, sondern nehmen ihre Umgebung wahr, erkennen andere Verkehrsteilnehmer und weichen ihnen aus. Über einen speziellen Anregungsfaktor nutzen Fußgänger meistens Bürgersteige und speziell markierte Straßenüberquerungen an Kreuzungen und Zebrastreifen. Allerdings kann es vorkommen, dass sie die Straßenseite an beliebig gewählten Punkten außerhalb der Überquerungen wechseln, dabei aber trotzdem versuchen Autos auszuweichen. Dies lässt die Simulation deutlich realistischer wirken. Gerade in großen Städten wechseln Menschen oft mitten drin die Straßenseite, weil dadurch der Weg kürzer wird, etwa wenn sie unter Zeitdruck stehen. Auch darauf muss ein Autofahrer und somit ein automatisiertes und vernetztes Fahrzeug reagieren und bremsen. Bestenfalls kann das Auto die Person schon vor dem Betreten der Fahrbahn erfassen und vorausschauend reagieren, wie es auch ein Mensch am Steuer machen würde. In der Simulation kann es zu Zusammenstößen zwischen Fahrzeugen und Fußgängern kommen. Die daran beteiligten dynamischen Objekte werden anschließend aus der Simulation gelöscht und nach kurzer Zeit ein Ersatz an einem Spawnpunkt erschaffen. Eine komplette Unfallsimulation mitsamt Rettungsdienst und Feuerwehr und den damit verbundenen Verkehrsauswirkungen ist in der Programmierung nicht vorgesehen. Das Aussehen der Fußgänger wird durch Zufallsprozesse festgelegt und soll die visuelle Vielfalt erhöhen. Auch die Beleuchtung der Simulationswelt ist vielfältig und kann verändert werden. Neben den Witterungsbedingungen kann auch die Tageszeit in Verbindung mit dem Sonnenstand verändert werden, insgesamt sind 18 verschiedene Kombinationen aus Beleuchtung und Wetter wählbar. Autonome Fahrzeuge müssen bei auch tiefem

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Sonnenstand, schlechter Sicht und regennasser Fahrbahn noch sicher operieren können und dürfen keine Fußgänger, Autos oder Hindernisse übersehen. Eine mögliche Maßnahme bei unvorteilhaften Witterungseinflüssen ist beispielsweise die Reduzierung der Geschwindigkeit und die Vergrößerung des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug. Der in der Simulation verwendete Steuerungsalgorithmus für Fußgänger und Autofahrer kann durch von Nutzern erstellte verbesserte und veränderte Systeme ergänzt werden. Damit können auch tiefergehende und sehr spezielle Simulationen und Analysen durchgeführt werden.

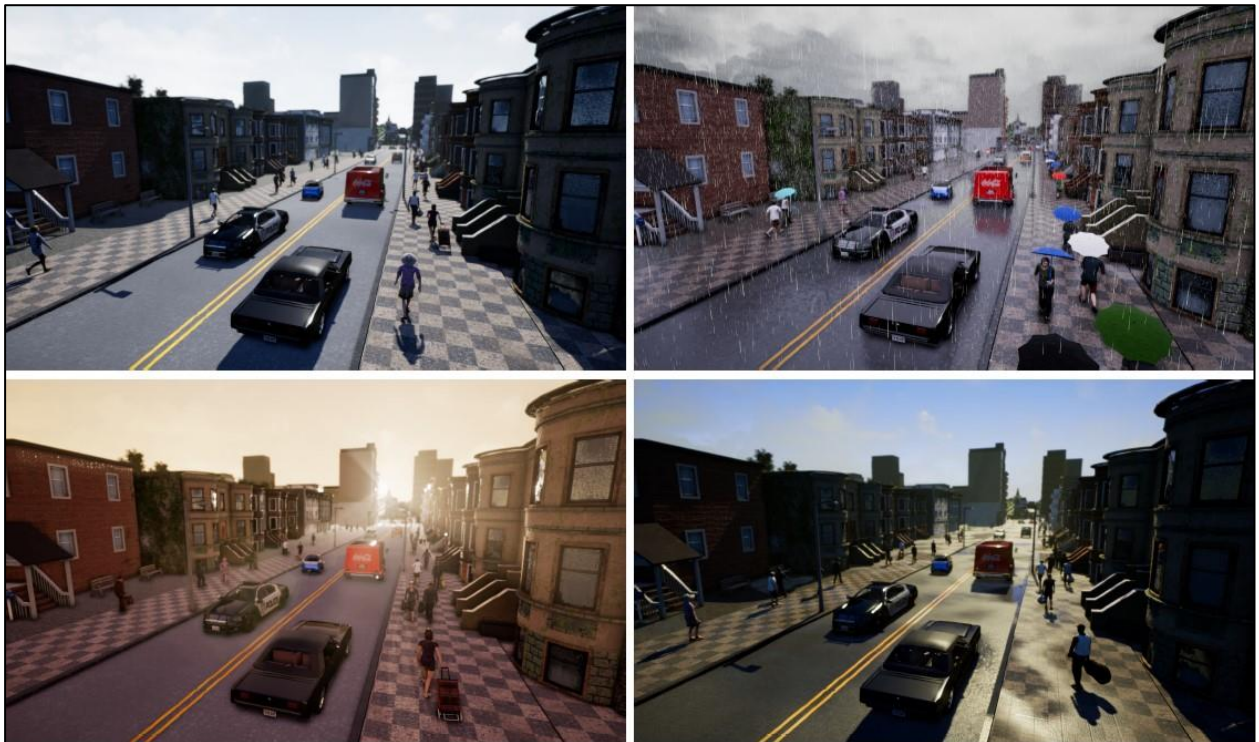


Abbildung 34: Ansicht einer urbanen Umgebung in CARLA mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen

Unerlässliche technische Einrichtung für das autonome Fahren sind Sensoren zur Umfelderkennung. In CARLA sind sie selbstverständlich auch implementiert worden und das Programm ermöglicht zudem eine flexible Konfiguration. Anzahl und Positionen der Kameras zur Umgebungserfassung können vom Nutzer selbst bestimmt werden. Jeder Kamera sind spezielle Parameter wie der Standort, die Ausrichtung im Verhältnis zum Fahrzeug, die Tiefenschärfe und das Sichtfeld zugeordnet. Die von den Entwicklern in die Anwendung eingebauten Sensoren dienen der semantischen Segmentierung und der Tiefenmessung. 12 verschiedene Kategorien kennt die semantische Segmentierung: Straße, Fahrbahnmarkierung, Verkehrszeichen, Gehweg,

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Zaun, Mast, Mauer, Gebäude, Vegetation, Fahrzeug, Fußgänger sowie andere, vgl. [55], S. 4. Zusätzlich liefert das Programm noch weitere fahrzeugbezogene Daten. Dazu gehören u.a. Ausrichtung und Position des Fahrzeuges, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Auswirkungen von Kollisionen. Dies gilt auch für sämtliche dynamische Objekte in der Umgebung des Fahrzeuges. Zur Überwachung der Einhaltung der Verkehrsregeln kann die Simulationssoftware den prozentualen Anteil des Fahrzeuges auf Bürgersteigen und fremden Fahrspuren messen und Auskunft über die aktuell gültige Geschwindigkeitsbegrenzung liefern.

Zum Trainieren der Steuerungssysteme und –algorithmen können verschiedene Lernmethoden angewendet, in diesem Fall sollen drei bedeutende Methoden miteinander verglichen und ihre Performance in verschieden anspruchsvollen Aufgaben mit einem Punktesystem bewertet werden. Eine dieser Methoden ist die sogenannte modulare Pipeline. Sie setzt sich aus verschiedenen Untergruppen zusammen, welche jeweils eigene Aufgabenbereiche wie die Wahrnehmung der Umgebung, die Bewegungsplanung und die Steuerung des Fahrzeuges übernehmen. Der Aufbau ist im Bereich der autonomen Fahrsysteme häufig anzutreffen und wurde auch im Kapitel 3.2 vorgestellt. Entscheidend bei der modularen Pipeline ist das erste Teilsystem, die visuelle Umgebungswahrnehmung. Dabei kommt semantische Segmentierung zum Einsatz, ein Verfahren zur Bilderkennung, bei dem jeder einzelne Pixel von einem Bild kategorisiert und verschiedenen Klassen zugeordnet wird. Auf diese Weise können Personen, Straßenlaternen und Fahrbahnmarkierungen erkannt und voneinander unterschieden werden. Computerprogramme können mittels neuronaler Netze auf das Erkennen verschiedener Objekte kalibriert werden. Dieses Verfahren ist bereits aus dem Abschnitt über Simulationsprogramme bekannt, inklusive eines Beispiels mit dem Computerspiel Grand Theft Auto V. Bildlich vorstellen lässt sich ein solcher segmentierter Wahrnehmungsprozess mittels einer Aneinanderreihung von vielen Lagen eines neuronalen Netzwerkes. Auf jeder blau gefärbten Ebene werden bildbezogene Funktionen durchgeführt und durch eine Pooling-Schicht (grün gefärbt) ein sogenanntes Downsampling. Am Ende dieses Prozess und Durchlaufen aller Schichten ist das gesamte Bild in eine bestimmte Kategorie klassifiziert. Diese müssen vorab vom Nutzer erstellt und mit zuweisbaren Merkmalen versehen werden. Um aber statt des gesamten Bildes einzelne Pixel klassifizieren und unterscheiden zu können, wird das zuvor verwendete neuronale Netz in umgekehrter Reihenfolge angefügt, wobei

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

dann von Upsampling gesprochen wird. Beide Teilprozesse sollten gleich lang sein, also gleich viele Schichten besitzen, damit das segmentierte Bild die gleichen Abmessungen und die gleiche Auflösung wie das Ursprungsbild hat, um Fehler und Ungenauigkeit ausschließen zu können. Eine Ausgabeschicht zur Pixelklassifizierung schließt den Prozess ab, welcher auch als Encoder-Decoder-Architektur bezeichnet werden kann, vgl. [61]. Die Kategorien Straße, Gehweg, Fahrbahnmarkierung, dynamische Objekte sowie verschiedene statische Objekte wurden im Vorhinein definiert, das Training erfolgte mit 2.500 Bildern aus der CARLA Trainingsumgebung. Auf Grundlage der sich aus dem zugehörigen neuronalen Netz ergebenden Wahrscheinlichkeitsverteilung kann die voraussichtliche Fahrspur mit Hilfe von Straßenfläche und Fahrbahnmarkierungen abgeschätzt werden. Weiterhin ist auch Bestimmung der Wahrscheinlichkeit sich an einer Kreuzung zu befinden möglich, durch einen binären Szeneklassifikator. Trainiert wurde diese mit rund 500 Aufnahmen. Auf die visuelle Umgebungswahrnehmung folgt die Bewegungsplanung. Auf der strategisch niedrigsten Ebene, also in unmittelbarer Nähe zum Automobil, wird hier die Navigation koordiniert und kurzfristig bestehende Wegpunkte erzeugt. Dabei ist die gewünschte Position und die Ausrichtung des Fahrzeuges von Bedeutung. Ziel der Bewegungsplanung ist es, das Fahrzeug auf der Straße in der Fahrspur zu halten und Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern und Hindernissen zu vermeiden. Das Programm für die Bewegungsplanung kennt fünf verschiedene Fahrzeugzustände: Folgen des Straßenverlaufs, Linksabbiegen, Rechtsabbiegen, Geradeaus über eine Kreuzung und die Gefahrenbremsung. Auf Grundlage von Schätzungen des Wahrnehmungsmoduls und Informationen zur Landschaft vom globalen Planer auf einer strategisch höher angesiedelten Ebene erfolgen Wechsel des Fahrzustandes. Die festgelegten Wegpunkte werden nach Festlegung in Verbindung mit aktuellem Standort und Fahrzeuggeschwindigkeit der Steuerungseinheit übermittelt. Besagte Steuerungseinheit besteht aus mehreren PID-Regler, welcher für ihren einfachen Aufbau, ihre flexiblen Konfigurationsmöglichkeiten und ihre kurzen Reaktionszeiten bekannt sind. Zur entsprechenden Betätigung von Gas, Bremse und Lenkung erhalten die Regler Informationen über gesetzte Wegpunkte, Standort und Geschwindigkeit von den beiden anderen Aufgabenbereichen des automatisierten und vernetzten Fahrzeuges. In dem hier dargestellten Versuch wurde eine Reisegeschwindigkeit von

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

20 Kilometern pro Stunde angestrebt und alle nötigen steuernden Parameter richtig eingestellt, vgl. [55], S. 4-5.

Ein weiterer Ansatz zur Entwicklung des autonomen Fahrens ist das Lernen durch konditionelle Nachahmung. Hochrangige Systembefehle und Umgebungswahrnehmung kommen gleichermaßen zum Einsatz. Grundlage der Methoden bilden Datensätze von menschlichen Fahrern mit etwa 14-stündiger Fahrdauer. Die Datensätze enthalten für jede aufgenommene Fahrsituation eine Beobachtung, einen Befehl bzw. ein Kommando und eine darauffolgende Aktion. Die Befehle stammen von Fahrern und werden parallel zu den Fahrmanövern gegeben und sollen ihren Absichten wiedergeben. Vergleichbar ist dies mit dem Blinker bei Abbiegen. Insgesamt wurden vier verschiedene Befehle verwendet: dem Straßenverlauf folgen, an der kommenden Kreuzung geradeaus fahren und an der nächsten Kreuzung abbiegen. Beim Fahren werden Beobachtungen in Form von Aufnahmen einer Kamera aus der Fahrerperspektive erstellt. Zur Erhöhung der Robustheit werden Lärm und Störgeräusche in die Aufnahmen eingestreut. Die erstellten Datensätze dienen dem Training und der Kalibrierung eines neuronalen Netzes im sogenannten Deep Learning Verfahren. Deep Learning nutzt neuronale Netze und große Datenmengen zum „Antrainieren von maschinellen Verhaltensweisen“. Mit Beobachtung und Befehlen soll die korrekte Handlung vorausgesagt werden, vgl. [55], S. 5.

Abschließend wird auch das sogenannte Deep Reinforcement Learning behandelt, beim dem ein neuronales Netzwerk durch ein Belohnungssignal aus seiner Umgebung beeinflusst wird, ein Eingriff durch den Menschen findet nicht statt. Der Algorithmus wird durch zielgerichtete Navigation trainiert und muss in jeder Trainingseinheit, gesteuert durch Befehle einer hohen strategischen Ebene, ein vordefiniertes Ziel erreichen. Wenn das Fahrzeug das angestrebte Ziel erreicht, eine Kollision verursacht oder es nicht innerhalb der Zeitbegrenzung schafft, wird der Versuch beendet. Nach jedem Durchlauf findet eine Bewertung aus fünf elementaren Kriterien statt: Geschwindigkeit, zum Ziel zurückgelegte Strecke, Unfallschäden, sowie Befahren von Bürgersteig und Gegenfahrbahn. Grundgedanke bei dieser Methode ist, dass das System durch Zufall nach vielen Simulationsdurchläufen das Ziel findet und dabei eine möglichst gute Bewertung erreicht. Zur Begrenzung des Rechenaufwandes wird ein Durchlauf vorab auf 10 Millionen Simulationsschritte beschränkt und der verwendete Algorithmus erlaubt die parallele Durchführung mehrerer Simulationsdurchläufe, vgl. [55], S. 5-6.

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Zur Verdeutlichung der Möglichkeiten von CARLA wurden mit den drei Lernmethoden Versuche durchgeführt. Es galt vier zunehmend schwerere Fahraufgaben in zwei unterschiedlichen Städten bei sechs verschiedenen Wetterbedingungen zu absolvieren. Diese sechs Bedingungen sind in eine Trainings- und eine Testgruppe unterteilt, ein wolkenloser Tag, ein wolkenloser Sonnenuntergang, ein Regenschauer bei Tag und der Zeitpunkt direkt nach dem Regen für die Trainingsgruppe und ein bewölkter Tag sowie leichter Regen bei Sonnenuntergang in der Testgruppe. Beim Absolvieren der vier Aufgaben mit den drei Methoden werden keine Feinabstimmungen an den Algorithmen vorgenommen, alle drei Ansätze haben dieselben Startvoraussetzungen. Bestandteil der gestellten Aufgabe ist die zielgerichtete Navigation, von einem beliebigen Startpunkt irgendwo in der Stadt aus muss das autonome Fahrzeug den Zielpunkt erreichen. Geschwindigkeitsbegrenzungen und Ampeln dürfen zur Verringerung der Komplexität ignoriert werden. Folgende Aufgaben müssen absolviert werden: Geradeausfahren ohne dynamische Objekte als Hindernisse, in Stadt 1 200 Meter bis zum Ziel, in Stadt 2 100 Meter bis zum Ziel, Abbiegefahrt mit einem Mal Abbiegen zwischen Start und Ziel, 400 Meter in der ersten Stadt, 170 Meter in der zweiten, eine Navigationsfahrt ohne Anforderungsbeschränkungen an Lage von Start- und Zielpunkt, durchschnittliche Strecke vom Start zum Ziel 770 Meter bzw. 360 Meter. Die vierte Aufgabe ist vom Aufbau identisch der dritten, allerdings bewegen sich jetzt auch andere dynamische Objekte wie Autos und Fußgänger in der Stadt. Jeder einzelne Testdurchlauf, also für jeweils jede Aufgabe, Stadt, Lernmethode und Wetterbedingung besteht aus 25 Versuchen bzw. Episoden. Erreicht das Fahrzeug das Ziel innerhalb einer gesetzten Zeitvorgabe, ist der Versuch erfolgreich. Die Zeitvorgabe variiert je nach Aufgabe und stellt als Richtwert das Erreichen des Zielpunktes auf dem optimalen Weg mit einer Geschwindigkeit von 10 Kilometern pro Stunde. Verkehrsverstöße und Kollisionen werden erfasst und in die abschließende Bewertung des Versuchs miteinbezogen, vgl. [55], S. 6.

Die Auswertung des Experiments mit den drei Methoden erfasst den Anteil der erfolgreich abgeschlossenen Versuche in Prozent mit einer Unterteilung in vier Abschnitten. Nach den Versuchen unter Trainingsbedingungen wurden die Steuerungsalgorithmen mit einer neuen Stadt, anderen Witterungsbedingungen und anschließend noch einer Kombination aus der neuen Stadt (Stadt 2) und abweichenden Witterungsbedingungen konfrontiert. Aus den tabellarisch ausgeführten Ergebnissen

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

lässt sich herauslesen, dass die Erfolgsquote aller Methoden bei steigendem Schwierigkeitsgrad der Aufgaben nachlässt und auch bei der einfachsten Aufgabe, dem Geradeausfahren, unterlaufen den Steuerungssystemen Fehler. Einen Wechsel des Wetters können die Algorithmen besser verarbeiten als den Einsatz in der anderen Stadt. Keine der Systeme verfügt also über eine ausgeprägte Verallgemeinerungskompetenz und agiert außerhalb der gewohnten Umgebung unsicher. Allgemein erbringen die modulare Pipeline und das Imitationslernen in etwa die gleichen Leistungen, während das Verstärkungslernen leistungstechnisch im Hintertreffen ist. Grund für diese Leistungseinbußen ist die Variabilität der registrierten Daten, also der Input. Es bestehen Unterschiede zwischen Trainings- und Testsituationen, Trajektorien werden nicht wiederholt und die anspruchsvollen Aufgaben sind den Systemen auf diesem Niveau nicht aus dem Training bekannt. Generalisierungen sind für die aktuell verfügbaren Deep-Learning Methoden eine Herausforderungen und sie weisen keine robuste Generalisierung auf. Übertragung von Verhaltensmustern auf neue Situationen und eigenes Herleiten von Strategien im Straßenverkehr mit anderen Fahrzeugen und Fußgängern können von neuronalen Netzwerken nicht geleistet werden. Diese Fähigkeit kann durch Intelligenz ausgebildet werden, welche aber nur dem Menschen als Erschaffer dieser Systeme vorbehalten ist. Generalisierungen werden in diesem Experiment auf zwei verschiedene Arten durchgeführt, einerseits durch andere Wetterbedingungen und andererseits durch eine für das System unbekannte Umgebung bzw. eine neue Stadt. Während die neuen Witterungseinflüsse von der modularen Pipeline und dem Imitationslernen gut verarbeitet werden konnten, ist der Wechsel in neue Umgebung von Leistungseinbrüchen begleitet. Grund dafür könnte sein, dass die Systeme zwar in mehreren Witterungsbedingungen trainiert wurden, aber nur in einer einzigen Stadt. Neue Städte haben andere Texturen und 3D-Modelle, welche für die Erkennungssysteme völlig unbekannt sind. Einzig das Training das verschiedenen Städten und Umgebungen kann die Generalisierungsfähigkeit der lernbasierten Ansätze für sensomotorische Steuerung verbessern. Andernfalls ist die Einsatzfähigkeit örtlich begrenzt. Weiterhin kann aus den Ergebnissen noch herausgezogen werden, dass die modulare Pipeline in hohem Maße vom zuverlässigen Funktionieren der Umgebungswahrnehmung abhängig ist, vgl. [55], S. 6-8. Wenn diese nicht funktioniert, können Bewegungsplaner und Steuerungseinheit nicht vernünftig zum Ziel navigieren.

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Beim Vergleich der beiden End-to-End trainierten Systeme ist festzustellen, dass das Verstärkungslernen bei den Aufgaben schlechter abschneidet als das Imitationslernen. Dies hat seinen Grund in der Tatsache, dass die hier zu absolvierenden Aufgaben schwieriger sind als die bisher mit Verstärkungslernen durchgeführten. Bei der von CARLA unterstützten Erfassung von Verkehrsverstößen schneiden alle drei Ansätze in der Trainingsstadt besser ab. Insgesamt zeigt die tabellarische Auswertung deutlich die Anfälligkeit der End-to-End Systeme für seltene Verkehrereignisse auf. Während der Kalibrierungsphase war das Ausweichen eines Fußgängers ein eher seltenes Ereignis. Aber gerade diese seltenen Ereignisse bergen häufig das größte Risiko für Personenschäden. In diesen Situationen muss der Algorithmus zuverlässig funktionieren. CARLA kann die Häufigkeit dieser kritischen Ereignisse im Training erhöhen. Zur Verbesserung des Robustheitsgrades der Systeme sind Verbesserungen im Bereich der Lernalgorithmen und Modellarchitektur notwendig. Die quantitative Auswertung der drei Lernmethoden unter zielgerichteter Navigation ist in verschiedenen Einsatzgebieten durchgeführt worden. Je höher die Bepunktung, desto besser das Abschneiden bei der Aufgabe:

Task	Training conditions			New town			New weather			New town & weather		
	MP	IL	RL	MP	IL	RL	MP	IL	RL	MP	IL	RL
Straight	98	95	89	92	97	74	100	98	86	50	80	68
One turn	82	89	34	61	59	12	95	90	16	50	48	20
Navigation	80	86	14	24	40	3	94	84	2	47	44	6
Nav. dynamic	77	83	7	24	38	2	89	82	2	44	42	4

Abbildung 35: Auswertung der verschiedenen Lernmethoden, zielorientierte Navigation, steigende Schwierigkeit der Aufgaben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, der Open Source Simulator CARLA erlaubt das virtuelle Durchführen von autonomen Fahren. Dazu stellt das Programm dem Nutzer eine Reihe von Funktionen und Mechanismen zur Verfügung, um das Durchführen, Überwachen und Auswerten der Fahrversuche zu vereinfachen und damit nicht zu viel Zeit allein zur Erstellung aufgebracht werden muss, sondern stattdessen viel simuliert werden kann. Die von den Entwicklern angelegte Programmstruktur erlaubt das Einfügen von Modifikationen und Objekten zur Erweiterung der Programmvierfalt und der Simulationsmöglichkeiten. Anhand des hier dargestellten Versuchs mit den drei verschiedenen Lernmethoden für das autonome Fahren können die Möglichkeiten des

4 Computergestützte Anwendungen zur Verkehrssimulation

Programms dargestellt werden. Nicht nur allein für Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlagen, sondern für das gesamte System mit Umfelderkennung, Routenplanung und Steuerung des Fahrzeuges, In realitätsnahen Umgebungen mit Straßen, Häusern, Vegetation und sogar dynamischen Objekten wie Fußgängern und Autofahrern mit der Realität nachempfundenen Verhalten. Durch den Open Source Gedanken des Programms soll es einer möglichst großen Anzahl von Interessierten ermöglicht werden, sich aktiv in die Forschung zum autonomen Fahren einzubringen.

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Stellt man die beiden Simulationsprogramme vergleichend gegenüber, sind neben einer Reihe von Unterschieden in der Verwendung und Bedienung auch einige Gemeinsamkeiten zu erkennen. Darüber hinaus besteht sogar eine technische Verbindung zwischen den beiden Programmen.

5.1 Allgemeines und Verwendungszweck

Der Open-Source Simulator CARLA ist wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben ein Programm zur virtuellen Darstellung von autonomem Fahren. Zur Bewältigung der bei dieser Art von Autofahren anfallenden Bewegungsaufgaben wurde das Programm von Grund auf als ein sogenanntes API (Application Programming Interface) entwickelt, welches die Kommunikation und die Zugangspunkte zwischen dem Server und den einzelnen Computern festlegt und steuert. Die Systemarchitektur ist dem Server-Client-Modell zuzuordnen: ein Architekturkonzept zur Verteilung von Aufgaben in einem Netzwerk. Einer oder mehrere Clients greifen auf die vom Server zur Verfügung gestellten Dienste zu. Der Client stellt eine Zugriffsanfrage, welche anschließend vom Server beantwortet und abgearbeitet wird. Die Kommunikation zwischen den Clients und dem Server läuft über festgelegte Protokolle ab. Ein typisches Beispiel für ein Client-Server-Modell ist der Email-Verkehr über die großen Email Dienste, vgl. [62]. Auf der Server-Seite von CARLA werden alle simulationsspezifischen Aufgaben bearbeitet, vor allem die Berechnung der Umgebung, Fahrphysik und sämtliche verwendeten Sensoren. Der Client, also der Rechner des Simulations-Anwenders setzt sich aus einer Reihe von unterschiedlichen Modulen zusammen, welche jeweils für einzelne Aufgaben zuständig sind und im Ganzen die Weltbedingungen für die Simulation festlegen und beteiligte Akteure untereinander abstimmen. Dies ist im Wesentlichen die Grundstruktur von CARLA, vgl. [63]. Eine Auswahl der wichtigsten Teilelemente des Client-Moduls umfasst:

- Verkehrsmanager: Die nicht für Forschungszwecke verwendeten Fahrzeuge werden durch diese Anwendung gesteuert. Eine stadtähnliche Umgebung mit realistischem Fahrverhalten einzelner Fahrzeuge soll damit simuliert werden.
- Sensoren: Unerlässlich für die Informationsgewinnung autonomer und teilautomatisierter Fahrzeuge. Kamerasysteme, Radar- und Lidarsensoren

5 CARLA und SUMO im Vergleich

können eingesetzt werden. Zur besseren Nachvollziehbarkeit werden von Sensoren empfangene und verwendete Daten zwischengespeichert und vom Benutzer abgerufen werden.

- **Rekorder-Tool:** Mit diesem Programm kann in einer durchgeführten Simulation von jedem Ort jeder Moment auf der Karte aufgerufen und nachträglich gesichtet werden. Es dient einer möglichst hohen Nachvollziehbarkeit durchgeführter Projekte.
- **Datenbrücken und Implementierungssoftware:** Die im Programm erhaltenen Daten sollen auch in anderen Verkehrssimulationsprogrammen verwendet werden können, wodurch die universelle Einsatzbarkeit der Daten verbessert werden soll. Eine Implementierungsstelle in die SUMO Simulator existiert bereits und wird auch im Rahmen dieses Vergleichs Berücksichtigung finden.
- **Offene Assets:** Assets sind umgebungscharakterisierende Daten im Programm. In CARLA können diese nach einer Bibliothek mit Blaupausen durch Neuerstellte ergänzt und auch den anderen Nutzern zur Verfügung gestellt werden.
- **Szenarien:** Bereits von Beginn an vorinstalliert sind eine Reihe von Fahrscenarien mit unterschiedlichen Situationen, in denen das System auf verschiedene Art und Weise reagieren muss. Dies dient zum einen der Erleichterung des Lernprozesses für das implementierte autonome Fahrsystem und zum anderen auch als Grundlage des im Programm integrierten Wettbewerbssystems, bei dem sich durch Herausforderung und gegenseitiges Messen das beste Ergebnis durchsetzen soll und die Spitzenposition einer Bestenliste erklimmt. Diese Wettbewerbe sind ebenfalls an einer späteren Stelle noch Gegenstand dieses Kapitels.

Der Wettkampf-Aspekt lässt auf die Ausrichtung des Programms hindeuten. Es soll so demokratisch und transparent wie möglich sein. Die Forschung im Bereich des autonomen Fahrens soll mit diesem Programm für jeden verfügbar sein. Jeder soll so leicht wie möglich auf das Programm und seine Funktionen zugreifen und auch Inhalte selbst hinzufügen können, um anderen die Arbeit zu erleichtern. Um die Hauptplattform herum hat sich so im Laufe der Zeit ein ganzes System aus kleineren und größeren Projekten aufgebaut. Die Herausforderung in diesem Zusammenhang ist dabei, im großen Forschungsgebiet des autonomen Fahrens verschiedene Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Anforderungen zu erfüllen und realitätsnah wiederzugeben, vgl. [63].

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Schlussendlich sollen aber verschiedene Ansätze für autonomes und automatisiertes Fahren erforscht und in realitätsnaher Umgebung erprobt werden können.

Im Gegensatz zu diesem thematischen Forschungsansatz steht der Verwendungszweck des Simulationsprogramms SUMO, der Simulation von intermodalem Verkehr, also mit mehreren verschiedenen Verkehrsteilnehmern. Dazu gehören neben Straßenfahrzeugen auch Fußgänger und die öffentlichen Verkehrsmittel. Die Simulation ist eher für größere Verkehrsnetzwerke in einer Stadt ausgelegt als eine spezialisierte Betrachtung der autonomen Fahrfähigkeit einzelner Fahrzeuge. Wie auch das CARLA Simulationsprogramm ist diese Anwendung quelloffen und kann mit benutzer-erstellten Programmen und Modellen beliebig erweitert werden. Auch hier ist der Begriff Simulationspaket zutreffender, da mehrere Programme der Verkehrssimulation in einer Anwendung gebündelt werden. APIs regeln wie auch schon bei CARLA die Kommunikation zwischen Client-Rechner und Server, auf dem die notwendigen Rechenoperationen durchgeführt werden, vgl. [64]. Simulationsszenarien werden auch bei SUMO explizit vorangestellt und bilden einen wichtigen Bestandteil zur Durchführung aussagekräftiger Verkehrssimulationen. Damit kann festgestellt werden, wie sich eine gegebene Verkehrsnachfrage durch ein real existierendes Straßennetz bewegt und es zu Problemen kommen kann. Vom Grundsatz her ist bei jedem Verkehrsteilnehmer vor Simulationsbeginn ein Reiseziel vorgemerkt, über die umfangreichen Simulationseinstellungen können aber auch Zufälligkeiten in der Reisezielwahl und der Routenführung eingestreut werden. Dies dient ebenfalls einer weiteren Annäherung an die hier abgebildete Realität. Die verkehrswissenschaftliche Sichtweise stellt für beide Programme einen mikroskopischen Simulationsansatz fest, also eine Berücksichtigung einzelner Fahrzeuge und deren Wechselwirkungen untereinander und keine bloße Darstellung als Verkehrsstrom, vgl. [65]. Bei einem Blick auf die in SUMO implementierten Anwendungen, stellen sich aus dieser Vielzahl von Programmen, wie auch bei CARLA sechs von hoher Wichtigkeit heraus, die dem Programm auch seine Charakteristiken in der Simulation und dem Anwendungszweck verleihen:

- sumo: Das Simulationsprogramm an sich, Abspielen eines vordefinierten Szenarios. Eingabe über die Kommandozeile, Programmiersprache: C++, zum ordnungsgemäßen Funktionieren von sumo wird ein generiertes Straßennetzwerk sowie Routen der Verkehrsteilnehmer benötigt, um diese dann

5 CARLA und SUMO im Vergleich

simulieren zu können. Ausgegebene Daten können mit Hilfe von sumo-gui graphisch dargestellt werden.

- sumo-gui: Erweitert sumo um eine graphische Benutzeroberfläche, benötigt eine aus sumo generierte Konfigurationsdatei.
- netconvert: Hiermit können Straßenkarten im digitalen Format in SUMO importiert und daraus für das Programm nutzbare Straßennetzwerke generiert werden, um etwa das Verkehrsgeschehen einzelner Straßenzüge oder sogar ganzer Stadtteile darstellen zu können. Es werden verschiedene Dateiformate unterstützt.
- netgenerate: Neben dem Import bestehender Verkehrsnetzwerke die zweite Möglichkeit zum Einbringen von Straßen und Kreuzungen in das Programm. Mittels einer Vielzahl unterschiedlicher Programmbefehle können sowohl einfache als auch abstrakte Straßensysteme vom Programm erstellt werden.
- duarouter: Zweck dieses Programms ist das Erstellen der einzelnen Fahrzeugrouten und das Beheben von Verbindungsproblemen in bestehenden Wegführungen. Neben einer grundsätzlichen Definition der Verkehrsnachfrage benötigt auch dieses Programm ein zuvor generiertes Straßennetz. Ausgegeben werden letztendlich Informationen zu Fahrzeugen und ihren Routen, welche wiederum von sumo zur Simulation genutzt werden.
- activitygen: Gehört thematisch zur duarouter-Applikation. Ist in der zu simulierenden Stadt eine Bevölkerung implementiert, wird diese von der Anwendung ausgewertet und davon ausgehend eine Nachfrage nach Mobilität erzeugt, welche je nach Stadt und je nach Szenario teilweise deutlich voneinander abweichen und durch umfangreiche Einstellungsmöglichkeiten abgeändert werden kann. Auch hierfür stehen eine Reihe vordefinierter Befehle zur Auswahl.

Neben diesen sechs charakterisierenden Teilanwendungen besteht SUMO noch aus vielen weiteren Programmen, etwa zur Darstellung und Erzeugung von Verkehrsemissionen sowie weitere Applikationen zur Routenerstellung, vgl. [65].

In seiner über zwanzigjährigen Geschichte wurde das Simulationsprogramm SUMO bereits für zahlreiche verkehrswissenschaftliche Untersuchungen verwendet. Dazu gehören unter anderem die Analyse und Bewertung von Ampelsystemen, die Erstellung

von Verkehrsprognosen anlässlich verschiedener Großveranstaltungen sowie auch Simulationen im Bereich des Eisenbahnverkehrs. Auch im autonomen Fahren ist das Programm bereits zum Einsatz gekommen. Dazu zählen etwa die verkehrlichen Auswirkungen von autonomen Fahrzeugen oder auch die bereits vielfach durchgeführte allgemeine Validierung autonomer Fahrfunktionen, auch in Zusammenarbeit mit anderen Simulationsprogrammen, vgl. [64].

Damit sollte der Grundstein für den Vergleich beider Programme gelegt sein und es wurden bereits grundsätzliche Unterschiede herausgestellt. Im folgenden Teilkapitel soll es dann um die Installation der beiden Programme gehen und wie es um den Einstieg in die Simulationsanwendungen bestellt ist.

5.2 Installation und Programmeinstieg

Die Installation der beiden Programme auf dem Rechner des Anwenders ist unabdingbar für das spätere Durchführen von Simulationen. Vorab ist allerdings anzumerken, dass CARLA und SUMO keine leicht zu bedienenden Anwendungen sind und keinesfalls etwa mit Videospielen zu vergleichen sind, welche mit einem klar abgesteckten Handlungsrahmen und einer intuitiven Bedienung Anwendern einen leichten Einstieg ermöglichen, es steht der Unterhaltungswert im Vordergrund. Verkehrssimulationsprogramme sind wissenschaftlicher Natur und bei ihnen wurde das Ziel gesetzt, die Realität so genau wie möglich abzubilden und die Dynamiken des Straßenverkehrs nachvollziehen und beherrschen zu können. Schon die Installation und auch die spätere Bedienung erfordern fortgeschrittene Computerkenntnisse und das Beherrschen der Programmiersprachen Python bzw. C++. Zwar stellen die Programmentwickler umfangreiche Installations- und Bedienungsanleitung im Internet zur Verfügung, und auch auf der Videoplattform YouTube finden sich einige Erklär-Videos, aber der Einstieg in die Anwendungen bleibt weiterhin beschwerlich. Eingaben in die Programme können mitunter nicht in einer übersichtlichen und gestalteten Benutzeroberfläche mit eingänglichen Sätzen und Worten erfolgen, sondern werden in Form von programmiersprachspezifischen Kommandos in schlichte Kommandozeilen eingegeben. Zudem ist dabei auf die Syntax und die Eigenheiten der Sprachen zu achten. Schnell entstehen bei der Arbeit mit CARLA oder SUMO lange Abfolgen von Befehlen und Variablen. Die bloße Kenntnis der verkehrswissenschaftlichen

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten reicht zur ergebnisorientierten Arbeit mit den Programmen nicht aus.

Der zuvor beschriebene Aspekt ist allein schon an den von den Entwicklern empfohlenen Systemvoraussetzungen von CARLA zu erkennen. Gerade die möglichst realitätsnahen Simulationen benötigen einen Grafikprozessor mit hohem Arbeitsspeicher, empfohlen werden mindestens 6 Gigabyte. Für maschinelles Lernen wird sogar eine Grafikkarte mit separatem Arbeitsspeicher, ein sogenannter dedizierter Grafikprozessor empfohlen. Dazu kommen noch rund 20 Gigabyte freier Festplattenspeicher sowie eine aktuelle Version des Programms pip, ein Verwaltungsprogramm für Datenpakete in der Python-Programmiersprache, vgl. [66]. Simulationsskripte, also Ablaufpläne für die Simulationen, werden in Python geschrieben, einer ursprünglich im Jahr 1991 entstandenen Programmiersprache. Sie ermöglicht ein objektorientiertes Programmieren und der Anwender kann sich durch eine simple und eingängige Strukturierung vollständig auf die Programmieraufgabe konzentrieren. Wie auch die bei SUMO verwendete C++-Programmiersprache funktioniert diese mittels der Eingabe von Variablen, Datentypen, Konstanten und Befehlen in das Eingabefeld. Beide Sprachen folgen einem logischen Grund- und Funktionsprinzip.

Installiert werden kann das Simulationsprogramm auf Rechnern mit Windows- oder Linux-Betriebssystem. Je nach System sind dabei unterschiedliche Abfolgeschritte einzuhalten. Nach einer ersten Befehl-Eingabe in das Terminal-Bedienfeld des Computers kann eine aktuelle Version des Programms über die Plattform GitHub.com heruntergeladen werden. Neben allen veröffentlichten Update-Versionen von CARLA stehen dort auch verschiedene Erweiterungssoftware zum Download bereit, etwa für zusätzliche Karten oder Plugins für das Imitationslernen im autonomen Fahren. Die Installationsdaten sind wie bereits erwähnt relativ groß und der Download nimmt einige Minuten Zeit in Anspruch. Nach Abschluss des Vorgangs müssen für die ordnungsgemäße Funktion der Anwendung noch eine umfangreiche Dateibibliothek und zusätzliche Datenpakete mit drei weiteren Stadtkarten heruntergeladen werden. Anschließend kann das Programm durch die Eingabe eines nach Installationsart spezifischen Befehls gestartet werden. Bei Erscheinen eines Updates von CARLA kann dieses nicht ohne weiteres dem Programm hinzugegeben werden. Der Nutzer muss stattdessen zuerst die alte Version entfernen und anschließend die aktuelle Version

5 CARLA und SUMO im Vergleich

installieren, vgl. [66]. Eine Komfortfunktion des Programms, welche bei anderer Computersoftware durchaus standardmäßig implementiert ist, fehlt hier. Insgesamt sind für den gesamten Installationsprozess mindestens vier Stunden Zeit einzuplanen, denn zusätzlich zum eigentlichen Simulationsprogramm wird die Installation weiterer Zusatzprogramme empfohlen, welche entweder für die Konfiguration oder die spätere Nutzung unverzichtbar sind. Dazu gehören unter anderem die bereits angesprochenen Programmiersprache Python inklusive einem Compiler, welcher die Befehle in Programmiersprache in für den Computer verständliche Sprache übersetzt, Software zur Dateipaket-Verwaltung sowie eine Anwendung zur Darstellung der Programmgrafiken. Die Unreal Engine ist in diesem Fall eine modifizierte Version speziell für die Nutzung in CARLA. Ohne diese Grafik-Engine ist die Darstellung des auf dem Computermonitor sichtbarem nicht möglich. Im Leitfaden für eine Installation auf einem Rechner mit Windows-Betriebssystem belaufen sich die Programme in Summe auf acht Programme, mit unterschiedlichem Bedeutungsgrad für CARLA, vgl. [67]. Erst nach Abschluss dieser Installationen kann mit dem eigentlichen Build, also der Einrichtung von CARLA begonnen werden. Auch der Start der Simulation wird bereits in diesem Leitfaden auf der offiziellen Homepage der Simulationssoftware erklärt. Gemessen an der Dauer der gesamten Installation ist diese Hilfestellung allerdings recht kurz geraten und es werden nur die wesentlichen und entscheidenden Installationsschritte benannt.

Sind Installation und Programmeinrichtung abgeschlossen, können die Hauptfeatures und Module von CARLA vorgestellt werden. Fundamental sind dabei der Client und die Simulationswelt. Im Client wird die Simulationswelt an sich dargestellt und sie enthält die wichtigsten Methoden, um diese Welt mit Leben zu füllen, etwa mit neuen Akteuren, unterschiedlichen Witterungsbedingungen oder dem aktuellen Simulationszustand. Bei einer Änderung in der Simulation wird diese eine Welt durch eine neue ersetzt. Während es pro Simulation immer nur eine dazugehörige Welt geben kann, können mehrere Clients auf eine Simulation zugreifen und von dieser Programmänderungen durchführen oder Programminformationen abrufen lassen. Über ein Terminal stehen eine oder mehrere Clients mit dem Simulationen berechnenden Server in Verbindung, die läuft über Skripte ab. Technisch läuft diese Kommunikation über eine IP-Adresse und spezielle Ports ab. Über die Eingabe vorgegebener Befehle in einen Client können Änderungen in der Simulationswelt erzeugen und diese auch umsetzen, vgl. [68].

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Aufbauend auf einer Simulationswelt und den Clients zur Kommunikation als Basis kommen im nächsten Schritt Akteure nebst den zugehörigen Programmentwürfen (Actors und Blueprints) zum Einsatz. Vom Grundsatz her ist alles, was in irgendeiner Form in der Simulation in Erscheinung tritt ein Akteur. Dies können Ampeln, Verkehrsschilder, Fahrzeuge und Fußgänger, aber auch Sensoren sein. Alle Akteure können in der Welt erschaffen, ihnen Funktionen zugewiesen und auch wieder aus der Welt entfernt werden. Dazu stehen in einer von den Entwicklern bereitgestellten Bibliothek für jeden Akteur Modelle mit Animationen und Eigenschaften zur Verfügung, welche in den Programmiercode der Simulation übernommen werden können. Eine nachträgliche Anpassung durch den Benutzer ist ebenfalls möglich. Beispiele für diese Attribute sind unter anderem die Farbe eines Autos, die Spezifikationen eines LIDAR Sensoren oder aber die Fortbewegungsgeschwindigkeit eines Fußgängers. Über eine spezifische Identifikationsnummer kann jeder Akteur gefunden und angesteuert werden. Attribute müssen zur genauen Bestimmung mit Werten versehen werden. Zum Erschaffen eines Akteurs in der Simulationswelt werden ein Programmentwurf sowie Angaben zur gewünschten Position und Ausrichtung der Welt benötigt. Es ist möglich Akteure mittels eines Befehls an andere „heranzuhängen“ und diesen zu folgen, gerade beim Einsatz von Sensoren an Fahrzeugen etwa im autonomen Fahren kann dies sinnvoll sein. Zusätzlich kann eine Liste aller dieser erstellt und nach bestimmten durchsucht werden. Mittels der Eingabe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitskennwerten können Fahrzeuge und Fußgänger angewiesen werden, bestimmte Punkte auf der Karte anzusteuern oder über ihre Programmentwürfe bestimmte Bewegungsroutinen auszuführen. Fahrzeuge etwa können entweder nach bestimmten Mustern über die Karte fahren oder auch vom Benutzer selbst gesteuert werden, alles möglich über die Eingabe bestimmter Simulationsbefehle. Nach Abschluss ihrer Aufgabe in der Simulation müssen die Akteure mittels eines Befehls auch explizit wieder gelöscht werden, daran muss bei der Programmierung gedacht werden, vgl. [69]. Sind die benötigten Akteure inklusive ihrer spezifischen Eigenheiten eingefügt, kann mit den Karten und der dazugehörigen Navigation fortgefahren werden. Straßen, Kreuzungen und Verkehrszeichen, wie Ampeln und Schilder, ermöglichen den Straßenverkehr auf der Simulationskarte. Karten können nachträglich vom Benutzer angepasst und mit Wegpunkten versehen werden, welche dann von Fahrzeugen auf ihrer Fahrt angesteuert und passiert werden können. Mit einer bestimmten Abfolge von

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Befehlen können diese beispielsweise Routen gebildet oder auch auf dem Weg nur bestimmte Fahrspuren verwendet werden. Darüber hinaus verfügen Objekte wie Ampeln oder Kreuzungen über Erfassungsrahmen, die ein Befahren eines Fahrzeuges erfassen und sich dahingehend verhalten. Auf einigen Karten ist es zudem möglich, einige Layer der Kartenobjekte an- oder abzustellen, sodass auf einer Karte beispielsweise nur noch Straßen, Bürgersteige, Ampeln und Verkehrsschilder vorhanden sind. Dies kann eine Anpassung der Karte erleichtern oder aber auch die Simulation bei der Berechnung entlasten, wenn beispielsweise keine Lichteffekte an Gebäuden oder ähnliches berechnet werden muss, vgl. [70]. Schlussendlich können in einer CARLA Simulation auch Sensoren zum Einsatz kommen, welche nach der Aktivierung durch ein bestimmtes Ereignis Daten sammeln und an weitergehende Systeme zur Auswertung weitergeben. Sensoren sind entscheidend für das Training von Systemen für das autonome und automatisierte Fahren. In fast allen Fällen werden Sensoren an ein Fahrzeug angeheftet. Das Fahrzeug fungiert als eine Art Vater und die Sensoren folgen diesem Fahrzeug zu jeder Zeit. Wie bei jedem anderen implementierten Akteur existieren sensorenspezifische Programmvorlagen (Blueprints), welche mit Attributen versehen werden müssen. Nach dem Erschaffen in der Simulationswelt werden sie mit einem speziellen Befehl darauf abgestellt Daten zu sammeln. Es stehen verschiedene Arten von Sensoren wie Kameras oder Detektoren zur Verfügung, daneben auch Radar oder LIDAR. Die gesammelten Daten werden gespeichert und können auch in anderen Umgebungen Verwendung finden. Des Weiteren können Bilder aufgenommen, Kollisionen erkannt, vorausfahrende Fahrzeuge erkannt und Fahrzeuge in ihrer Position geortet werden, vgl. [71]. Diese vier Bereiche sind essenziell für Simulationen mit CARLA und in jeder Simulationsumgebung in einer bestimmten Form vorhanden. Das von den Entwicklern hier zur Verfügung gestellte Material zur Erklärung und Erläuterung deckt allerdings wieder nur die Grundlagen mitsamt der notwendigen Programmbefehle ab, die richtige Verwendung im Programmcode ohne das Begehen von Fehlern in der Programmierung muss vom Benutzer selbst ergründet werden. Auch hier sind Erfahrungen im Bereich der Programmierung notwendig und auch empfehlenswert.

Auch die Bedienung des Simulationsprogramms SUMO setzt schon in der Installation Computerkenntnissen voraus, dazu gehört unter anderem die Steuerung eines Programms über die Kommandozeile. Außer sumo-gui und netedit verfügt keines der

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Programme über eine graphische Oberfläche, sondern müssen über die Eingabe des Programmnamens sowie weiteren Einstellungen gestartet werden. Beispielsweise kann die Anwendung netgenerate über die Eingabe „netgenerate.exe“ in die Kommandozeile gestartet werden und es öffnet sich das Programmfenster. Jedes in SUMO ausführbare Programm verfügt über eine Reihe von einstellbaren Parametern, welche nach Eingabe über die generierten Daten und das generelle Verhalten des Programms entscheiden. Damit die Auswahl aller möglichen Optionen nicht zu groß und zu unübersichtlich wird, gibt es sogenannte Konfigurationsdateien, welche für ein bestimmtes Programm auf einen Blick sämtliche einstellbare Parameter enthalten. Für eine ordnungsgemäße Ausführung des Simulationsprogrammes muss auch ein Text Editor wie zum Beispiel Notepad++ bedient werden können. Mit diesem können zur Ausführung unverzichtbare Dateien erstellt und auch nachträglich abgeändert werden. Weiterhin weisen die Entwickler auch darauf hin, dass die Arbeit mit SUMO viel Beschäftigung mit Dateien und Ordnern bedeutet und je nach verwendetem Betriebssystem (Windows, MacOS oder Linux) auch Änderungen in den Verzeichnispfaden durchgeführt werden müssen, bevor mit der eigentlichen Programminstallation begonnen werden kann, vgl. [72]. Diese nötigen Einstellungen werden aber wie auch bei CARLA in einem Online-Nachschlagewerk von den Entwicklern zur Verfügung gestellt. Die kurzen Installationsanleitungen sind nach den drei genannten Betriebssystemen aufgeteilt und beschreiben kurz und knapp die zum Herunterladen und Installieren notwendigen Schritte. Bei einer Installation auf einem Rechner mit Windows-Betriebssystem stehen je nach Bit-Konfiguration (32 oder 64 Bit System) verschiedene ZIP-komprimierte Dateienpakete zum Download zur Verfügung. Das Programm kann entweder komplett auf dem Rechner installiert werden oder als eine sogenannte portable Version, bei der nicht Programmprozesse auf dem lokalen Computer ablaufen, sondern auf weiteren Geräten oder Servern. In einem Ordner befinden sich alle ausführbaren Programme von SUMO. Wie auch bei der Arbeit mit CARLA wird hier die Installation einiger Begleitprogramme empfohlen, die die Installation und Benutzung erleichtern, vgl. [73]. Neben Datenbibliotheken für SUMO geht es dabei auch um die hier verwendete Programmiersprache Python, ein Programm zur Überwachung und Überprüfung des Installationsprozesses von Software sowie der Anwendung Visual Studio, welche eine spezielle Arbeitsumgebung zum Programmieren schafft. Es werden verschiedene Programmiersprachen unterstützt. Nachfolgende Konfigurations- und

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Installationsschritte werden mit der Hilfe von Bildern unterlegt erklärt und dabei auch verschiedene Vorgehensweisen erläutert. Wie auch schon bei der Installation von CARLA und seinen Begleitprogrammen kann erahnt werden, dass auch hier Kenntnisse in der Informatik und in der Arbeit mit Computern benötigt werden, um die Einrichtung des Programms ordnungsgemäß durchführen zu können. Natürlich bietet die Videoplattform YouTube auch hier zahlreiche Videoerzeugnisse mit Anschauungs- und Erklärmaterial an, welches bei Unklarheiten zu Rate gezogen werden kann. Für eine Verdeutlichung der Möglichkeiten bei der Arbeit mit SUMO kann beispielsweise das Erstellen einer kreisförmigen Strecke genannt werden, auf der auch Autos fahren sollen. Mit dem Programm netedit wird zunächst eine kreisförmige Fahrbahn erstellt. Die Arbeitsoberfläche des Programms sieht folgendermaßen aus:

Nach dem Abspeichern müssen im nächsten Schritt des Projektverzeichnis zwei leere Textdateien erstellt werden, eine für die eingesetzten Fahrzeuge und die andere für die Fahrkonfiguration. An die Definition eines Fahrzeugflusses, bestehend aus fünf Fahrzeugen, schließt sich die Konfigurationsdatei an, in der dem Programm im Grunde genommen gesagt wird, wo Fahrzeuge und Straßennetz abgerufen werden können. Damit die Simulation auch ablaufen kann, muss noch eine Fahrstrecke vom Benutzer angegeben werden. Dies geschieht mit Hilfe der Attribute „to“ und „from“. Ecken bzw. Kurvenpunkte auf der Kreisbahn werden in netedit mit Eckpunkten benannt und im Gebilde eingefügt, vgl. [74]. Die erste und die letzte benannte Ecke werden anschließend in eine andere Programmierungsdatei eingefügt. Damit die Fahrzeuge sich jetzt auch in Kreisbahnen auf dem Straßenring bewegen, muss in einer neuen Datei ein bestimmter xml-Code eingegeben werden, damit SUMO die hinzugefügten Elemente auch als Bestandteile des Straßennetzes erkennt und nicht bloß die Strecke vom ersten Eckpunkt bis zum zweiten Eckpunkt. Selbstverständlich muss auch diese erstellte Datei in die eigentliche Konfigurationstextdatei eingefügt werden, damit dies später in der Simulation auch Berücksichtigung findet, vgl. [74]. Neben dieser Methoden mit xml-Dateien ist die Erstellung der Kreisbahn und einer Route für Fahrzeuge auch allein mit dem Programm netedit möglich. Das Ergebnis bleibt allerdings das gleiche. Die Variante ausschließlich unter der Verwendung von netedit erscheint aber etwas effizienter und schneller, da nicht jeder Eckpunkt einzeln definiert und verbunden werden muss, sondern direkt eine Route erstellt werden kann. Auch das Einstellen des

Fahrens im Kreis für die Fahrzeuge ist hier effizienter durchführbar. Dieser Aspekt ist gerade bei Erstellung größerer Straßennetzwerke und Fahrzeugströme von Bedeutung.

5.3 Anwendungen im Detail und Simulationsmöglichkeiten

Das im Simulationsprogramm CARLA enthaltende Kernkonzept aus den vier Bestandteilen Simulationswelt und Client, Akteure und Programmmentwürfe, Karten und Navigation sowie Sensoren und Daten erlaubt eine vielfältige und Nutzung innerhalb des Programms. Ausgehend von diesem Konzept ergeben sich im Detail eine Vielzahl von weitergehenden Verwendungen und Simulationsmöglichkeiten. Im Grunde genommen kann aus den vier Hauptkomponenten eine reichhaltige Simulationswelt zusammengebaut werden. Nicht zu vergessen ist dabei die Schnittstelle zu anderen Simulationsprogrammen, insbesondere SUMO. Eine der wichtigsten Grundbedingungen zur Durchführung autonomer Fahrsimulationen ist die Programmierung von Straßenverkehr in der Simulationswelt. Der sogenannte Scenario Runner aus dem Hauptdownloadpaket von CARLA enthält eine Reihe voreingestellter Verkehrsszenarios und erlaubt ebenfalls die Erstellung eigener Szenarios, unter Zuhilfenahme des Programms OpenSCENARIO, welcher als ein programmübergreifender Standard bei Entwicklung, Testen und Validierung von Fahrerassistenzsystemen gilt. Die Anwendung beschreibt komplexe Fahrmanöver mit mehreren beteiligten Fahrzeugen so simpel wie möglich und der CARLA-eigene Scenario Runner unterstützt einen Großteil der in diesem Programm einsetzbaren Elemente und Spezifikationen. Alternativ können die Szenarien auch mit einem normalen Python-Skript erstellt werden. Verwendungszweck dieser Szenarien ist das Testen und Erproben eines vom Benutzer programmierten Moduls, mit dem sich ein Fahrzeug autonom in der Simulationswelt bewegen kann, ohne dabei die Insassen oder andere Verkehrsteilnehmer zu gefährden. Diese Fahrmodule mit ihren Sensoren und Steuerungsalgorithmen, die Simulationswelt und alle Fußgänger, Fahrzeuge und Objekte können aus den vier in 5.2 beschriebenen Teilmodulen erstellt und als eine lebendige und realitätsnahe virtuelle Testumgebung zusammengefügt werden, vgl. [75]. Auf voreingestellten Strecken von einem Punkt einer Stadt zu einem anderen Punkt können die autonomen Fahrsysteme der Benutzer bewertet und miteinander verglichen werden. Möglich macht dies das CARLA Autonomous Driving Leaderboard, welche speziell für die Bewertung dieser Systeme in realitätsnahen Szenarien des Straßenverkehrs entwickelt wurde. Jedes System erhält vor Fahrtbeginn eine genaue

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Routenbeschreibung mittels GPS-Koordinaten und Fahrtanweisungen. Auf diesen Strecken kommen eine große Variation an möglichen Situationen im Straßenverkehr in Form von Autobahnen, innerstädtischer Verkehr und auch ländlichen Abschnitten vor. Die Routen müssen für die Bewertung in unterschiedlichen Tageszeit- und Wetterkonfigurationen durchfahren werden und es werden eine ganze Reihe kritischer Fahrmanöver abgeprüft, welche für ein zuverlässiges autonomes Fahrsystem unbedingt zu beherrschen sind und im Alltag oft zu Verkehrsunfällen führen. Dazu zählen das Einfädeln in oder aus dem Verkehr, Fahrstreifenwechsel, Befahren von Kreuzungen und Kreisverkehren unter Beachtung der Vorfahrtsregelungen und Verkehrszeichen, Begegnungen mit Einsatzfahrzeugen sowie der als besonders sensibel einzustufende Umgang mit verletzlichen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern und Radfahrern. Selbstverständlich muss das Fahrzeug dabei zu jeder Zeit seine Fahrspur halten können und Kollisionen mit Hindernissen und parkenden Autos vermeiden. Diese Testumgebung kann sich anhand der folgenden Abbildung annäherungsweise vorgestellt werden:

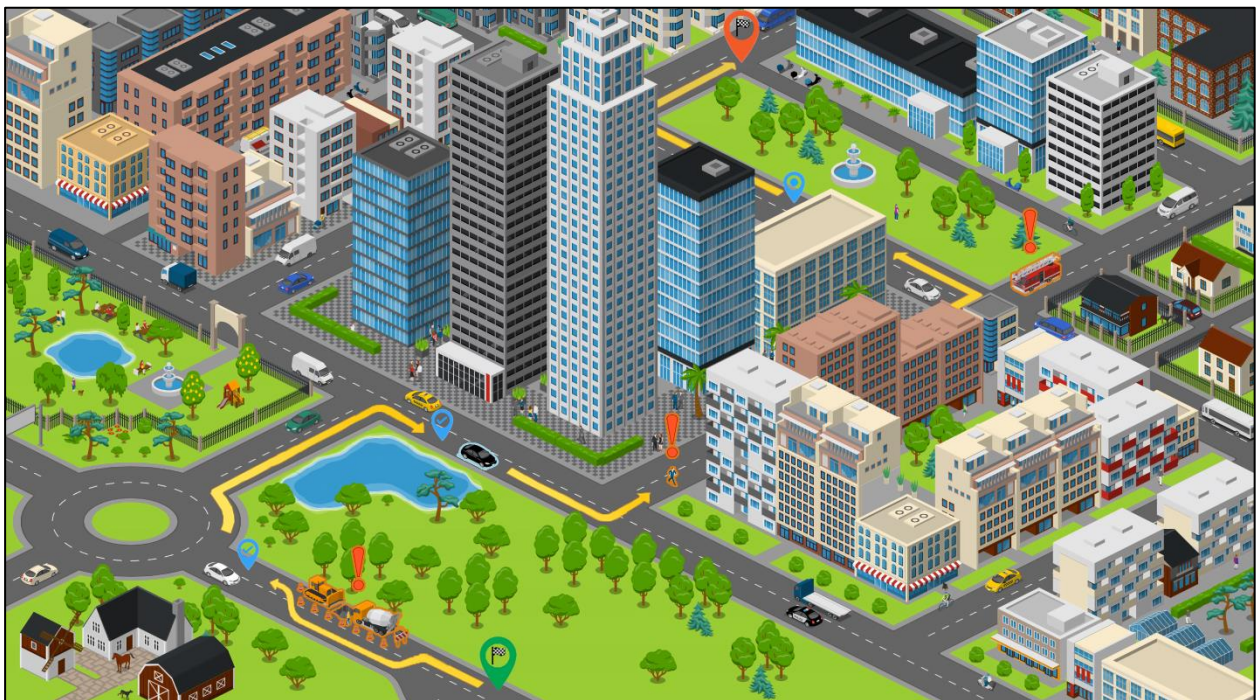


Abbildung 36: Schematische Darstellung einer Fahraufgabe für die autonomen Steuerungssysteme

Zur Teilnahme an diesem Wettbewerb muss jedes Fahrsystem darüber hinaus die beiden Teilsysteme „Sensoren“ und „Karte“ enthalten, welche beide ihre Routeninformationen in verschiedenen Datenformaten erhalten. Die Daten von den

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Sensoren und der Übersichtskarte werden vom Leaderboard-System ausgewertet und fließen in die Bewertung mit ein, ebenso wie Vergehen, welche mit Strafpunkten bedacht werden. Mittels verschiedener Systemen wird die Fahrperformance nach verschiedenen Kriterien bewertet und als Abschluss zu einer Endnote zusammengefasst. Als Rückmeldung an den Benutzer werden alle Fehlverhalten des Systems rückgemeldet, vgl. [76].

Die Installation und Inbetriebnahme des angesprochenen Scenario Runners erfordert wie bei anderen Anwendungen von CARLA auch den Download von Dateien und die Eingabe von Befehlen in den Terminal, dafür steht auch hier wieder ein Tutorial zur Verfügung. Jetzt können über die bereits bekannte Eingabe von Befehlen in Kombination mit Parametern Szenarien erzeugt werden, unter anderem können dabei das Verhalten der Fahrzeuge und bestimmte Testkriterien nach Wunsch eingestellt werden. Nach der Durchführung eines Szenarios und Aufzeichnung mit dem CARLA recorder können mit dem Scenario Runner noch auf die Simulation angepasste Metriken erstellt werden, welche als eine Art Sollwert fungieren und die Simulationsergebnisse leichter damit verglichen werden können, ohne die Simulation mehrmals abspielen zu müssen. Die Erstellung der Metriken folgt einer bestimmten Logik und funktioniert über das Schreiben von Skripten und Eingabe von Befehlsketten, inklusive einer Definition aller verwendeten Kriterien und zugehöriger Werte. Auf diese Weise können eigene Szenarien ergebnisorientiert miteinander verglichen werden, etwa um die Performance des selbst erstellten Fahrsystems in verschiedenen Situationen abgleichen zu können, vgl. [77].

Um eine Simulationswelt mit realistischen Verkehrsverhältnissen aufzuwerten, kann das CARLA Modul „Traffic Manager“ verwendet werden, welcher das Fahrverhalten einzelner Fahrzeuge variabel macht und obendrein die Bildung phasenbezogener Funktionalität und Datenstrukturen bei besser Recheneffizienz ermöglicht. Die Steuerung der Fahrzeuge erfolgt von der Clientseite aus, über einen aus mehreren Phasen bestehenden Zyklus. Der Traffic Manager steht in unmittelbarer Wechselwirkung zum Scenario Runner und füllt die vom Programm vorgegebenen Szenarioeinstellungen mit einem entsprechenden, möglichst realistischem Fahrverhalten der übrigen KI-Fahrzeuge auf. Über die Wahl von Parametern kann das Verhaltensmuster der anderen Fahrzeuge angepasst und ein mitunter atypisches Fahrverhalten erzeugt werden (Missachten der Verkehrsregeln, Drängeln beim

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Spurwechsel etc.), bei dem das autonome Fahrsystem ebenfalls zuverlässig funktionieren muss. Die Architektur des System lässt nur einen einseitigen Informationsfluss zu und ist in einzelne Aufgabenbereiche unterteilt. Der zentrale Agent Lifecycle & State Management kommuniziert als einzige Stelle mit dem Server und überwacht alle Bewegungen in der Simulationswelt. Daran schließt sich das Modul zur Berechnung der Fortbewegung jedes beteiligten Fahrzeuges an sowie eine Datenbank, welche alle zur steuernden Fahrzeuge überwacht. Diese Informationen werden an zentraler Stelle ausgewertet und über verschiedene Kontrollmechanismen letztlich in Steuerungsoperationen umgewandelt. Für die Erstellung eines Traffic Manager Skripts haben die Entwickler zum besseren Verständnis ein Beispiel hinterlegt, in dem mit dem Abändern einiger Variablenwerte auch ein atypisches Fahrverhalten der Autofahrer erzeugt werden kann, vgl. [78].

Für die Erstellung von mehreren Szenarien mit unterschiedlichem Simulationsablauf aus nur einer einzigen Szenariodefinition heraus ist noch die Scenic Anwendung zu erwähnen, die als eine domänenspezifische Programmiersprache die Umgebung von autonomen Fahrzeugen modellieren kann. Es lassen sich spezielle Scenic-Szenarien damit erstellen. Die Syntax dieser Sprache unterscheidet sich allerdings von der gewohnten Python bzw. CARLA Syntax, vgl. [78].

Mit der ebenfalls hier behandelten Open Source Simulationssoftware SUMO haben die Entwickler von CARLA eine Co-Simulations Anwendung in das Programm implementiert. Damit können die Fähigkeiten der beiden Programme sinnvoll gemeinsam genutzt werden. SUMO hat seinen Schwerpunkt im Bereich der Verkehrssimulation, welcher im Normalfall durch den CARLA eigenen Traffic Manager abgedeckt wird, aber SUMO erweist sich hier als eine effizientere Alternative. Das Programm erzeugt die Fahrzeuge und verwaltet diese auch, das Durchlaufen der Szenarios oder das Auswerten der Sensor- und Kartendaten übernehmen aber weiterhin die Module von CARLA. Zur Nutzung dieses Zusammenspiels muss das Programm natürlich erst einmal installiert werden, allerdings empfehlen die Entwickler hier eine Installation vom Quellcode aus, also abweichend von der beschriebenen Installationsanleitung. Nach dem Einsetzen einer SUMO Umgebungsvariable, die direkt auf das Programm verweist, kann die Software als Co-Simulation in der Verkehrssimulation verwendet werden. Dazu müssen vom Benutzer sogenannte vtypes erstellt werden, das Äquivalent zu den Programmmentwürfen (Blueprints) von CARLA.

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Anschließend erstellt die SUMO-Anwendung netconvert ein Straßennetz, welches für die Anwendung in CARLA synchronisiert ist. Dies erfordert noch das Eingeben einiger Programmbefehle. Dann ist der Prozess aber abgeschlossen und die Verkehrssimulation und Netzwerkgenerierung vom effizienteren Programm SUMO erfolgt. CARLA muss sich nur noch um die berechnungsintensive Simulation der Sensoren und der Fahrzeugwechselwirkungen kümmern, vgl. [79]. So können verfügbare Computerressourcen effizienter genutzt werden.

Besagte Anwendung netconvert ist auch in der praxisorientierten Nutzung des Open Source Simulationsprogramms SUMO von Bedeutung, etwa wenn die Verkehrsströme einer real existierenden Stadt abgebildet, analysiert und in der Simulation gezielt verbessert werden sollen, um daraus Schlüsse für die Stadtplanung zu ziehen. Das Programm ist in der Lage, digitale Verkehrsnetzwerke verschiedener Dateiformate in SUMO hinein zu importieren und für die Nutzung durch andere Modul-Programme verwendbar zu machen und vorzubereiten. Durch die Eingabe des zu importierenden Dateityps und der zu importierenden Datei als Parameterwert in die Kommandozeile startet die Anwendung und führt die angeforderte Operation durch. Der Import eines Straßennetzes aus dem Kartenportal OpenStreetMap funktioniert mittels der Eingabe eines Befehls.

Mit der Eingabe zahlreicher weiterer Parameter lässt sich die Art und Weise des Imports der Straßenkarte abändern sowie auch das resultierende SUMO-Verkehrsnetz für die nachfolgenden Simulationen. Beispiele dafür sind unter anderem die Angabe von Straßennamen, das Markieren erkannter Kreuzungspunkte oder auch die Analyse eines auf der Karte vorhandenen Schienennetzes, vgl. [80]. Diese und zahlreiche weitere Vorbereitungsschritte, welche allesamt in dem von den Entwicklern zur Verfügung gestellten Online-Wiki aufgelistet sind, werden durch die Eingabe des entsprechenden Befehles in die Kommandozeile vollzogen. Für eine funktionierende Verkehrssimulation enthält ein von netconvert erzeugtes SUMO-Verkehrsnetz stets die folgenden Informationen: alle enthaltenen Straßen inklusive ihrer Position, Form, Geschwindigkeitsbegrenzung und Fahrspuren, sämtliche Ampelanlagen inklusive ihrer Schaltungslogik, Kreuzungen mit allen Vorfahrtsregelungen, Verbindungen zwischen den einzelnen Fahrspuren an Knotenpunkten sowie, falls vorhanden, Kreisverkehre, vgl. [81]. Neben dem Import können Straßennetzwerke auch vom Programm selbst erstellt werden, von geometrischen Schachbrettformen bis hin zu zufällig erstellten

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Mustern. Mit sumo-gui kann das Netzwerk bereits angesehen werden, aber noch fahren keine Autos auf den Straßen und noch wird kein Verkehr simuliert. Dies wird aber im nächsten Schritt, der Nachfragemodellierung durch das Anlegen von Routen festgelegt. Sumo und sumo-gui benötigen Routen für die Bestimmung von Fahrzeugbewegungen. Je nach Detaillierungsgrad vorhandener Verkehrsdaten zu einer Kreuzung oder zu mehreren Straßenzügen kann die Verkehrsnachfrage anders dargestellt werden, von einer randomisierten Darstellung, mit unrealistischen Ergebnissen bis hin zu von Verkehrsbehörden veröffentlichten Matrizen mit Fahrzeugzählungen auf bestimmten Straßenabschnitten. Routendateien können auch per Hand erstellt werden, bei großen Netzen ist dies aber sehr aufwändig, weshalb von den Entwicklern Programme entwickelt wurden, die Verkehrsdaten direkt in SUMO implementieren können, vgl. [82]. Alle in der Simulation dargestellten Fahrzeuge müssen vorab mit Klasse, Typ und Route definiert werden, so werden sie den Simulationsmodulen übergeben. Wichtig ist dabei zu beachten, dass sämtliche den Fahrzeugen zugehörigen Elemente nach ihrer Abfahrtszeit in der Simulation sortiert werden müssen. Ansonsten kann es zur fehlerhaften Abbildung der simulierten Wirklichkeit kommen. Als zusätzliche Dateien werden der Simulation noch Informationen wie etwa Ampelprogramme, Induktionsschleifen zur Verkehrsstärkemessung und verkehrsdichteabhängige Geschwindigkeitsbegrenzungen. Mit dem richtigen Befehl erfolgt die Einlesung in den Programmspeicher. SUMO hält bei der Abarbeitung des Programmiercodes eine fest stehende Reihenfolge ein, zuerst das importierte Verkehrsnetzwerk, die Zusatzdaten (in der eingegebenen Reihenfolge), anschließend öffnet und liest das Programm die Routendateien mit den ersten Zeitschritten. Die nachfolgenden Zeitschritte folgen. Auf diese Weise wird die Simulation Stück für Stück vom Programm abgearbeitet, vgl. [83]. Während der Durchführung und nach Beedingung der Berechnungsverfahren liefert SUMO eine Reihe von Ergebnissen, den Programoutput. Einige Daten können über Optionen in der Kommandozeile abgerufen werden, andere benötigen eine Definition in Zusatzdateien. Standardmäßig sind alle vom Programm erstellen Output-Dateien im XML-Dateiformat, welches für den eigenen Computer nicht ohne weiteres nutzbar ist. Mit einem speziellen Python-Tool ist allerdings die Umwandlung in ein Dateiformat möglich, welches von einem Großteil der Tabellenkalkulationsprogramme verarbeitet werden kann. Damit lassen sich die erhaltenen Ergebnisse auch etwa graphisch aufbereiten und sichten. Die Bandbreite des Outputs ist vielfältig, von einer genauen

5 CARLA und SUMO im Vergleich

Auflistung aller Fahrzeuge mit Position und Geschwindigkeit in jedem einzelnen Zeitabschnitt über Berechnungen zu Rückstaus an Kreuzungen für jede einzelne Fahrspur bis hin zu einer addierten Zusammenstellung der zurückgelegten Strecke von jedem Fahrzeug, optional auch mit nutzbaren Emissionsdaten, vgl. [84]. Diese werden in SUMO mittels verschiedener Modelle und über Emissionsklassen wiedergegeben. Mit dem Attribut „emissionClass“ können sie einzelnen Fahrzeugen zugewiesen werden. Standardmäßig vom Programm verwendet wird ein mit Hilfe des Models HBEFA3 generiertes Personenfahrzeug mit einem Euro 4 Benzinmotor, es sind aber auch andere Motoren und Fahrzeugtypen wählbar. Das Ergebnis dieser optional durchführbaren Simulation der Autoabgase kann die insgesamt ausgestoßene Menge an Abgasen sein, oder aber auch die Gesamtemissionen aller Fahrzeuge auf einer einzelnen Fahrspur in einem Zeitschritt der Simulation, vgl. [85]. Außerdem kann SUMO auch das Mitwirken von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr darstellen, inklusive dem Anfahren in die Simulationswelt eingefügter Ladestationen. Diese Erweiterung wurde von Wissenschaftlern der Technischen Universität Braunschweig in das Simulationsprogramm eingefügt, was das Open Source Prinzip auch bei SUMO nochmals unterstreicht. Die Möglichkeit einer Fahrzeugemissionsimulation und Einfügen von Elektrofahrzeugen ist in Zeiten von Umweltschutz und der Suche nach alternativen Antriebstechnologien ein wichtiger Baustein im Mitwirken an der nachhaltigen und umweltfreundlichen Verkehrswende.

Der Vergleich der beiden Open Source Simulationsprogramme CARLA und SUMO offenbart neben vielen Unterschieden auch einige Gemeinsamkeiten, vor allem in der allgemeinen Bedienung. Bei beiden Programmen ist allerdings ein gewisses Grundwissen und Verständnis in der Informatik und tieferen Bedienung von Computern erforderlich, um erfolgreich installieren und simulieren zu können. Beiden Programmen ist deutlich ihre wissenschaftliche Herangehensweise anzumerken und die Entwickler haben mit der Erstellung der Online-Nachschlagewerke versucht, möglichst vielen Interessierten den Zugang zu den Anwendungen zu ermöglichen und auch nicht ganz so Computer-versierten den Einstieg in die Programme zu erleichtern. Abschließend für diese Gegenüberstellung und Beleuchtung der Simulationsprogramme folgt eine Übersichtstabelle der behandelten Themen und Anwendungen mit ausgewählten Vergleichskriterien.

5 CARLA und SUMO im Vergleich

	CARLA	SUMO
Kosten	Open Source (kostenfrei)	Open Source (kostenfrei)
Simulationsmaßstab	mikroskopisch	mikroskopisch
Erweiterungen möglich	Ja, sogar von den Entwicklern erwünscht.	Ja, sogar von den Entwicklern erwünscht.
Vorausgesetzte Computerkenntnisse	Umfangreich, Bedienung von Terminal und Konsole schon zur Installation nötig, Erfahrung mit Programmiersprachen ebenfalls nützlich.	Etwas zugänglicher als CARLA, aber auch hier tieferes Einsteigen in den Computer bzw. den Terminal, die Kenntnisse der verkehrswissenschaftlichen Zusammenhänge reicht bei beiden Programmen nicht für die Bedienung aus.
Installationsaufwand	Erheblich, insgesamt bis zu 4 Stunden einzuplanen	Ebenfalls umfangreich, neben dem Hauptprogramm wie auch bei CARLA zahlreiche weitere kleinere Anwendungen zu installieren.
Programmiersprache	Python	C++
Eingabe von Befehlen	Über eine Kommandozeile in Programmiersprache, nur wenig graphische Oberfläche zur Eingabe.	Über eine Kommandozeile, nur zwei Programme mit graphischer Oberfläche, ansonsten Schreiben von Skripten mittels eines Texteditors.
Hilfestellung durch Onlinewiki	Umfangreich, kommen Videos auf YouTube.	Ausführlich, ebenfalls Erklärvideos auf YouTube vorhanden.
Verwendungszweck	Erkennungs- und Steuerungssysteme im autonomen Fahren	Verkehrssimulation für einzelne Kreuzungen oder sogar größere Verkehrsnetzwerke

Tabelle 2: Vergleichende Gegenüberstellung von CARLA und SUMO anhand maßgebender Attribute

6 Resümee und Ausblick

Seit der Erfindung des Automobils vor etwa 150 Jahren hat es über die Zeit einen bedeutenden Stellenwert im Leben vieler Menschen eingenommen und mit der Massenmotorisierung seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs sind neben dem erschwinglichen Zugang zu nahezu grenzenloser Mobilität viele Probleme mit gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen entstanden. Dazu zählen vor allem Verkehrsstauungen, der für die Infrastruktur beanspruchte Platz sowie Abgasemissionen. Dies war der Anlass für die Wissenschaft sich mit dem Thema Straßenverkehr zu befassen und mit den Verkehrswissenschaften ein vollkommen neues Forschungsgebiet entstehen zu lassen. Der Verkehr auf Straßen und Autobahnen wurde beobachtet, analysiert und Modelle dazu entwickelt. Es entstand die Verkehrsflusstheorie und Erklärungen für Phänomene wie Phantomstaus oder Stop-and-Go-Wellen wurden entwickelt, oftmals unter Einbeziehung der Mathematik und anderer wissenschaftlicher Fachdisziplinen. Der technische Fortschritt führte zu der Entwicklung von Systemen, welche dem Menschen das Autofahren erleichtern und es vor allem sicherer machen sollten. Angefangen von einem simplen Tempomaten zum Halten der Geschwindigkeit sind es bis heute Systeme zum vollständigen autonomen Fahren geworden, deren Anwendbarkeit im alltäglichen Straßenverkehr in der Theorie bereits gesichert erscheint. Bei rechtlichen Fragen, insbesondere der Haftung, besteht aber noch Klärungsbedarf und grundlegende internationale Abkommen und Leitlinien müssen einem Abänderungsprozess unterzogen werden. Für eine staatliche Zulassung von autonomem Fahren des fünften Level, also das vollständig autonome Fahren zu jedem Fahrtzeitpunkt und der bedingungslosen Erfüllung der Fahraufgabe, auch in kritischen Situationen, bedarf es allerdings noch der Durchführung vieler Simulationsfahrten und der ausgiebigen Prüfung und Evaluation der Fahrsysteme. Die Praxiserfahrungen mit den bereits in Deutschland und anderen Ländern zugelassenen Systemen mit der Automatisierungsstufe 3 oder niedriger werden mit Sicherheit auch in die Entscheidung zur Zulassung höherer Automatisierungsstufen einfließen. Aus Kosten- und Sicherheitsgründen können allerdings nicht alle für die Erstellung eines robusten Steuerungssystems Testreihen auf Übungsstrecken oder sogar im alltäglichen Straßenverkehr stattfinden. Aus diesem Grund stehen neben dem Abhalten von Testfahrten auch insbesondere das Training der Fahralgorithmen in

Simulationsprogrammen im Vordergrund, in dem auch kritische Situationen gefahrlos und beliebig oft wiederholt werden können, um das System auch für solche Fälle ausreichend zu schulen. Je nach Teilbereich im automatisierten und autonomen Fahren, oder auch in der allgemeinen Verkehrssimulation, stehen verschiedene Simulationsprogramme zur Verfügung. Unter anderem auch SUMO und CARLA, beide kostenlos im Internet erhältlich und offen für Erweiterungen durch die Nutzer. Diese und zahlreiche weitere Simulationsprogramme werden auch in Zukunft einen wichtigen Beitrag bei der weiteren Optimierung bereits bestehender autonomer Fahrsysteme und der Innovation neuer Erkennungssysteme und Steuerungsalgorithmen haben und das autonome Fahren der höchsten Automatisierungsstufe auf ein neues Niveau von Sicherheit und Fahrkomfort bringen. Die Entwicklung immer leistungsfähigerer Rechner, Prozessoren und Grafikkarten kommt auch der virtuellen Simulation von Straßenverkehr zugute. Unterstützt durch weiterentwickelte Versionen der Simulationsanwendungen ist eine noch bessere Abbildung der Realität mit einer unzähligen Variation an Fahrsituationen möglich. Den Menschen wird durch den Einsatz von automatisierten und autonomem Fahren die Chance geboten, das alltägliche Verkehrsgeschehen in der Stadt, auf dem Land und auf der Autobahn sicherer und effizienter zu gestalten und damit verbundenen Belastungen auf ein erträgliches Maß zu reduzieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 1: „Einführung in die Verkehrstheorie und –automatisierung“, letzter Zugriff: 11.08.2022
- [2] „Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugbestand“, in: Umweltbundesamt, 24.03.2022, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeugbestand#lange-der-verkehrswege>, letzter Zugriff: 23.07.2022
- [3] Brandt, Mathias: „Blechlawine – 569 Autos je 1.000 EU-Bürger:innen“, in: Statista, Online-Plattform für Statistik, 30.09.2021, „Blechlawine – 569 Autos je 1.000 EU-Bürger:innen“, URL: <https://de.statista.com/infografik/25811/anzahl-der-pkw-je-1000-einwohnerinnen-in-der-eu/>, letzter Zugriff: 25.07.2022
- [4] „Pkw-Dichte in Deutschland in den vergangenen zehn Jahren um 12 % gestiegen“, in: Statistisches Bundesamt (Destatis), Pressemitteilung Nr. N 055 vom 11.09.2020, URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20_N055_461.html, letzter Zugriff: 03.08.2022
- [5] Wegener, Basil: „München ist die Pendlerhauptstadt Deutschlands – München bleibt Pendlerhauptstadt: Fast 400.000 Menschen fahren jeden Tag von außerhalb zum Arbeiten in die Stadt. Generell steigen die Zahlen deutschlandweit an.“, in: Abendzeitung München, 06.02.2020, URL: <https://www.abendzeitung-muenchen.de/muenchen/muenchen-ist-die-pendlerhauptstadt-deutschlands-art-487308>, letzter Zugriff: 23.11.2022
- [6] „Verkehrsunfälle – Verkehrsunfälle und Verunglückte im Zeitvergleich (ab 1950)“, in: Statistisches Bundesamt (Destatis), URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Tabellen/liste-strassenverkehrsunfaelle.html>, letzter Zugriff: 01.08.2022

- [7] Kords, Martin: „Anzahl der Getöteten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland von 1950 bis 2021“, in: Statista, Online-Plattform für Statistik, 18.07.2022 , URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/185/umfrage/todesfaelle-im-strassenverkehr/>, letzter Zugriff: 26.07.2022
- [8] „Verkehrsdichte – In diesen Städten stehen Autofahrer am längsten im Stau“, in: Next Mobility, Portal für die Mobilität der Zukunft mit allen relevanten Nachrichten, 07.12.2021, URL: <https://www.next-mobility.de/in-diesen-staedten-stehen-autofahrer-am-laengsten-im-stau-a-1081269/>, letzter Zugriff: 29.07.2022
- [9] Randelhoff, Martin: „Analyse Straßenverkehr – Die drei Haupttheoreme der Stauforschung: Der Schmetterlingseffekt, unsichtbare Wellen (=Phantomstau) und die Tragik des Zufalls“, in: Zukunft Mobilität, Internetblog, 22.12.2017, URL: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/3344/analyse/wie-entstehen-staus-phantomstau/>, letzter Zugriff: 04.08.2022
- [10] „Downs-Thomson Paradoxon: Mehr Staus durch Ausbau des Straßennetzes“, in: IABG, deutsches Analyse- und Testdienstleistungsunternehmen, 21.12.2020, URL: <https://www.iabg.de/news-termine/themen/downs-thomson-paradoxon-mehr-staus-durch-ausbau-des-strassennetzes>, letzter Zugriff: 24.07.2022
- [11] Lehnert, Dr. Ninja Mariette: „Umweltbelastungen durch den Straßenverkehr – Die statistische Erfassung nachhaltiger Mobilität“, in: Statistische Monatshefte Rheinland-Pfalz, Ausgabe 08 2014, URL: <https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/monatshefte/2014/August/08-2014-743.pdf>, letzter Zugriff: 20.07.2022
- [12] „CO₂-Emissionen von Pkw: Zahlen und Fakten (Infografik)“, in: Internetauftritt Europäisches Parlament, Aktuelles, 14.06.2022, URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-pkw-zahlen-und-fakten-infografik>, letzter Zugriff: 10.08.2022
- [13] „Länger als gedacht: Mentale Geschwindigkeit bleibt bis zum Alter von 60 Jahren hoch“, in: Redaktionsnetzwerk Deutschland, 19.02.2022, URL: <https://www.rnd.de/wissen/mentale-geschwindigkeit-bleibt-bis-zum-alter-von-60-jahren-hoch-PSGDNRYK4JCC3DF6CCVJ5S6UN4.html>, letzter Zugriff: 15.08.2022

- [14] „Autofahren im Alter: Auch als Rentner sicher unterwegs“, in: Bussgeldkatalog.net, URL: <https://www.bussgeldkatalog.net/autofahren-im-alter/>, letzter Zugriff: 16.08.2022
- [15] „Anhalteweg berechnen: Mit dieser Formel geht's“, in: Allgemeiner Deutsche Automobil-Club e.V., 20.10.2022, URL: <https://www.adac.de/verkehr/rund-um-den-fuehrerschein/erwerb/anhalteweg-berechnen>, letzter Zugriff: 23.10.2022.
- [16] „Straßenverkehrsrecht“, in: Bundesamt für Güterverkehr, URL: https://www.bag.bund.de/DE/Themen/RechtsentwicklungRechtsvorschriften/Rechtsvorschriften/Strassenverkehrsrecht/strassenverkehrsrecht_node.html, letzter Zugriff: 20.08.2022
- [17] „Nützliche Infos rund um Ihr Fahrzeug – Aktive und passive Sicherheit im Auto!“, in: Raiffeisen- und Volksbanken Versicherung AG (R+V Versicherung), URL: <https://www.ruv.de/kfz-versicherung/magazin/rund-ums-auto/sicherheit-im-automobilbau-folge-1-aktive-und-passive-sicherheit>, letzter Zugriff: 23.07.2022
- [18] Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 2: „Variablen und Messmethoden“, letzter Zugriff: 07.09.2022
- [19] Kühne, Prof. Dr. Reinhart D.: „Foundations of Traffic Flow Theory I: Greenshields Legacy – Highway Traffic“, German Aerospace Center, Transportation Studies, Berlin, Germany, URL: https://www.krbalek.cz/For_students/mds/clanky/Greenshields.pdf, letzter Zugriff: 17.10.2022
- [20] van Wageningen-Kessels, Femke, van Lint, Hans, Vuik, Kees, Hoogendoorn, Serge: „Genealogy of traffic flow models“, EURO J Trans Logist (2015) 4:445-473, Survey, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 13.10.2022
- [21] Treiber, Martin, Kesting, Arne: „Verkehrsdynamik und –simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik, veröffentlicht im Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 15.10.2022

- [22] „Makroskopische Modelle zur Kapazitätsschätzung städtischer Netze“, Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten, Merkblatt 2018/04, URL: https://svi.ch/media/upload/publications_de/c562586b_SVI_Merkblatt_2018-04_181030_d.pdf, letzter Zugriff: 28.10.2022
- [23] Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 3: „Empirische Charakteristiken der Verkehrsflüsse“, letzter Zugriff: 04.11.2022
- [24] Kerne, Boris S.: „Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control – The Long Road to Three-Phase Traffic Theory“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 10.10.2022
- [25] Eduard Primas, Matthias: „Phantomstaus: Ursachen, Wirkungen und Möglichkeiten ihrer Vermeidung. Eine Untersuchung mit agentenbasierten Modellen“, Karl-Franzens-Universität Graz – Institut für Systemwissenschaften, Innovations- und Nachhaltigkeitsforschung, Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines Master of Science, eingereicht am 16.08.2016, URL: <https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/content/titleinfo/1492968/full.pdf>, letzter Zugriff: 03.10.2022
- [26] Manz, Michael Dipl.-Ing. (FH): „Modellbasierte visuelle Wahrnehmung zur autonomen Fahrzeugführung“, Universität der Bundeswehr München – Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik – Institut für Technik Autonomer Systeme, Dissertation zum Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.), eingereicht am 19.09.2012, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 17.10.2022
- [27] Graf, Maximilian J. Graf: „Bewegungsplanung für automatisierte Fahrzeuge in strukturierten Umgebungen unter Nutzung von Fahrermodellen und kontinuierlicher Optimierung“, Universität Ulm, Schriftenreihe des Institutes für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Band 38, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 28.09.2022

- [28] Braun, Nikolaus: „Antworten aus dem Cockpit (1) – Was kann eigentlich der Autopilot (nicht)? – Der Autopilot hilft dem Piloten aus jeder Situation, oder? Flugkapitän Nikolaus Braun räumt mit Kinolegenden auf und erklärt, was Flugzeuge heute automatisch können – und was nicht“, in: Online-Wissensplattform Airliners für die deutsche Luftverkehrswirtschaft, 17.07.2021, URL: <https://www.airliners.de/antworten-cockpit-1-autopilot/33438>, letzter Zugriff: 30.08.2022
- [29] Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 4: „Automatisiertes Fahren“, letzter Zugriff: 30.08.2022
- [30] Vaid, Kamal, Becker, Marco (Herausgeber): „Selbst ist das Auto – automatisiertes und autonomes Fahren – Die Zukunft der Mobilität“, Schriftenreihe der Northern Business School zur angewandten Wissenschaft – Band 10, Diplomica Verlag GmbH, Hamburg 2018, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 30.08.2022
- [31] „Lkw-Fahrer: Gesetzliche Pausen sind vorgeschrieben“, in: Informationsportal zum aktuellen Punktekatolog des Jahres 2022 und allen Bußgeldern im Straßenverkehr, 11.08.2022, URL: <https://www.bussgeldkatalog.org/lkw-pausen/>, letzter Zugriff: 09.09.2022
- [32] „Strassenverkehr 4.0 – Rechtssicherheit für automatisiertes Fahren“, in: Internetauftritt der deutschen Bundesregierung, 04.11.2016, URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/rechtssicherheit-fuer-automatisiertes-fahren-349048>, letzter Zugriff: 09.09.2022
- [33] Bittner, Andreas K.: „Autos im moralischen Dilemma? – Zur Ethik des Autonomen Fahrens“, in: Internetauftritt des Allgemeinen Deutschen Fahrrad-Clubs (adfc), Kreisverband Münsterland, 29.10.2018, URL: <https://kreisverbaende.adfc-nrw.de/kv-muenster/ortsgruppen/altenberge/adfc-ortsgruppe-altenberge/aktuelles/article/autos-im-moralischen-dilemma-zur-ethik-des-auto.html>, letzter Zugriff: 24.08.2022

- [34] „Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles“, in: SAE International, SAE J3016_202104, URL: https://wiki.unece.org/display/trans/FRAV+13th+session?preview=%2F128418539%2F128418560%2FSAE+J3016_202104.pdf, letzter Zugriff: 21.10.2022
- [35] Paulsen, Thomas: „Autonomes Fahren: Die 5 Stufen zum selbst fahrenden Auto“, in: Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., 15.07.2021, URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/grundlagen/autonomes-fahren-5-stufen/>, letzter Zugriff: 22.10.2022
- [36] Paulsen, Thomas: „Gesetz zum autonomen Fahren: Diese Regeln gelten“, in: Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., 04.01.2022, URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/recht/gesetz-zum-autonomen-fahren/>, letzter Zugriff: 23.10.2022
- [37] Hebermehl, Gregor, Baumann, Uli: „Mercedes mit Level-3-Zulassung – Drive Pilot kostet wenigstens 5.950 Euro“, in: Automobil-Fachzeitschrift auto motor und sport, 17.05.2022, URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mercedes-autonom-level-3-drive-pilot-haftung-unfall/>, letzter Zugriff: 19.10.2022
- [38] „Bundestag nimmt Gesetz zum autonomen Fahren an“, in: Deutscher Bundestag, Textarchiv aus 2021, Kalenderwoche 20, URL: <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2021/kw20-de-autonomes-fahren-840196>, letzter Zugriff: 17.10.2022
- [39] „Bundeskabinett verabschiedet Verordnung zum Autonomen Fahren – Wissing: Rechtsrahmen für autonomes Fahren vervollständigt“, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Pressemitteilung, 23.02.2022, URL: <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2022/008-wissing-verordnung-zum-autonomen-fahren.html>, letzter Zugriff: 12.09.2022

- [40] Maurer, Markus, Gerdes, J. Christian, Lenz, Barbara, Winner, Hermann (Herausgeber): „Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte“, Springer Verlag GmbH Berlin Heidelberg 2015, Teil IV Sicherheit (Hermann Winner, Markus Maurer), Kapitel 20: Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren (Klaus Dietmayer), URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-45854-9.pdf?pdf=button>, letzter Zugriff: 11.11.2022
- [41] „Funktionsweise und Technologie von Radarsensoren“, in: Baumer Group, URL: <https://www.baumer.com/de/de/service-support/funktionsweise/funktionsweise-und-technologie-von-radarsensoren/a/Know-how-Function-Radar-sensors>, letzter Zugriff: 03.11.2022
- [42] Petit, Florian: „Die Welt der LIDAR-Technologie – Entmystifizierung von LiDAR – Ein Überblick über die LiDAR-Technologie“, in: Blickfeld Blog, 19.08.2020, URL: <https://www.blickfeld.com/de/blog/was-ist-lidar/>, letzter Zugriff: 23.10.2022
- [43] Zhang, Jeremy: „PID Controller Info – Controlling a Self-Driving Car to Follow a Path“, in: Towards Data Science, 20.12.2019, URL: <https://towardsdatascience.com/pid-controller-intro-26fda41aaa59>, letzter Zugriff: 31.10.2022
- [44] „Funktionale Sicherheit“, in: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., URL: <https://www.vde.com/topics-de/funktionale-sicherheit>, letzter Zugriff: 11.10.2022
- [45] „Funktionale Sicherheit von Produkten, Maschinen und Anlagen – Alles zur Funktionalen Sicherheit“, in: TÜV Süd AG, Services zur Funktionalen Sicherheit, URL: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/funktionale-sicherheit-info>, letzter Zugriff: 12.10.2022
- [46] „Funktionale Sicherheit (ISO 26262)“, in: Kugler Maag Cie GmbH, URL: <https://www.kuglermaag.de/funktionale-sicherheit/>, letzter Zugriff: 12.10.2022
- [47] Schnieder, Lars, Hosse, Rene S.: „Leitfaden Safety of the Intended Functionality – Verfeinerung der Sicherheit der Sollfunktion auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Springer Fachmedien-Verlage Wiesbaden, 2019, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 13.10.2022

- [48] „Intelligent transport systems – Adaptive cruise control systems – Performance requirements and test procedures“, ISO 15622:2018, PREVIEW, URL: <https://www.sis.se/api/document/preview/80006814/>, letzter Zugriff: 02.11.2022
- [49] Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 5: „Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage“, letzter Zugriff: 01.11.2022
- [50] „Grundwissen – DOPPLER-EFFEKT“, in: LEIFIphysik, Akustische Wellen, URL: <https://www.leifiphysik.de/akustik/akustische-wellen/grundwissen/doppler-effekt>, letzter Zugriff: 13.10.2022
- [51] „Adaptive Cruise Control ACC – Abstandsregeltempomat“, in: Die Plattform für Kfz-Technik kfztech.de, URL: <https://www.kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/acc.htm>, letzter Zugriff: 09.10.2022
- [52] „Differentialgleichung“, in: Onlinelernportal Studyflix, URL: <https://studyflix.de/mathematik/differentialgleichung-4206>, letzter Zugriff: 10.10.2022
- [53] Dallmeyer, Jörg: „Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt – Das Mit- und Gegeneinander verschiedener Verkehrsteilnehmertypen“, Springer Fachmedien-Verlag Wiesbaden, 2014, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 15.10.2022
- [54] Treiber, Dr. Martin: „Verkehrsdynamik und –simulation“, Skript zur Vorlesung, Technische Universität Dresden, Institut für Wirtschaft und Verkehr, Lehrstuhl für Verkehrsmodellierung und -ökonomie, Stand: Sommersemester 2017, URL: https://www.mtreiber.de/Vkmod_Skript/Vkmod_all.pdf, letzter Zugriff: 16.10.2022
- [55] Dosovitsky, Alexey, Ros, German, Codevilla, Felipe, Lopez, Antonio, Koltun, Vladlen: „CARLA: An Open Urban Driving Simulator“, URL: <http://vladlen.info/papers/carla.pdf>, letzter Zugriff: 07.12.2022
- [56] „Straßenverkehrs-Ordnung – I. Allgemeine Verkehrsregeln (§§ 1 – 35) - § 18 Autobahnen und Kraftfahrstraßen“, in: Rechtsinformationssystem Dejure, URL: <https://dejure.org/gesetze/StVO/18.html>, letzter Zugriff: 29.09.2022

- [57] Laganieri, Robert: „Training Real-World Self-Driving Cars with Video Games“, University of Ottawa and Founder and Chief Science Officer at Sensor Cortek and Tempo Analytics, URL: <https://www.synopsys.com/designware-ip/technical-bulletin/training-self-driving-cars-video-games-2019q3.html>, letzter Zugriff: 30.08.2022
- [58] Lubert, Stefan Dipl.-Ing. (FH): „Definition – Was ist ein Neuronales Netz?“, in: Fachportal BigData-Insider, 15.02.2018, URL: <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-ein-neuronales-netz-a-686185/>, letzter Zugriff: 29.08.2022
- [59] Karovalia, Alzaib: „Building a Self-Driving Vehicle in GTA-V Using Deep Learning and Convolutional Neural Network“, URL: <https://alzaibkarovalia.medium.com/building-a-self-driving-vehicle-in-gta-v-using-deep-learning-and-convolutional-neural-network-696b38b4c81e>, letzter Zugriff: 27.08.2022
- [60] Krajewicz, Daniel, Erdmann, Jakob, Behrlich, Michael, Bieker, Laura: „Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility“, in: International Journal on Advances in Systems and Measurements, Vol. 5 No. 3 & 4, German Aerospace Center – Institute of Transportation Systems, 2012, URL: https://www.researchgate.net/publication/259896651_Recent_Development_and_Applications_of_SUMO_-_Simulation_of_Urban_MObility, letzter Zugriff: 07.12.2022
- [61] „Semantische Segmentierung – Drei Dinge, die Sie wissen sollten“, in: MathWorks – Bildverarbeitung und Computer Vision, URL: <https://de.mathworks.com/solutions/image-video-processing/semantic-segmentation.html>, letzter Zugriff: 30.10.2022
- [62] Lubert, Stefan Dipl.-Ing. (FH): „Definition – Was ist das Client-Server-Modell?“, in: Fachportal für Netzwerktechnik und Routing IP-Insider, 19.06.2020, URL: <https://www.ip-insider.de/was-ist-das-client-server-modell-a-940627/>, letzter Zugriff: 23.11.2022
- [63] „CARLA“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/start_introduction/, letzter Zugriff: 30.11.2022
- [64] „About Eclipse SUMO“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: <https://www.eclipse.org/sumo/about/>, letzter Zugriff: 01.12.2022

- [65] „SUMO at a Glance“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: https://sumo.dlr.de/docs/SUMO_at_a_Glance.html, letzter Zugriff: 03.12.2022
- [66] „Quick start package installation“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/start_quickstart/, letzter Zugriff: 01.12.2022
- [67] „Windows build“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/build_windows/, letzter Zugriff: 02.12.2022
- [68] „1.st World and client“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/core_world/, letzter Zugriff: 02.12.2022
- [69] „2nd. Actors and blueprints“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/core_actors/, letzter Zugriff: 02.12.2022
- [70] „3rd. Maps and navigation“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/core_map/, letzter Zugriff: 30.11.2022
- [71] „4th. Sensors and data“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/0.9.13/core_sensors/, letzter Zugriff: 30.11.2022
- [72] „Computer Skills“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: https://sumo.dlr.de/docs/Basics/Basic_Computer_Skills.html, letzter Zugriff: 29.11.2022
- [73] „Windows Build“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: https://sumo.dlr.de/docs/Installing/Windows_Build.html, letzter Zugriff: 29.11.2022
- [74] „Driving in Circles“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: https://sumo.dlr.de/docs/Tutorials/Driving_in_Circles.html, letzter Zugriff: 28.11.2022

- [75] „Scenario Runner“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: <https://carla-scenariorunner.readthedocs.io/en/latest/>, letzter Zugriff: 28.11.2022
- [76] „Overview“, in: Bestenliste im autonomen Fahren des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: <https://leaderboard.carla.org/>, letzter Zugriff: 04.12.2022
- [77] „Metrics module“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla-scenariorunner.readthedocs.io/en/latest/metrics_module/, letzter Zugriff: 04.12.2022
- [78] „Traffic Manager“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/latest/adv_traffic_manager/, letzter Zugriff: 01.12.2022
- [79] „SUMO co-simulation“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/latest/adv_sumo/, letzter Zugriff: 26.11.2022
- [80] „netconvert“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: <https://sumo.dlr.de/docs/netconvert.html>, letzter Zugriff: 03.12.2022
- [81] „SUMO Road Networks“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: https://sumo.dlr.de/docs/Networks/SUMO_Road_Networks.html, letzter Zugriff: 04.12.2022
- [82] „Introduction to demand modelling in SUMO“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: https://sumo.dlr.de/docs/Demand/Introduction_to_demand_modelling_in_SUMO.html, letzter Zugriff: 04.12.2022
- [83] „Basic Definition (Simulation)“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Basic_Definition.html, letzter Zugriff: 04.12.2022

[84] „Output“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: <https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Output/index.html>, letzter Zugriff: 02.12.2022

[85] „Emissions“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms SUMO, URL: <https://sumo.dlr.de/docs/Models/Emissions.html>, letzter Zugriff: 01.12.2022

Abbildung 1: Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 1: „Einführung in die Verkehrstheorie und –automatisierung“, Seite 37, letzter Zugriff: 24.08.2022

Abbildung 2: Piller, Tobias: „Inrix-Staureport – Das sind Deutschlands staureichste Städte“, in: Online-Auftritt der Frankfurter Allgemeinen Zeitung, 07.12.2021, URL: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/auto-verkehr/inrix-report-das-sind-deutschlands-staureichste-staedte-17671274.html>, letzter Zugriff: 20.08.2022

Abbildung 3: „Bremsweg-Formel, Reaktionsweg-Formel, Anhalteweg-Formel: So wird gerechnet“, in: Onlinebörse für den Autohandel wirkaufendeinauto.de, URL: <https://www.wirkaufendeinauto.de/magazin/bremsweg-rechner/>, letzter Zugriff: 23.07.2022

Abbildung 4: Esser, Biedermann, D. H.: „Abbildung 1: Makroskopische, mesoskopische und mikroskopische Skala, 2016, URL: https://www.researchgate.net/figure/Abbildung-1-Makroskopische-mesoskopische-und-mikroskopische-Skala-D-H-Biedermann_fig1_308416554, letzter Zugriff: 14.09.2022

Abbildung 5: Kühne, Reinhart D. Prof. Dr.: „Foundations of Traffic Flow Theory I: Greenshields Legacy – Highway Traffic“, Seite 4, Abbildung 6, German Aerospace Center, Transportation Studies, Berlin, Germany URL: https://www.krbalek.cz/For_students/mds/clanky/Greenshields.pdf, letzter Zugriff: 15.09.2022

Literaturverzeichnis

Abbildung 6: van Wageningen-Kessels, Femke, van Lint, Hans, Vuik, Kees, Hoogendoorn, Serge: „Genealogy of traffic flow models“, Seite 449, Abbildung 3, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 23.10.2022

Abbildung 7: van Wageningen-Kessels, Femke, van Lint, Hans, Vuik, Kees, Hoogendoorn, Serge: „Genealogy of traffic flow models“, Seite 448, Abbildung 2, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 22.10.2022

Abbildung 8: van Wageningen-Kessels, Femke, van Lint, Hans, Vuik, Kees, Hoogendoorn, Serge: „Genealogy of traffic flow models“, Seite 449, Abbildung 4, EURO J Trans Logist (2015) 4:445-473, Survey, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 21.10.2022

Abbildung 9: Treiber, Martin, Kesting, Arne: „Verkehrsdynamik und –simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik, veröffentlicht im Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, Seite 14, Abbildung 3.1, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 20.10.2022

Abbildung 10: Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 2: „Variablen und Messmethoden“, Folie 52, letzter Zugriff: 14.11.2022

Abbildung 11: „Makroskopische Modelle zur Kapazitätsschätzung städtischer Netze“, in: Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten, Merkblatt 2018/04, Abbildung 1, URL: https://svi.ch/media/upload/publications_de/c562586b_SVI_Merkblatt_2018-04_181030_d.pdf, letzter Zugriff: 12.11.2022

Abbildung 12: Pretzlaff, Harry: „Autonomes Fahren – Technisch ausgereift – aber verboten“, in: Stuttgarter Zeitung, 29.12.2017, URL: <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.autonomes-fahren-technisch-ausgereift-aber-verboten.dcb6d764-6c23-4bbe-94ef-c558890e2922.html?reduced=true>, letzter Zugriff: 03.12.2022

Abbildung 13: Jendrischik, Martin: „Autonomes Fahren: Fünf Level bis zum selbstfahrenden Auto“, in: Cleanthinking.de – mit Cleantech die Klimakrise bekämpfen, 16.11.2022, <https://www.cleanthinking.de/autonomes-fahren-fuenf-level-bis-zum-selbstfahrenden-auto/>, letzter Zugriff: 07.10.2022

Abbildung 14: Gomoll, Wolfgang: „Mercedes Drive-Pilot: Autonom fahren auf Level 3“, in: Zeitschrift für Elektromobilität Edison, 10.12.2021, URL: <https://edison.media/verkehr/mercedes-drive-pilot-autonom-fahren-auf-level-3/25222911/>, letzter Zugriff: 12.11.2022

Abbildung 15: Maurer, Markus, Gerdes, J. Christian, Lenz, Barbara, Winner, Hermann (Herausgeber), „Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte“, Springer Verlag GmbH Berlin Heidelberg 2015, Teil IV Sicherheit (Hermann Winner, Markus Maurer), Kapitel 20: Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren (Klaus Dietmayer), Seite 420, Abbildung 20.1, URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-45854-9.pdf?pdf=button>, letzter Zugriff: 08.11.2022

Abbildung 16: Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 4: „Automatisiertes Fahren“, Folie 47, letzter Zugriff: 09.11.2022

Abbildung 17: Schnieder, Lars, Hosse, Rene S.: „Leitfaden Safety of the Intended Functionality – Verfeinerung der Sicherheit der Sollfunktion auf dem Weg zum autonomen Fahren“, Springer Fachmedie-Verlage Wiesbaden, 2019, Seite 10, Abbildung 3.1, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 11.11.2022

Abbildung 18: Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 5: „Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage“, Folie 19, letzter Zugriff: 13.11.2022

Abbildung 19: Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 5: „Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage“, Folie 21, letzter Zugriff: 15.11.2022

Abbildung 20: Dallmeyer, Jörg: „Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt – Das Mit- und Gegeneinander verschiedener Verkehrsteilnehmertypen“, Springer Fachmedien-Verlag Wiesbaden, 2014, Seite 19 + Seite 20, Abbildung 3.1, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 17.11.2022

Abbildung 21: Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 5: „Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage“, Folie 25, letzter Zugriff: 07.10.2022

Abbildung 22: Veranstaltung „Sicherheitsgrundlagen des automatisierten Fahrens“, geleitet von Herrn Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux, Sommersemester 2022, Foliensatz Teil 5: „Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage“, Folie 31, letzter Zugriff: 11.10.2022

Abbildung 23: Dallmeyer, Jörg: „Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt – Das Mit- und Gegeneinander verschiedener Verkehrsteilnehmertypen“, Springer Fachmedien-Verlag Wiesbaden, 2014, Seite 28, Abbildung 3.4, Zugriff über den VPN-Zugang der Universitätsbibliothek, letzter Zugriff: 07.10.2022

Abbildung 24: „Automated driving in urban traffic – Autonomous and safe“, in: Mercedes-Benz Group, URL: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/case/autonomous/automated-driving-in-urban-traffic.html>, letzter Zugriff: 23.10.2022

Abbildung 25: „Neuronale Netze kurz erklärt“, in: Hamburg Open Online University, URL: <https://www.hoou.de/projects/neuronale-netze-kurz-erklart/pages/neuronales-netz>, letzter Zugriff: -
„Rekurrentes neuronales Netz“, in: Onlineenzyklopädie Wikipedia, URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Rekurrentes_neuronales_Netz, letzter Zugriff: 17.11.2022

Abbildung 26: „Das menschliche Hirn, seine Neuronen und Synapsen sind das Vorbild für künstliche neuronalen Netze, eine besondere Spielart der künstlichen Intelligenz (KI). Diese Netze können lernen, Muster zu erkennen – und eigenständig zu handeln.“, in: Volkswagen AG, URL: <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/06/volkswagen-neural-networks.html>, letzter Zugriff: 03.09.2022

Abbildung 27: Karoalia, Alzaib: „Building a Self-Driving Vehicle in GTA-V Using Deep Learning and Convolutional Neural Network“, Figure 1, URL: <https://alzaibkaroalia.medium.com/building-a-self-driving-vehicle-in-gta-v-using-deep-learning-and-convolutional-neural-network-696b38b4c81e>, letzter Zugriff: 02.09.2022

Abbildung 28: Karoalia, Alzaib: „Building a Self-Driving Vehicle in GTA-V Using Deep Learning and Convolutional Neural Network“, Figure 6, URL: <https://alzaibkaroalia.medium.com/building-a-self-driving-vehicle-in-gta-v-using-deep-learning-and-convolutional-neural-network-696b38b4c81e>, letzter Zugriff: 31.10.2022

Abbildung 29: Karoalia, Alzaib: „Building a Self-Driving Vehicle in GTA-V Using Deep Learning and Convolutional Neural Network“, Figure 18, URL: <https://alzaibkaroalia.medium.com/building-a-self-driving-vehicle-in-gta-v-using-deep-learning-and-convolutional-neural-network-696b38b4c81e>, letzter Zugriff: 29.10.2022

Abbildung 30: Krajzewicz, Daniel, Erdmann, Jakob, Behrisch, Michael, Bieker, Laura: „Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility“, German Aerospace Center – Institute of Transportation Systems, Seite 129, Abbildung 2 + Abbildung 3, International Journal on Advances in Systems and Measurements, Vol. 5 No. 3 & 4, 2012, URL: https://www.researchgate.net/publication/259896651_Recent_Development_and_Applications_of_SUMO_-_Simulation_of_Urban_MObility, letzter Zugriff: 29.11.2022

Abbildung 31: Krajzewicz, Daniel, Erdmann, Jakob, Behrisch, Michael, Bieker, Laura: „Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility“, German Aerospace Center – Institute of Transportation Systems, Seite 129, Abbildung 4, International Journal on Advances in Systems and Measurements, Vol. 5 No. 3 & 4, 2012, URL: https://www.researchgate.net/publication/259896651_Recent_Development_and_Applications_of_SUMO_-_Simulation_of_Urban_MObility, letzter Zugriff: 29.11.2022

Abbildung 32: Krajzewicz, Daniel, Erdmann, Jakob, Behrisch, Michael, Bieker, Laura: „Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility“, German Aerospace Center – Institute of Transportation Systems, Seite 129, Abbildung 6, International Journal on Advances in Systems and Measurements, Vol. 5 No. 3 & 4, 2012, URL: https://www.researchgate.net/publication/259896651_Recent_Development_and_Applications_of_SUMO_-_Simulation_of_Urban_MObility, letzter Zugriff: 05.12.2022

Abbildung 33: „Running the CARLA simulator in standalone mode“, in: Online-Nachschlagewerk des Open Source Simulationsprogramms CARLA, URL: https://carla.readthedocs.io/en/stable/running_simulator_standalone/, letzter Zugriff: 01.12.2022

Abbildung 34: Dosovitsky, Alexey, Ros, German, Codevilla, Felipe, Lopez, Antonio, Koltun, Vladlen: „CARLA: An Open Urban Driving Simulator“, Seite 2, Abbildung 1, URL: <http://vladlen.info/papers/carla.pdf>, letzter Zugriff: 02.12.2022

Abbildung 35: Dosovitsky, Alexey, Ros, German, Codevilla, Felipe, Lopez, Antonio, Koltun, Vladlen: „CARLA: An Open Urban Driving Simulator“, Seite 7, Tabelle 1, URL: <http://vladlen.info/papers/carla.pdf>, letzter Zugriff: 04.12.2022

Abbildung 36: „CARLA Autonomous Driving Leaderboard“, URL: <https://leaderboard.carla.org/>, letzter Zugriff: 04.12.2022

Anhang

CARLA Simulator: „The CARLA Autonomous Driving Leaderboard“, hochgeladen am 09.09.2022, URL: https://www.youtube.com/watch?v=3_oLou553lc, letzter Zugriff: 05.12.2022

CARLA Simulator: „CARLA fundamentals“, hochgeladen am 13.06.2022, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pONr1R1dy88>, letzter Zugriff: 05.12.2022

DLR Verkehr: „SUMO Simulation of Automated and Connected Driving in the Test Field Hamburg“, hochgeladen am 18.11.2020, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1FW7GUu84ws>, letzter Zugriff: 06.12.2022

Tienan Li: „Quick start of SUMO simulation“, hochgeladen am 30.03.2021, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pwix3dZgCwA>, letzter Zugriff: 06.12.2022