

Konzept für ein hierarchisches autonomes Verkehrsmanagement

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von

M. Sc. Sven Mertin
aus Lemgo

Tag des Kolloquiums: 02.11.2022

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler

Koreferent: Prof. em. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling

*„ Pánta chorei kaì oudèn ménei Πάντα χωρεῖ καὶ
οὐδὲν μένει “*

„Alles bewegt sich fort und nichts bleibt.“ (Altgriechisch)

Lehrsatz nach Platon (428 – 348 v. Chr.), der auf Heraklits „Panta rhei“ zurückgeht

Vorwort

Diese Dissertation entstand in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik des Heinz Nixdorf Instituts der Universität Paderborn.

An erster Stelle sei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler, für die Möglichkeit gedankt, dass diese Arbeit entstehen konnte. Die zahlreichen Fachgespräche und die wissenschaftliche Betreuung haben zum erfolgreichen Abschluss der vorliegenden Arbeit beigetragen. Ebenfalls möchte ich meinen Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling aussprechen, welcher erfreulicherweise das Koreferat für diese Arbeit übernommen hat. Bei Prof. Dr. Hans-Joachim Schmid und Prof. Dr.-Ing. Eugeny Kenig bedanke ich mich für das Mitwirken in der Prüfungskommission.

Außerdem sei allen Kollegen des Lehrstuhls für die lockere und ebenso gute Zusammenarbeit mein Dank ausgesprochen. Insbesondere Patrick Biemelt und Nico Rüdtenklau danke ich für die interessanten fachlichen Diskussionen und Ratschläge, jedoch ebenso für die vielen lustigen und mir sicherlich in Erinnerung bleibenden Momente, die mindestens genauso dazu beigetragen haben, dass mir die Arbeit immer sehr viel Spaß bereitet hat. Sandra Gausemeier, Kevin Malena, Christopher Link und Pascal Lange danke ich zudem für die Durchsicht des Manuskripts. Den zahlreichen Studierenden, die dazu beigetragen haben, dass diese Arbeit erfolgreich abgeschlossen werden konnte, möchte ich ebenso danken, dies gilt insbesondere für Jan Nicolas Weskamp.

Zu guter Letzt gilt besonderer Dank meiner Mutter Ulrike Kaiser und meiner Frau Carolin Mertin, die mich in jedem Moment unterstützt haben und auch in schwierigen Zeiten immer Verständnis aufbrachten. Ohne diesen Rückhalt wäre die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Paderborn, im November 2022

Sven Mertin

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein neuartiges Verkehrsmanagementsystem entwickelt und simulativ untersucht, welches in einem zukünftigen Szenario eines vollautonomen Straßenverkehrs angesiedelt ist. Motivation dieser Arbeit ist die Erwartung, die Vorteile eines autonomen Verkehrs durch ein übergeordnetes Verkehrsmanagement zu verstärken, indem der Verkehrsfluss verbessert wird. Ziel ist es, nicht lediglich individuelle Ziele einzelner Verkehrsteilnehmer in den Fokus zu stellen, sondern kollektive Ziele wie beispielsweise eine verkürzte mittlere Reisezeit oder die Verhinderung von Staus zu erreichen. Das entwickelte Verkehrsmanagement besteht hierbei aus drei Hierarchieebenen, die das Verkehrsgeschehen jeweils unterschiedlich abstrakt erfassen und entsprechend Trajektorien, Sollgeschwindigkeiten und Routen für die einzelnen Fahrzeuge berechnen. Zur Untersuchung des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes für ein intelligentes Verkehrsmanagement wird ein komplexes Simulationsframework vorgestellt, mit dem eine Vielzahl an Testscenarien erprobt wird. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen großes Potential, die Vorteile eines autonomen Verkehrs durch die Einbindung eines übergeordneten Verkehrsmanagements weiter zu steigern und die angesprochenen kollektiven Ziele zu erreichen.

Summary

In this thesis a novel traffic management system is developed and simulated, which is based on a future scenario of a fully autonomous road traffic. The motivation of this work is the expectation to enhance the benefits of autonomous traffic by improving the traffic flow. The aim is not only to focus on the individual targets of individual drivers, but to achieve collective aims such as a reduced average travel time or the prevention of traffic jams. The developed traffic management system consists of three hierarchical levels, which capture the traffic situation in different abstract ways and calculate trajectories, reference speeds and routes for the individual vehicles. In order to investigate the approach for an intelligent traffic management developed in this thesis, a complex simulation framework is presented, that is used to test a variety of test scenarios. The results of the simulations show great potential to further increase the advantages of autonomous traffic by integrating a higher-level traffic management system and to achieve the collective aims mentioned above.

Liste der Vorveröffentlichungen

- [HBA+17a] Henning, S.; Biemelt, P.; Abdelgawad, K.; Gausemeier, Sandra; Trächtler, A.: Methodology for Determining Critical Locations in Road Networks based on Graph Theory, In: IFAC World Congress 2017. IFAC, 2017
- [HBA+17b] Henning, S.; Biemelt, P.; Abdelgawad, K.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Modellbasierte Untersuchung der Zuverlässigkeit algorithmisch bestimmter kritischer Stellen in Straßennetzwerken, In: VDI/VDE (AUTOREG 2017). VDI-Verlag, Düsseldorf, Berlin, Deutschland, 2017.
- [HBR+18] Henning, S.; Biemelt, P.; Rüdtenklau, N.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: A Simulation Framework for Testing a Conceptual Hierarchical Autonomous Traffic Management System including an Intelligent External Traffic Simulation. In: Proceedings of the DSC 2018 Europe VR. Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition, 2018
- [MBT+19] Mertin, S.; Buse, D.; Trächtler, A.; Gausemeier, S.; Dressler, F.: Proof-of-Concept einer komplexen Co-Simulationsumgebung für einen Fahrsimulator zur Untersuchung von Car2X-Kommunikations-Szenarien. In: VDI/VDE AUTOREG 2019. Verein Deutscher Ingenieure. Mannheim, Deutschland: VDI Verlag Düsseldorf (9. VDI/VDE-Fachtagung AUTOREG), S. 159–170, 2019
- [MMG+20] Mertin, S.; Link, C.; Malena, K.; Gausemeier, S.; Trächtler, A. (2020): Macroscopic Traffic Flow Control using Consensus Algorithms. In: The 23rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Rhodos, Griechenland, 2020
- [AHB+16] Abdelgawad, K.; Henning, S.; Biemelt, P.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Advanced Traffic Simulation Framework for Networked Driving Simulators. In IFAC-PapersOnLine, 2016, 49; S. 101–108
- [AHB+17] Abdelgawad, K.; Henning, S.; Biemelt, P.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Networked Driving Simulation for Future Autonomous and Cooperative Vehicle Systems: 8. VDI/VDE Fachtagung „AUTOREG 2017 - Automatisiertes Fahren und vernetzte Mobilität“, 2017
- [RBH+18] Rüdtenklau, N.; Biemelt, P.; Henning, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Shader-Based Realtime Simulation of High-Definition Automotive Headlamps. In: SIMUL 2018. The Tenth International Conference on Advances in System Simulation, Nizza, Frankreich, 2018
- [BHR+18] Biemelt, P.; Henning, S.; Rüdtenklau, N.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: A Model Predictive Motion Cueing Strategy for a 5-Degree-of-Freedom Driving Simulator with Hybrid Kinematics. In: Proceedings of the DSC 2018 Europe VR. Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition, S. 79–85, 2018

- [RBH+18] Rüdtenklau, N.; Biemelt, P.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Real-time Lighting of High-Definition Headlamps for Night Driving Simulation, In: IARIA SysMea, Auflage 12 , S. 72-88. IARIA, 2019
- [RBH+19b] Rüdtenklau, N.; Biemelt, P.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Simulation-Based Lighting Function Development of High-Defintion Headlamps, In: 13th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Ausgabe 18 , S. 677-686. Utzverlag GmbH, 2019
- [RBM+19] Rüdtenklau, N.; Biemelt, P.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Hardware-in-the-Loop Simulation of High-Definition Headlamp Systems, In: VDI/VDE AUTOREG 2019, 9. VDI/VDE-Fachtagung AUTOREG VDI- Verlag, Düsseldorf, 2019
- [BMR+19] Biemelt, P.; Rüdtenklau, N.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Objective Evaluation of a Novel Filter-Based Motion Cueing Algorithm in Comparison to Optimization-Based Control in Interactive Driving Simulation, In: International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL) IARIA, 2019
- [RBM+20] Rüdtenklau, N.; Biemelt, P.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Lighting Function Generation for Pixel Headlamp Systems by Night Driving Simulation, In: Proceedings of the DSC 2020 Europe VR. Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition, 2020
- [BMR+20] Biemelt, P.; Rüdtenklau, N.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Design and Evaluation of a Novel Filter-Based Motion Cueing Strategy for a Hybrid Kinematics Driving Simulator with 5-Degrees-of-Freedom, In: Proceedings of the DSC 2020 Europe VR. Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition, 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation der Arbeit	2
1.2	Zielsetzung.....	4
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1	Autonomes Fahren und Inter-Vehicle-Communication.....	7
2.2	Verkehrsmanagement der Gegenwart	13
2.3	Ansätze für intelligente Verkehrsmanagementsysteme	19
3	Grundlagen der Verkehrsmodellierung	30
3.1	Klassen von Verkehrsmodellen.....	35
3.2	Makroskopische Verkehrsflussmodelle	40
3.2.1	Besondere Modellelemente.....	59
3.2.2	Lösung von makroskopischen Modellen	67
3.2.3	Stabilität von makroskopischen Verkehrsflussmodellen	73
3.2.4	Makroskopische Fundamentaldiagramme.....	83
4	Hierarchisches autonomes Verkehrsmanagement	85
4.1	Idee und Gesamtstruktur.....	85
4.2	Ebene 1: Mikroskopisches Management	88
4.2.1	Beispiel eines autonomen Kreuzungsmanagements.....	89
4.3	Ebene 2: Makroskopisches Bilanzraummanagement	103
4.3.1	Funktion des Bilanzraummanagements	103
4.3.2	Grundlagen Konsensalgorithmen	105
4.3.3	Verkehrsdichteregulierung mittels Durchschnitts- Konsensalgorithmus.....	111
4.3.4	Strategie des lokalen Inner-Bilanzraumroutings	119
4.3.5	Bestimmung der Bilanzraumgröße	125
4.4	Ebene 3: Globales makroskopisches Management	141
4.4.1	Funktion und Idee.....	141
4.4.2	Globale Routing-Strategie	142
4.5	Zusammenfassende Übersicht.....	146

5	Modellbildung und Simulation	149
5.1	Untersuchung des Konsensalgorithmus anhand des PW-Modells.....	149
5.1.1	Modellbildung eines exemplarischen Straßennetzes	149
5.1.2	Simulation und Lösung unter Berücksichtigung von Randbedingungen	156
5.1.3	Ergebnisse und Bedeutung im Kontext	158
5.2	Simulation des Gesamtsystems mit mikroskopisch simuliertem Verkehr	162
5.2.1	Simulationsframework	162
5.2.2	Betrachtete Straßennetze und Vergleichsszenarien	168
5.2.3	Untersuchung der Simulationsergebnisse	176
5.2.4	Mögliche Modellerweiterungen.....	202
6	Zusammenfassung und Ausblick	205
7	Notation	207
8	Abkürzungsverzeichnis	211
9	Literaturverzeichnis.....	213

Anhang

A	Anhang	224
A.1	Simulationsframework.....	224
A.1.1	Klassendiagramme.....	224
A.1.2	Kopplung mit 3D-Visualisierung und Echtzeitsystemen	228
A.1.3	Bilanzraumeinteilungen der Simulationskonfigurationen	228

1 Einleitung

„Kölner stehen 110 Stunden im Jahr im Stau“¹, „Gesamtlänge aller Staus reicht 35,5-mal um die Erde“², „Pendler in Hannover [verbrachten] 2019 durchschnittlich rund 89 Stunden im Stau“³: Meldungen in der Presse über den Individualverkehr wie diese, aber auch die Mobilitätsdiskussion im Allgemeinen sind aktueller denn je. Die Anzahl der in Deutschland vorkommenden Staus auf Bundesautobahnen hat sich in den letzten Jahren beispielsweise von 185.000 (2010) auf 745.000 (2018) vervielfacht. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass der Großteil der deutschen Bevölkerung mit dem PKW reist (82,3% in 2017), statt alternative Beförderungsmittel zu nutzen (z.B. Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr: 14% oder Eisenbahn: 4% in 2017) und sowohl die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge als auch die Personenkilometer des motorisierten Individualverkehrs (MIV) immer weiter zunehmen, wie dies auch in Abbildung 1-1 zu erkennen ist [Bun18]. Dies zeigt sich in ähnlicher Weise auch in den steigenden Staukilometern in Deutschland. Es ist offensichtlich, dass der „Druck“ auf die existente Verkehrsinfrastruktur stetig steigt und ebenso deutet die Zunahme von Staus darauf hin, dass die Straßenkapazitäten teilweise ausgeschöpft sind.

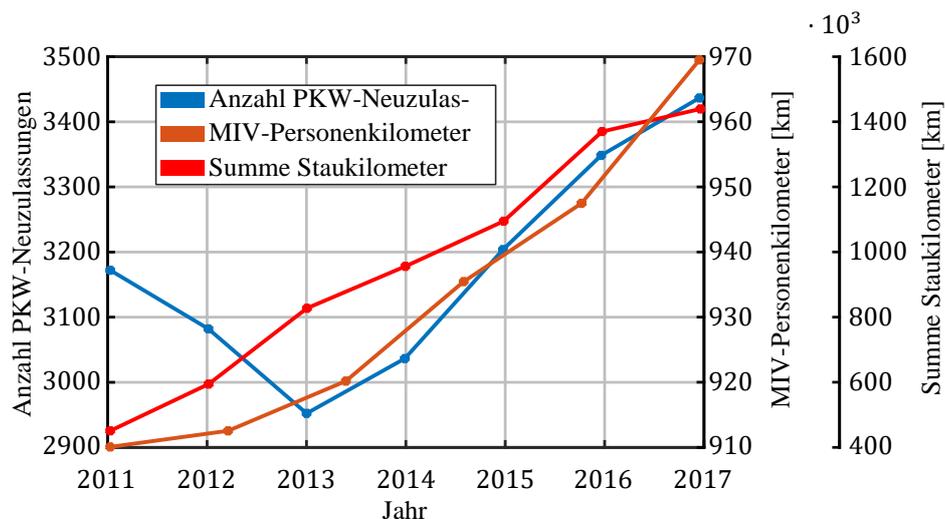


Abbildung 1-1: Anzahl der PKW-Neuzulassungen, der MIV-Personenkilometer sowie der Staukilometer von 2011 bis 2017 nach [Bun18] und dem ADAC²

¹ <https://www.ksta.de/koeln/donnerstags-ist-es-am-schlimmsten-koelner-stehen-110-stunden-im-jahr-im-stau-33824332>, Stand 22.04.2020

² <https://www.adac.de/verkehr/verkehrsinformationen/staubilanz>, Stand 22.04.2020

³ https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/hannover_weser-leinegebiet/89-Stunden-im-Stau-Verkehrswende-nicht-in-Sicht,stauindex100.html, Stand 22.04.2020

Die negativen Folgen des daraus resultierenden steigenden Verkehrsaufkommens verschärfen sich zunehmend, so nehmen beispielsweise die CO₂-Emissionen für den Individualverkehr seit 2008 nach fallender Tendenz wieder stetig zu, während andere Sektoren wie etwa Industrieprozesse einen sinkenden CO₂-Austoß verzeichnen [Bun18]. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass andersartige Emission auch im Straßenverkehr durchaus abnehmende Tendenzen aufweisen, so reduzierten sich z.B. die Emissionen für Staub, NO_x, SO₂, CO, CH₄ und NH₃.

Auf Grund der Gesetzgebung wurden in den vergangenen Jahren immer einschneidendere Beschränkungen für den Individualverkehr erwogen und umgesetzt, um die gesetzlich vorgeschriebenen Ziele der verkehrsbezogenen Emissionsreduktion zu erreichen. Seit 2018 wurden in mehreren deutschen Städten Diesel-Fahrverbotszonen eingerichtet, damit diese Vorgaben eingehalten werden können. Neben der verkehrsbedingten Emissionsdiskussion und der dadurch resultierenden Ziele und gesetzlichen Vorgaben sind zudem allgemein die Ziele der Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit sowie der Steigerung der Lebensqualität der Bevölkerung weiter in den Fokus gerückt.

Auch wenn die Wachstumsrate der zugelassenen Fahrzeuge in den letzten Jahren abgenommen hat, erschweren diese gegensätzlichen Entwicklungen zunehmend, das Ziel der sinkenden verkehrsbedingten Emissionen zu erreichen. Grundsätzlich können drei Faktoren benannt werden, die als „Hebel“ den größten Einfluss zur Erreichung beitragen: Verpflichtende Vorgaben durch die Politik und Gesetzgebung, die Motivation der Bevölkerung zu alternativen und umweltfreundlicheren Beförderungsmitteln und das Verbesserungspotential durch technologische Entwicklungen. Während die ersten beiden Faktoren die wesentliche Rolle spielen und bereits Wirkung gezeigt haben (z.B. durch gesetzliche Fahrverbote), liegen diese außerhalb des Fokus dieser Arbeit. Der letzte Faktor der technologischen Entwicklungen kann als weitere potentielle Möglichkeit gesehen werden, die zuvor beschriebene Problematik zu entspannen.

Die technologischen Entwicklungen in der Automobilbranche haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass Verbrennungsantriebe effizienter und emissionsärmer geworden sind. Außerdem etablieren sich zunehmend alternative Antriebstechnologien auf dem Markt, wie etwa der Elektroantrieb, durch den eine noch emissionsärmere Beförderung möglich ist. Neben den Entwicklungen der alternativen Antriebstechnologien ist das Thema des automatisierten/autonomen Fahrens in den letzten Jahren ebenfalls bedeutender geworden, denn hierdurch werden neuartige (Fahr-)Funktionen möglich, die ebenso dazu beitragen können, die zuvor erwähnten aktuellen Problempunkte zu lösen.

1.1 Motivation der Arbeit

Wie sich im Kapitel 2.1 zum Stand der Technik zeigen wird, befindet sich der Straßenverkehr vor der Schwelle zum automatisierten Fahren und damit vor der größten Wende seit dem Einzug des Automobils. Viele Studien, die sich mit einem autonomen Verkehr

beschäftigt haben, kommen zu dem Schluss, dass ein großes und vielseitiges Verbesserungspotential durch die neuen Technologien gegenüber dem heutigen Zustand vorliegt. Diese Vorteile beziehen sich u.a. auf die verbesserte Verkehrssicherheit, eine höhere Effizienz der Beförderung und der damit einhergehenden geringeren Umweltbelastung durch Emissionen sowie einen erhöhten Fahrkomfort, da sich Fahrgäste mit anderen Dingen beschäftigen können. Die Ursachen für diese Potentiale liegen z.B. darin, dass autonome Fahrzeuge auch komplexe Informationen zur Verkehrssituation deutlich schneller erfassen und interpretieren können als der Mensch und damit das Unfallrisiko reduziert wird. Zusätzlich wiegt der Einfluss menschlichen Verhaltens durch den Einsatz autonomer Fahrzeuge weniger schwer, da zum Beispiel die negativen Auswirkungen typischer eigennütziger Verhaltensweisen menschlicher Fahrer reduziert werden können. Etablieren sich autonome Fahrzeuge in der Zukunft, so besteht die Chance, dass sich die Mobilität zu einem Dienstleistungsmarkt wandelt, in dem Fahrgäste von autonomen Taxis abgeholt und zum gewünschten Ziel befördert werden. Die Notwendigkeit zum Besitz eines eigenen Fahrzeugs wird somit zukünftig sinken und die Fahrzeuge können demnach effizienter eingesetzt werden und weisen weniger unnötige Standzeit auf (Stichwort Car-Sharing). Der eingangs erwähnte Trend der steigenden Fahrzeuganzahl in Deutschland könnte sich also in Zukunft ändern und ein Rückgang einsetzen.

All diese allgemein bekannten Vorteile beziehen sich jedoch vornehmlich auf die heutige Technik zur Umsetzung des autonomen Fahrens. Die bereits heute autonom fahrenden Versuchsfahrzeuge und damit aller Wahrscheinlichkeit nach auch die ersten Generationen der frei verkäuflichen autonomen Fahrzeuge teilen die Eigenschaft, dass diese, in einfacher Weise gesagt, die Aufgaben des menschlichen Fahrers übernehmen und mit den zuvor genannten Vorteilen „nachahmen“. Daher kann ein autonomes Fahrzeug zunächst als eine Einheit verstanden werden, die Vorteile gegenüber einem menschlichen Fahrer aufweist, jedoch dennoch nur isoliert für sich selbst agiert (z.B. sicheres und möglichst schnelles Erreichen eines definierten Ziels). Im Kontext fortschrittlicher Kommunikationstechnologien (z.B. 5G/6G), sind in Kombination mit einer steigenden Anzahl an autonomen Fahrzeugen weitere Verbesserungspotentiale möglich, die in aktuellen Szenarien weitestgehend ungenutzt bleiben. Können autonome Fahrzeuge also miteinander kommunizieren und Informationen austauschen, so sind Szenarien denkbar, in denen weitere übergeordnete Ziele durch kooperative Verhaltensweisen der Fahrzeuge erreicht werden können. Zu diesen „kollektiven“ Zielen zählen zum Beispiel die Vermeidung von Stauungen oder eine Verbesserung der mittleren Reisezeit. Es ist offensichtlich, dass das Erreichen dieser Ziele nicht lediglich einen Vorteil für ein einzelnes Fahrzeug, sondern für eine Vielzahl von Fahrzeugen mit sich bringt. Mögliche Nachteile hiervon sind, dass die Fahrzeuge individuelle Ziele nicht immer werden erreichen können, da diese im Gegensatz zu den kollektiven Zielen stehen. So ist beispielhaft denkbar, dass einzelne Fahrzeuge längere Umwege fahren müssen, um die Vermeidung eines Staus zu unterstützen. Hierdurch erleiden die autonomen Fahrzeuge ggf. einen individuellen Nachteil, der als „Preis“ der kollektiven Ziele verstanden werden kann. Immerhin besteht für die Fahrzeuge somit eine geringere Gefahr, in einem Stau zu stehen.

„Alles bewegt sich fort und nichts bleibt.“

Das im Vorwort genannte und auf Platon bzw. Heraklits zurückgehende Zitat ist Grundlage für die Motivation dieser Arbeit. Basierend auf der Erwartungshaltung, dass sich die autonomen Fahrzeuge in Zukunft durchsetzen werden und den Großteil der im Straßenverkehr befindlichen Fahrzeuge ausmachen, stellt sich hierbei die naheliegende Frage, ob sich die Vorteile eines überwiegend autonomen Straßenverkehrs durch die Integration von Kommunikation sowie eines übergeordneten intelligenten „Verkehrsmanagements“ steigern lassen. Eine stetige Erhaltung des Verkehrsflusses bzw. Reduktion oder gar Verhinderung von Störungen im Verkehrsfluss durch entsprechende intelligente Strategien bieten dieselben Vorteile, wie sie zuvor für das automatisierte Fahren genannt wurden, jedoch in gesteigerter Weise. Aus einem anderen Blickwinkel ist die Idee eines übergeordneten intelligenten Verkehrsmanagements auch als logische (und evolutionäre) Weiterentwicklung zu autonomen Fahrzeugen zu sehen.

Diese Arbeit nimmt sich daher der Untersuchung dieser Fragestellung an und versucht, das zu erwartende Verbesserungspotential herauszustellen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist auf Grundlage der genannten Motivation die Entwicklung und Untersuchung einer makroskopischen Verkehrsmanagementstrategie sowie deren Umsetzung durch autonome Fahrzeuge auf mikroskopischer Ebene. Hierbei sind Wechselwirkungen zu erwarten, die es in dieser Arbeit zu untersuchen gilt. Da das Szenario des überwiegend autonomen Straßenverkehrs noch nicht der heutigen Realität entspricht, ist eine Untersuchung ausschließlich durch Simulation möglich. Wie sich im Weiteren zeigen wird, existieren durchaus bereits Untersuchungen zu Verkehrsmanagementstrategien der Zukunft sowie deren Verbesserungspotentiale, jedoch beschränken sich diese i.d.R. auf eine bestimmte Abstraktionsebene, d.h. der Verkehr wird entweder mikroskopisch oder makroskopisch betrachtet. Eine kombinierte Betrachtung, die beide Domänen umfasst und das zuvor erläuterte Zukunftsszenario der autonomen Fahrzeuge betrachtet, existiert bisher nicht. Diese Arbeit soll daher als initialer Beitrag zur Schließung dieser Lücke dienen und ggf. Raum für interessante zukünftige Fragestellungen schaffen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt strukturiert:

In Kapitel 2 wird der Stand der Wissenschaft und Technik erläutert. Hierzu wird in Kapitel 2.1 zunächst auf das autonome Fahren sowie die sog. Inter-Vehicle-Communication eingegangen, denn diese Technologien sind zwingende Voraussetzungen für alle in dieser Arbeit entwickelten Ideen und daher wichtig für das Verständnis. Anschließend wird in den Kapiteln 2.2 und 2.3 ein Überblick über heutzutage eingesetzten und auf menschliche

Fahrer ausgelegten Verkehrsmanagementsystemen sowie zu Ansätzen intelligenter Verkehrsmanagementsysteme der Zukunft gegeben. Insbesondere letztere sind hierbei im Fokus der Wissenschaft, denn hier werden neuartige Konzepte thematisiert, die teilweise Überschneidungen zu dem in dieser Arbeit entwickelten Ansatz aufweisen.

Kapitel 3 umfasst die wesentlichen Grundlagen zur Verkehrsmodellierung. Diese sind im Kontext dieser Arbeit unverzichtbar für das Verständnis, da verschiedene Modellansätze, verkehrstechnische Eigenschaften sowie Begrifflichkeiten im weiteren Verlauf aufgegriffen werden. Beginnend bei der Erläuterung verschiedener Verkehrsmodellklassen (Kapitel 3.1) werden anschließend in Kapitel 3.2 detailliertere Grundlagen zur Klasse der makroskopischen Verkehrsflussmodelle sowie deren Erweiterung um besondere Modellelemente, Lösungsmöglichkeiten und Stabilitätsuntersuchungen selbiger vorgestellt (Kapitel 3.2.1 bis 3.2.4).

Nach dem der Stand der Wissenschaft und Technik sowie die Grundlagen zur Verkehrsmodellierung geklärt wurden, folgt im Anschluss in Kapitel 4 der Kern dieser Arbeit: Die Entwicklung des hierarchischen autonomen Verkehrsmanagements. Beginnend mit der Erläuterung der Idee und Grundstruktur (4.1) werden die drei in dieser Arbeit entwickelten Hierarchieebenen detailliert vorgestellt. Hierbei bildet die unterste Schicht das mikroskopische Management (4.2), welches exemplarisch anhand eines autonomen Kreuzungsmanagements erläutert wird. Anschließend folgen die Erläuterungen zum makroskopischen Bilanzraummanagement in Kapitel 4.3.1; hier werden zunächst die grundlegenden Funktionen der Ebene erläutert. Nach einer kurzen Übersicht zu Grundlagen sog. Konsensalgorithmen in Kapitel 4.3.2 folgen die Beschreibungen zur Entwicklung der Verkehrsdichteregulierung mittels Durchschnitts-Konsensalgorithmen sowie zum Inner-Bilanzraumrouting (4.3.3 und 4.3.4). Für das Inner-Bilanzraumrouting ist die Definition von Bilanzräumen erforderlich, daher wird in Kapitel 4.3.5 ein Ansatz präsentiert, wie Bilanzräume definiert werden können. Abgeschlossen wird Kapitel 4 durch die Erläuterungen der Funktionen zur dritten Hierarchieebene, dem globalen makroskopischen Managements in Kapitel 4.4.

Die in Kapitel 4 vorgestellten Konzepte werden in Kapitel 5 implementiert und simulativ untersucht. Zunächst erfolgt eine Voruntersuchung in 5.1 mittels eines makroskopischen Verkehrsflussmodells, um die generelle Funktionsfähigkeit der in Kapitel 4.3 gezeigten Ansätze zu prüfen. Darauf aufbauend wird das Gesamtsystem in 5.2 mittels Simulationen untersucht. Hierfür wird zunächst das in dieser Arbeit entwickelte komplexe Simulationsframework vorgestellt (5.2.1) und anschließend in 5.2.2 die betrachteten Straßennetze und Vergleichsszenarien erläutert. In Kapitel 5.2.3 werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und interpretiert. Das Kapitel schließt mit Ideen für mögliche Modellerweiterungen ab, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt wurden.

Kapitel 6 fasst die vorliegende Arbeit zusammen und gibt einen abschließenden Ausblick für künftige Forschungsfragen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel werden zur besseren Einordnung der Thematik einige Grundlagen zum Stand der Wissenschaft und der Technik gegeben. Hierzu werden zunächst die geschichtliche Entwicklung des autonomen Fahrens sowie die dafür zugrundeliegenden Technologien erläutert, gefolgt von Informationen zur Kommunikation zwischen Fahrzeugen, der sog. *Inter-Vehicle-Communication* (IVC), die für zukünftige kooperative Fahrmanöver erforderlich ist. Anschließend finden sich Grundlagen zu heutigen Verkehrsleitsystemen für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und darüber hinaus Ansätze für intelligente Verkehrsleitsysteme der Zukunft.

2.1 Autonomes Fahren und Inter-Vehicle-Communication

Autonomes Fahren / Selbstfahrende Fahrzeuge

Durch die rasch fortschreitenden technologischen Entwicklungen im 20. Jahrhundert ist es kaum verwunderlich, dass die Vision selbstfahrender Fahrzeuge schon sehr früh ihre Anfänge fand. Im Jahr 1925 stellte der Elektrotechnik-Ingenieur Francis P. Houdina ein selbstentwickeltes System bestehend aus zwei Fahrzeugen vor, die drahtlos miteinander verbunden waren. Die Vorgaben des Fahrers im Führungsfahrzeug wurden per Funkübertragung an das Folgefahrzeug übermittelt, welches diese Vorgaben mittels Elektromotoren ebenfalls umsetzte. Dadurch gelang es Houdina, das zweite Fahrzeug dem Führungsfahrzeug ohne menschliches Zutun selbständig folgen zu lassen und leitete damit die „Anfänge“ des autonomen Fahrens ein [Tim25].

Bereits 1956 wurde Werbung in verschiedenen amerikanischen Zeitschriften veröffentlicht, die Darstellungen (vgl. Abbildung 2-1 oben links) davon zeigten, wie die Zukunft des Automobils aussehen könnte [Cen56]. Ähnlich zu heutigen Vorstellungen sollte das Automobil der Zukunft die Reise wie eine Dienstleistung erbringen, sodass sich die Fahrgäste mit anderen Dingen beschäftigen können und ihre Aufmerksamkeit nicht dem Straßenverkehr widmen müssen. Im Jahr 1977 stellte das Tsukuba Mechanical Engineering Lab ein modifiziertes Fahrzeug vor (Abbildung 2-1 oben Mitte), das in der Lage war, mit zwei Kameras einer weißen Markierung auf dem Straßenbelag selbständig zu folgen. Hierbei konnte die Funktion bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 33 km/h erfüllt werden [TYH+79]. In Abbildung 2-1 oben rechts ist das Fahrzeug VaMoRs⁴ zu sehen, das 1987 völlig autonom mit bis zu 96 km/h fahren konnte und im Rahmen des Prometheus⁵-Projekts entwickelt wurde. Zur Umsetzung wurden schwenkbare Kameras eingesetzt, die

⁴ Versuchsfahrzeug für autonome **M**obilität und **R**echnersehen

⁵ **PRO**gramme for a European Traffic of **H**ighest **E**fficiency and **U**nprecedented **S**afety, Laufzeit: 1986 – 1994

durch eine Aufmerksamkeitssteuerung vom System bewegt wurden, um die Umgebung zu erfassen [Dic07].



Abbildung 2-1: 1956: Werbung im Newsweek Magazine [Cen56],
 1977: Spurfolgendes Fahrzeug [TYH+79],
 1992: Autonomer Van [Dic07],
 2004: Fahrzeug Sandstorm bei der DARPA Grand Challenge [Car05],
 2017: Autonomes Fahrzeug der Firma Waymo [Way17]

Ab der Jahrtausendwende existierten bereits viele parallele Entwicklungen im Bereich des autonomen Fahrens, wie auch die Autoren in [ZGG+16] herausstellen. Eine Besonderheit war an dieser Stelle jedoch die DARPA⁶ Grand Challenge, ein vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium gesponserter Wettbewerb für unbemannte Landfahrzeuge, der zwischen 2004 und 2007 stattfand. Ziel des Wettbewerbs war die erfolgreiche und autonome Absolvierung einer 241 km langen Strecke durch die Mojave-Wüste. Während 2004 das Team der Carnegie Mellon University (Abbildung 2-1 unten rechts) mit lediglich 12 km am weitesten kam und keines der Teams das Ziel erreichen konnte, wurde das Ziel schon in den direkten Folgejahren von gleich mehreren Teams erreicht. In Abbildung 2-1 unten links sieht man das aktuelle Fahrzeug des US-amerikanischen Unternehmens Waymo. Waymo ist eine Tochtergesellschaft von Alphabet (Google) und führt die Arbeiten des Projekts Google Driverless Car fort, das 2009 gestartet wurde. Der dargestellte und umgerüstete Chrysler Pacifica von Waymo sensiert seine Umwelt mithilfe von Radar- und LiDAR-Sensoren sowie mittels Kameras. Durch eine ausgereifte Software und einer Flotte bestehend aus ca. 20.000 Fahrzeugen ist es Waymo bis zum Jahr 2019 möglich gewesen, über 10 Millionen autonom gefahrener Meilen (ca. 25.000 tägliche Fahrten) erfolgreich zurückzulegen [Way18]. Verschiedene Hersteller und Institutionen, die zum autonomen Fahren forschen und dies auf realen Straßen in Kalifornien (USA) praktisch erproben, werden vom Department of Motor Vehicles des Staats anhand

⁶ Defense Advance Research Projects Agency (DARPA)

der notwendigen Eingriffe durch die Testfahrer pro gefahrener Strecke gemessen. Waymo wies 2018 beispielsweise ein Verhältnis von 17.847 Kilometer pro notwendigem Eingriff auf und führt damit das Feld deutlich an. Auf den nachfolgenden Plätzen finden sich GM Cruise mit 8328 km/Eingriff und Zoox mit 3200 km/Eingriff [Sta18]. In seltenen Fällen lässt sich jedoch auch trotz Testfahrer ein Unfall nicht vermeiden. In [TK17] wird ein Vergleich zwischen menschlichen Fahrern und autonomen Fahrzeugen bezüglich der Sicherheit vorgestellt. Die Autoren bezogen sich ebenfalls auf die Statistik der autonomen Fahrzeugflotte des Unternehmens Waymo für den Zeitraum von 2009 bis 2015 und zeigten auf, dass diese autonomen Fahrzeuge eine 2,7-fach geringere polizeilich ermittelte Crash-Rate (Anzahl Unfälle pro gefahrener Strecke) aufweisen als dies menschliche Fahrer tun. Zudem existiert bei allen gemeldeten Unfällen nur ein einziger Fall, bei dem der Unfall durch ein autonomes Fahrzeug verursacht wurde. Für alle anderen Unfällen waren menschliche Fehler die Ursache. Nicht nur in den USA wird intensiv an der Thematik des autonomen Fahrens geforscht, auch in Europa und im Speziellen in Deutschland arbeiten die Fahrzeughersteller in diesem Bereich. Im Jahr 2013 demonstrierte beispielweise Daimler zum 125-jährigen Jubiläum des ersten verkauften Fahrzeugtyps, dem Benz Patent-Motorwagen Nr. 3, eine historisch inspirierte autonome Fahrt mit einem Mercedes Benz S-Class S 500. Dieses umgebaute Fahrzeug war in der Lage, dieselbe 103 km lange Strecke von Mannheim nach Pforzheim, welche Bertha Benz 1888 als erste automobiler Fernfahrt zurücklegte, völlig autonom zu bestreiten [ZBS+14].

Damit ein Fahrzeug überhaupt in der Lage ist, sich sicher und autonom im Straßenverkehr bewegen zu können, ist eine umfangreiche Sensorik unabdingbar.

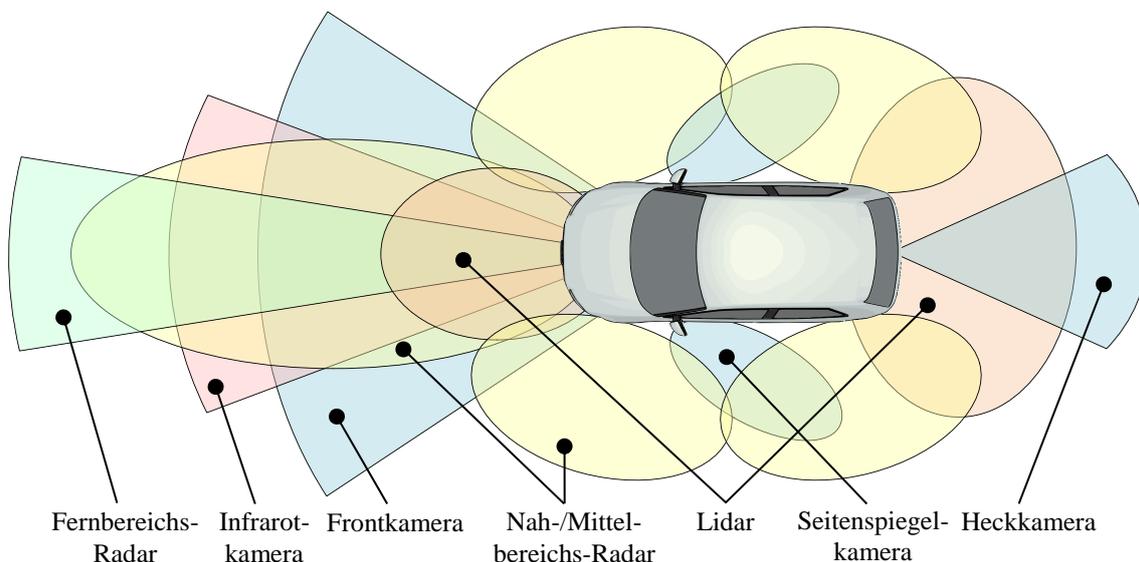


Abbildung 2-2: *Beispielhafte Sensorik und Wahrnehmungsbereiche eines autonomen Fahrzeugs*

Abbildung 2-2 zeigt eine beispielhafte Sensorik, wie sie in autonomen Fahrzeugen vorkommen kann. Für den Nahbereich um das Fahrzeug finden sehr oft Radar⁷-Sensoren Verwendung, die Radiowellen mit 24 GHz bzw. 77 GHz ausstrahlen. Je nach Einsatzzweck ist es möglich, ein Radar-System für Fernbereiche als auch für Nah- oder Mittelbereiche um das Fahrzeug herum einzusetzen. Ebenfalls werden häufig Lidar⁸-Sensoren verwendet, die in ähnlicher Weise funktionieren, jedoch statt Radiowellen einen beweglichen Laserstrahl aussenden und durch die Lichtlaufzeiten der Reflektionen die Entfernung zu umliegenden Hindernissen erfassen. Durch ein gerastertes Abfahren mit dem Laser können so hochaufgelöste 3D-Punktwolken der Umgebung erzeugt und ausgewertet werden. Anders als in Abbildung 2-2 dargestellt, werden Lidar-Sensoren teilweise auch auf dem Fahrzeugdach montiert und können ein 360°-Rundumbild der Umgebung aufnehmen. Beide Systeme können ideal in Kombination eingesetzt werden und kompensieren zum Teil die Schwächen des jeweils anderen Systems (z.B. ist Lidar anfällig gegenüber Witterungsbedingungen während dies bei Radar ein geringes Problem ist). Ferner werden verschiedene Arten von Kameras eingesetzt. Während normale Kameras ein reines 2D-Pixelbild aus einer Perspektive liefern, können 3D-Kameras zusätzlich hilfreiche Tiefeninformationen und Infrarotkameras kontrastreiche Bilder in schwierigen Wetterbedingungen und Dunkelheit liefern. Die Wahl der Kameraart beeinflusst folglich stark die Qualität einer nachgelagerten Bilderkennung.

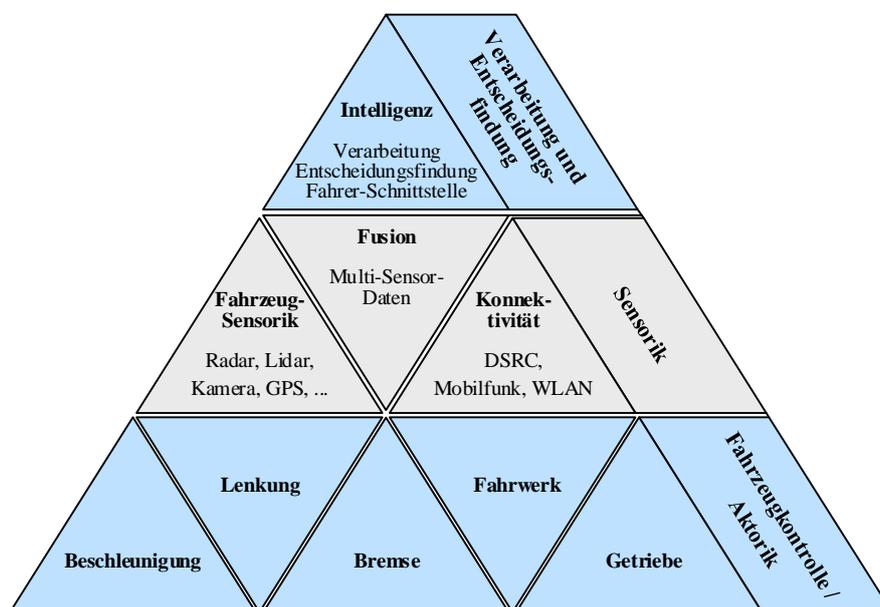


Abbildung 2-3: Wichtige Bausteine zur Realisierung autonomer Fahrzeuge nach [WH17]

⁷ Radio detection and ranging

⁸ Light detection and ranging

Durch eine ausgeklügelte Fusion aller Sensordaten ist es einem autonomen Fahrzeug möglich, andere Objekte in der Umgebung zu lokalisieren und geeignet auf sie zu reagieren. Zusätzlich können die Daten auch genutzt werden, um eine Lokalisation des eigenen Fahrzeugs in der Umgebung zu realisieren und so durch sog. SLAM⁹-Algorithmen Karten der Umgebung zu generieren, die zukünftig weiterverwendet werden können.

Die Sensorik und Fusion der Sensordaten stellen also einen essentiellen Bestandteil autonomer Fahrzeuge dar, jedoch ist in Abbildung 2-3 erkennbar, dass diese Funktionen (in der Mitte) nur einen Teil der erforderlichen Aufgaben erfüllen, die zur Realisierung autonomer Fahrzeuge wichtig sind. Die Sensordaten bilden die Grundlage, auf der eine darüber liegende intelligente Verarbeitung Entscheidungen treffen muss, die in letzter Konsequenz das Verhalten des Fahrzeugs bestimmen. Die Funktionen zur Beeinflussung des Fahrzeugverhaltens finden sich demnach in der untersten Schicht wieder, in der sowohl das Beschleunigungs- und Bremsverhalten als auch die Lenkung übernommen wird.

Der Grad der Autonomie selbstfahrender Fahrzeuge lässt sich in fünf Klassen einsortieren, die charakterisieren, wieviel Aufmerksamkeit und Kontrolle durch den menschlichen Fahrer während der Fahrt erbracht werden muss. Die Einordnung beruht darauf, dass die Wandlung vom manuellen zum automatisierten Fahren stückweise verläuft und sich auf die immer fortschrittlicheren Fahrerassistenzsysteme stützt.

Tabelle 1: Klassen des automatisierten Fahrens nach [VDA15]

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Nur Fahrer	Assistiert	Teil-automatisiert	Hoch-automatisiert	Voll-automatisiert	Fahrerlos
Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querführung aus	Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus	Fahrer muss das System dauerhaft überwachen	Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen	Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall	Von Start bis Ziel ist kein Fahrer erforderlich

Wie in [WH17] beschrieben, lässt sich beispielsweise eine Einparkhilfe in die Klasse Null einsortieren, da der Fahrer nur Informationen erhält, jedoch stets die Kontrolle über das Fahrzeug behält. Das Assistenzsystem ACC¹⁰ ist in der ersten Klasse einzuordnen, da die Längsführung (Gas- und Bremsvorgabe) übernommen wird, die Querführung (Lenkung) wird jedoch weiterhin durch den Fahrer vorgenommen. Ein AutobahnpiLOT kann je nach

⁹ Simultaneous Localization and Mapping

¹⁰ Active Cruise Control

Auffassung und gesetzlicher Vorgabe in Klasse drei oder vier einsortiert werden. Dieses Assistenzsystem übernimmt die komplette Längs- und Querführung des Fahrzeugs im Anwendungsfall „Autobahnfahrt“, sodass der Fahrer nichts weiter steuern muss und seine Aufmerksamkeit anderen Dingen widmen kann (sofern durch die Gesetzgebung erlaubt).

Inter-Vehicular Communication / Car2X-Kommunikation

Wird der Betrachtungshorizont nicht auf ein einzelnes (autonomes) Fahrzeug begrenzt, sind weitere Funktionen und Verbesserungspotentiale erkennbar. Durch die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und dem stetigen Austausch relevanter Informationen können sie Kenntnisse über die Umwelt über die Grenzen der eigenen Sensorik hinaus erlangen. Die Inter-Vehicular Communication (kurz: IVC) und Car2X-Kommunikation umfassen die Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur und die dafür notwendigen Technologien.

In Abbildung 2-4 ist ein einfaches Beispielszenario einer Car2X-Kommunikation zu erkennen. Einzelne Fahrzeuge können beispielsweise über kurze Strecken kleine, dynamisch anpassbare Adhoc-Netzwerke (sog. VANETs¹¹) zur Kommunikation erstellen (gelbe Flächen in Abbildung 2-4). Solche Netzwerke werden mithilfe von standardisierter DSRC¹²-Kommunikation realisiert, in Europa ist dies beispielsweise der vom European Telecommunication Standard Institute (ETSI) eingeführte ITS-G5-Standard, der auf der IEEE 802.11p-Norm im 5,9 GHz-Frequenzband aufsetzt. Ebenso können Infrastrukturelemente wie Road-Side-Units (RSU) in diese Netzwerke eingegliedert werden, welche die Reichweite von lokalen VANETs erweitern, indem Informationen z.B. über Mobilfunk an andere Netze weitergeleitet werden [SD15].

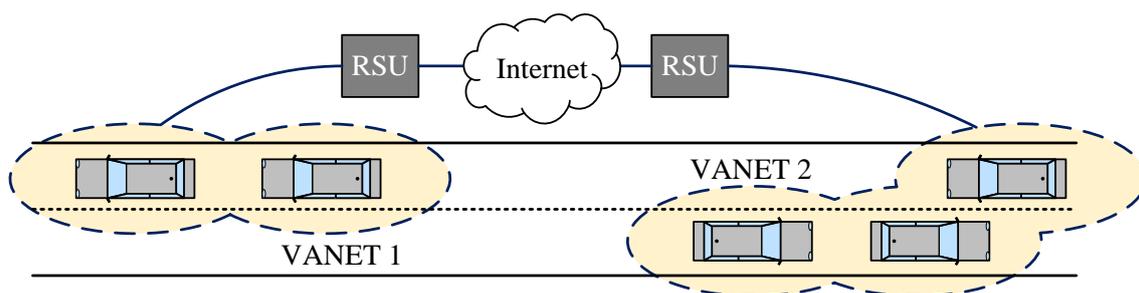


Abbildung 2-4: Beispiel für ein Car2X-Kommunikationsszenario

¹¹ Vehicular Ad-hoc Networks

¹² Dedicated Short Range Communication

Der Nutzen solcher Netze erschließt sich recht schnell: Wichtige Informationen wie beispielsweise ein sich ereigneter Unfall, die Sperrung einer Straße oder ein erhöhtes Verkehrsaufkommen auf der Strecke können so einfach und schnell an viele Fahrzeuge verteilt werden, bevor diese die problematischen Stellen erreichen und die Verkehrssituation womöglich verschärfen. Der Fahrer ist schon zeitnah in der Lage, geeignete Maßnahmen zu ergreifen und einen Alternativweg einzuschlagen. Intelligente vernetzte Lichtsignalanlagen können durch Kommunikation mit den Fahrzeugen dazu genutzt werden, den Verkehrsdurchsatz zu erhöhen und so zu einer besseren Gesamtverkehrssituation zu führen, wie in [DDM+15] vorgestellt. Die erhobene Datenmasse von vernetzten Fahrzeugen wird in Zukunft dadurch derart umfangreich sein, dass die Autoren in [GLP+14] sogar die Zukunft einer „Vehicular Cloud“ in Anlehnung an das Internet of Things vorbringen. Eine Besonderheit stellen autonome Fahrzeuge dar. Wie bereits in Abbildung 2-3 als Funktionsbaustein in der Mitte rechts angedeutet, kann die Car2X-Kommunikation als eine Erweiterung der Fahrzeugsensorik aufgefasst werden. Da sich die Fahrzeuge nicht mehr ausschließlich auf ihre eigenen Sensordaten und Erkenntnisse daraus verlassen müssen, sondern dieses Wissen zusätzlich durch Informationen von anderen Fahrzeugen absichern können, kann die Sicherheit bzw. Verlässlichkeit der Systeme insgesamt gesteigert werden.

Darüber hinaus sind aber auch gänzlich neue kooperative Funktionen möglich, die ohne eine Kommunikation nicht umsetzbar wären und gesondert in Kapitel 2.3 aufgegriffen werden

2.2 Verkehrsmanagement der Gegenwart

Unter dem Begriff des Verkehrsmanagements (oder Netzmanagements) kann die Intention verstanden werden, den aufkommenden Verkehr in einem typischerweise stark verkehrsbelasteten Gebiet oder entlang eines spezifizierten Straßenzuges (z.B. Autobahnen, Highways) bestmöglich abzuhandeln. Hierzu zählt ein verträgliches, sicheres und kontinuierliches Abfließen der Fahrzeuge zu gewährleisten, ohne dass es zu Stauungen kommt. Gerade in stark nachgefragten Straßennetzen und -zügen können Stauungseffekte langanhaltende negative Effekte zur Folge haben und den Verkehrsfluss stören oder gar zum Erliegen bringen. In diesem Abschnitt soll daher ein Überblick über heutige technische Möglichkeiten gegeben werden, um den Verkehr geeignet zu steuern. Eine feingliedrige Darstellung von Zielen und Stellmöglichkeiten von Verkehrsmanagementsystemen, unterteilt nach Sicherheit, wirtschaftlichem Nutzen, Attraktivität, Schnelligkeit und Umweltschonung, ist in Tabelle 2 nach [BS07] dargestellt.

Tabelle 2: Ziele und Stellmöglichkeiten von Verkehrsmanagementsystemen nach [BS07]

Ziel	Kriterien, Messgrößen	Strategie	Einflussmaßnahme, Stellgröße
Sicherheit	(Beinah-) Unfälle, Dichte, Varianz der Geschwindigkeiten, Überlastung der Fahrbahnbeläge	Harmonisierung der Flusssteuerung, Dichtereduzierung, Harmonisierung und Optimierung der Geschwindigkeit	Richtungsempfehlungen, Geschwindigkeitsempfehlungen, Regulierung
Wirtschaftlicher Nutzen	Nutzungsentgelte	Routenplanung, Zeit-/Wegeminimierung	Routenvorgabe
Attraktivität	Verkehrsstärke, Parkraumauslastung	Stauvermeidung, Flussdrosselung, Verkehrslenkung,-information Routenplanung,-regelung (Park)Raummanagement und -bewirtschaftung, Ticketvorverkauf	Verkehrsinformationen (vor, während), Dichteregulierung, Routenvorgabe, Kosteninformation, Kostenstruktur
Schnelligkeit	Reisezeit, Reisegeschwindigkeit, Durchsatz	Harmonisierung des Verkehrsflusses, Routenplanung,-regelung, Verlustzeitenminimierung, Suchverkehrvermeidung, Ticketvorverkauf	Verkehrsinformation (während der Fahrt), Geschwindigkeitsvorgabe, Routenvorgabe, Kapazitätsanpassung (Spuranzahl)
Umweltschonung	Emission, Lärm, Gase, Staub, Verbrauch, Kraftstoff, (versiegelte Straßen-) Fläche, Verkehrsdichte	Dichtereduzierung, Drosselung, Ausgleich und Verteilung der Verkehrsströme, Routenumlegung, harmonisierte Fahrweise	Geschwindigkeitsvorgabe, Routenvorgabe, Verkehrsinformation, Regulierung, Monetarisierung (z.B. Emissionen)

Die wesentlichen Probleme bestehen demnach aus Überlastungen von Straßennetzen, welche zur Folge haben, dass es häufiger zu Unfällen kommt, der Durchsatz an Fahrzeugen sinkt, sich somit die Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer erhöhen und zudem gerade dadurch sich die Umweltbelastungen in Form von vielseitigen Emissionen erhöhen. Zur Abhilfe wird die Strategie der Lastverteilung angeführt, der Verkehrsfluss soll also „harmonisiert“ werden, sodass es nicht zu punktuellen Überbelastungen kommt, die das Straßennetz nachhaltig stören und sich ausbreiten. Die Stellgrößen von Verkehrsmanagementsystemen zur Umsetzung der zuvor genannten Ziele bestehen nach [PKD+03], [BS07] und [RilSA10] u.a. aus den nachfolgenden statischen Stellgrößen, die dauerhaften Einfluss auf die Verkehrssituation haben, sowie den dynamischen Stellgrößen, deren Auswirkung sich in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung ergibt.

Statische Stellgrößen

- Bauliche Veränderungen der Infrastruktur
- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Regulierungen (z.B. LKW-Überholverbote)
- Monetarisierung (z.B. Maut, Steuer)

Dynamische Stellgrößen

- Wechselverkehrszeichensteuerung
 - Dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen
 - Dynamische Spurbeschränkung/-erweiterung (z.B. Standstreifenfreigabe)
 - Dynamische Fahrstreifenzuteilung
- Dynamische Lichtsignalanlagen-Programme
- Zuflussregelung (sog. „Ramp Metering“)
- Allgemeine Verkehrsinformationen über Hinweistafeln (z.B. Stauwarnung, Reisezeiten)
- Routenvorgabe/-empfehlung über Hinweistafeln/Apps

Einige ausgewählte Stellgrößen des Verkehrsmanagements sind exemplarisch in Abbildung 2-5 dargestellt, welche eine dreispurige Straße mit Verkehr in eine Richtung zeigt. Während das LKW-Überholverbot (1) in dem Beispiel die einzige statische Stellgröße ist, finden sich sonst ausschließlich dynamische Stellgrößen (2) – (5) wieder, die den Verkehr beeinflussen können, jedoch in der gezeigten Konstellation nur der Anschauung dienen. Mit der dynamischen Spurbeschränkung (2) werden beispielsweise LKW daran gehindert, die linke Spur zu befahren und damit ggf. eine bereits stark ausgelastete Verkehrssituation durch geringe Geschwindigkeit und träges Fahrverhalten weiter zu verschärfen. Die dynamischen und spurabhängigen Geschwindigkeitsbegrenzungen in (3) sorgen dafür, dass einerseits der Verkehrsfluss durch eine generelle Geschwindigkeitsbegrenzung harmonisiert wird und andererseits die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen einzelnen Spuren nicht zu groß wird. Letzteres kann bei entsprechender Verkehrsbelastung zu Stauungen führen, da eine zu große Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Spuren bei Spurwechseln dazu führen kann, dass einzelne Fahrzeuge stark abbremsen müssen und somit den Startpunkt einer Stauungswelle initiieren. Das Stellglied (4) ist eine dynamische Spurerweiterung, die nur bei Bedarf aktiviert wird und in diesem Beispiel den Standstreifen zum Befahren freigibt. Hierdurch erhöht sich die Kapazität der Straße und ein größeres Verkehrsaufkommen kann bewältigt werden. Ein in Deutschland eher selten (dafür in den USA z.B. häufig an Highways) anzutreffendes Stellglied ist eine Zuflussregelung (oder auch Ramp Meter) durch eine Lichtsignalanlage wie in (5) gezeigt. Dieses Stellglied sorgt für einen kontrollierten Zufluss von Fahrzeugen, indem einzelnen Fahrzeugen zeitweise die Auffahrt auf die Straße gewährt wird. Dadurch kann gewährleistet werden, dass nicht zu viele Fahrzeuge auf einmal die Straße befahren und damit deren Kapazitätsgrenze erreicht wird, wodurch ebenfalls ein Stau entstehen kann.

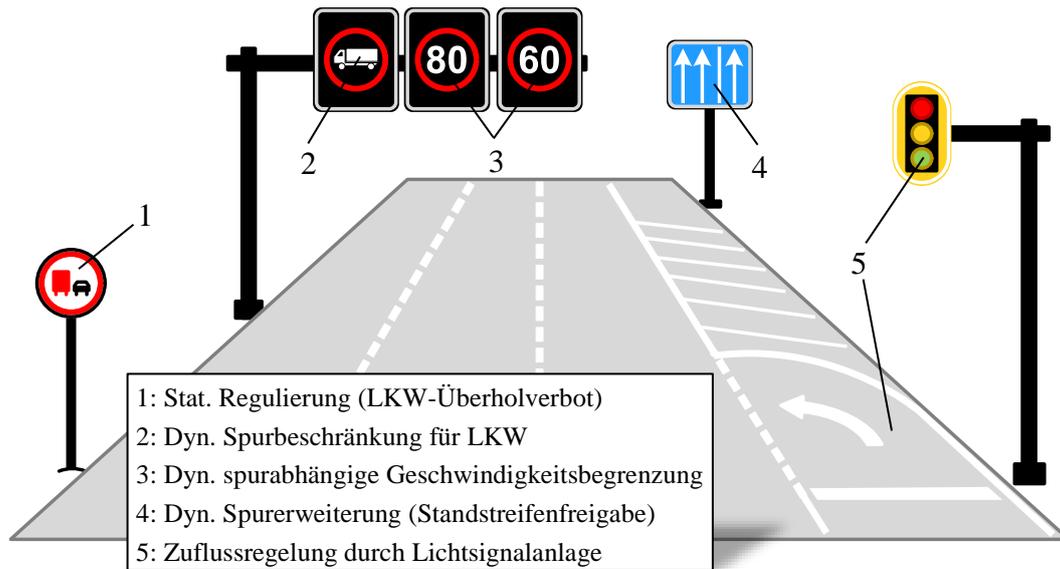


Abbildung 2-5: Beispiele für Stellgrößen des Verkehrsmanagements

Die gezeigten Stellgrößen beziehen sich hauptsächlich auf Fernverkehrsstraßen wie etwa Autobahnen mit mehreren Spuren in jede Fahrtrichtung und langen Streckenabschnitten, welche üblicherweise durch Verkehrszentralen überwacht werden und diese Technik aktiv einsetzen. So werden als Beispiel von der Verkehrszentrale AFINAG in Österreich ca. 2.200 Kilometer, von der Verkehrsmanagementzentrale der Schweiz (VMZ-CH) ca. 2.300 Kilometer, von der Verkehrszentrale Hessen ca. 1.200 Kilometer und von der Verkehrszentrale NRW ca. 2.200 Kilometer Autobahnstrecke und weitere Fernverkehrsstraßen mittels Verkehrsmesseinrichtungen und Videokameras überwacht und über die zuvor erwähnten Stellgrößen geeignet beeinflusst [RS18].

Straßennetze in urbanen und dicht umbauten Gebieten sind i.d.R. wesentlich weniger umfangreich ausgebaut und weisen vermehrt statische Regulierungen (Geschwindigkeitsbeschränkungen) und Lichtsignalanlagen auf. Gerade in städtischen Gebieten ist es aufgrund der begrenzten Fläche oft nicht möglich, die Infrastruktur dem hohen Verkehrsaufkommen anzupassen, zudem ist dies aus Attraktivitätsgründen auch nicht immer erwünscht.

Wird der Fahrer als Stellglied mitberücksichtigt, sind zusätzlich dynamische und verkehrabhängige Routenplanungen möglich, die z.B. mittels Apps individuell für jedes Fahrzeug erzeugt werden können. In [Hei19] stellen die Autoren für diesen Ansatz die für Smartphones konzipierte App NUNAV vor, die für jeden Fahrer eine individuelle Route auf Grundlage der aktuellen Verkehrssituation berechnet und alle 15 Sekunden dynamisch aktualisiert wird. Der eingesetzte Routing-Algorithmus setzt hierbei nicht nur auf die cloudbasierte Berechnung des kürzesten Wegs zwischen Start- und Zielpunkt, sondern berücksichtigt zudem Kapazitäten für jede Straße, sodass Staus aktiv vermieden werden sollen. Einige große Kurier- und Lieferdienste setzen diese Technologie bereits heute ein.

Lichtsignalanlagen

Da der Fokus dieser Arbeit mehr auf dem Verkehr in urbanen Gebieten liegt, soll nachfolgend eine kurze Erläuterung des für diese Gebiete wichtigsten Stellglieds gegeben werden: der Lichtsignalanlage. Lichtsignalanlagen werden eingesetzt, wenn sich verschiedene Verkehrsflüsse schneiden. Typischerweise ist dies an Kreuzungen der Fall, wo sich Fahrzeuge aus verschiedenen Richtungen einem zentralen Knotenpunkt nähern und passieren wollen. In Kreuzungen müssen sich demnach Fahrzeuge aus verschiedenen Verkehrsflüssen dieselbe Kreuzungsfläche teilen, die als Konfliktfläche bezeichnet wird. Für jede Verkehrsrichtung bzw. jeden Verkehrsfluss gibt es Signalgeber, die über Lichter eindeutig anzeigen, ob ein Verkehrsfluss eine Kreuzung befahren darf oder nicht (Rot: Keine Freigabe, Gelb: Übergang, Grün: Freigabe).

Nach [RilSA10] und [Kri17] werden Verkehrsflüsse an Kreuzungen in drei Kategorien eingeteilt, abhängig davon, ob diese Konfliktflächen mit anderen Verkehrsflüssen aufweisen und wie sich diese darstellen: Verträgliche Verkehrsflüsse (1) zeichnen sich dadurch aus, dass keine Konfliktflächen zwischen Verkehrsflüssen existieren, somit können diese zeitgleich durch eine Lichtsignalanlage (LSA) freigegeben werden (Beispiel: Geradeausfahrer- und Rechtsabbiegerverkehr). Bedingt verträgliche Verkehrsflüsse (2) weisen Konfliktflächen mit anderen Verkehrsflüssen auf, jedoch beschränkt sich der Konflikt auf Abbiegeverkehr, der durch allgemeine Vorfahrts- und Vorrangsregeln geregelt ist. Bei dieser Art des Konflikts ist eine von der vorliegenden Situation individuelle Entscheidung zu treffen, ob die Verkehrsflüsse von einer LSA zeitgleich freigegeben werden können. Nichtverträgliche Verkehrsflüsse (3) bilden alle Verkehrsflüsse mit Konfliktflächen, die durch eine LSA nicht zeitgleich freigegeben werden dürfen. Als Beispiel seien hier zwei sich kreuzende Verkehrsflüsse aus unterschiedlichen Richtungen genannt, für die keine zeitgleiche Freigabe gegeben werden darf.

Welche Verkehrsflüsse zu welchem Zeitpunkt eine Freigabe erhalten, wird durch das Programm bzw. die implementierte Logik einer LSA bestimmt. Die Lichtsignalanlagenprogramme sind in der Regel als Festzeitsteuerung oder als verkehrsabhängige Steuerung ausgelegt.

In Abbildung 2-6 ist ein vereinfachtes Beispiel für eine Festzeitsteuerung zu sehen. An der T-Kreuzung sind drei Verkehrsflüsse zu berücksichtigen. Während die Verkehrsflüsse von links und rechts (Signalgeber 1 und 2) aufgrund der von rechts kommenden Linksabbieger zueinander bedingt verträglich sind, ist der Verkehrsfluss von unten kommend (Signalgeber 3) unverträglich zu den anderen Verkehrsflüssen.

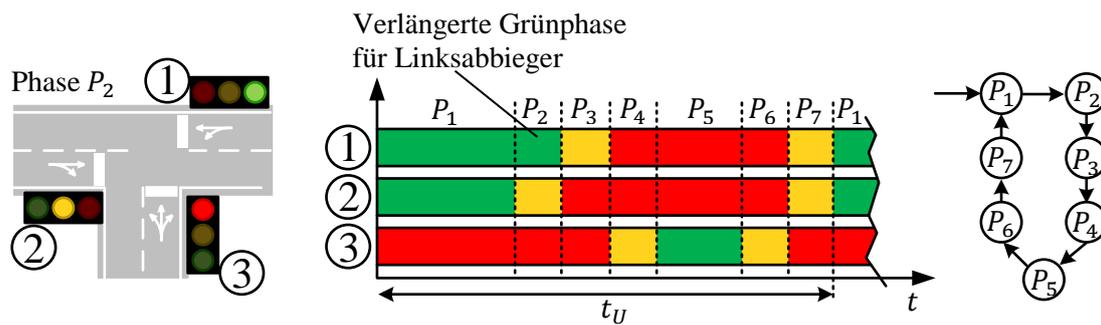


Abbildung 2-6: Phasen- und Zustandsdiagramm für eine beispielhafte vereinfachte Festzeitsteuerung

Die Festzeitsteuerung kann in einem Phasen- und Zustandsdiagramm dargestellt werden. Das Phasendiagramm zeigt die Zustände der Signalgeber über der Zeit, während das Zustandsdiagramm den Ablauf der Zustände beschreibt. Wie in der Mitte von Abbildung 2-6 dargestellt ist, ist eine Festzeitsteuerung ein sich stets wiederholender Vorgang mit fester Phasenabfolge und fester Dauer. Innerhalb eines Zyklus, welcher die Umlaufzeit t_U besitzt, wird jede Phase einmal durchlaufen, dann beginnt der Zyklus von vorne (s. Abbildung 2-6 rechts). Die Dauer der einzelnen Phasen berechnen sich anhand von Richtlinien wie in [RilSA10] angegeben und orientieren sich an überschlägigen Zeiten für die Ein- und Überfahrt sowie an Räumzeiten, die zusammengefasst als Zwischenzeiten bezeichnet werden. Grundlage der Berechnung sind für die spezifische Kreuzung zurückzulegende Wege und zu erwartende Geschwindigkeiten der Fahrzeuge. Da die Umlaufzeit statisch und bekannt ist, eröffnet sich die Möglichkeit, mehrere Lichtsignalanlagen aufeinander abzustimmen und beispielsweise eine grüne Welle in Hauptverkehrsrichtung umzusetzen.

Es ist jedoch offensichtlich, dass sich eine solch einfache Festzeitsteuerung nicht auf fluktuierende Verkehrsbedingungen einstellen kann. Dies ist der größte Nachteil einer Festzeitsteuerung, denn es wird unabhängig vom Verkehrsaufkommen immer dieselbe Logik zur Abhandlung der Fahrzeuge verwendet. Auch wenn dieser Nachteil durch z.B. tageszeitabhängige Festzeitsteuerungen verkleinert werden kann, können unvorhergesehen hohe Verkehrsaufkommen dazu führen, dass die Festzeitsteuerung die Verkehrssituation deutlich verschlechtert. Im Gegensatz dazu zeichnet sich eine verkehrsabhängige Steuerung dadurch aus, dass es eine Rückkopplung in Form von Messungen in das System gibt. Mittels Induktionsschleifen können einzelne Fahrzeuge erfasst und das Verkehrsaufkommen abgeschätzt werden. Mit dieser Information kann die Steuerung in einem gewissen Rahmen dynamisch angepasst werden. Wie in [Kri17] erläutert, lassen sich bei einer verkehrsabhängigen Steuerung die Dauer der Grünphasen (und damit auch die Umlaufzeit) und die Phasenabfolge anpassen. Die Zwischenzeiten können aus sicherheitstechnischen Gründen nicht angepasst werden, da den Verkehrsteilnehmern unabhängig von der Logik immer genügend Zeit gegeben werden muss, die Konfliktflächen zu räumen. Eine üblicherweise eingesetzte Methode der Grünphasenverlängerung ist das Zeitlückenverfahren, bei dem mit Induktionsschleifen vor der Kreuzung die Zeit zwischen zwei Fahrzeugen

ermittelt wird. Unterschreitet die gemessene Zeit einen festgelegten Wert, wird die Grünphase verlängert (unter Berücksichtigung einer Oberschranke, um „Verhungern“ von Verkehrsflüssen zu unterbinden), ansonsten wird die Grünphase abgebrochen. Hierbei kann zusätzlich noch eine gesonderte Berücksichtigung spezieller Verkehrsteilnehmer integriert werden, wie etwa die Priorisierung von ÖPNV, Radfahrern oder Fußgängern. Neben der einfachen Grünphasenverlängerung ist es zudem möglich, von dem starren Phasenablauf abzuweichen und eine dynamische Reihenfolge, abhängig vom Verkehrsaufkommen, zuzulassen. Im Zustandsdiagramm der Festzeitsteuerung in Abbildung 2-6 ist erkennbar, dass jeder Zustand genau einen Vorgänger und einen Nachfolger (und damit genau einen Übergang) besitzt. Die Struktur kann nun für eine verkehrsabhängige Steuerung aufgeweicht werden, sodass Zustände mehrere Übergänge besitzen können, vorausgesetzt, die Phasen sind ineinander überführbar. Zum Beispiel können Hauptverkehrsrichtungen dauerhaft/länger grün bekommen, wenn dort ein erhöhtes Verkehrsaufkommen auftritt, während Nebenverkehrsrichtungen bei geringem oder keinem Verkehrsaufkommen nur beschränkt eine Freigabe erhalten, z.B. nur dann, wenn ein Fahrzeug an der Kreuzung detektiert wird. Für den Fahrer ist damit das Verhalten einer LSA nicht mehr einfach vorhersehbar, jedoch kann das Verkehrsaufkommen besser abgehandelt werden. Ein anderes Beispiel ist die Alles-Rot-Sofort-Grün-Steuerung, bei der die gesamte LSA für alle Richtungen standardmäßig Dauerrot zeigt, bis sich ein Fahrzeug der Kreuzung nähert. In diesem Fall wird für das Fahrzeug sofort grün geschaltet, sofern zuvor der Dauerrot-Zustand aktiv war (also nicht bereits für ein Fahrzeug aus einer anderen Richtung grün geschaltet wurde, die hierzu im Konflikt steht).

Modernere Verfahren für verkehrsabhängige Steuerungen wie etwa SCOOT¹³ [HT81] oder „selbstgesteuerte“ Lichtsignalanlagen, wie in [Läm16] vorgestellt, setzen beispielsweise modellgestützte und mehrstufige Optimierungsansätze für eine dynamische Verkehrssteuerung ein. Hierzu wird zum Teil auch eine individuelle Gewichtung unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer vorgenommen. Das Verkehrsaufkommen muss im betrachteten Verkehrsraum daher für solch dynamische Steuerungen mittels Sensoren in Echtzeit erfasst und durch eine zentrale Recheneinheit ausgewertet werden. Als Ergebnis werden die Phasen der LSA-Programme kurzfristig adaptiert, indem z.B. die Grünzeit für eine Verkehrsrichtung verlängert wird oder die feste Reihenfolge vernachlässigt wird. SCATS¹⁴ [Roa18] berücksichtigt als weiteres Beispiel überdies das Verkehrsaufkommen ganzer Stadtteile und Regionen, um die LSA-Programme dynamisch anzupassen.

2.3 Ansätze für intelligente Verkehrsmanagementsysteme

Die zuvor erwähnten Ansätze wie SCATS und SCOOT stellen bereits heute den etablierten Stand der Technik dar und werden weit verbreitet eingesetzt (SCATS wird derzeit an

¹³ Split, Cycle and Offset Optimisation Technique (SCOOT)

¹⁴ Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS)

ca. 42.000 Kreuzungen in 1.800 Städten weltweit eingesetzt). In der Literatur lassen sich dennoch zahlreiche vielversprechende Ansätze finden, die auf neuere Technologien wie etwa die Car2X-Kommunikation oder Machine-Learning aufsetzen oder aber die dynamische Berechnung individualisierter Routen für Fahrzeuge als weitere Stellgröße neben den Lichtsignalanlagen in urbanen Gebieten in den Fokus nehmen. Andere Ansätze basieren zudem auf einer höheren Abstraktion des Verkehrs, um übergeordnete Steuerungsalgorithmen zu implementieren. Auch Szenarien vollständig autonomer Fahrzeuge werden berücksichtigt, die durch übergeordnete Algorithmen Vorgaben erhalten. In [Fri16] erläutern die Autoren hierzu z.B. allgemein, welchen Einfluss ein autonomer Verkehr bei der bestehenden Straßeninfrastruktur insgesamt haben kann und kommen zu dem Schluss, dass in jeder Hinsicht (höhere Kapazität und Effizienz, niedrigere Wartezeiten etc.) Verbesserungspotentiale zum heutigen Verkehrszustand bestehen. Eine gemeinsame Voraussetzung zur Umsetzung aller Ansätze ist der echtzeitfähige Datenaustausch (z.B. via Car2X). Im Folgenden werden einige ausgesuchte Ansätze aus der Literatur für intelligente Verkehrsmanagementsysteme sowie Teilsysteme davon vorgestellt. Es sei jedoch angemerkt, dass diese Auswahl bewusst begrenzt ist und nicht den vollen Umfang der in der Literatur vorhandenen Ansätze widerspiegelt.

Intelligente Lichtsignalanlagenprogramme

In der Literatur vorgestellte Ansätze zur Verbesserung von LSA-Programmen setzen i.d.R. neuartige Steueralgorithmen ein, umfassen zusätzliche Technologien oder untersuchen zum Teil auch deren kombinierte Anwendung. Die Untersuchung erfolgt hierbei meist modellbasiert. Der Aufbau einer intelligenten Lichtsignalanlage umfasst in der Regel, wie in Abbildung 2-7 dargestellt, eine Rückkopplung in Form einer stetigen und echtzeitfähigen Verkehrsdatenerfassung, auf deren Grundlage die LSA-Programme von einem Algorithmus dynamisch ermittelt werden. Die berechneten Programme werden dann nächstmöglich an den entsprechenden Kreuzungen umgesetzt.

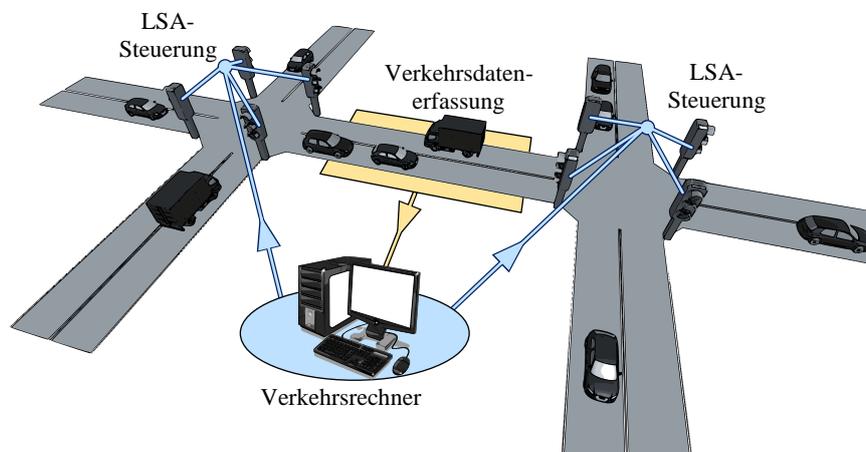


Abbildung 2-7: *Prinzipieller Aufbau eines Systems mit intelligenten Lichtsignalanlagen*

Die Autoren in [EGJ+12] stellen z.B. eine Methode vor, wie LSA-Programmen mehrerer verbundener Kreuzungen dynamisch durch eine Fuzzy-Steuerung erzeugt werden können. Die Fuzzy-Logik bestimmt die zu aktivierenden Phasen-Logik derart, dass der Verkehrsfluss verbessert wird. In Simulationen konnte gezeigt werden, dass dieser Ansatz im Vergleich zu einfachen Festzeitprogrammen eine deutliche Verbesserung bewirkt (bis zu 28% mehr Durchsatz an Fahrzeugen).

Einen anderen Ansatz präsentieren die Autoren in [ALU+10]. Hier wird ebenfalls für einen Verbund aus Kreuzungen eine optimale Phasenabfolge bestimmt. Zur Berechnung wird jede Kreuzung als eigenständiger Agent in einem verkoppelten Multiagenten-System aufgefasst. In dem System können die Agenten teilweise miteinander kommunizieren, um Informationen über den Verkehrszustand auszutauschen. Durch diese Informationen sowie maschinelle Lernverfahren, die jeder Agent implementiert, wird die akkumulierte Wartezeit der Fahrzeuge durch geeignete und kooperative Phasenfolgen der Lichtsignalanlagen an den Kreuzungen reduziert. Durch die lernenden Agenten verbessert sich das System zusätzlich innerhalb der Laufzeit.

In Kapitel 2.1 wurde bereits die Relevanz von Car2X-Kommunikation für moderne Fahrerassistenzsysteme erläutert. Diese Technologie kann ebenso eingesetzt werden, um aktuelle Informationen über den Verkehrszustand zu erhalten. In [YB14] wird ein Konzept vorgestellt, das sich dies zu Nutzen macht. In dem Szenario, in welchem alle Fahrzeuge über Car2X-Kommunikation verfügen, werden mittels dynamischer VANETs Daten aller Fahrzeuge eines Verbunds (z.B. jeweils Position, Geschwindigkeit, Richtung, etc.) gesammelt. Die Fahrzeuge senden die notwendigen Informationen dazu selbständig und periodisch an alle Fahrzeuge im Verbund. Das Fahrzeug aus dem Verbund, welches sich am nächsten zur LSA befindet, wertet diese gesammelten Daten aus und übermittelt sie in Echtzeit an die Lichtsignalanlage. Die LSA berechnet dann mit einem Scheduling-Algorithmus die nächsten Phasen und Zeiten, um die Wartezeiten der Fahrzeuge an der Kreuzung zu reduzieren. Auch wenn in diesem Beitrag nicht explizit ein Verbund aus Lichtsignalanlagen betrachtet wurde, ist ersichtlich, dass eine Car2X-Kommunikation völlig neue Informationsquellen und Steuerungsansätze ermöglicht. Mittels der Funktechnologie können fahrzeugeigene Sensoren zur Bestimmung des Verkehrszustands herangezogen werden, sodass sich nicht auf festinstallierte Technik, wie einfache Induktionsschleifen und Kamerasysteme beschränkt werden muss. Eine Systemgrenze ist dadurch nicht mehr fest vorgegeben und kann dynamisch an die Anforderungen adaptiert werden, sodass eine Ausweitung des beschriebenen Ansatzes auch auf weitere Kreuzungen möglich wäre.

Eine Kombination aus optimierten Phasenzeiten für LSA-Programme und einem dynamischen Routing für Fahrzeuge stellen die Autoren in [DMD14] vor. In diesem Beitrag werden die Phasenzeiten und Fahrzeugrouten gemeinsam von einem evolutionären Algorithmus dynamisch berechnet. Der Algorithmus generiert zufällige Kombinationen aus gültigen Phasenzeiten und gültigen Fahrzeugrouten, die mit einem als Petri-Netz modellierten Verkehrsnetz simuliert und jeweils mit einer Fitness-Funktion bewertet werden.

Vielfersprechende Kandidaten mit einem hohen Fitness-Wert werden bezüglich ihrer Parameter so lange miteinander gekreuzt und weiterentwickelt, bis keine Verbesserung mehr eintritt. Auf diese Weise war es den Autoren möglich, innerhalb von 40 Generation zu einer optimalen Kombination für die Abhandlung des Verkehrsaufkommens zu gelangen.

Intelligentes Routing von Fahrzeugen

Das Routing von Fahrzeugen als weitere Stellgröße für Verkehrsmanagementsysteme zu berücksichtigen ist, wie im letzten Beispiel zu sehen, eine naheliegende und wirkungsvolle Möglichkeit, das Verkehrsaufkommen zu bewältigen und soll im Folgenden ebenfalls kurz diskutiert werden.

Jedes Fahrzeug besitzt ein Ziel im Straßennetz, zu dessen Erreichen unendlich viele Routen existieren. Betrachtet man jedoch zyklenfreie und möglichst nicht unnötig lange Routen zum Ziel, so reduziert sich der unendlich große Lösungsraum auf eine kleine Teilmenge von sinnvoll umsetzbaren Routen, aus der ausgewählt werden kann. Ein intelligenter Routingalgorithmus setzt an dieser Stelle an und wählt die Routen der Fahrzeuge so aus, dass nicht nur das Ziel eines Fahrzeugs berücksichtigt wird (möglichst schnell an den Zielort gelangen), sondern kollektive Ziele aller Fahrzeuge einbezogen werden. Zu solchen Zielen zählt beispielsweise die Vermeidung von Stauungen durch Überbelastung von neuralgischen Stellen im Straßennetz. Aus diesem Grund ist auch beim intelligenten Routing die Einbindung aktueller Verkehrsdaten unverzichtbar. Einfache Routingalgorithmen, die lediglich für ein einzelnes Fahrzeug eine Route auf Grundlage der kürzesten Distanz oder der kürzesten Fahrtzeit ohne Berücksichtigung der aktuellen Verkehrssituation berechnen, tendieren je nach Implementierung dazu, gleiche bzw. sehr ähnliche Routen zu generieren und können dadurch eine Überbelastung an Knotenpunkten provozieren.

Dieses Problem kann anschaulich mit dem Braess-Paradoxon erklärt werden. Stelle man sich ein einfaches und zu Beginn stets fahrzeugleeres Straßennetz, wie in Abbildung 2-8 dargestellt, vor, so haben Fahrzeuge vom Start aus die Möglichkeit, entweder über Knoten A oder über Knoten B zum Ziel zu gelangen. Hierbei weist jede Verbindung zwischen den Knoten Kosten auf, diese können z.B. Fahrtzeiten der Fahrzeuge sein. Während die Verbindung vom Start zum Knotenpunkt B die feste Fahrtzeit von vier Minuten aufweist, sind die Fahrtzeiten vom Start zum Knoten A variabel und gleich der Anzahl an Fahrzeugen in Minuten. Analog sind die Fahrtzeiten von Knoten A und B zum Ziel zu verstehen. Die Verbindung zwischen Knoten A und B sei als aktivierbare Schnellstraße anzusehen und besitzt eine Fahrtzeit von 0 Minuten. Die Fahrzeuge verhalten sich in jedem Falle immer optimal bezüglich der eigenen Fahrtzeit, d.h. es wird stets die Route der geringsten Fahrtzeit gewählt. Anders ausgedrückt könnte man auch sagen: Jedes Fahrzeug wählt seine Route in egoistischer Weise ohne Rücksicht auf die Gesamtsituation aus.

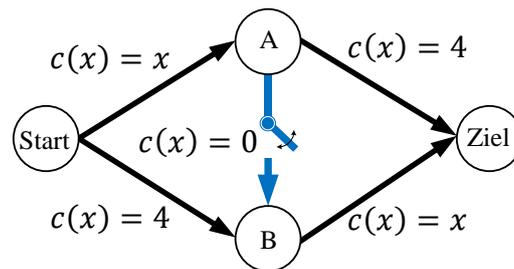


Abbildung 2-8: *Illustration des Braess-Paradoxons (vier Fahrzeuge)*
Gesamtfahrzeit ohne Schnellstraße: 6 Minuten
Gesamtfahrzeit mit Schnellstraße: 8 Minuten

Für den Fall, dass die Verbindung zwischen A und B freigegeben ist, wird sich der Verkehr zwischen beiden Alternativrouten aufteilen, da die Fahrzeiten mit jedem hinzukommenden Fahrzeug abwechselnd mal über A, mal über B am kürzesten sind. Fährt das erste Fahrzeug am Start los, dann würde sich die Fahrzeit bei Wahl für die obere Route auf $1 \text{ min} + 4 \text{ min} = 5 \text{ min}$ und die Fahrzeit bei Wahl der unteren Route ebenfalls auf $4 \text{ min} + 1 \text{ min} = 5 \text{ min}$ belaufen. Da beide Kosten identisch sind, wählt das Fahrzeug bspw. zufällig die obere Route aus. Das zweite Fahrzeug findet sich in der Situation, dass die obere Route durch das erste Fahrzeug bedingt nun eine neue Fahrzeit von $2 \text{ min} + 4 \text{ min} = 6 \text{ min}$ aufweisen würde. Die untere Route weist jedoch nur eine Fahrzeit von $4 \text{ min} + 1 \text{ min} = 5 \text{ min}$ für das zweite Fahrzeug auf, daher wählt dieses die untere Route und gleicht damit die Fahrzeit dieser Route der oberen an (Beide 5 Minuten). Dieses Vorgehen der alternierenden Routenwahl setzt sich so lange fort, wie Fahrzeuge vom Start zum Ziel fahren. Seien als Beispiel vier Fahrzeuge zu betrachten, so berechnet sich die Gesamtfahrzeit aller Fahrzeuge zu 6 Minuten, nach der alle Fahrzeuge am Ziel angekommen sind (obere Route: $2 \text{ min} + 4 \text{ min} = 6 \text{ min}$, untere Route: $2 \text{ min} + 4 \text{ min} = 6 \text{ min}$).

Wird im nächsten Fall nun die Schnellstraße zwischen A und B aktiviert, ändert sich das Verhalten gänzlich. Fährt das erste Fahrzeug beim Start los existiert im anfänglich leeren Straßennetz nun eine Route mit der Fahrzeit von 0 Minuten ($\text{Start} \rightarrow \text{A} \rightarrow \text{B} \rightarrow \text{Ziel}$) und weist damit also die minimalen Kosten von 0 Minuten auf. Das Fahrzeug wählt diese Route entsprechend. Das zweite Fahrzeug wird sich ebenfalls wie das erste Fahrzeug entscheiden, da keine andere Route existiert, die weniger Fahrtzeit aufweist. Die Fahrtzeit für das zweite Fahrzeug berechnet sich also zu: $1 \text{ min} + 0 \text{ min} + 1 \text{ min} = 2 \text{ min}$. Dieselbe Route wird nun wiederholt so lange von den Fahrzeugen gewählt, bis die variable Fahrzeit der statischen Fahrzeit von 4 Minuten ($\text{Start} \rightarrow \text{B}$ und $\text{A} \rightarrow \text{Ziel}$) entspricht, da die Kosten in jedem Fall geringer sind. Erst danach (ab fünf Fahrzeugen und mehr) wird sich wieder eine alternierende Aufteilung der Routen wie im Fall ohne Schnellstraße ergeben. Werden nun wieder vier Fahrzeuge betrachtet, so berechnet sich die Zeit, zu der alle Fahrzeuge ihr Ziel erreicht haben, zu: $4 \text{ min} + 4 \text{ min} = 8 \text{ min}$. Die Gesamtfahrzeit ist insofern erstaunlich, da das Straßennetz ohne die Schnellstraße eine Bewältigung derselben Fahrzeugzahl mit einer zwei Minuten geringeren Fahrtzeit ermöglicht. Die Existenz dieses Phänomens wurde durch Experimente in realen Straßennetzen nachgewiesen und lässt

sich auf das vermehrte eigennützige Verhalten von Verkehrsteilnehmern zurückführen. Anhand des Paradoxons lassen sich zwei wesentliche Erkenntnisse ableiten: Zum einen können zusätzliche Straßen in einem Straßennetz zur Verschlechterung des gesamten Netzes führen oder die Herausnahme im Umkehrschluss die Verkehrssituation deutlich verbessern. Zum anderen weisen intelligente Routingverfahren, die über erweiterte Echtzeit-Verkehrsinformationen verfügen und nicht lediglich die Ziele eines Fahrzeugs, sondern die Ziele eines Kollektivs an Fahrzeugen zu erfüllen versuchen, große Potentiale auf, die Verkehrssituation zu verbessern.



Abbildung 2-9: Beispiel für intelligentes Routing zwischen Start und Ziel. Die untere Route stellt den kürzesten Weg ohne Rücksicht auf das Verkehrsaufkommen dar. Die obere Route ist länger, berücksichtigt jedoch das Verkehrsaufkommen und entschärft die Verkehrsbelastung

Intelligente Routing-Verfahren setzen daher auf komplexere Kantengewichte zur Routenberechnung, die neben der Entfernung oder geschätzten Reisezeit auch Informationen zum aktuellen Verkehrsaufkommen enthalten. Auf diese Weise ist es möglich, dass Fahrzeuge, die bei gleichem Start dasselbe Ziel haben, völlig unterschiedliche und individuelle Routen erhalten, um eine Überlastung zu verhindern. In Abbildung 2-9 ist ein Beispiel für ein intelligentes Routing im Vergleich zu einem einfachen Routingverfahren dargestellt. Wird das Straßennetz als statische Gegebenheit ohne Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens betrachtet, so werden von einfachen Routingverfahren (z.B. Offline-Navigationsgeräte) in der Regel kürzeste oder schnellste Routen berechnet, die sich wie die in Abbildung 2-9 gezeigte untere Route darstellen können. Es ist zu erkennen, dass die Route durch ein Gebiet mit hohem Verkehrsaufkommen führt und daher zu erwarten ist, dass die Fahrt dadurch mehr Zeit in Anspruch nehmen wird. Zudem steigt die Verkehrsbelastung dort noch weiter, insbesondere dann, wenn mehrere Fahrzeuge durch das bereits belastete Gebiet geroutet werden.

Verfügt ein intelligentes Routingverfahren nun über solche Verkehrsinformationen, können diese berücksichtigt werden wie in der oberen Route exemplarisch veranschaulicht. Die obere Route stellt mitunter nicht mehr die kürzeste Route dar, sie kann aber gemäß

des Verkehrszustands die schnellste Route vom Start zum Ziel sein. Darüber hinaus wird die Auslastung des Straßennetzes wie im einfachen Routingverfahren nicht weiter verschärft, da vermehrt auf freie oder wenig belastete Straßen ausgewichen wird. Selbst wenn die Route nicht zeitoptimal ist, ergeben sich dadurch Vorteile für das Kollektiv, da sich so Stauungen besser vermeiden lassen und z.B. die mittlere Reisezeit aller Fahrzeuge verbessert werden kann.

Als Beispiel präsentieren die Autoren in [KDH+12] in diesem Kontext ein Routingverfahren, das eine dynamische Kantengewichtung in Form der zu erwartenden Reisezeit entlang von Straßen vornimmt. Die Reisezeit wird hierbei mittels sog. Geschwindigkeitskarten approximiert, die für einen bestimmten Zeitpunkt eine gemessene diskrete Geschwindigkeitsverteilung in einem Straßennetzstück repräsentiert. Durch die Einbindung der Geschwindigkeitskarten wird das Verkehrsaufkommen bei der Routenberechnung also indirekt berücksichtigt und verbessert somit das Routing. Nachteil ist jedoch, dass dies nicht in Echtzeit geschieht, die Daten werden per Floating-Car-Technologie erhoben und zu festen Zeitpunkten (15 Minuten-Intervalle) ausgewertet, um die Geschwindigkeitskarten zu erzeugen. Daher kann dieser Ansatz nur recht träge auf sich schnell ändernde Verkehrsaufkommen reagieren. Die Autoren in [PPZ+13] beziehen sich ebenfalls auf die Reisezeit und vergleichen fünf verschiedene Routing-Strategien zur Reduzierung der Reisezeit. Sie konnten zeigen, dass sich eine deutliche Verbesserung mit geringem Rechenaufwand und hoher Skalierbarkeit erzielen ließ. In [JNK15] stellen die Autoren beispielsweise ein Routing-Verfahren vor, das einen Ameisenalgorithmus (Fahrzeuge werden in Analogie zu Ameisen betrachtet) zur Berechnung einsetzt, um den Kraftstoffverbrauch und damit die Emissionen zu reduzieren. Hierzu wird der Routingalgorithmus um ein Verbrauchsmodell erweitert und zusätzlich der Verkehrszustand berücksichtigt. In einer simulativen Studie konnten die Autoren mit dem intelligenten Routingverfahren die mittlere Reisezeit der Fahrzeuge und den Kraftstoffverbrauch um bis zu 25% reduzieren.

Intelligente Verkehrsregionen-Steuerungen (Perimeter Control)

Als letzter Typ für intelligente Verkehrsmanagementsysteme finden sich in der Literatur einige Ansätze, die nicht einzelne Fahrzeuge, sondern Flüsse von Fahrzeugen in abgegrenzten Regionen betrachten. Hierzu wird das Straßennetz derart in Regionen eingeteilt, dass sich der Verkehrszustand für die gesamte Region in einer einzigen Metrik wiedergeben lässt. Die genannte Metrik ist abhängig vom Verhältnis der Eingangs- und Ausgangsverkehrsflüsse zwischen den Regionen und wird mithilfe des sogenannten makroskopischen Fundamentaldiagramms (MFD) ermittelt, welches detaillierter in Kapitel 3.2.4 erläutert wird. Ohne inhaltlich vorzugreifen, wird daher im Folgenden zunächst der Begriff „Verkehrsregionenzustand“ zur Erläuterung der Ansätze herangezogen, der ein Maß für die Verkehrsbelastung in einer Region darstellt. Für die Umsetzung wird in der Literatur zudem an vielen Stellen von der Voraussetzung sog. „homogener“ Regionen (homogenous regions) gesprochen. Diese Eigenschaft beschreibt, dass eine Region eine

möglichst gleichmäßig verteilte Verkehrslast aufweist und somit überhaupt erst modelltechnisch durch ein makroskopisches Fundamentaldiagramm abgebildet werden kann.

Wird ein Straßennetz nun, wie in Abbildung 2-10 gezeigt, in mehrere Verkehrsregionen eingeteilt und lässt sich für jede dieser Region ein Verkehrsregionszustand berechnen, ergeben sich mögliche Steuerungsansätze, welche die verbindenden Verkehrsflüsse zwischen den Regionen beeinflussen. Diese, in der Literatur häufig als „Perimeter Control“ bezeichneten, Ansätze verfolgen unterschiedliche Regelziele und setzen verschiedene Algorithmen ein.



Abbildung 2-10: Einteilung eines Straßennetzes in Verkehrsregionen, die über Verkehrsflüsse miteinander verbunden sind

In [GHR13] stellen die Autoren z.B. eine modellprädiktive Regelung (model predictive control, kurz MPC) für solche Verkehrsregionen vor. In der Veröffentlichung wurde ein einfaches, aus zwei Regionen bestehendes Verkehrsmodell als Grundlage verwendet. Die Regelung sowie das Verkehrsmodell nutzen jeweils makroskopische Fundamentaldiagramme als Basis, wobei das Verkehrsmodell jedoch eine verbrauchte und um Fehler erweiterte Variante enthält. Die Reglereingriffe können hierbei nur auf die Flüsse an der Grenze, nicht jedoch auf die inneren Flüsse innerhalb der beiden Regionen Einfluss nehmen. Die Verkehrsflüsse an der Grenze zwischen den beiden Regionen werden durch die Regelung derart beeinflusst, dass die internen Flüsse der Regionen maximiert werden. Der Optimierungsansatz beruht auf der Annahme der Autoren, dass diese Flüsse Fahrzeuge repräsentieren, die ihre Fahrt finalisieren, d.h. die Region nicht mehr verlassen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Gesamtkapazität beider Regionen deutlich gesteigert werden konnte.

Eine Erweiterung zum vorigen Ansatz wird in [HRG13] vorgestellt, in der das Modell um einen durchquerenden Freeway ergänzt wird, der durch eine Zuflussregelung als zusätzliche Stellmöglichkeit berücksichtigt wird. Ebenso wie im ersten Ansatz wird auch hier eine modellprädiktive Regelung verwendet, jedoch wird das Optimierungsziel um eine Minimierung der Gesamtverzögerung aller Fahrzeuge ergänzt. Der Ansatz wird in [RHG15] und [HM17] konsequent fortgesetzt. Die Autoren verfeinern das Modell um Subregionen, die für sich, anders als die übergeordnete Region, auch nichthomogen (verkehrsbelastet) sein können. Zusätzlich wird ein hierarchischer Ansatz verwendet, der eine

übergeordnete Regelung (Perimeter Control) umfasst und in der darunter liegenden Subregionen-Ebene Regler einsetzt, welche die Subregionen möglichst „homogen“ halten. Durch diese Homogenitätsregler wird gewährleistet, dass die übergeordnete Regelung überhaupt funktionieren kann, da diese wie erwähnt homogene Regionen voraussetzt. Neben der Verfeinerung in Subregionen wird auch die Modellkomplexität nicht mehr auf lediglich zwei Regionen beschränkt, sondern ein ganzes Netz aus Regionen (Multi-Regionen) betrachtet. Zudem werden weitere Unsicherheiten bei den makroskopischen Fundamentaldiagrammen integriert, sodass eine größere Robustheit gegenüber real gemessenen Messwerten besteht. Speziell in [HM17] wird der zentralisierte Regelungsansatz durch einen teilweise verteilten und damit besser skalierbaren Ansatz ersetzt. Eine Verkopplung der Regionsregler und die sich dadurch ergebene Verbesserung wird in [Had17] untersucht. In [HZ18] zeigen die Autoren, wie die Verkehrsdynamik für Modelle, die auf makroskopischen Fundamentaldiagrammen basieren, berücksichtigt werden kann und wie der vorgestellte Regelungsansatz durch eine adaptive Erweiterung auch diese Klasse von Modellen erfolgreich regeln kann.

Zusätzlich zu den erwähnten Ansätzen der Regelung von Regionen durch Beeinflussung der Verbindungsströme, werden in [YRG15] und [KHv12] Routingansätze auf Basis von makroskopischen Fundamentaldiagrammen als weitere Stellgröße des hierarchischen Ansatzes untersucht. Hierzu werden die Verkehrsflüsse abhängig von den einzelnen Verkehrsregionenzuständen dynamisch und anteilig zwischen den Regionen geroutet und untersucht, welche Routingverfahren sich hierfür am besten eignen. Wie bereits im Abschnitt zum intelligenten Routing von Fahrzeugen gezeigt, hat das Routing auch an dieser Stelle in Kombination mit der übergeordneten Regelung Vorteile, da das Verkehrsaufkommen besser bewältigt werden kann. Abbildung 2-11 zeigt in Anlehnung zum vorgestellten Gesamtsystem in [KTG18] die prinzipielle Struktur einer hierarchischen Verkehrsregionensteuerung. Grundlage bilden die Verkehrsnetzmodelle auf Basis makroskopischer Fundamentaldiagramme, die mit Verkehrsmessdaten aktualisiert werden. Darunter befindet sich die übergeordnete Regionsregelung, welche mittels eines modellprädiktiven Ansatzes die Flüsse zwischen den Regionen beeinflusst und das Flussrouting, welches zusätzlich Routen über Regionen hinweg berechnet. Auf unterster Ebene liegt die Homogenitätsregelung, welche die Subregionen in gleichmäßiger Verkehrsbelastung halten soll, damit die übergeordnete Regelung funktionieren kann.

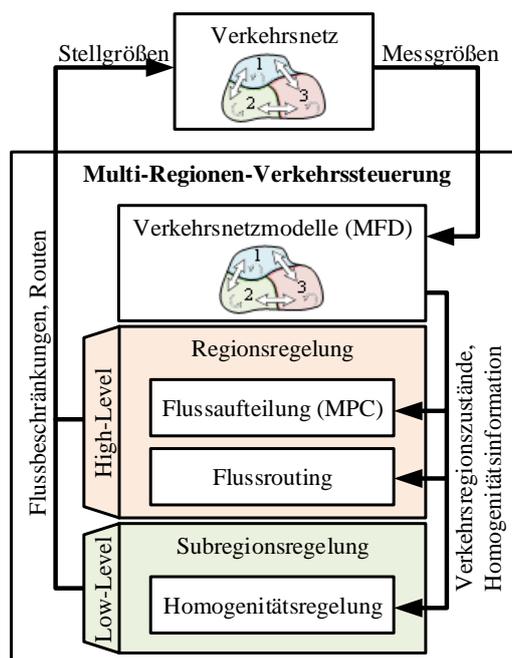


Abbildung 2-11: Prinzipielle kombinierte Struktur einer intelligenten hierarchischen Verkehrsregionensteuerung nach [KTG18], [RHG15] und [HM17]

Eine andere Herangehensweise zur Steuerung von Verkehrsflüssen stellt die Verwendung von sog. Konsensalgorithmen dar. Diese Algorithmen werden für verteilte Agentensysteme eingesetzt, bei denen die Agenten ein gemeinsames Ziel durch intelligente und kooperative Koordination erreichen müssen. Eine genaue Erläuterung zu diesen Algorithmen ist in Kapitel 4.3.2 zu finden. Damit die Agenten in der Lage sind, ein gemeinsames Ziel kooperativ zu erreichen, tauschen diese Informationen mit ihren Nachbarn aus. Anders als in dem zuvor vorgestellten Ansatz wird also kein zentralisierter, sondern ein vollständig verteilter Ansatz verwendet. Die Agenten verfügen zudem i. d. R. nicht über die Informationen aller Agenten, sondern nur über die Informationen der jeweils benachbarten Agenten (lokale Informationen). Die in [KA14] und [WLL+13] vorgestellten Ansätze betrachten in diesem Kontext beispielsweise ebenfalls abgetrennte (Verkehrs-)Bereiche, die allerdings mit einer Größenordnung von einer bis wenigen Kreuzungen deutlich kleiner sind als die zuvor beschriebenen Verkehrsregionen. In diesen miteinander verbundenen Bereichen wird durch die in den Bereichsagenten implementierten Konsensalgorithmen versucht, die Verteilung der Verkehrsbelastung einander anzugleichen und damit den Verkehrsfluss zu optimieren. Die Agenten koordinieren hierzu die Zufluss- bzw. Abflussregelung (Ramp Metering) und tauschen den aktuellen Verkehrszustand lokal mit den benachbarten Agenten aus. In [WT13b] stellen die Autoren ebenso einen auf Konsensalgorithmen beruhenden Ansatz vor, der in ähnlicher Weise funktioniert, stattdessen aber vollständig autonomen Verkehr voraussetzt, der extern gesteuert werden kann.

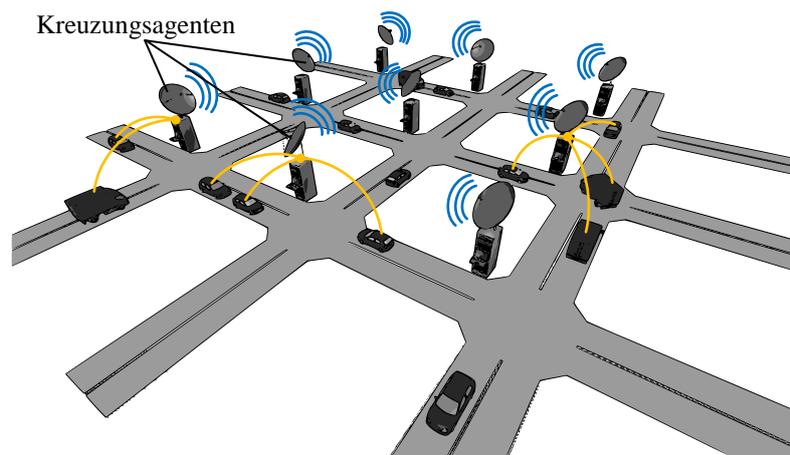


Abbildung 2-12: Intelligente Verkehrsbereichssteuerung mittels Konsensalgorithmen nach [WT13b]

Wie in Abbildung 2-12 dargestellt, wird ein abgetrenntes 3x3-Sträßennetz als System betrachtet, für das die Verkehrsbelastung balanciert wird. Hierzu verfügt jede Kreuzung über einen Agenten, der den auf die Kreuzung zufahrenden Verkehrsfluss beeinflussen kann und im Informationsaustausch mit den anderen Agenten steht. Durch den Konsensalgorithmus werden in kooperativer Weise leichte Geschwindigkeitsänderungen der Verkehrsflüsse vorgenommen und diese als Sollgeschwindigkeiten den autonomen Fahrzeugen vorgegeben. Gemäß der Annahme, dass die Fahrzeuge diesen Sollvorgaben ideal folgen, ist es den Agenten somit möglich, die Verkehrsbelastung im gesamten Sträßennetz zu balancieren und damit den Verkehrsfluss zu maximieren sowie die Gefahr von Stauungen zu verringern.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass einige vielversprechende Ansätze für intelligente Verkehrsmanagementsysteme in Form von intelligenten Lichtsignalanlagen, intelligentem Routing oder einer übergeordneten Verkehrsbereichssteuerung in der Literatur zu finden sind. Auch wenn die hier vorgestellten Ansätze nur einen kleinen Ausschnitt der Literatur darstellen, fallen durchaus einige Unterschiede und Gemeinsamkeiten auf. Unterschiede sind beispielsweise in der Festlegung von charakteristischen Größen zu erkennen, die den Zustand des Verkehrsnetzes möglichst gut wiedergeben, in den Stellgrößen zur Beeinflussung des Verkehrs sowie in den Algorithmen, um die Stellgrößen entsprechend zu berechnen. Als Gemeinsamkeit kann festgehalten werden, dass die Ansätze bisher in den meisten Fällen nur simulativ erprobt wurden und überdies hauptsächlich makroskopische (aggregierte) Verkehrsmessdaten wie Verkehrsflüsse nutzen und beeinflussen. Eine Kopplung zwischen diesen makroskopischen mit mikroskopischen Daten wie die individuellen Ziele einzelner Fahrzeuge (Quell-/Zielverkehr) sowie deren wechselseitige Beeinflussungen wurden bisher nicht untersucht.

3 Grundlagen der Verkehrsmodellierung

In diesem Kapitel werden zum weiteren Verständnis die wichtigsten Grundlagen für die Modellierung des Straßenverkehrs erläutert, welche, wenn nicht anders angegeben, auf den Erläuterungen in [TK10] basieren. Wie in Abbildung 3-1 gezeigt, wird mit Verkehrsmodellen das Ziel verfolgt, die Dynamik des Verkehrs in mathematischer Weise zu beschreiben. Durch Messungen erhobene Verkehrsdaten bilden die Grundlage, um Prinzipien der Verkehrsflussdynamik abzuleiten und empirische Aussagen über das Verkehrsgeschehen treffen zu können. Mit mathematischen Methoden können daraus (Verkehrs-)Modelle entwickelt werden.

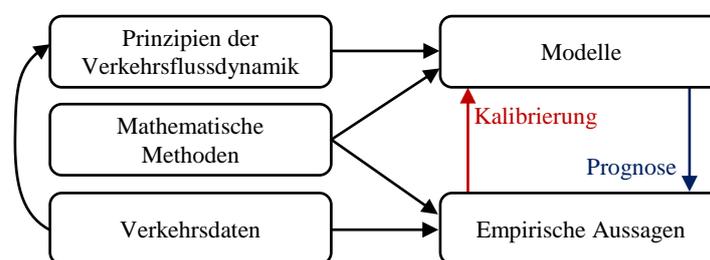


Abbildung 3-1: Zusammenhänge der Verkehrsmodellierung nach [TK10]

Liegen empirische Aussagen aus Verkehrsmessdaten vor, können diese genutzt werden, um die entwickelten Verkehrsmodelle zu kalibrieren, sodass das simulierte Verkehrsgeschehen möglichst nah an der Realität ist. Im Umkehrschluss können kalibrierte Modelle Prognosen für (zukünftige) Verkehrsgeschehen berechnen und somit nicht nur für Analysezwecke, sondern z.B. auch für intelligente Verkehrsmanagementsysteme eingesetzt werden.

Verkehrsmodelle sind mächtige Werkzeuge, die einerseits maßgeblich zum Verständnis verkehrsbedingter Effekte und deren Ursachen beitragen sowie andererseits die notwendigen Grundlagen zur simulativen Entwicklung und Untersuchung neuartiger Steuerungsansätze ermöglichen. Im Folgenden wird zunächst der Begriff der Querschnittsdaten erläutert, da diese für die weitere Arbeit von großer Bedeutung sind. Danach soll kurz auf die Geschichte und die Klassifizierung von Verkehrsmodellen eingegangen werden. Den Kern des Kapitels stellt die detaillierte Beschreibung makroskopischer Verkehrsmodelle dar, die für die Entwicklung des hier vorgestellten hierarchischen autonomen Verkehrsmanagements eine wichtige Rolle spielen.

Querschnittsdaten des Verkehrs

Wird an einem festen Straßenquerschnitt eine Messung des Verkehrs durch z.B. eingebrachte Induktionsschleifen vorgenommen, so werden die erhobenen Daten Querschnittsdaten genannt. Die Daten werden über der Zeit oder der Streckenlänge gemittelt, folglich stehen keine aufgenommenen Einzelfahrzeugdaten (mikroskopische Daten), sondern aggregierte (makroskopische) Größen zur Verfügung. Makroskopische Größen erlauben eine abstrahierte Einsicht in die Verkehrssituation in Form von Flüssen, Informationen zu einzelnen Fahrzeugen gehen hierbei verloren. Zu diesen makroskopischen Größen gehört die mittlere Flussgeschwindigkeit V , der Verkehrsfluss Q (teilweise auch Verkehrsstärke genannt) und die Verkehrsdichte ρ . Da diese makroskopischen Größen unverzichtbar zum weiteren Verständnis sind, werden sie im Folgenden kurz erläutert.

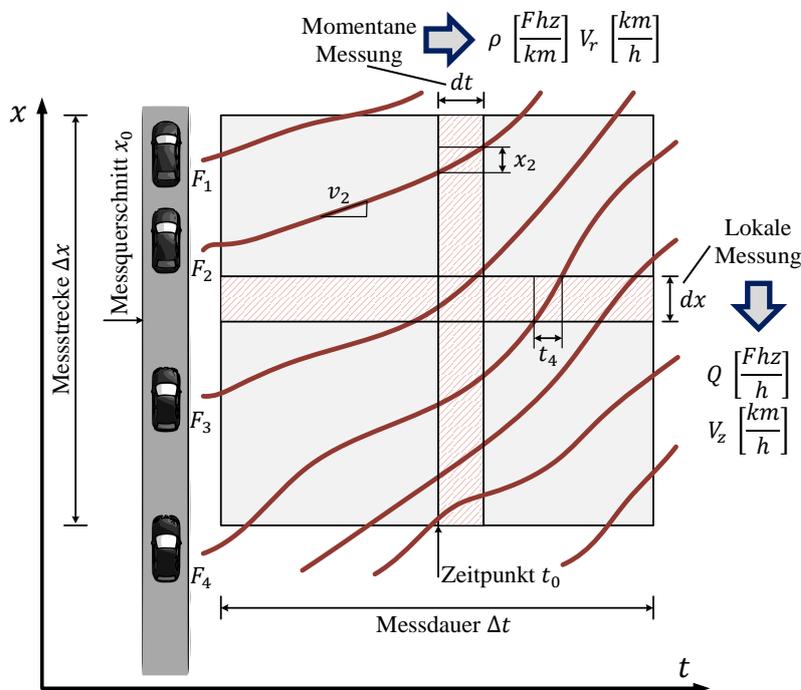


Abbildung 3-2: Bestimmung von Querschnittsdaten aus Messdaten nach [MGC+16],
 V_r : Räumliches Geschwindigkeitsmittel,
 V_z : Zeitliches Geschwindigkeitsmittel

Abbildung 3-2 zeigt die Bestimmung von Querschnittsdaten eines betrachteten Straßensegments. Hierbei wird eine Messstrecke Δx entlang der Straße für eine Messdauer Δt betrachtet (siehe einschließendes Quadrat). Die Fahrzeugbewegungen lassen sich in dieser Darstellung als Wegtrajektorien über der Zeit darstellen, die das erwähnte Quadrat durchqueren. Aus Mittelung der Fahrzeuganzahl und -geschwindigkeiten über die Messstrecke X für eine infinitesimal kurze Zeit dt lassen sich die Verkehrsdichte ρ und das räumliche Geschwindigkeitsmittel V_r als lokale Messung bestimmen. Aus der Mittelung derselben

Werte über der Messdauer Δt für eine infinitesimal kurze Streckenlänge dx lassen sich analog der Verkehrsfluss Q sowie das zeitliche Geschwindigkeitsmittel V_z als momentane Messungen bestimmen. Das räumliche Geschwindigkeitsmittel V_r bezieht sich also auf alle Fahrzeuge, die den Messquerschnitt x_0 in der Messdauer Δt überfahren, das zeitliche Geschwindigkeitsmittel V_z bezieht sich auf alle zum Zeitpunkt t_0 auf dem Streckenabschnitt Δx befindlichen Fahrzeuge.

Mittlere Flussgeschwindigkeit

Die mittlere Flussgeschwindigkeit $V(x, t)$ wird in der Regel als räumliches Mittel (vgl. Abbildung 3-2, vertikale Schraffur) angegeben, d.h. mit welcher mittleren Geschwindigkeit die Fahrzeuge eine Messstelle am Ort x zum Zeitpunkt t passieren. Die Berechnung des arithmetischen Mittels bezieht sich hierbei auf einen bestimmten und fest definierten Streckenabschnitt Δx in der Umgebung von x . Die mittlere Flussgeschwindigkeit ist daher wie folgt definiert:

$$V(x, t) = \underbrace{\bar{v}_i(t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{i=0}^{N(t)-1} v_i(t)}_{\text{mit } x \in \Delta x} \quad (3-1)$$

Hierbei gibt $V(x, t)$ den Mittelwert aller Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten $v_i(t)$ unter der Annahme an, dass sich $N(t)$ Fahrzeuge in dem betrachteten Streckenabschnitt Δx befinden. Die Einheit wird üblicherweise in Kilometern pro Stunde angegeben.

Verkehrsfluss (oder Verkehrsstärke)

Der Verkehrsfluss $Q(x, t)$ gibt die Anzahl $N(t)$ der Fahrzeuge an, die eine Messstelle am Ort x pro definierter Zeiteinheit Δt zum Zeitpunkt t passieren (vgl. vertikale Schraffur in Abbildung 3-2) und ist wie folgt definiert:

$$Q(x, t) = \frac{N(t)}{\Delta t} \quad (3-2)$$

Die Einheit des Verkehrsflusses wird meistens in Fahrzeuge pro Stunde angegeben.

Verkehrsdichte

Die Verkehrsdichte ist ein Maß für die Belegung einer Straße und gibt das Verhältnis zwischen der Anzahl $N(t)$ von Fahrzeugen und einem bestimmten Streckenabschnitt Δx um einen Ort x an, auf dem sich diese Fahrzeuge zum Zeitpunkt t befinden. Die Verkehrsdichte ist daher wie folgt definiert:

$$\rho(x, t) = \frac{N(t)}{\Delta x} \quad (3-3)$$

Die Einheit der Verkehrsdichte wird normalerweise in Fahrzeuge pro Kilometer angegeben. Alternativ kann die Verkehrsdichte auch über das Reziproke des mittleren Abstands \bar{d}_i zwischen Fahrzeugen berechnet werden:

$$\rho(x, t) = \frac{1}{\bar{d}_i(t)} = \frac{N(t)}{\sum_{i=0}^{N(t)-1} d_i(t)} \quad (3-4)$$

Der mittlere Fahrzeugabstand \bar{d}_i ist in diesem Fall als Normierung auf ein Fahrzeug zu verstehen, d.h. er definiert die Streckenlänge einer Straße, die von exakt einem Fahrzeug zum Teil belegt wird.

Belegungsgrad

Da die Verkehrsdichte die Längen der Fahrzeuge nicht berücksichtigt, gibt diese den tatsächlichen Grad der Belegung nicht in jedem Kontext korrekt wieder. Dies begründet sich darin, dass nicht alle Fahrzeuge dieselbe Länge aufweisen, denn ein realer Mischverkehr besteht aus vielen unterschiedlich langen Fahrzeugen (Kleinwagen, LKW, Motorrad, etc.). Fahren auf einer Straße beispielsweise ausschließlich lange LKW, so kann die Verkehrsdichte ρ in der Einheit $[Fhz/km]$ wertmäßig gering sein, obwohl die Straße vollständig belegt ist. Dies kann zu einer falschen Interpretation der Auslastung führen. Aus diesem Grund wird häufig auch der einheitenlose Belegungsgrad $O(x, t)$ verwendet, welcher wie folgt definiert ist:

$$O(x, t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \sum_{i=1}^{N(t)-1} t_{i,out} - t_{i,in}, \quad \{O(x, t) \in \mathbb{R} \mid 0 \leq O(x, t) \leq 1\} \quad (3-5)$$

Der Belegungsgrad $O(x, t)$ gibt für eine Messstelle am Ort x zum Zeitpunkt t die über die Anzahl der Fahrzeuge $N(t)$ gemittelten Zeitlücken $t_{i,out} - t_{i,in}$ als Verhältnis zur Zeitspanne Δt an. Die Zeitlücken beschreiben hierbei die Differenzen zwischen Ausfahrts- und Einfahrtszeitpunkten der Fahrzeuge an der Messstelle. Ein Wert von $O(x, t) = 1$ bedeutet, dass die Zeitlücken gleich der Zeitspanne Δt sind und die Straße damit vollständig (zu 100%) belegt ist, die Fahrzeuge fahren somit lückenlos hintereinander über die Messstelle. Im Umkehrschluss gibt ein Wert von $O(x, t) = 0$ eine leere Straße an (0% belegt).

Hydrodynamische Flussbeziehung (Fundamentalbeziehung)

Zwischen den makroskopischen Größen der mittleren Flussgeschwindigkeit, dem Verkehrsfluss sowie der Verkehrsdichte besteht ein funktionaler Zusammenhang, der sich wie folgt darstellt und als hydrodynamische Flussbeziehung bezeichnet wird:

$$Q(x, t) = \rho(x, t) \cdot V(x, t) \quad (3-6)$$

Abbildung 3-3 zeigt die Zusammenhänge der erläuterten Querschnittsgrößen in Kombination. Eine solche Darstellung wird als *Fundamentaldiagramm* bezeichnet. Es besteht

ein Zusammenhang zwischen allen drei Größen, der an eine Dreitafelprojektion erinnert. In der Farbe Rot ist ein beispielhafter qualitativer Verlauf aufgetragen, in der Farbe Blau sind zusätzlich Messpunkte einer einminütigen Messung der A5-Nord dargestellt.

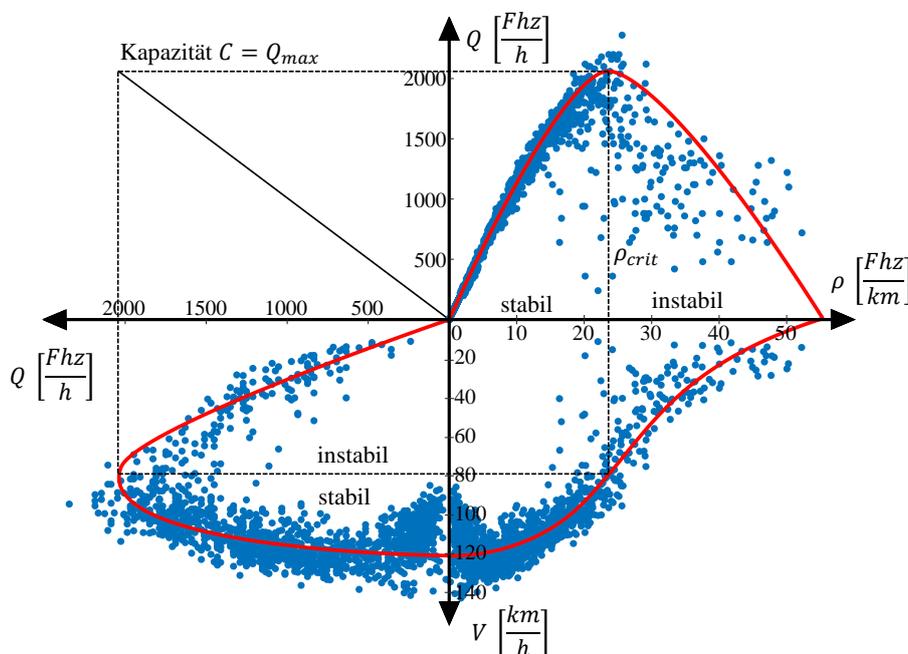


Abbildung 3-3: Qualitativer Verlauf von Querschnittsdaten nach [MGC+16] (rot) und einer einminütigen Messaufnahme der A5-Nord aus [TK10] (blau) in Form eines Fundamentaldiagramms

Es ist zu erkennen, dass zwischen der Verkehrsdichte ρ und dem Verkehrsfluss Q (oben rechts) ein konkaver Zusammenhang mit einem ausgeprägten Maximum existiert. Ist die Verkehrsdichte gering, d.h. es befinden sich wenige Fahrzeuge auf der Straße, kann der Verkehr störungsfrei fließen, daher ist die Streuung der Messwerte gering. Aufgrund der geringen Fahrzeuganzahl ist gleichzeitig der Verkehrsfluss gering. Steigt die Verkehrsdichte an, so steigt auch der Verkehrsfluss, da die Straße nun über eine höhere Fahrzeugzahl verfügt. Jedoch ist eine Abflachung des Verkehrsflusses und die Ausprägung eines Maximums bei der sog. kritischen Verkehrsdichte ρ_{crit} zu erkennen. Bei dieser Verkehrsdichte wird die Kapazität C der Straße erreicht, welche den von der Straße maximal zu bewältigenden Verkehrsfluss Q_{max} definiert. Steigt die Verkehrsdichte über das Maximum hinaus, so nimmt der Verkehrsfluss wieder ab, weil sich nun so viele Fahrzeuge auf der Straße befinden, dass diese vermehrt ins Stocken geraten. Steigt die Verkehrsdichte noch weiter, so erliegt der Verkehrsfluss, da es zum Stau kommt, d.h. die Straße ist mit Fahrzeugen gefüllt (hohe Verkehrsdichte), die jedoch geringe Geschwindigkeiten aufweisen oder stehen (niedriger Verkehrsfluss). Die kritische Verkehrsdichte ρ_{crit} wird daher oft als Grenze zwischen frei fließendem und zäh fließendem Verkehr (gebundener Verkehr) bis hin zum Stau betrachtet. Die getrennten Bereiche werden in diesem Kontext

häufig als „stabil“ oder „instabil“ bezeichnet und sind synonym zum freien und gebundenen Verkehr zu verstehen.

Während der Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss Q und der mittleren Geschwindigkeit V (unten links) ähnlich interpretiert werden kann, ist bei dem Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte ρ und der mittleren Flussgeschwindigkeit V ein anderer Verlauf zu erkennen. Hier existiert mit Ausnahme des Ursprungs kein ausgeprägtes Maximum, vielmehr nimmt die Geschwindigkeit mit steigender Verkehrsdichte ab. Es lässt sich also interpretieren, dass die Fahrzeuge auf einer „leeren“ Straßen (geringe Verkehrsdichte) deutlich schneller unterwegs sind als auf einer „gefüllten“ Straße (hohe Verkehrsdichte). Auffällig ist hier der Wendepunkt um die kritische Verkehrsdichte ρ_{crit} .

3.1 Klassen von Verkehrsmodellen

Die mathematische Abbildung von Verkehr weist, wie ausführlich in [vvV+15] erläutert, eine lange Geschichte auf. Bereits in den Jahren 1934 und 1935 veröffentlichte Bruce Greenshields beispielweise erste Ergebnisse zu Messungen, die Zusammenhänge wie im Fundamentaldiagramm in Abbildung 3-3 aufzeigten ([GTD+34], [GBC+35]) und gilt damit als Pionier in diesem Gebiet. Seit Greenshields haben sich daraufhin im Laufe der Zeit viele weitere Wissenschaftler mit der Modellbildung von Verkehr auf vielschichtige Weisen beschäftigt und so ein breites Spektrum an Verkehrsmodellklassen entwickelt. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der Verkehrsmodellklassen sind in dem Grad der (Modell-)Abstraktion festzustellen. In Abbildung 3-4 ist eine grobe Einteilung von Verkehrsmodellklassen zu sehen.

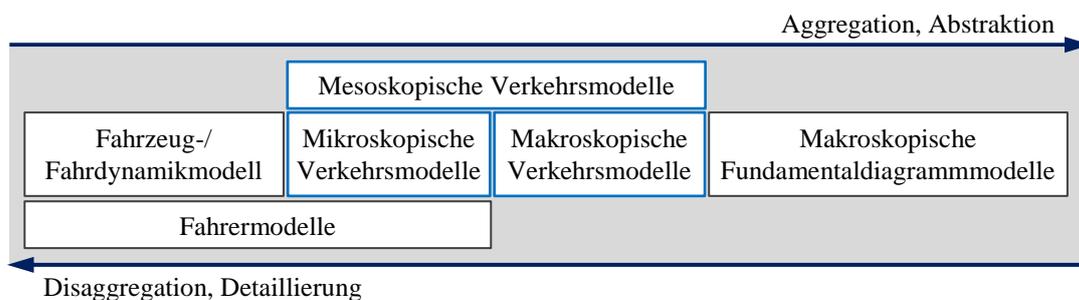


Abbildung 3-4: Unterschiedliche Einteilung von Verkehrsmodellklassen nach Abstraktionsgrad

In der Literatur ist die Einteilung in die drei Klassen mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Verkehrsmodelle die am häufigsten anzutreffende Kategorisierung (vgl. z.B. Übersichten in [Jau10], [Ros13]). Diese werden im Folgenden etwas detaillierter erläutert.

Mikroskopische Verkehrsmodelle

Wird der Verkehr in einer Modellbildung sehr granular, d.h. in Form von Einzelfahrzeugen, betrachtet, so liegt ein sehr detailliertes Modell mit vielen Freiheitsgraden vor. Diese

Gruppe von Verkehrsmodellen wird in seiner Gesamtheit unter dem Oberbegriff mikroskopischer Verkehrsmodelle eingeordnet. Die Detaillierung von mikroskopischen Verkehrsmodellen ist dabei nicht beschränkt und kann auch komplexe Fahrermodelle, welche typische menschliche Verhaltensweisen im Straßenverkehr (aggressive Fahrweise, „Trödeln“, Unaufmerksamkeit usw.) darstellen, umfassen oder auch die Fahrdynamik in Form eines Fahrzeugmodells berücksichtigen¹⁵. In zellulären Automaten wird als Beispiel für ein mikroskopisches Verkehrsmodell die Straße in gleich lange Stücke Δx diskretisiert, welche als Zellen bezeichnet werden (vgl. Abbildung 3-5). Darüber hinaus wird die Zeit in diskrete Schritte Δt eingeteilt. Die Fahrzeuge können sich innerhalb der Modellgültigkeit mit konstanter Geschwindigkeit von einer Zelle zur nächsten bewegen, hierbei kann jede Zelle jedoch nur von maximal einem Fahrzeug belegt werden.

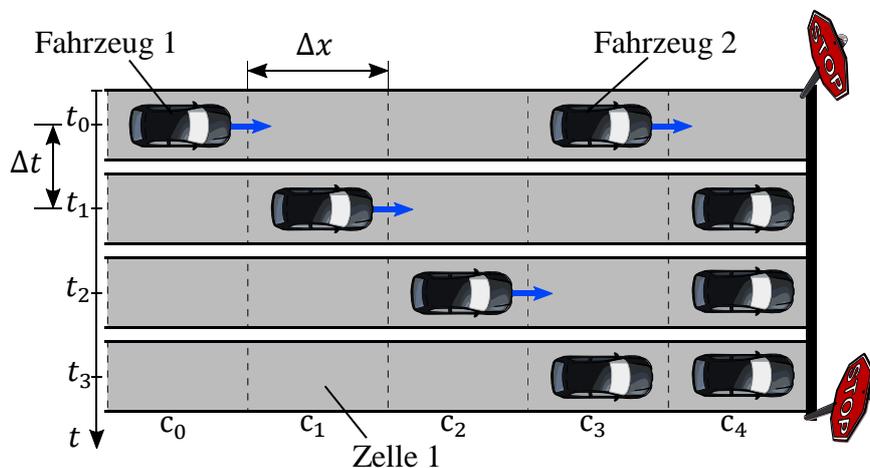


Abbildung 3-5: Ein zellulärer Automat als Beispiel für ein mikroskopisches Verkehrsmodell

Eine weitere Klasse von mikroskopischen Verkehrsmodellen sind Fahrzeugfolgemodelle. Anders als im Ansatz des zellulären Automaten sind üblicherweise der Weg, die Zeit und die Geschwindigkeit (quasi-)kontinuierliche Größen, je nach Modell wird oft auch eine zeitdiskrete Betrachtung vorgenommen. Das Gazis-Herman-Rothery-Modell (GHR-Modell) berechnet z.B. das Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge als Funktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs sowie des Abstands und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem Folgefahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug (vgl. Abbildung 3-6 links) [BM99].

$$a_n(t) = \alpha \cdot v_n^\beta(t) \cdot \frac{\Delta v(t-T)}{\Delta x(t-T)^\gamma} \quad (3-7)$$

¹⁵ Modelle dieser Detaillierungsstufe werden in der Literatur im Kontext der Verkehrsmodellierung häufig auch als *pikoskopische* Modelle bezeichnet

Hier gibt $a_n(t)$ die Beschleunigung und $v_n^\beta(t)$ die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs an. Die Variablen $\Delta v(t - T)$ und $\Delta x(t - T)$ beschreiben die Geschwindigkeitsdifferenz und respektive den Abstand zwischen den Fahrzeugen zu einem vergangenen Zeitpunkt, um die Reaktionszeit eines menschlichen Fahrers zu berücksichtigen. Das Modell kann über die Parameter α , β und γ parametrisiert werden. In Abbildung 3-6 rechts ist ein beispielhafter Verlauf des Abstands und der Geschwindigkeitsdifferenz zweier Fahrzeuge zu sehen, bei dem das Folgefahrzeug mit einem um einen Wunschabstand h_W erweiterten GHR-Fahrzeugfolgemodell (vgl. Gl. (3-7)) zum vorausfahrenden Fahrzeug aufschließt. Je nach Parametrisierung kann es wie im Beispiel zu Schwingungen kommen, die sich als Spirale äußern (im Beispiel ist die Reaktionszeit T wesentlich für den Effekt). Es gibt viele verschiedene Ansätze für Fahrzeugfolgemodelle, die unterschiedliche Strategien verfolgen. So existieren neben dem GHR-Modell weitere Fahrzeugfolgemodelle, die auf relative Größen wie Differenzgeschwindigkeiten reagieren und daher zu den sog. Stimulus-Response-Modellen (Reiz-Reaktion) gezählt werden. Weiter existieren Fahrzeugfolgemodelle in der Klasse der Kollisionsvermeidung (collision avoidance models, kurz: CA) und in der Klasse des Wunschabstands (desired headway models), deren Namensgebung den jeweiligen Ansatz zu erkennen geben. Darüber hinaus setzen sog. psychophysikalische Fahrzeugfolgemodelle auf psychologisch motivierte Ansätze, die beispielsweise die Reaktion aufgrund der visuell wahrnehmbaren Winkeländerung des vorausfahrenden Fahrzeugs berechnen. Außerdem existieren Fahrzeugfolgemodelle mit Fuzzy-Logik sowie mit Ansätzen des maschinellen Lernens (neuronale Netzwerke), um Fahrerverhalten nachzuahmen. Obwohl sich die große Mehrheit der Fahrzeugfolgemodelle auf die Abbildung des Fahrerverhaltens *längs* der Straße konzentrieren, sind diese nicht darauf beschränkt. Es werden ebenso häufig in Kombination zu den zuvor erwähnten Modellen Spurwechselmodelle verwendet, die das Fahrerverhalten *quer* zur Straße abbilden [BM99], [ASY15].

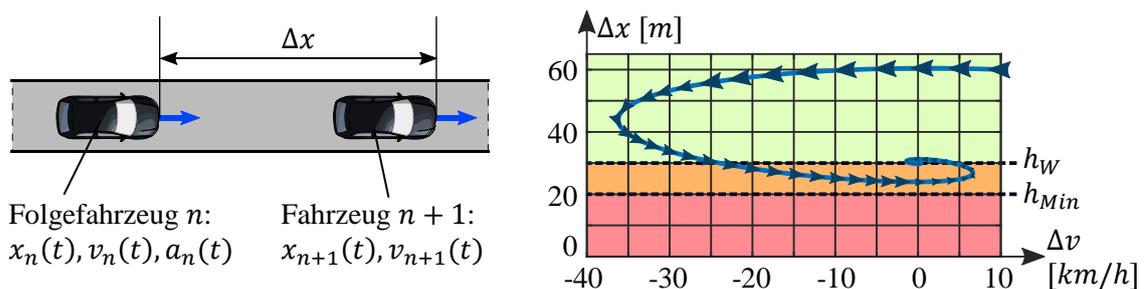


Abbildung 3-6: Links: Relevante Größen im mikroskopischen GHR-Fahrzeugfolgemodell nach [BM99], Rechts: Beispielhafter Verlauf des Abstands und der Geschwindigkeitsdifferenz zweier Fahrzeuge mit angepasstem GHR-Fahrzeugfolgemodell

Makroskopische Verkehrsmodelle

Eine abstraktere Art den Verkehr modelltechnisch abzubilden ist die makroskopische Betrachtungsweise in Form von Verkehrsflüssen, -dichten und mittleren Geschwindigkeiten, wie es bereits bei der Erläuterung von Querschnittsdaten erwähnt wurde. In Analogie

zur Fluidodynamik wird der Verkehr in dieser Modellklasse als ein sich unidirektional bewegender Fluss verstanden, der weitaus weniger Freiheitsgrade besitzt, als dies bei der Betrachtung von Einzelfahrzeugen der Fall ist. Die Modellkomplexität ist also deutlich reduziert und erlaubt es damit, auch sehr weitläufige Verkehrsnetze zu untersuchen. Bei der makroskopischen Modellierung können einerseits statische Modelle wie das Fundamentaldiagramm (vgl. Abbildung 3-3) zum Einsatz kommen. Andererseits können auch dynamische Modelle eingesetzt werden, die besondere Charakteristika wie z.B. sich bewegende Stauwellen, die auch im realen Verkehr vorkommen, abbilden und deren Ursache begründen. Makroskopische Verkehrsmodelle werden im Detail in Kapitel 3.2 vorgestellt. Sie beziehen sich i.d.R. auf ein beschränktes Straßenstück, wobei jedoch auch ein Straßennetz aus mehreren Straßen als ein verkoppeltes System von makroskopischen Verkehrsmodellen beschrieben werden kann. Makroskopische Fundamentaldiagramme betrachten unter bestimmten Voraussetzungen hingegen das aggregierte Verhalten ganzer Straßennetzabschnitte inklusive aller Kreuzungen. Durch diese erweiterte Abstraktion wird die Anzahl der Freiheitsgrade weiter reduziert und Aussagen zum Zustand eines Straßennetzabschnitts (Index *Net*) werden vereinfacht.

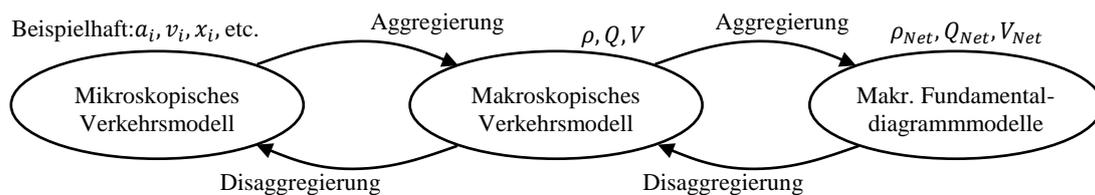


Abbildung 3-7: Aggregation und Disaggregation von Daten in Verkehrsmodellen in Anlehnung an [TK10]

Der Übergang von mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten zu makroskopischen Größen wird als Aggregation (Zusammenfassung) bezeichnet, wie in Abbildung 3-7 dargestellt. Die Ableitung makroskopischer Größen aus mikroskopischen Daten ist, wie bereits gezeigt, durch geeignete Mittelung über eine Messzeit oder einen Streckenabschnitt möglich. Die Rückgewinnung mikroskopischer Daten aus den makroskopischen Größen wird als Disaggregation (Aufschlüsselung) bezeichnet und stellt eine größere Herausforderung dar, da dies nicht eindeutig lösbar ist. Verfügt bspw. jedes mikroskopische Fahrzeug über eine Beschleunigung a_i , eine Geschwindigkeit v_i und einen Fahrweg x_i , so ist nicht eindeutig festzulegen, wie sich diese Größen über der Zeit darstellen, um ein realistisches Fahrverhalten der Fahrzeuge umzusetzen und darüber hinaus kausal zu den makroskopischen Daten zu sein. Soll das Verhalten der Einzelfahrzeuge in einem mikroskopischen Modell derart sein, dass sich die simulierten makroskopischen Querschnittsdaten real gemessenen Querschnittsdaten angleichen, so spricht man von einer Kalibrierung des Verkehrsmodells. Gleiches gilt für makroskopische Verkehrsmodelle, jedoch mit dem Unterschied, dass die Kalibrierung hier weniger aufwändig ist und sich hauptsächlich auf eine Parametrierung bezieht.

Mesoskopische Verkehrsmodelle

Die Lücke zwischen mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsmodellen wird durch die mesoskopischen Verkehrsmodelle geschlossen, die je nach Modell beide Ansätze vereinen. Hierbei wird die Verkehrsdynamik wie bei den makroskopischen Verkehrsmodellen mittels aggregierter Größen beschrieben, jedoch mit dem Vorteil, dass das individuelle Fahrverhalten der Fahrer durch statistische Verteilungsfunktionen beschrieben wird, sodass der Verkehr realistischer modelliert werden kann. In der Gruppe der mesoskopischen Verkehrsmodelle existieren die Abstandsverteilungsmodelle (headway distribution models), Cluster-Modelle und gaskinetische Modelle (GKT-Modelle). Letztere sind die bekanntesten Modelle aus dieser Klasse und beschreiben die Dynamik des Verkehrsflusses in Analogie zur Bewegung einer großen Anzahl von Teilchen in einem Gas. Das GKT-Modell basiert auf einem mikroskopischen Modell, aus dem ein makroskopisches Verkehrsmodell abgeleitet wird und eine von der Verkehrsdichte abhängige Geschwindigkeitsverteilung berücksichtigt. Eine etwas losgelöste Variante für ein mesoskopisches Verkehrsmodell ist das Hybridmodell. Das Hybridmodell enthält verschiedene Modelle (z.B. mikroskopisch und makroskopisch), die jedoch für sich berechnet und über Schnittstellen aneinandergesetzt werden. Beispielsweise können für bestimmte Streckenabschnitte mikroskopische Fahrzeugfolgemodelle eingesetzt werden, um individuelles Fahrerverhalten zu berücksichtigen, während der Rest des Straßennetzes in Form eines makroskopischen Modells beschrieben wird. Solch eine Kopplung ist in Abbildung 3-8 beispielhaft skizziert. Es handelt sich also gewissermaßen um eine Co-Simulation [FSS18], [vvV+15], [TK10].

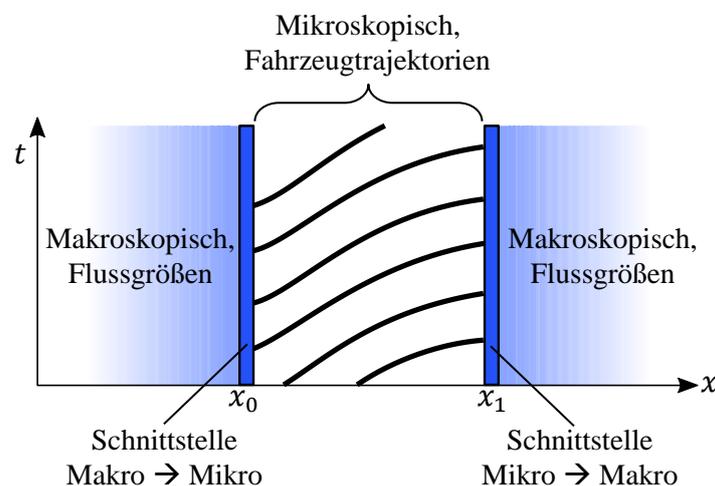


Abbildung 3-8: Beispiel für ein Hybridmodell mit Schnittstellen nach [Kes19]

Da in dieser Arbeit der Fokus auf makroskopischen Verkehrsflussmodellen liegt, werden die mesoskopischen Verkehrsmodelle an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

3.2 Makroskopische Verkehrsflussmodelle

In diesem Unterkapitel werden die Grundlagen zu makroskopischen Verkehrsflussmodellen erläutert. Zunächst werden einige Verkehrseffekte beschrieben, die in solchen Modellen abgebildet werden sollen und mit einem konkreten Beispiel in Form eines Experiments verdeutlicht. Nach der anschließenden Herleitung der Kontinuitätsgleichung für Verkehrsflussmodelle wird kurz auf mathematische Besonderheiten aufmerksam gemacht und statische Zusammenhänge im Verkehrsfluss mittels Fundamentaldiagramm-Modelle erläutert. Anschließend folgen die Erläuterungen zu den zwei großen Klassen der First-Order- sowie die Second-Order-Modelle sowie deren Unterschiede. Zudem werden einige besondere Modellelemente vorgestellt, die zur Abbildung eines Straßennetzes notwendig sind. Es wird außerdem erläutert, inwiefern solche Modelle mathematisch gelöst werden können und wie Stabilität definiert und nachgewiesen werden kann. Da das Feld der makroskopischen Verkehrsflussmodelle zu umfangreich ist, um dies in dieser Arbeit vollumfänglich und in ganzer Tiefe vorzustellen, sind die gezeigten Grundlagen als Übersicht zu verstehen. Weitergehende Informationen sind darüber hinaus in den genannten Quellen und allgemein in der Literatur zu finden.

Makroskopische Verkehrsmodelle haben das Ziel, real vorkommende, makroskopische Verkehrseffekte in Form von Funktionen aggregierter Größen zu beschreiben. Wie zuvor erwähnt, „fließt“ der Fahrzeugstrom bei dieser abstrakten Betrachtung durch das Straßennetz wie, in Analogie dazu, ein Fluid durch ein Rohrsystem. Im Gegensatz zu den gezeigten Querschnittsmessdaten in Abbildung 3-3 (blaue Punkte), die aggregierte Größen der Verkehrsdichte, des Verkehrsflusses und der mittleren Flussgeschwindigkeit ausschließlich an einem diskreten Ort x über einem Zeitmittlungsintervall Δt beschreiben, liegt die Natur der makroskopischen Verkehrsmodelle in der Beschreibung der funktionalen und kontinuierlichen Zusammenhänge. Aus diesem Grund liegen die erwähnten Größen als kontinuierliche Funktionen für jeden beliebigen Ort x zu jeder beliebigen Zeit t vor. Dies ist schematisch in Abbildung 3-9 dargestellt, hier ist die Änderung der Verkehrsdichte als (dreidimensionale) Fläche im Weg-Zeit-Diagramm aufgetragen.

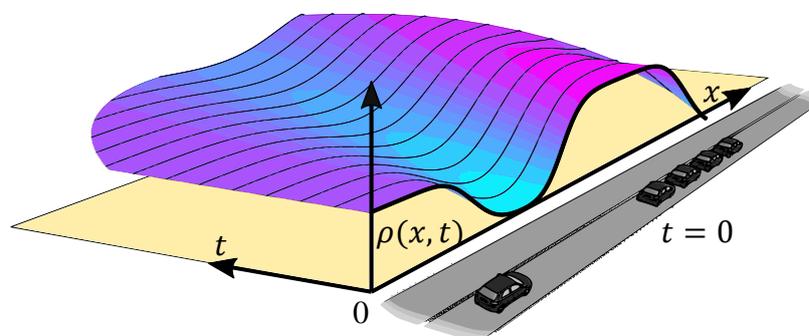


Abbildung 3-9: Veranschaulichung der Verkehrsdichte als kontinuierliche Funktion von Weg und Zeit

Makroskopische Verkehrsflussmodelle beschreiben im einfachsten Fall ein homogenes Straßenstück, welches sich dadurch auszeichnet, dass der Verkehr in ausschließlich einer Richtung betrachtet wird und das betrachtete Stück keine Änderungen bezüglich der Spuren (wie etwa Auf- und Abfahrten) aufweist. Die Länge L des Stücks muss dabei jedoch ausreichend groß sein, um makroskopische Größen ermitteln zu können. Die funktionalen Zusammenhänge der makroskopischen Größen lassen sich dann über die sog. Kontinuitätsgleichung, die auf der Annahme der Erhaltung von Fahrzeugen in dem Straßenstück basiert, herleiten. Auf die Herleitung wird im nächsten Abschnitt detaillierter eingegangen. Ergebnis ist eine nichtlineare, hyperbolische partielle Differentialgleichung. Hierbei resultiert die Nichtlinearität aus den nichtlinearen Zusammenhängen der makroskopischen Größen, wie sie bereits in Abbildung 3-3 zu sehen sind. Insbesondere wird sich im Folgenden noch zeigen, dass dies selbst dann der Fall ist, wenn starke Vereinfachungen für diese Zusammenhänge getroffen werden (Fundamentaldiagramme). Wie sich zeigen wird, hängen die Funktionen der Gleichung im Allgemeinen von zwei Variablen ab (Zeit t und Weg x) und zusätzlich wird nach diesen differenziert, daher liegt eine partielle Differentialgleichung vor. Diese lässt sich zum Grundtyp der hyperbolischen partiellen Differentialgleichungen einordnen.¹⁶

Neben der Kontinuitätsgleichung bestehen makroskopische Verkehrsflussmodelle zudem aus mindestens einer weiteren Gleichung, die den Verkehrsfluss beschreibt, sodass ein für ein solches Modell zu lösendes Gleichungssystem resultiert. Abhängig von der Beschaffenheit der zusätzlichen Gleichungen werden Modelle erster Ordnung (First-Order-Modelle) und Modelle zweiter Ordnung (Second-Order-Modelle) unterschieden. Modelle erster Ordnung enthalten die Vereinfachung, dass der Verkehrsfluss statisch von der Verkehrsdichte abhängt und die Fahrzeugströme instantan die Geschwindigkeit ändern können, d.h. über ein unendlich hohes Beschleunigungsvermögen verfügen. Modelle zweiter Ordnung berücksichtigen eine dynamische Geschwindigkeit, sodass eine weitere dynamische Funktion zum Gleichungssystem hinzukommt, was die Namensgebung erklärt. Die Einsatzmöglichkeiten sowie die Vor- und Nachteile dieser beiden Modellklassen werden in den jeweiligen Unterkapiteln näher erläutert.

Makroskopische Verkehrsflussmodelle erlauben einen vergleichsweise einfachen Einblick in Verkehrseffekte, die auf komplexen Zusammenhängen beruhen. Zu diesen Effekten gehören zum einen sich bewegende Stau-Schockwellen, die mehrfach auftreten und zu sehr abrupten Brems- und Beschleunigungsvorgängen führen können (sog. *Stop-And-Go-Verkehr*). Ein anderer wichtiger Effekt ist der *Capacity Drop* (Verkehrszusammenbruch), der u.a. infolge einer Spurreduzierung, einer Auffahrt oder durch allgemeine Störungen unterschiedlicher Art (z.B. Unaufmerksamkeit der Fahrer etc.) auftreten kann. Durch die Störungen ergibt sich ein lokal zäh fließender Verkehr (ob sich diese Stauung

¹⁶ Für einen allgemeinen Nachweis der Einordnung anhand der Eigenwerte der Koeffizientenmatrix sei hier auf [Ros13] S. 93 ff. verwiesen.

bewegt oder nicht ist dabei unerheblich) mit hoher Verkehrsdichte und geringem Verkehrsfluss (vgl. Abbildung 3-10).

Aus diesem, in der Literatur oft *Bottleneck* genannten, Bereich fließen jedoch weiterhin kontinuierlich Fahrzeuge ab. Der Capacity Drop beschreibt nun, dass der Verkehrsfluss nach einem solchen Bottleneck wesentlich geringer ist als vor dem Bottleneck, obwohl keine Störung mehr vorhanden ist. Es dauert also eine Zeit lang, bis sich der Verkehrsfluss wieder „erholt“ hat.

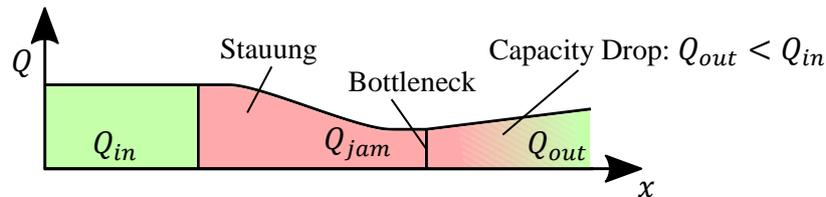


Abbildung 3-10: Capacity Drop an einem Bottleneck nach [IRP+14]

Zur Motivation des Nutzens solcher Modelle soll im Folgenden zunächst ein beispielhafter (komplexer) Verkehrseffekt anhand eines anschaulichen Beispiels erläutert werden, bevor im nächsten Unterkapitel die mathematische Erläuterung selbiger vorgestellt wird. In einem Experiment nach [SFK+08] wurde praktisch untersucht, wie ein sog. „Stau aus dem Nichts“ entstehen kann. Für das Experiment befanden sich auf einem Rundkurs mit 230 m Länge zu Beginn 22 Fahrzeuge, die alle mit derselben Anfangsgeschwindigkeit von 30 km/h gefahren wurden. Zu Beginn des Experiments wurden die Fahrer lediglich dazu instruiert, dem jeweils vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen (s. Abbildung 3-11 links). Wie im Bild zu erkennen ist, besitzen alle Fahrzeuge denselben Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und die Verkehrsdichte (rot) ist folglich über den gesamten Rundkurs konstant.

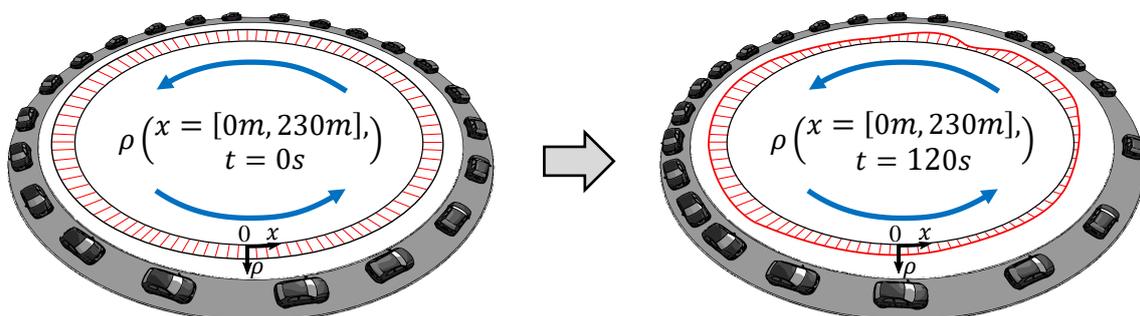


Abbildung 3-11: Kreisfahrversuch nach [SFK+08], trotz gleicher initialer Geschwindigkeit und gleichen Abständen entstehen Dichteschwankungen nach kurzer Zeit (qualitative Verkehrsdichte entlang des Kurses in rot dargestellt)

Nach zwei Minuten ließ das Experiment bereits erkennen, dass es durch unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsvorgänge und unterschiedlichen Reaktionszeiten (kurz: unterschiedliche Fahrcharakteristika) der Fahrer dazu kommt, dass sich die anfangs ausgeglichene Verteilung der Fahrzeuge zu einer Verteilung von dichterem Verkehr und Abschnitten mit sehr wenig Verkehr gewandelt hat (s. Abbildung 3-11 rechts). Überdies entstand auch die Notwendigkeit für einzelne Fahrer, teilweise bis zum Stillstand zu bremsen, sodass es einen Stauungspunkt gab, der entgegengesetzt der Fahrtrichtung wandert. In Abbildung 3-12 sind die Einzeltrajektorien der im Experiment befindlichen Fahrzeuge dargestellt. Es ist sehr gut zu erkennen, wie sich die Staufront mit einer Geschwindigkeit ω von ca. 20 km/h entgegen des Fahrzeugstroms bewegt.

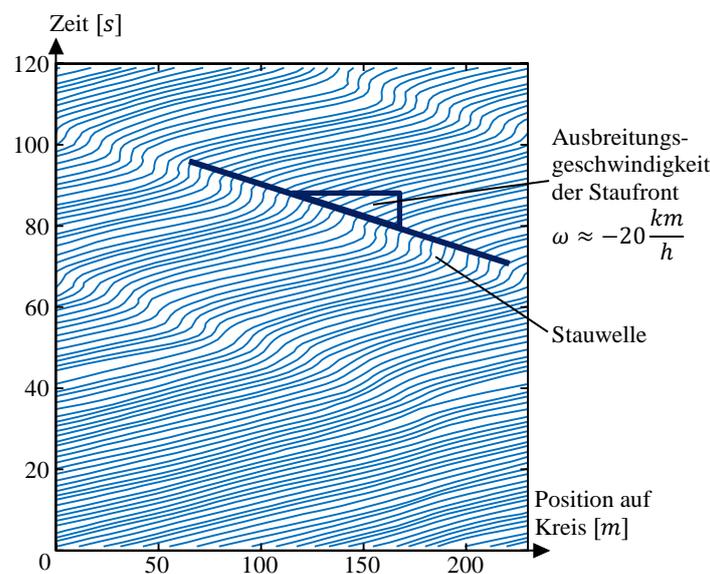


Abbildung 3-12: Ausbreitung der Staufront anhand der Fahrzeugtrajektorien im Kreisfahrversuch nach [SFK+08]

Die wandernde Staufront wird in der Fachliteratur häufig als Schockwelle bezeichnet, welche vereinfacht als eine sich bewegende Welle mit sprunghafter Verkehrsdichteänderung angesehen werden kann. Dieser und weitere Effekte lassen sich mittels makroskopischer Verkehrsflussmodelle untersuchen und helfen dabei, sowohl deren Entstehung nachzuvollziehen als auch geeignete Maßnahmen daraus abzuleiten und ggf. modellbasiert zu untersuchen.

Kontinuitätsgleichung in Verkehrsflussmodellen

Aus der Kontinuitätsgleichung ergeben sich die charakteristischen partiellen Differentialgleichungen, die zur Modellbildung von makroskopischem Verkehr herangezogen werden. Die Herleitung erfolgt in Anlehnung an [Kes19], die Literatur bietet jedoch weitere Herleitungen mit anderen Ansätzen, daher sei hier als Beispiel zu diesem Thema noch auf [Ros13] und [TK10] verwiesen.

Zum besseren Verständnis werden zunächst exemplarische Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit-Diagramm (vgl. Abbildung 3-13) betrachtet. Wird ein hinreichend kleiner Streckenabschnitt Δx für eine hinreichend kurze Zeitspanne Δt betrachtet, so lässt sich festlegen, dass die Anzahl der Fahrzeuge N innerhalb dieser Fläche (violett) konstant ist. Dies bedeutet in Konsequenz, dass Fahrzeuge nicht verschwinden oder aus dem Nichts entstehen können.

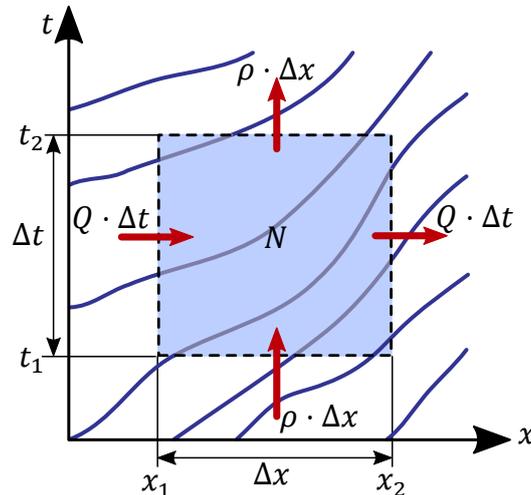


Abbildung 3-13: Fahrzeugtrajektorien zur Herleitung der Kontinuitätsgleichung nach [Kes19]

Die betrachtete Fläche besitzt nun zwei Eingangsverkehrsflüsse sowie zwei Ausgangsverkehrsflüsse (links, unten bzw.; rechts, oben). Es ist erkennbar, dass die Eingangs- und Ausgangsflüsse in Summe identisch sein müssen, um der Forderung nach Erhaltung gerecht zu werden. Gleichung (3-8) beschreibt diese Forderung formal:

$$\underbrace{\int_{t_1}^{t_2} Q(x_1, t) dt}_{\text{Eingangsfluss von links}} + \underbrace{\int_{x_1}^{x_2} \rho(x, t_1) dx}_{\text{Eingangsfluss von unten}} = \underbrace{\int_{t_1}^{t_2} Q(x_2, t) dt}_{\text{Ausgangsfluss nach rechts}} + \underbrace{\int_{t_1}^{t_2} \rho(x, t_2) dx}_{\text{Ausgangsfluss nach oben}} \quad (3-8)$$

mit $Q, \rho, N = \text{const.}$

$$x_2 = x_1 + \Delta x \quad ; \quad t_2 = t_1 + \Delta t \quad (3-9)$$

Werden die Gleichungen (3-9) für sehr kleine Wegdifferenzen Δx und für sehr kleine Zeitdifferenzen Δt betrachtet, so lassen sich diese statt durch Integration wie folgt als Multiplikation darstellen:

$$(\rho(x, t_1) - \rho(x, t_1 + \Delta t)) \cdot \Delta x = (Q(x_1 + \Delta x, t) - Q(x_1, t)) \cdot \Delta t \quad (3-10)$$

$$\Rightarrow -\frac{\rho(x, t_1 + \Delta t) - \rho(x, t_1)}{\Delta t} = \frac{Q(x_1 + \Delta x, t) - Q(x_1, t)}{\Delta x} \quad (3-11)$$

$$\Rightarrow \frac{\rho(x, t_1 + \Delta t) - \rho(x, t_1)}{\Delta t} + \frac{Q(x_1 + \Delta x, t) - Q(x_1, t)}{\Delta x} = 0 \quad (3-12)$$

Mit $\Delta x, \Delta t \rightarrow 0$ folgt die differentielle Darstellung für infinitesimal kleine Wege und Zeiten:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\rho(x, t_1 + \Delta t) - \rho(x, t_1)}{\Delta t} = \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} \quad (3-13)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{Q(x_1 + \Delta x, t) - Q(x_1, t)}{\Delta x} = \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} \quad (3-14)$$

Aus Gleichung (3-12), (3-13) und (3-14) folgt die Kontinuitätsgleichung für ein homogenes Straßenstück:

$$\Rightarrow \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (3-15)$$

Die Erhaltungsgleichung (3-15) stellt jedoch lediglich einen von zwei Teilen eines makroskopischen Verkehrsmodells dar. Zur Beschreibung bedarf es noch einer Definition der Funktion $Q(x, t)$ für den Verkehrsfluss. Abhängig vom Grad des Verkehrsflussmodells ergeben sich zwei mögliche Modelle.

$$\text{Allgemeines Second-Order-Modell: } \begin{cases} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \\ Q(x, t) = \rho(x, t) \cdot V(x, t) \\ V(x, t) = f(A(x, t), \dots) \end{cases} \quad (3-16)$$

Gleichung (3-16) zeigt den allgemeinen Fall zweiter Ordnung, d.h. der Verkehrsfluss $Q(x, t)$ wird als Produkt der Verkehrsdichte und der mittleren Flussgeschwindigkeit berechnet, wie es die hydrodynamische Flussbeziehung in Gleichung (3-6) beschreibt. Da

die Geschwindigkeit hierbei über eine eigene Dynamik verfügt, wird diese als weitere Gleichung hinzugezogen. Die Geschwindigkeitsfunktion kann in diesem Falle von unterschiedlichen weiteren Variablen und Funktionen abhängig sein, bspw. von der konvektiven Beschleunigung $A(x, t)$. Solche Second-Order-Modelle werden im späteren Verlauf des Kapitels erneut aufgegriffen und detaillierter erläutert.

Wird der Verkehrsfluss $Q(x, t)$ jedoch vereinfacht durch eine zunächst nicht näher erläuterte Funktion $Q_e(\rho)$ der Verkehrsdichte beschrieben (vgl. Gleichung (3-17)), so liegt ein sog. First-Order-Modell vor, welches mit zwei Gleichungen vollständig beschrieben ist.

$$\begin{array}{l} \text{Allgemeines} \\ \text{First-Order-Modell:} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \\ Q(x, t) = Q_e(\rho) \end{array} \right. \quad (3-17)$$

Insbesondere kann hierbei erwähnt werden, dass sich alle makroskopischen Verkehrsflussmodelle (unabhängig davon, ob First-Order oder Second-Order) lediglich in der Modellierung der Geschwindigkeit bzw. des Verkehrsflusses unterscheiden [TK10].

Anfangswertproblem makroskopischer Verkehrsflussmodelle

Zur vollständigen Beschreibung makroskopischer Verkehrsflussmodelle in Form von partiellen Differentialgleichungen muss zusätzlich der Initialzustand der Dichteverteilung $\rho_0 = \rho(x, t = t_0)$ für das betrachtete Straßenstück definiert werden. In dieser Modellklasse können hierbei Anfangswertprobleme besonderer Art auftreten, wenn der Anfangswert nicht durch eine stetig differenzierbare Funktion $\rho(x, t_0)$ beschrieben wird, sondern alle Anfangswerte mit Ausnahme einer Knickstelle konstant sind (vgl. Abbildung 3-14). In diesem Fall liegt ein sog. Riemann-Problem vor.

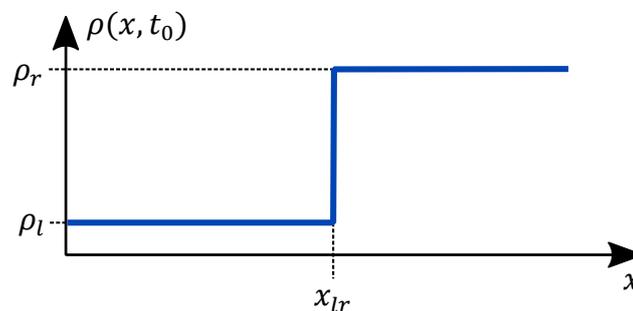


Abbildung 3-14: Beispiel für ein Riemann-Problem anhand einer Knickstelle im Anfangswert

Diese Besonderheit kommt üblicherweise in Systemen hyperbolischer partieller Differentialgleichungen vor und ist ursächlich dafür, dass bestimmte Effekte wie Schockwellen überhaupt mathematisch beschrieben werden können, wie sich im Folgenden noch zeigen wird. Die Erläuterungen zum Riemann-Problem werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt, zur Vollständigkeit soll jedoch auf entsprechende Literatur [Tay11], [Eva10], [PAO92] verwiesen sein, die dies thematisiert und insbesondere auf [KLd19] mit Fokus auf das Riemann-Problem in Verkehrsflussmodellen.

Soll nun also beispielhaft ein First-Order-Modell, wie in Gleichung (3-17) gezeigt, vollständig und eindeutig beschrieben werden, so sieht die Definition unter Berücksichtigung der Initialbedingung wie folgt aus:

$$\begin{array}{l} \text{Allgemeines} \\ \text{First-Order-Modell} \\ \text{mit Initialbedingung:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \\ Q(x, t) = Q_e(\rho) \\ \rho(x, t = 0) = \begin{cases} \rho_l & x < x_{lr} \\ \rho_r & x \geq x_{lr} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3-18)$$

Je nach Wahl von ρ_l und ρ_r ist zu erkennen, dass eine Knickstelle an der Stelle x_{lr} existiert. Dies könnte der Fall sein, wenn z.B. ein freier Verkehrsfluss auf einen gestauten Verkehrsfluss stößt. Die Bedeutung eines solchen Aufeinandertreffens wird im nächsten Unterkapitel erläutert. Auf die Lösung von First-Order- sowie Second-Order-Modellen wird zudem näher in Kapitel 3.2.2 eingegangen.

Fundamentaldiagramme des Verkehrsflusses als Funktionen

Fundamentaldiagramme wurden bereits eingangs des Kapitels anhand Abbildung 3-3 erläutert und stellen die statischen Zusammenhänge von makroskopischen Querschnittsdaten dar. In diesem Kontext ist der statische Zusammenhang (ein Punkt in dem Fundamentaldiagramm) als ein Zustand stationären Verkehrs ohne Änderung des Flusses zu betrachten. Dieser Zustand in der Literatur oft als Equilibrium bezeichnet¹⁷. Bevor nun First-Order- und Second-Order-Modelle näher erläutert werden, soll eine kurze Übersicht zur Abbildung dieser Zusammenhänge gegeben werden, da diese im Weiteren von großer Bedeutung sind.

¹⁷ Aus diesem Grund besitzt auch die Funktion des Verkehrsflusses $Q_e(x, t)$ den Index „e“ in Gleichungen (3-17) und (3-18)

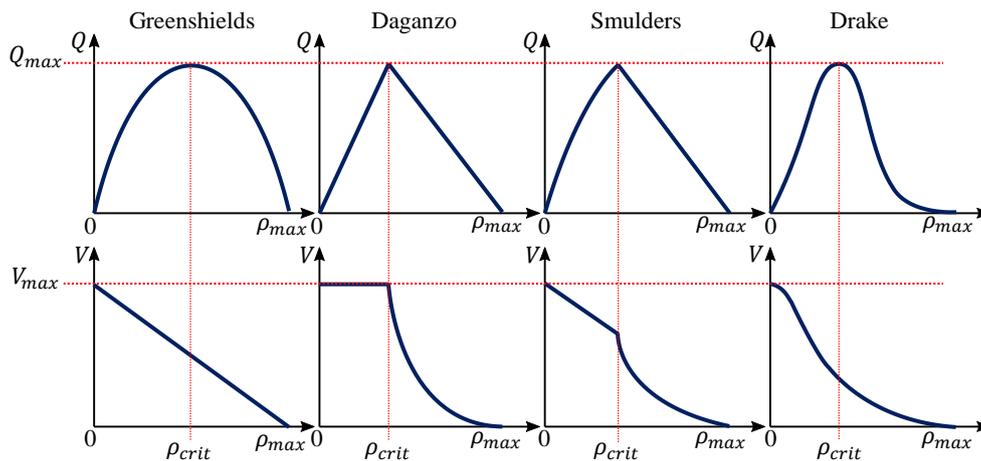


Abbildung 3-15: Übersicht verschiedener Fundamentaldiagramm-Modelle nach [vvV+15] mit verschiedenen Ansätzen

Fundamentaldiagramme finden im Rahmen makroskopischer Verkehrsflussmodelle Anwendung in Form von Approximationsfunktionen realer Messdaten, sodass der Zusammenhang analytisch berechnet werden kann. In [vvV+15] zeigen die Autoren eine Übersicht verschiedener Ansätze, um den qualitativen Verlauf der Zusammenhänge funktional abzubilden (vgl. Abbildung 3-15).

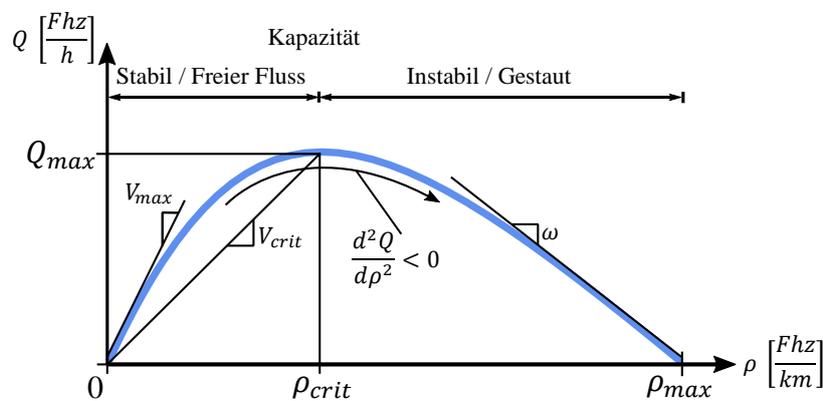


Abbildung 3-16: Qualitativer Verlauf von gängigen Verkehrsdichte-Verkehrsfluss-Diagrammen nach [vvV+15]

Die verschiedenen Ansätze unterscheiden sich hauptsächlich in der Komplexität der Approximationsfunktion, weisen jedoch die gleichen Charakteristiken auf, die in Abbildung 3-16 dargestellt sind. So ist zu erkennen, dass die Zusammenhänge zwischen Verkehrsdichte und -fluss (obere Zeile in Abbildung 3-15) in allen Ansätzen konkaver Natur sind, während die Zusammenhänge der Verkehrsdichte und der mittleren Fluggeschwindigkeit (untere Zeile in Abbildung 3-15) stets eine fallende Charakteristik aufweisen. Fundamentaldiagramme erlauben es, einige weitere verkehrsrelevante Größen zu ermitteln,

die zugleich zur Parametrierung eingesetzt werden können. So lässt sich im Verkehrs-dichte-Verkehrsfluss-Diagramm aus der Steigung im Ursprung die Maximalgeschwindigkeit V_{max} , in der Sekantensteigung zwischen Ursprung und dem Maximum des Verkehrsflusses bei ρ_{crit} die kritische mittlere Flussgeschwindigkeit V_{crit} sowie in der Steigung an der maximalen Verkehrsdichte ρ_{max} die Ausbreitungsgeschwindigkeit ω der Staufront ablesen. Wie schon in Abbildung 3-3 gezeigt, kann der Verkehr außerdem anhand der Verkehrsdichte in den freien bzw. stabilen Fluss sowie den gestauten bzw. instabilen Fluss unterschieden werden.

Die Definition des Fundamentaldiagramms nach Greenshields (vgl. Abbildung 3-15 ganz links) lässt sich zum Beispiel mit nur zwei Parametern beschreiben (ρ_{max} , V_{max}) und lautet wie folgt:

$$V_e(\rho) = V_{max} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) \tag{3-19}$$

$$Q_e(\rho) = \rho \cdot V(\rho) = -\left(\frac{V_{max}}{\rho_{max}}\right) \cdot \rho^2 + V_{max} \cdot \rho \tag{3-20}$$

Durch den quadratischen Ansatz und der dadurch resultierenden Symmetrie im Verkehrs-dichte-Verkehrsfluss-Diagramm ist es offensichtlich, dass $V_{max} = \omega$ sowie $\rho_{crit} = \frac{\rho_{max}}{2}$ gilt.

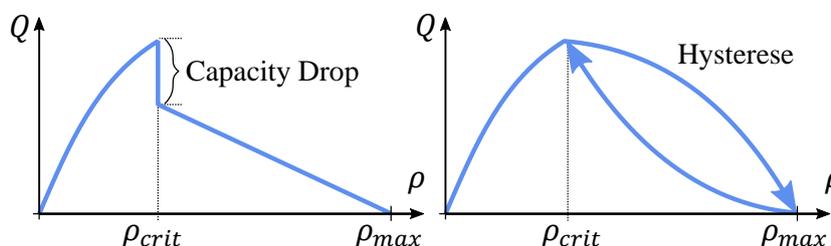


Abbildung 3-17: Abbildung von Verkehrseffekten (Capacity Drop, Hysterese) im Fundamentaldiagramm in Anlehnung an [vvV+15]

Werden zusätzliche Fallunterscheidungen in die Gleichungen integriert, können zudem Verkehrseffekte in vereinfachter Form integriert werden. In Abbildung 3-17 ist zum Beispiel in qualitativer Weise gezeigt, wie sich die Effekte des Capacity Drops und einer Hysterese in Fundamentaldiagrammen darstellen lassen. Die Gleichungen der Fundamentaldiagramme werden durch derartige Sonderfälle offensichtlich komplexer, jedoch können auch diese Erweiterungen die benannten Effekte nur in reduzierter Weise nachbilden.

First-Order-Modelle

First-Order-Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass die Geschwindigkeit nicht über eine eigene Dynamik verfügt, sondern statisch aus einem Fundamentaldiagramm berechnet

wird. Verschiedene First-Order-Modelle unterscheiden sich daher hauptsächlich im verwendeten Fundamentaldiagramm. Das Fundamentaldiagramm beschreibt folglich die Transition zwischen stationären Verkehrszuständen (Equilibriumzuständen).

Das älteste und bekannteste First-Order-Modell ist das sog. LWR¹⁸-Modell, welches in diesem Abschnitt als exemplarisches Beispiel für die Erläuterung herangezogen und häufig als Bezeichnung der gesamten Familie der First-Order-Modelle verwendet wird [LW55]. Im LWR-Modell wird zur Berechnung des Verkehrsflusses das zuvor erwähnte Greenshields-Fundamentaldiagramm verwendet. In Abbildung 3-18 links ist eine solche Transition zwischen zwei stationären Verkehrszuständen anhand des qualitativen Greenshields-Fundamentaldiagramms zu sehen.

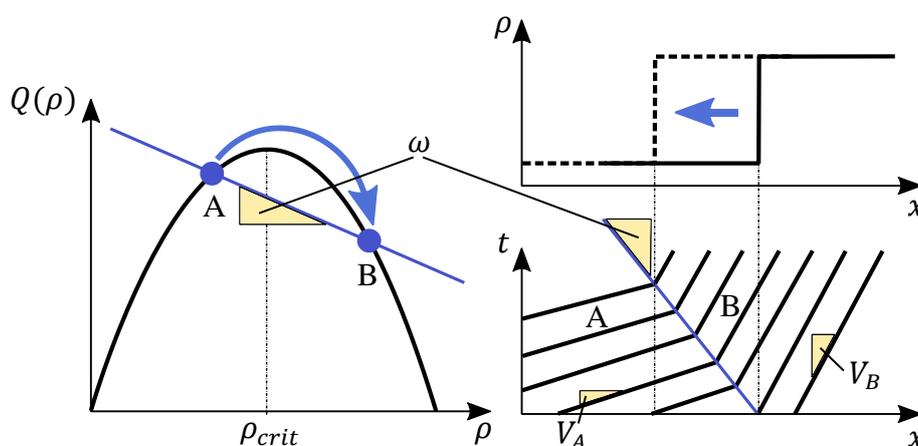


Abbildung 3-18: Entstehung und Ausbreitung einer Dichte-Schockwelle bei Übergang in einen anderen Equilibriumzustand (nach [KAW+08], [KM10])

Zunächst befinde sich der Verkehr im stationären Zustand A mit einer Verkehrsdichte etwas unterhalb der kritischen Verkehrsdichte der Kapazitätsgrenze (stabiler Fluss) und geht dann in den Zustand B mit erhöhter Verkehrsdichte (instabiler Fluss) über. Rechts unten sind exemplarische Einzelfahrzeugtrajektorien, die dem stationären Fluss entsprechen, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Fahrzeuge im Bereich A mit einer höheren Geschwindigkeit (V_A im Diagramm) fahren, als dies die Fahrzeuge im Bereich B tun und es darüber hinaus eine Trennlinie zwischen beiden Bereichen gibt. Die Trennlinie ist als Grenze einer instantanen Dichteänderung zu verstehen, wie es oben rechts in Abbildung 3-18 abgebildet ist und wird üblicherweise als *Schockwelle* bezeichnet, die zuvor mit dem Begriff des Riemann-Problems erläutert wurde (siehe Abbildung 3-14). Da im LWR-Modell durch die statischen Zusammenhänge des Fundamentaldiagramms eine feste Geschwindigkeit für eine vorherrschende Verkehrsdichte berechnet wird, adaptieren die Fahrzeuge beim Betreten des Bereichs B infolge ihre Geschwindigkeit ebenso instantan. Neben diesen Punkten ist zu erkennen, dass die Schockwelle nicht an einem festen Ort x

¹⁸ Lighthill-Witham-Richard-Modell

verharrt, sondern entgegen der Fahrtrichtung mit der konstanten Geschwindigkeit ω wandert. Die Ausbreitungsrichtung sowie die Geschwindigkeit der Schockwelle hängen hierbei von der Art des Übergangs zwischen den Zuständen ab. Das gezeigte Szenario kann sich bildhaft aus der Sicht eines Fahrers vorgestellt werden: Ist ein Fahrer im Bereich A mit einer konstanten Geschwindigkeit V_A unterwegs, so bewegt sich die Schockwelle (Staufont) mit den langsamer fahrenden Fahrzeugen (V_B) auf diesen zu. Sobald der Fahrer in den Bereich B einfährt, verringert dieser seine Geschwindigkeit entsprechend der vorherrschenden Verkehrsdichte verzögerungsfrei.

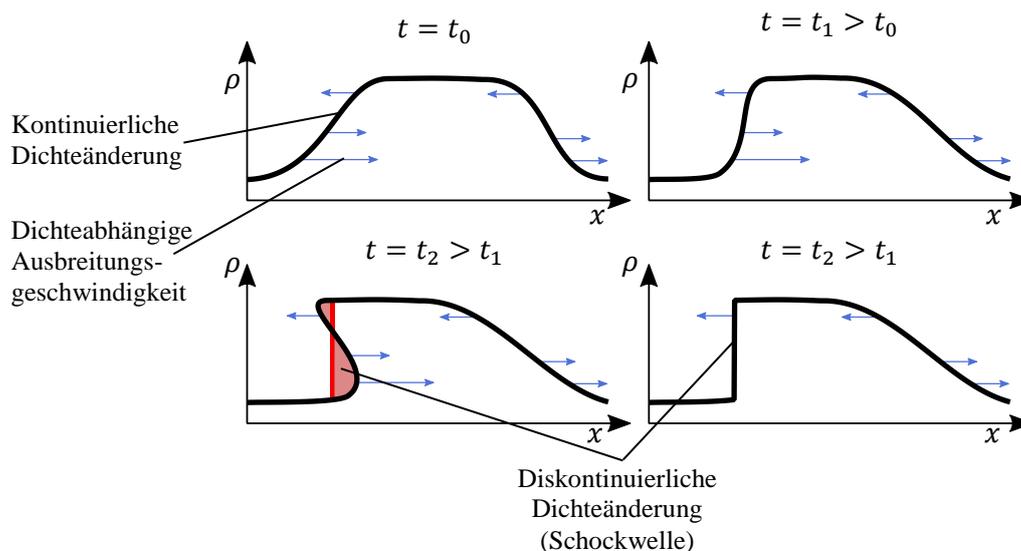


Abbildung 3-19: Übergang einer kontinuierlichen Dichteänderung zu einer Diskontinuität nach [TK10] und [Ros13]

Im LWR-Modell können solche Schockwellen nicht nur durch eine explizite Anfangswertdefinition entstehen, sondern sich ebenso aus kontinuierlichen Dichteschwankungen ergeben, wie dies in Abbildung 3-19 dargestellt ist. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Dichtewellen ist hierbei abhängig von der lokal vorherrschenden Verkehrsdichte [TK10]. Dies hat zur Folge, dass sich Dichtewellen in unterschiedliche Richtungen ausbreiten können (s. t_0 in Abbildung 3-19 oben links). Während sich die Dichtewelle für eine hohe Dichte lokal nach links bewegt, bewegt sich die Dichtewelle für eine geringe Dichte lokal nach rechts (t_1 in Abbildung 3-19). Durch diesen Effekt können sich Überlappungen ausbilden, sodass also Orte x existieren, an denen keine eindeutige Verkehrsdichte mehr herrscht (s. rote Fläche bei t_2) und die Steigung $\partial\rho/\partial x$ ins Unendliche wächst. Dieser Umstand ist physikalisch unsinnig und spiegelt die Realität nicht korrekt wider. Als Konsequenz bildet sich an dieser Stelle daher eine Schockwelle in Form einer wandernden, nicht stetig differenzierbaren Front aus.

Beim LWR-Modell sind prinzipiell zwei mögliche Dichteausbreitungen möglich: Treffen zwei Dichteregionen aufeinander, wie zuvor erläutert, so resultiert dies im LWR-Modell immer in einer Schockwelle. Abbildung 3-20 zeigt zum Verständnis erneut die Entstehung einer Schockwelle für zwei Dichtebereiche und ihre Ausbreitungen (blaue und rote

Linien). Es ist zu erkennen, dass die Dichteausbreitungen aufeinander zuwandern (d.h. hier trifft freier Verkehr auf dichten Verkehr). Es bildet sich eine Überschneidung (dunkelblau) in Form einer Schockwelle aus, die als eindeutige Lösung für das anfangs erwähnte Riemann-Problem mit der Initialbedingung $\rho_l < \rho_r$ (vgl. Gleichung (3-18)) gesehen werden kann.

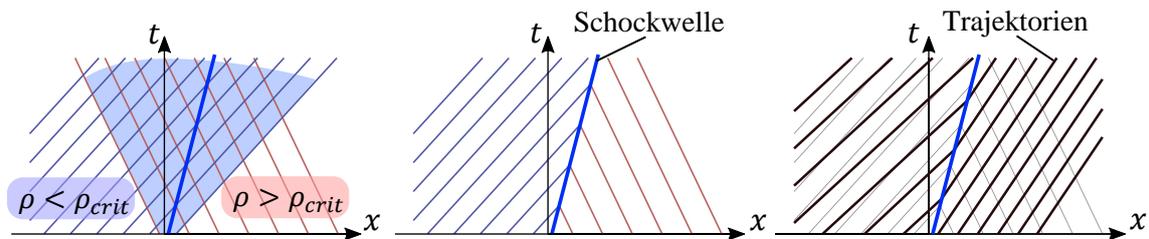


Abbildung 3-20: Aufeinandertreffen zweier sich bewegender Dichteausbreitungen mit Ausprägung einer Schockwelle nach [Kes19]

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ω einer Schockwelle lässt sich im LWR-Modell aus dem Differenzquotienten zweier stationäre Zustände, die aufeinandertreffen, wie im Folgenden berechnen:

$$\omega = \frac{Q_e(\rho_2) - Q_e(\rho_1)}{\rho_2 - \rho_1} \quad (3-21)$$

Eine zweite Möglichkeit sind sog. Verdünnungswellen (*Rarefaction waves*), die auftreten, wenn sich zwei Dichteausbreitungen voneinander entfernen, wie dies in Abbildung 3-21 dargestellt ist. In diesem Fall gilt für die Initialbedingung in Gleichung (3-18) $\rho_l > \rho_r$. Ein solche Verdünnung kommt häufig dann vor, wenn sich wartender Verkehr wieder in Bewegung setzt, z.B., wenn an einer Lichtsignalanlage wieder Grün gegeben wird. Die Fahrzeuge haben in diesem Fall freie Fahrt und verlassen zügig das dichte Gebiet. Anders als im Fall der Schockwelle bildet sich ein Übergangsbereich, d.h. der diskontinuierliche Dichteübergang wie in Abbildung 3-19 unten rechts wird entzerrt und löst sich mit der Zeit auf. Entsprechend existiert initial eine Knickstelle, die jedoch mit der Zeit stetig wird, wie es in den Trajektorien in Abbildung 3-21 rechts zu sehen ist.

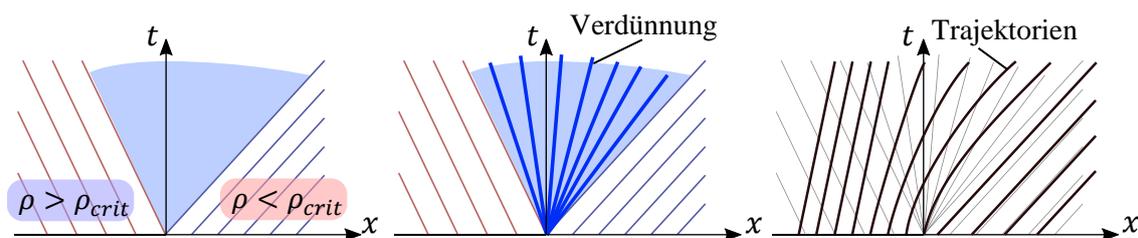


Abbildung 3-21: Ausprägung und Ausbreitung einer Verdünnungswelle zwischen zwei auseinanderlaufenden Dichteausbreitungen nach [Kes19]

Abschließend ist in Abbildung 3-22 eine Lösung für ein LWR-Modell mit möglichen Fahrzeugtrajektorien dargestellt. Zu Beginn ($t = 0$) liegt eine ungleiche Verteilung der Verkehrsdichte vor, so ist diese am Anfang des Streckenabschnitts bis ca. 200 m sehr hoch. Danach folgt eine sehr niedrige initiale Verkehrsdichte bis ca. 500m gefolgt von einer leicht erhöhten initialen Verkehrsdichte. Aus diesem Grund entsteht zum einen bei etwa 200 m eine Verdünnung (1), aus der die Fahrzeuge beschleunigen. Bei ca. 500 m ist eine Schockwelle (2) zu erkennen, die aus der Ursache resultiert, dass hier der Verkehrsfluss auf vorausfahrenden, dichteren Verkehr mit geringerer Geschwindigkeit trifft. Darüber hinaus sind am Ende des Streckenabschnitts noch weitere Schockwellen zu sehen, so trifft das Gebiet G_1 auf ein weitaus dichteres Gebiet G_2 mit zähfließendem Verkehr, welches wiederum auf Gebiet G_3 trifft, in dem die Fahrzeuge im Stau stehen (zu erkennen an den vertikalen Trajektorien). In Gebiet G_4 kommt der Verkehr wieder langsam in Bewegung, allerdings herrscht auch hier eine sehr hohe Verkehrsdichte. Es ist zu erkennen, dass einige Schockwellen, wie bei (2), in Flussrichtung wandern, während sich andere entgegen des Verkehrsflusses bewegen, wie z.B. von Gebiet G_4 . Auch sind die unrealistischen instantanen Geschwindigkeitsanpassungen in den Fahrzeugtrajektorien bei den Schockwellenfronten anhand der Knickstellen erkennbar.

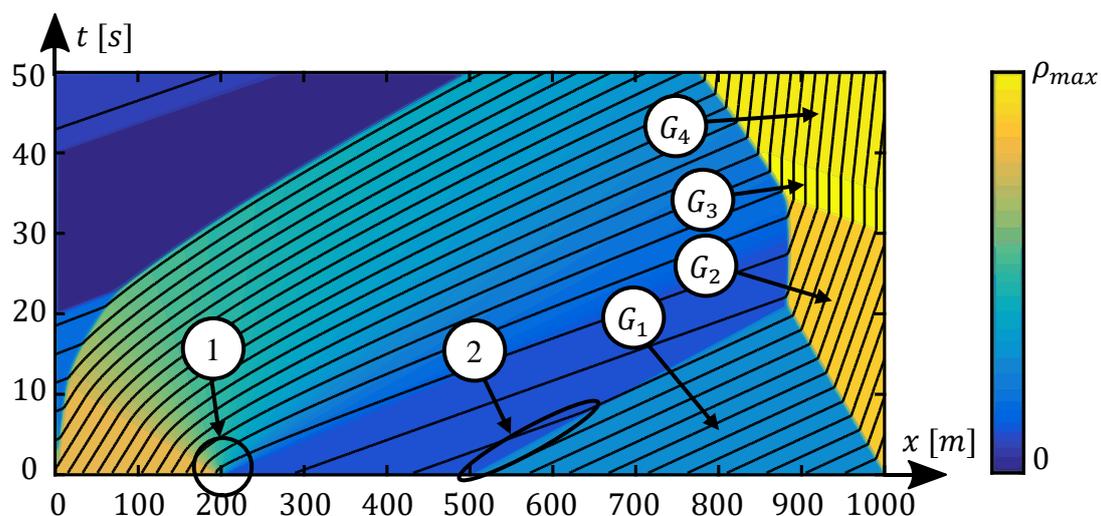


Abbildung 3-22: Beispielhafte Lösung für ein LWR-Modell mit einer Verdünnungswelle und mehreren Schockwellen nach [MDC+11]

Gültigkeit von First-Order-Modellen

Bevor im nächsten Unterkapitel die Second-Order-Modelle vorgestellt werden, sollen zunächst noch einige Nachteile der First-Order-Modelle bezüglich der Genauigkeit der Abbildung von realem Verkehr sowie deren Gültigkeit geklärt werden:

- Die größte Vereinfachung ist das unbeschränkte Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge. Dies führt zu unrealistischen Lösungen, die einige Verkehrseffekte

nicht abbilden können. Dies zeigt sich auch darin, dass real auftretende Schockwellen keine Knickstellen, sondern glatte Übergänge besitzen [Ros13].

- Der statische Zusammenhang im Fundamentaldiagramm widerspricht realen Messungen, die eine Verteilung aufweisen (vgl. blaue Punkte in Abbildung 3-3). Außerdem wird unterstellt, dass sich menschliche Fahrer gleich verhalten (homogen), jedoch ist dies nicht der Fall. So existiert z.B. nicht nur eine Geschwindigkeit zu einem Verkehrsdichtewert, sondern vielmehr eine lokale Geschwindigkeitsverteilung über den Fahrzeugen. Diese abhängig von den Verhaltensweisen der Fahrer, die sich zudem mit der Zeit ändern können [Kes19].
- First-Order-Modelle besitzen aufgrund der o.g. Punkte immer Schockwellen mit konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit und Amplitude. Sie sind nicht in der Lage, Hystereseeffekte wie den Capacity Drop oder Instabilitäten aus kleinen Störungen (z.B. Stop-And-Go-Wellen, Stau aus dem Nichts), die verstärkt werden und wachsen, abzubilden. Gerade diese Verkehrseffekte sind jedoch von großer Bedeutung [Hel97], [Bun09], [Ros13].

Second-Order-Modelle

Second-Order-Modelle enthalten neben der dynamischen Verkehrsdichtefunktion eine weitere dynamische Funktion, die zur Berechnung der mittleren Flussgeschwindigkeit verwendet wird. Daher resultiert daraus ein partielles Differentialgleichungssystem mit zwei dynamischen Funktionen. Second-Order-Modelle werden demnach auch Modelle mit dynamischer Geschwindigkeit genannt. Sie kompensieren den größten Nachteil der First-Order-Modelle: Die instantanen Geschwindigkeitsänderungen und das damit verbundene unbeschränkte Beschleunigungsvermögen. Second-Order-Modelle sind in der Lage, die zuvor erwähnten Verkehrseffekte wie den Capacity Drop und Stop-And-Go-Wellen modelltechnisch abzubilden. Zudem werden Schockwellen durch diese Modell-erweiterung geglättet. Durch eine geschickte Modellierung und Parametrierung der Geschwindigkeitsdynamik lässt sich zudem menschliches Verhalten z.B. in Form von antizipativer Fahrweise integrieren. Second-Order-Modelle unterscheiden sich i.d.R. lediglich in der unterschiedlichen Modellierung der Geschwindigkeit.

Die dynamische Geschwindigkeitsfunktion wird in Second-Order-Modellen über Beschleunigungsterme beschrieben, die sich zur Geschwindigkeit integrieren. Zur Berechnung wird hierbei jedoch nicht nur die lokale Beschleunigung für einen festen Ort x , sondern auch die konvektive Beschleunigung berücksichtigt, welche die Beschleunigung eines mitfließenden Teilchens im Strömungsfeld beschreibt. Die auf diese Weise definierte Beschleunigung wird als substanzielle Beschleunigung bezeichnet und berechnet sich allgemein wie in Gleichung (3-22) gezeigt:

$$\underbrace{\frac{D\varphi}{Dt}}_{\substack{\text{Substanzielle} \\ \text{Beschleunigung}}} = \underbrace{\frac{\partial\varphi}{\partial t}}_{\substack{\text{lokale} \\ \text{Ableitung}}} + \underbrace{(\underline{u} \cdot \nabla) \cdot \varphi}_{\substack{\text{konvektive} \\ \text{Ableitung}}} \quad (3-22)$$

Mit der allgemeinen Geschwindigkeitsfunktion φ berechnet sich die substanzielle Beschleunigung als Summe der lokalen sowie der konvektiven Ableitung. Die konvektive Ableitung hängt dabei vom Gradienten von φ in Richtung des Flussgeschwindigkeitsvektors \underline{u} ab. Wird die allgemeine Form auf makroskopische Verkehrsflussmodelle übertragen, so ergibt sich Gleichung (3-23):

$$\frac{DV(x,t)}{Dt} = \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + V(x,t) \cdot \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} \quad (3-23)$$

Die lokale Beschleunigung entspricht hierbei der einfachen Ableitung der Geschwindigkeitsfunktion $V(x,t)$ nach der Zeit. Die Flussgeschwindigkeit \underline{u} in der konvektiven Ableitung ist gleich der skalaren Funktion für die mittlere Flussgeschwindigkeit $V(x,t)$, da sich die Teilchen (Fahrzeuge) in Second-Order-Modellen ausschließlich eindimensional, also in eine Richtung, bewegen können. Da $V(x,t)$ zudem neben der Zeit lediglich vom eindimensionalen Weg x abhängt, ergibt sich der Gradient hier zu der skalaren Ableitung $\frac{\partial V(x,t)}{\partial x}$.

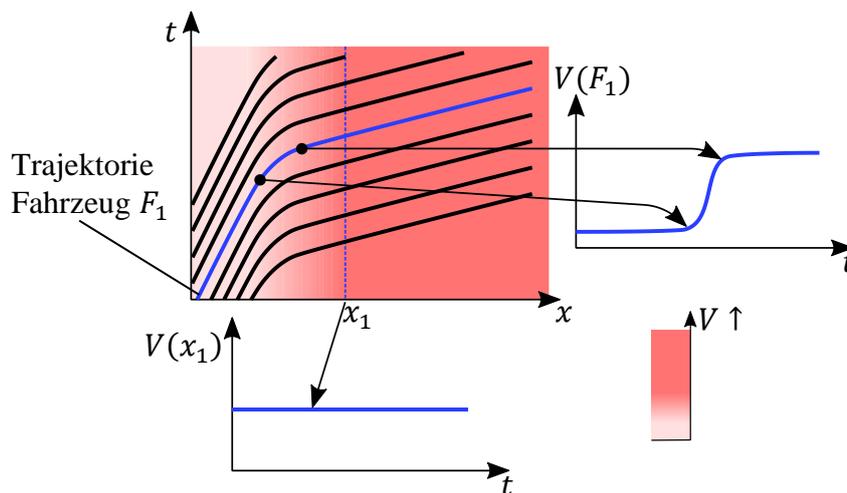


Abbildung 3-23: Unterschied zwischen mittlerer Flussgeschwindigkeit am Ort x_1 und konvektiver Geschwindigkeit aus Sicht eines mitschwimmenden Fahrzeugs nach [TK10]

In Abbildung 3-23 ist der Unterschied zwischen der lokalen und konvektiven Ableitung dargestellt. Wird an einem bestimmten Ort x_1 die mittlere Flussgeschwindigkeit als Querschnittsgröße erfasst (unterer Zeitverlauf), so ergibt sich im Beispiel durch den homogenen Verkehrsfluss am Ort x_1 eine konstante Geschwindigkeit. Es existiert außerdem keine lokale Ableitung ($\frac{\partial V(x_1, t)}{\partial t} = 0$). Anders ist dies im Fall, wenn die Geschwindigkeit aus Sicht eines mitfließenden Fahrzeugs (hier: F_1) betrachtet wird. Es ist zu sehen, dass das Fahrzeug F_1 , ebenso wie andere Fahrzeuge, im Fluss auf eine höhere Geschwindigkeit beschleunigt. Daher existiert in diesem Fall eine konvektive Ableitung die größer Null ist ($V(x, t) \cdot \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} > 0$) [TK10].

In der Literatur finden sich verschiedene Second-Order-Modelle, die sich, wie erwähnt, hauptsächlich in der Modellierung der Geschwindigkeit unterscheiden. Zur Erläuterung wird im Folgenden eine allgemeine substanzielle Ableitung der Geschwindigkeit gegeben, die in dieser oder ähnlicher Form in vielen Second-Order-Modellen eingesetzt wird.

$$\begin{aligned} \frac{DV(x, t)}{Dt} = & \\ & \underbrace{\frac{V_e(\rho(x, t)) - V(x, t)}{\tau}}_{\substack{\text{(Antizipatorischer)} \\ \text{Relaxationsterm}}} - \underbrace{\frac{1}{\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial P(x, t)}{\partial x}}_{\text{Druckterm}} + \underbrace{\frac{1}{\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\eta \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} \right)}_{\text{Diffusionsterm}} \quad (3-24) \\ & + \underbrace{A_{rmp}(x, t)}_{\text{Rampenterm}} \end{aligned}$$

Die substanzielle Ableitung der mittleren Flussgeschwindigkeit in Gleichung (3-24) enthält mehrere Beschleunigungsanteile, die unterschiedliche Funktionen haben.

Der erste Term der *Relaxation* wird dazu verwendet, dass die Fahrzeuge innerhalb einer Zeitspanne τ auf eine Gleichgewichtsgeschwindigkeit V_e beschleunigen, die aus einem Fundamentaldiagramm (vgl. Abbildung 3-15) stammt. Dies hat zur Folge, dass der Verkehrsfluss stets dazu neigt, in einen Gleichgewichtszustand des stationären Verkehrs zu gelangen. Wird in diesem Term statt des Ortes x ein in Entfernung liegender Ort $x_a = x + \Delta x$ eingesetzt¹⁹, so wirkt dieser Term wie eine antizipatorische Geschwindigkeitsanpassung der Fahrer. Die Beschleunigung wird folglich derart bestimmt, dass die Geschwindigkeit der Fahrzeuge an den Zustand eines noch zu erreichenden Ortes x_a adaptiert wird.

¹⁹ Dies wird auch als Nichtlokalität bezeichnet

Abbildung 3-24 verdeutlicht den Einfluss des Relaxationsterms. Für den Fall ohne Antizipation wird beispielhaft die aktuelle Verkehrsdichte ρ_0 am Ort x_0 ausgewertet. Zusätzlich liegt eine Geschwindigkeit vor, die nicht unbedingt einer Gleichgewichtsgeschwindigkeit $V_e(\rho_0)$ entsprechen muss (vgl. 3). Vielmehr kann die Geschwindigkeit von dieser abweichen und z.B. darüber oder darunter liegen (vgl. 1 und 2). Die Beschleunigung wird nun über den Zeithorizont derart berechnet, dass sich der Zustand entsprechend in den Gleichgewichtszustand des stationären Flusses bewegt (rote Pfeile). Für die antizipative Anpassung wird, wie es in Abbildung 3-24 rechts zu sehen ist, die Verkehrsdichte an einem entfernten Ort x_a zur Berechnung herangezogen, an dem die Geschwindigkeit V_3 vorliegt (vgl. 4). Gemäß des Fundamentaldiagramms wird dann die zum Übergang von (ρ_a, V_3) in den Zustand $V_e(\rho_a)$ notwendige Beschleunigung berechnet.

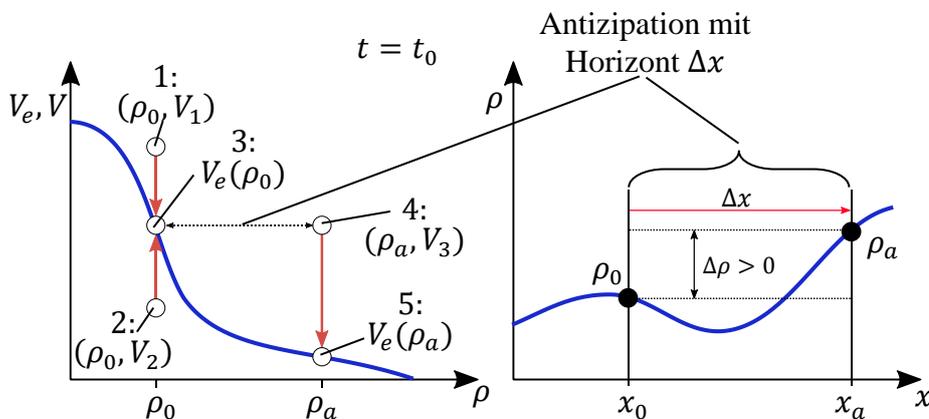


Abbildung 3-24: Anpassung an die Gleichgewichtsgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsantizipation in Anlehnung an [TK10]

Der *Druckterm* enthält eine Funktion $P(x, t)$ des „Verkehrsdrucks“, welcher eine Beschleunigung auf Grundlage des lokalen Verkehrsdichte- oder Geschwindigkeitsgradienten berechnet. Er wird dazu verwendet, das Anpassungsverhalten der Fahrer anhand der Änderung der Verkehrsdichte oder der Geschwindigkeit zu berücksichtigen und kann ebenfalls wie die Relaxation aus einem lokalen sowie einem antizipatorischen Teil bestehen. Durch den negativen Vorfaktor ist ersichtlich, dass eine negative Beschleunigung resultiert, sofern der Dichtegradient positiv ist bzw. eine positive Beschleunigung im entgegengesetzten Fall vorliegt, wie dies in Gleichung (3-25) dargestellt ist:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial x} > 0 \Rightarrow -\frac{1}{\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} < 0 \tag{3-25}$$

Der *Diffusionsterm* wird nach [TK10] hauptsächlich dazu eingesetzt, die Übergänge zwischen unterschiedlichen Dichteregionen zu glätten und wirkt so gegen steile Schockwellen, wie sie in First-Order-Modellen vorkommen. Die Fahrzeuge tendieren durch diesen

Term also dazu, den Fluss mit einer Viskosität $\eta > 0$ zu homogenisieren bzw. die Geschwindigkeitsverteilung lokal anzupassen. Nach [Kes19] kann der Diffusionsterm allerdings dafür sorgen, dass sich der Verkehrsfluss nicht mehr anisotrop verhält. Dementsprechend reagiert der Fluss nicht mehr ausschließlich auf den vorausfahrenden Verkehr, sondern auch auf den nachfolgenden, sodass sogar ggf. negative Geschwindigkeiten auftreten können.

Der *Rampenterm* $A_{rmp}(x, t)$ dient dazu, die Einflüsse auf die Beschleunigung der Fahrzeuge durch Zu- und Abfahrten zu berücksichtigen. Weitere Informationen zu diesem Anteil werden im nächsten Unterkapitel zu besonderen Modellelementen (3.2.1) gegeben.

Payne-Witham-Modell

Das Payne-Witham-Modell ist eine Variante für ein Second-Order-Modell und wird im weiteren Verlauf der Arbeit zur Modellbildung eines Straßennetzes herangezogen (Kapitel 5.1). Aus diesem Grund soll auf dieses Modell kurz eingegangen werden.

Die partiellen Differentialgleichungen des Modells lauten in Anlehnung an Gleichung (3-24) wie folgt [Pay71], [Whi74], [TK10]:

$$\text{Payne-Witham-Modell: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \\ Q(x, t) = \rho(x, t) \cdot V(x, t) \\ \frac{DV(x, t)}{Dt} = \frac{V_e(\rho(x, t)) - V(x, t)}{\tau} + \frac{dV_e(\rho(x, t))}{d\rho} \cdot \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \end{array} \right. \quad (3-26)$$

Es ist in Gleichung (3-26) zu erkennen, dass das Modell über einen Relaxationsterm und einen Druckterm mit $P = -\frac{V_e(\rho(x, t))}{2\tau}$ in der Beschleunigungsfunktion verfügt, jedoch keinen Diffusionsterm enthält (vgl. (3-24)). Die Gleichgewichtsgeschwindigkeit $V_e(\rho(x, t))$ resultiert in diesem Zusammenhang aus einem frei wählbaren Fundamentaldiagramm, während τ die Zeitkonstante der Fahrerreaktion beschreibt.

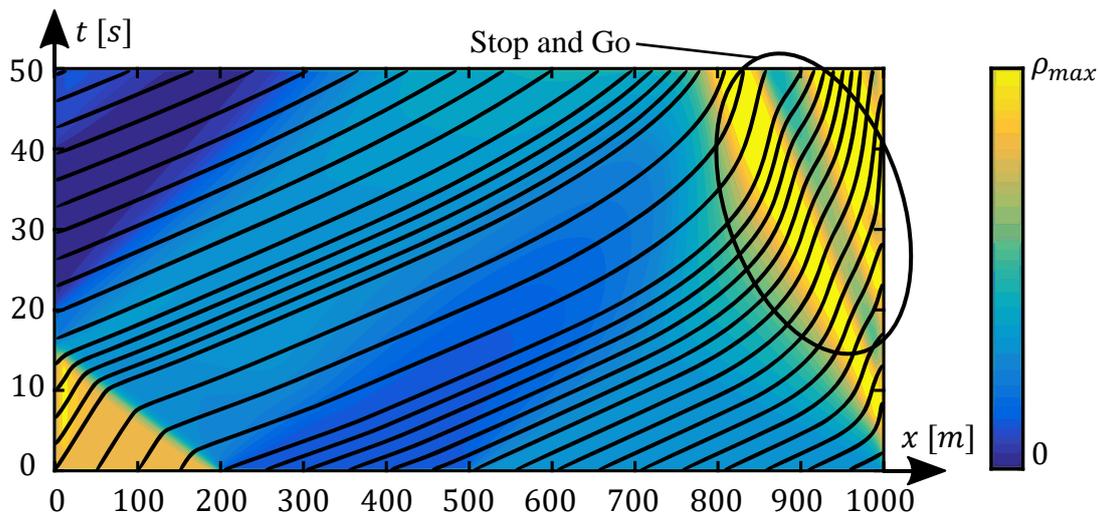


Abbildung 3-25: Beispiel einer Simulation des Payne-Witham-Modells mit gleichen Parametern und exemplarischen Einzelfahrzeugtrajektorien wie im LWR-Modell in Abbildung 3-22.

Das Payne-Witham-Modell ist ein in der Literatur ausführlich diskutiertes Modell, welches in der Lage ist, innerhalb eines bestimmten Verkehrsdichtebereichs Instabilitäten erzeugen zu können. Auf diese Weise können kleine Störungen im Dichteverlauf wachsen und zu dem Phänomen der Stop-And-Go-Wellen führen, was mit First-Order-Modellen nicht abgebildet werden kann [Hel97].

Als vergleichendes Beispiel ist in Abbildung 3-25 dasselbe Szenario wie in Abbildung 3-22 dargestellt, allerdings wird in diesem Fall das Payne-Witham-Modell verwendet, welches über eine dynamische Geschwindigkeitsgleichung verfügt. Es sind einige deutliche Unterschiede zum LWR-Modell zu erkennen. Der Verkehr wird insgesamt glatter und realistischer abgebildet. Als wichtigster und prägnantester Unterschied ist die von der Relaxationszeit abhängige, kontinuierliche Geschwindigkeitsanpassung der Fahrer zu nennen. Dies ist besonders in den Bereichen zu sehen, in denen die Fahrzeuge auf einen dichten Bereich zufahren, wie dies rechts in Abbildung 3-22 der Fall ist. Die Fahrzeuge erfahren keine instantane Geschwindigkeitsänderung, sodass sich die Schockwellen hier also mit weichen Übergängen statt mit harten Abtrennungen wie im LWR-Modell ausbreiten. Außerdem ist zu erkennen, dass auch Stop-And-Go-Wellen entstehen können (ebenfalls am rechten Rand zu sehen).

3.2.1 Besondere Modellelemente

Die Herleitung der vorgestellten partiellen Differentialgleichungssysteme basieren alle auf der Annahme eines homogenen Straßenstücks, wie in Abbildung 3-13 vorgestellt. Diese Einschränkung ist hinderlich bei der Modellbildung des Verkehrsflusses in Straßennetzen, die aus mehreren Straßen mit mehreren Spuren, Zu- und Abflüssen, Kreuzungen, Lichtsignalanlagen und weiteren verkehrstechnischen Besonderheiten bestehen.

Derartige Erweiterungen können aber teilweise in makroskopischen Verkehrsflussmodellen berücksichtigt werden. Im Folgenden wird eine Auswahl kurz beschrieben.

Zu- und Abflüsse

Die Herleitung der Kontinuitätsgleichung in Gleichung (3-15) zeigt den allgemeinen Fall einer homogenen Straße ohne Zu- und Abflüsse. Existieren jedoch Zu- und/oder Abflüsse, so muss dies als zusätzlicher Quellterm berücksichtigt werden. In Abbildung 3-26 ist die prinzipielle Modellierung von Zu- und Abflüssen gezeigt.

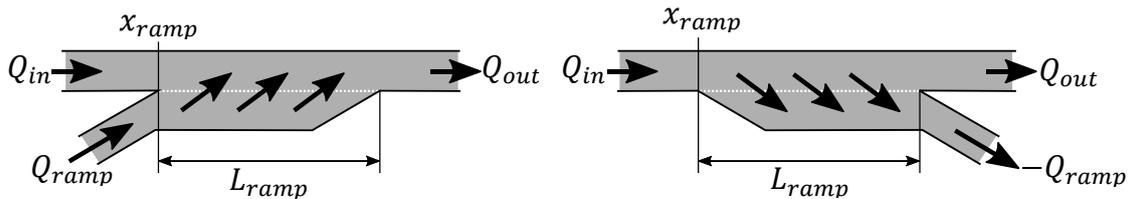


Abbildung 3-26: Prinzipielle Modellierung von Zu- und Abflüssen in makroskopischen Verkehrsflussmodellen nach [TK10]

Fließt ein zusätzlicher Verkehrsfluss Q_{ramp} über eine Länge L_{ramp} in das betrachtete Straßenstück, so ergibt sich eine Änderung der Fahrzeuganzahl, die ausschließlich von diesem Quellterm abhängt. Die Annahme der Fahrzeugerhaltung bleibt hierdurch also unberührt. Die Kontinuitätsgleichung ergibt sich daher nicht wie zuvor zu Null (vgl. (3-27)), sondern zum Quellterm $v(x, t)$.

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} \neq 0 \quad (3-27)$$

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = v(x, t) \quad (3-28)$$

$$v(x, t) = \begin{cases} \frac{Q_{ramp}(t)}{L_{ramp}} & x_{ramp} \leq x \leq x_{ramp} + L_{ramp} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-29)$$

Der nicht näher definierte Verkehrsfluss $Q_{ramp}(t)$ wirkt hierbei, wie in (3-29) gezeigt, nur im Bereich der Rampe und $v(x, t)$ nimmt sonst den Wert Null an. Dies ist analog für die Abflüsse der Fall.

Mehrere Spuren und Änderung der Spuranzahl

Straßen mit mehreren Spuren können berücksichtigt werden, indem die aggregierten Größen für Verkehrsdichte, Verkehrsfluss und mittlere Geschwindigkeit für jede Spur individuell definiert werden. Aus den Einzelspurgrößen kann durch den (gewichteten) Mit-

telwert der Zustand des gesamten Straßenstücks beschrieben und ebenso eine Kontinuitätsgleichung über alle Spuren hinweg formuliert werden. Die aggregierten Größen werden nach [TK10] für eine mehrspurige Straße mit I Spuren wie folgt berechnet:

$$\rho(x, t) = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I \rho_i(x, t) = \frac{\rho_{tot}(x, t)}{I} \tag{3-30}$$

$$Q(x, t) = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I Q_i(x, t) = \frac{Q_{tot}(x, t)}{I} \tag{3-31}$$

$$V(x, t) = \sum_{i=1}^I w_i \cdot V_i(x, t), w_i = \frac{\rho_i(x, t)}{\rho_{tot}(x, t)} \tag{3-32}$$

$$Q(x, t) = \rho(x, t) \cdot V(x, t) \tag{3-33}$$

Die hydrodynamische Flussbeziehung (3-33) gilt hier also für alle I Spuren und den darüber gemittelten Größen für $\rho(x, t)$ und $Q(x, t)$. Die mittlere Flussgeschwindigkeit $V(x, t)$ wird hingegen als gewichtetes Mittel unter Berücksichtigung der jeweils vorherrschenden Verkehrsdichte berechnet. Folgt nun eine Änderung der Spuranzahl, wie es beispielsweise in Abbildung 3-27 dargestellt ist, so kann abermals der Ansatz aus den Gleichungen (3-28) und (3-29) herangezogen werden, jedoch mit den nun über die Fahrspuren gemittelten Querschnittsgrößen (Gleichungen (3-30) bis (3-32)). Zusätzlich wird im Folgenden die Spuranzahl I als Funktion $I(x)$ der Strecke x aufgefasst und ist damit nicht auf ganzzahlige Werte beschränkt. Ein Wert von $I(x) = 1,1$ entspricht also beispielsweise einer fast ausschließlichen Nutzung der ersten Spur (und einer entsprechend niedrigen Gewichtung der zweiten Spur) [TK10].

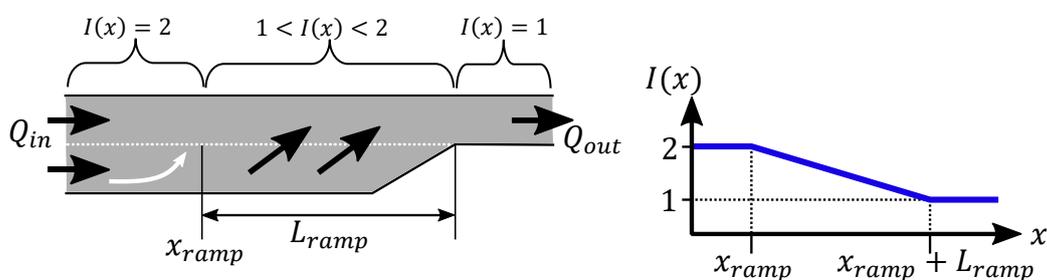


Abbildung 3-27: Abbildung mehrerer Spuren sowie von der Änderung der Spuranzahl in makroskopischen Verkehrsflussmodellen nach [TK10]

In Gleichung (3-34) ist zu erkennen, dass auch im Fall der Spuranzahländerung ein Quellterm $v(x, t)$ wie in (3-28) auf der rechten Seite der partiellen Differentialgleichung auftaucht. Durch Umformung und Berücksichtigung der Kettenregel für Differentiationen resultiert in (3-36) die bekannte Kontinuitätsgleichung mit einem zweiteiligen Quellterm, der nun zusätzlich von der nicht ganzzahligen Spuranzahl $I(x)$ abhängt.

$$\frac{\overbrace{\partial (\rho(x, t) \cdot I(x))}^{\rho_{tot}(x,t)}}{\partial t} + \frac{\overbrace{\partial (Q(x, t) \cdot I(x))}^{Q_{tot}(x,t)}}{\partial x} = I(x) \cdot v(x, t) \quad (3-34)$$

$$\Rightarrow I(x) \cdot \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + Q(x, t) \cdot \frac{\partial I(x)}{\partial x} + I(x) \cdot \frac{\partial Q(x, t)}{x} = I(x) \cdot v(x, t) \quad (3-35)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = -\frac{Q(x, t)}{I(x)} \cdot \frac{\partial I(x)}{\partial x} + v(x, t) \quad (3-36)$$

Für das Beispiel aus Abbildung 3-27 beschreibt der Quellterm $-\frac{Q(x,t)}{I(x)} \cdot \frac{\partial I(x)}{\partial x}$ in (3-36) folglich die Flüsse von der zweiten auf die erste Spur im Übergangsbereich für $1 \leq I(x) \leq 2$ (im Fall, dass $I(x) = const.$ ist, wird die partielle Ableitung $\frac{\partial I(x)}{\partial x}$ zu Null). Da in diesem Fall jedoch keine externen Zu- oder Abflüsse existieren, gilt der folgende, nicht direkt offensichtliche Zusammenhang in (3-37) gemäß der Erhaltung von Fahrzeugen:

$$-\frac{Q(x, t)}{I(x)} \cdot \frac{\partial I(x)}{\partial x} + v(x, t) = 0 \Rightarrow v(x, t) = \frac{Q(x, t)}{I(x)} \cdot \frac{\partial I(x)}{\partial x} \quad (3-37)$$

Abbiegevorgänge an Kreuzungen

Mit der Modellierung von Zu- und Abflüssen liegen bereits prinzipielle Möglichkeiten vor, Effekte, die durch Abbiegevorgänge auf die Verkehrsflüsse wirken, abzubilden. Eine Kreuzung kombiniert Verkehrsflüsse unterschiedlicher Richtungen zu neuen Verkehrsflüssen, sodass diese Effekte hier ebenso auftreten. Da bereits geklärt wurde, *wie* die Wirkung von Zu- und Abflüssen auf die Verkehrsflüsse beschrieben werden kann, wird nun eine Möglichkeit erläutert, in welcher Weise sich diese zusammensetzen lassen, um eine Kreuzung modelltechnisch abzubilden. Weitere Möglichkeiten mit ähnlichem Ansatz finden sich in der Literatur [CL12], [Jin10], [Leb05].

In Abbildung 3-28 links ist eine beispielhafte T-Kreuzung zu sehen, die insgesamt drei Eingangsverkehrsflüsse $Q_{E,i}$ und drei Ausgangsverkehrsflüsse $Q_{A,i}$ besitzt. Die Eingangsverkehrsflüsse teilen sich jeweils in zwei innere Flüsse auf (Separation), so separiert sich der Eingangsverkehrsfluss $Q_{E,1}$ zum Beispiel zu den beiden inneren Flüssen $Q_{I,11}$ und $Q_{I,12}$. Neben den Separationen existieren zudem Verschmelzungspunkte, an denen zwei Verkehrsflüsse zu einem Verkehrsfluss kombiniert werden. Als Beispiel wird der Ausgangsverkehrsfluss $Q_{A,1}$ aus der Verschmelzung der inneren Verkehrsflüsse $Q_{I,11}$ und $Q_{I,21}$ gebildet. Die Separationen bzw. Verschmelzungen aller Verkehrsflüsse sind in Abbildung 3-28 rechts dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch diese knotenbasierte Herangehensweise alle Verkehrsflüsse einer Kreuzung abgebildet werden können.

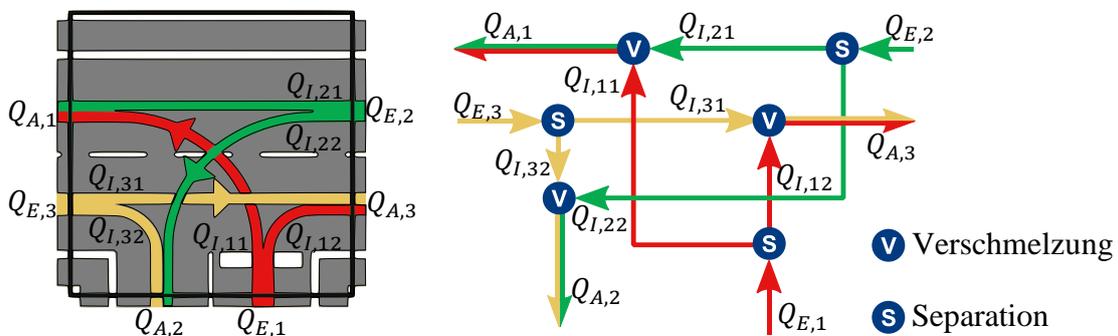


Abbildung 3-28: Abbildung einer T-Kreuzung mit separierenden und verschmelzenden Verkehrsflüssen

Zusätzlich zur knotenbasierten Separation und Verschmelzung der Verkehrsflüsse muss weiterhin die Fahrzeugerhaltung beachtet werden, d.h. die Anzahl der Fahrzeuge bleibt konstant (es existiert aber überdies auch keine zusätzliche Quelle). An jedem Verschmelzungsknoten Q_V gilt, dass der Ausgangsverkehrsfluss gleich der Summe aller n Eingangsverkehrsflüsse ist:

Verschmelzung

$$Q_{V,out} = \sum_{i=1}^n Q_{V,in,i} \tag{3-38}$$

Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass der resultierende Verkehrsfluss $Q_{V,out}$ überhaupt realisierbar ist, d.h. die Straße über die entsprechende Kapazität verfügt. Übersteigt der berechnete Ausgangsverkehrsfluss die Kapazitätsgrenze ($Q_{V,out} > Q_{max}$), so wird

dieser auf den Kapazitätswert beschränkt. Als Konsequenz kann der Verkehr also nicht frei abfließen, so dass an dieser Stelle eine erhöhte Dichte und ggf. der Beginn einer Staufront auftritt. Dieser Berücksichtigung wird in der Literatur oft die Bezeichnung „Supply-Demand-Methode“ gegeben. Die in die Kreuzung eingehenden Verkehrsflüsse bilden also die „Nachfrage“, während der ausgehende Verkehrsfluss das „Angebot“ stellt.

In Abbildung 3-29 ist das Beispiel für eine derartige Modellierung einer einfachen Flussverschmelzung zu sehen. Die Verkehrsflüsse Q_1 und Q_2 stellen hier die Eingangsflüsse und Q_3 den Ausgangsfluss dar. In Abbildung 3-29 links sind nun zwei Fälle für verschiedene Kapazitäten („Angebote“) der Ausgangsstraße zu sehen. Im Fall 1 ist zu erkennen, dass die Kapazität der Ausgangsstraße ausreichend groß ist, um die Eingangsflüsse vollständig aufzunehmen, d.h. Q_1 und Q_2 können vollständig abfließen und ergeben in Summe den Ausgangsverkehrsfluss Q_3 . Es gilt also:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \leq Q_{3,max} \quad (3-39)$$

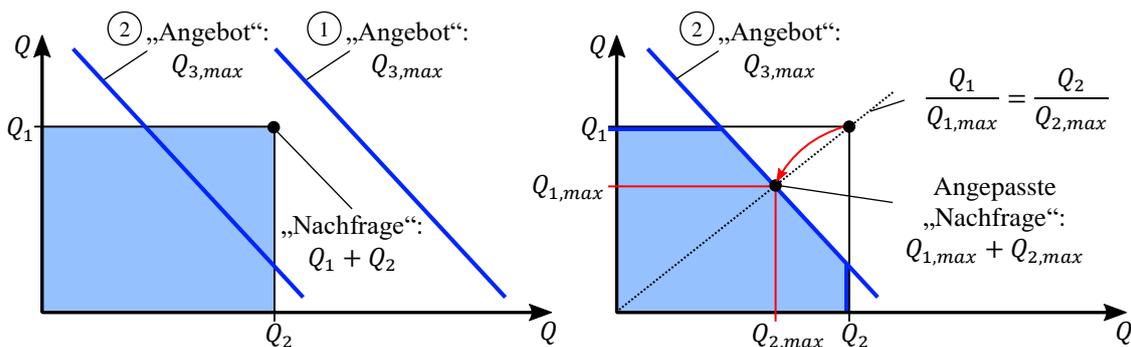


Abbildung 3-29: Begrenzung der kombinierten Verkehrsflüsse in Abhängigkeit der Kapazität der Ausgangsstraße nach [NL05]

Anders ist dies in Fall 2 (vgl. Abbildung 3-29 rechts), in dem die Kapazität $Q_{3,max}$ geringer als die Summe der Eingangsflüsse ist. Hier können die Eingangsflüsse nun nicht vollständig in die Ausgangsstraße abfließen, da diese über keine ausreichende Kapazität verfügt. Es liegt also folgender Fall vor:

$$Q_1 + Q_2 > Q_{3,max} \quad (3-40)$$

Die Eingangsverkehrsflüsse fließen daher nur anteilig ab und es wird sich zwangsläufig eine Dichteschwankung bzw. eine Stauwelle an der Verschmelzung bilden. Die Anteile der abfließenden Eingangsflüsse können auf verschiedene Weisen berechnet werden, in [NL05] geben die Autoren eine Übersicht zu gängigen Modellen zur Flussaufteilung sowie der Beschränkung selbiger. In Abbildung 3-29 rechts ist die beispielhafte flussoptimale Modellierung nach [JZ03] zu sehen. Die blau eingefärbte Fläche gibt alle zulässigen Lösungen für die beschränkte Flussaufteilung an. Der maximal mögliche, jedoch be-

schränkte Ausgangsfluss ergibt sich entlang der diagonalen dunkelblauen Begrenzungslinie. Lösungen, die außerhalb der blauen Fläche liegen, sind nicht zulässig, da sonst die Fahrzeugerhaltung verletzt ist, d.h. der Ausgangsverkehrsfluss wäre in diesem Fall größer als die Summe der Eingangsflüsse. In der vorliegenden Modellierung werden die Eingangsstraßen als gleichwertig angesehen (gleiche Prioritäten) und die Verkehrsflüsse um denselben Faktor reduziert, bei dem die Kapazität $Q_{3,max}$ ausgeschöpft wird. Die resultierenden beschränkten Verkehrsflüsse $Q_{1,cap}$ und $Q_{2,cap}$ bilden somit eine angepasste „Nachfrage“, die auch bedient werden kann. Wie bereits erwähnt, resultieren aufgrund der beschränkten Eingangsverkehrsflüsse ($Q_{1,cap} < Q_1, Q_{2,cap} < Q_2$) Dichteschwankungen oder Instabilitäten, die sich auf die Eingangsstraßen auswirken. Für die so ermittelten, gleichmäßig reduzierten und damit beschränkten Eingangsflüsse $Q_{1,cap}$ und $Q_{2,cap}$ gilt folglich:

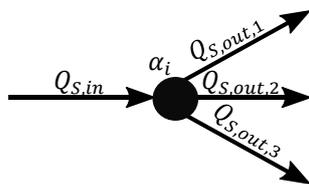
$$Q_{1,cap} + Q_{2,cap} \stackrel{!}{=} Q_{3,max} \quad (3-41)$$

$$Q_{1,cap} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \cdot Q_{3,max}, Q_{2,cap} = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \cdot Q_{3,max} \quad (3-42)$$

Aus Gleichungen (3-39) - (3-42) ergibt sich für die Fallunterscheidung also zusammengefasst:

$$Q_3 = \begin{cases} Q_1 + Q_2 & Q_1 + Q_2 \leq Q_{out,max} \\ Q_{1,cap} + Q_{2,cap} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-43)$$

Für die Separationsknoten ist es notwendig, einen Entscheidungs- bzw. Aufteilungskoeffizienten α_i für jeden Eingangsverkehrsfluss zu definieren. Auch hier muss die Fahrzeugerhaltung berücksichtigt werden, sodass der Eingangsverkehrsfluss gleich der Summe der n Ausgangsverkehrsflüsse ist:



Separation

$$Q_{S,out,i} = \alpha_i \cdot Q_{S,in} \quad (3-44)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \Rightarrow \sum_{i=1}^n Q_{S,out,i} = Q_{S,in}$$

Die Aufteilungskoeffizienten α_i sind ein Maß für das makroskopische Aufteilungsverhalten der Fahrer an der Kreuzung und mitteln also die Entscheidungen der Fahrer. Die Aufteilung ist im einfachsten Fall konstant, in einem erweiterten Modell können auch Funktionen zur Berechnung der Aufteilungskoeffizienten verwendet werden, zum Beispiel, wenn eine (Uhr-)zeitabhängige Aufteilung $\alpha_i(t)$ berücksichtigt werden soll.

Zuletzt ist noch zu erwähnen, dass an den Separations- und Verschmelzungsknoten mit dem zuvor vorgestellten Ansatz eine sprunghafte Verkehrsdichteänderung auftritt. Dies liegt in der Natur des Modellierungsansatzes, es ist jedoch eine Kombination mit den Ansätzen für Zu- und Abflüsse denkbar.

Erzwungene Halte (Lichtsignalanlagen etc.)

In realen Straßennetzen kommt es in der Regel vor, dass der Verkehrsfluss erzwungener Weise zum Erliegen kommt. Dies kann durch dauerhaft vorhandene verkehrstechnische Anlagen wie z.B. Lichtsignalanlagen oder aber auch temporäre Blockaden, wie etwa Störungen durch einen Unfall oder eine Baustelle erzeugt werden. Anhand einer Lichtsignalanlage soll die modelltechnische Umsetzung für makroskopische Verkehrsflussmodelle erläutert werden.

Abbildung 3-30 zeigt eine Lichtsignalanlage, die für eine Verkehrsrichtung auf Rot schaltet (zur Vereinfachung wird die Gelbphase vernachlässigt). Der Verkehrsfluss dieser Richtung kommt daraufhin zum Erliegen und eine Schockwelle breitet sich erwartungsgemäß aus.

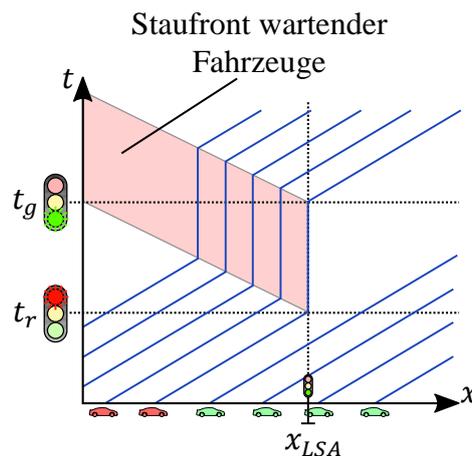


Abbildung 3-30: Beispieltrajektorien an einer Lichtsignalanlage

Soll dieses Verhalten nun berücksichtigt werden, kann die Funktion der mittleren Geschwindigkeit, wie im Gleichungssystem in (3-16) gezeigt, durch eine modifizierte Geschwindigkeitsfunktion $V^*(x, t)$ ausgetauscht werden, die ab der Startzeit t_r der Rotphase bis zur erneuten Grünphase t_g am Ort der Lichtsignalanlage x_{LSA} einen Wert von Null ausgibt und für alle übrigen Zeiten und Orte den Wert der Geschwindigkeitsfunktion $V(x, t)$.

$$V^*(x, t) = \begin{cases} 0 & x = x_{LSA} \wedge t_r \leq t \leq t_g \\ V(x, t) & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-45)$$

Das Beispiel geht im Übrigen von der vereinfachten Annahme instantaner Beschleunigungen aus und ist damit wenig realistisch. Eine Berücksichtigung innerhalb der dynamischen Geschwindigkeitsgleichung kann diesen Nachteil beheben, wird aber an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

3.2.2 Lösung von makroskopischen Modellen

Die Lösung von makroskopischen Verkehrsflussmodellen beschreibt den tatsächlichen Verlauf der unbekannt Funktionen $\rho(x, t)$ und $V(x, t)$ in der xt -Ebene. Die Bestimmung einer Lösung ist für nichtlineare partielle Differentialgleichungssysteme jedoch nicht in einfacher Weise oder auch gar nicht möglich, wie nachfolgend erläutert wird. Grundsätzlich können entweder analytische Lösungsmethoden oder numerische Lösungsmethoden herangezogen werden.

Analytische Lösung

In der Literatur sind viele Ansätze zu finden, die sich mit der Lösung von partiellen Differentialgleichungen bzw. Systemen aus partiellen Differentialgleichungen befassen. In diesem Unterkapitel wird daher nur auf die Lösung von Systemen eingegangen, die für makroskopische Verkehrsflussmodelle von Bedeutung sind: Gleichungssysteme nichtlinearer hyperbolischer Differentialgleichungen. Solche Systeme sind im Allgemeinen schwer bis gar nicht analytisch zu lösen und bekannte Ansätze beschränken sich meist auf einfache Systeme. Besonders in Hinsicht auf Second-Order-Modelle, die eine komplexe Geschwindigkeitsdynamik berücksichtigen, oder Modelle, die besondere Modellelemente, wie in Kapitel 3.2.1 gezeigt, integrieren, sind i.d.R. nicht analytisch zu lösen. Einfachere (First-Order-) Modelle wie das LWR-Model sind hingegen analytisch lösbar, jedoch existiert in diesen Fällen nicht immer eine eindeutige Lösung. Es kann der Fall eintreten, dass lediglich eine sog. schwache (oder verallgemeinerte) Lösung bestimmt werden kann, also eine nichtglatte Lösung, für die nicht alle Differentiale existieren. Schwache Lösungen weisen daher Knickstellen auf und führen zu den bekannten wandernden Schockwellen [PAO92], [Tay11], [Eva10].

Im Falle eines First-Order-Modells (vgl. Gleichung (3-18)) kann eine analytische Lösung mit der *Methode der Charakteristiken* bestimmt werden. Die Idee und die Lösung wird an dieser Stelle nur sehr reduziert vorgestellt, für eine detailliertere Ausführung sei auf die Herleitungen in [KAW+08] und [KÖ18] verwiesen. Die Idee der Methode der Charakteristiken ist es, eine partielle Differentialgleichung derart umzuformen, dass ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen resultiert. Dies ist im Fall der First-Order-Modelle möglich, da das Gleichungssystem in (3-18) durch das Fundamentaldiagramm einen statischen Zusammenhang und somit nur in der ersten Gleichung eine Dynamik besitzt

(das System ist also erster Ordnung und quasi-linear²⁰). Für ein First-Order-Modell können auf diese Weise *charakteristische Kurven* bestimmt werden, welche die Bewegungen der Initialbedingungen (Verkehrsdichte) in der xt -Ebene beschreiben. Für jeden Initialdichtewert kann demnach eine dichteabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit $f'(\rho(x, t))$ berechnet werden.

Ein First-Order-Modell (vgl. (3-18)) mit eingesetztem Greenshields-Fundamentaldia-gramm (entspricht dem LWR-Modell) kann entsprechend [KAW+08] wie folgt zu Gleichung (3-46) umgeschrieben werden. Hieraus kann anschließend die Funktion²¹ der charakteristischen Kurven in (3-47) bestimmt werden:

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + f'(\rho(x, t)) \cdot \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (3-46)$$

$$f'(\rho(x, t)) = V_{max} - 2 \cdot \frac{V_{max}}{\rho_{max}} \cdot \rho(x, t) \quad (3-47)$$

$$\rho(x, t > t_0) = f'(\rho(x, t_0)) \cdot \rho(x, t_0) \quad (3-48)$$

Die Bewegungen der Initialverkehrsdichten kann nun mit der linearen Funktion (3-47) für $f'(\rho(x, t_0))$ exakt beschrieben werden. Abbildung 3-31 zeigt den Zusammenhang dieser Funktion grafisch. Die Lösung für das LWR-Modell lässt sich daher abhängig von der Initialdichteverteilung $\rho(x, t_0)$ und der charakteristischen Kurven $f'(\rho(x, t_0))$ der Initialdichteverteilung eindeutig bestimmen, wie dies in (3-48) gezeigt ist. Die Dichteausbreitungen können nun in der xt -Ebene entweder, wie bereits in Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 dargestellt wurde, auseinanderlaufen oder sich schneiden. Im ersten Fall gilt die einfache eindeutige Lösung in Gleichung (3-48). Schneiden sich die Dichteausbreitungen jedoch, muss eine erweiterte Betrachtung durchgeführt werden, indem die Überlappungen der sich treffenden Dichteausbreitungen berechnet werden. Auf diese Weise resultiert eine schwache Lösung mit einer sich bewegenden Knickstelle (Schockwelle). Dies wird hier jedoch nicht weiter ausgeführt.

²⁰ Eine partielle Differentialgleichung ist quasi-linear, wenn diese linear in allen Ableitungen der unbekanntenen Funktion ist (d.h. es kommt z.B. kein Term $(\partial \rho(x, t) / \partial t)^2$ vor).

²¹ „Charakteristische Kurven“ müssen nicht zwangsläufig linear sein, auch wenn dies hier der Fall ist.

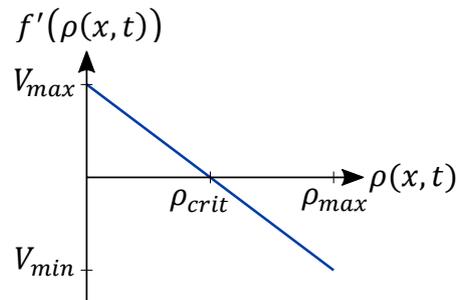


Abbildung 3-31: Berechnung der dichteabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit im LWR-Modell nach [KAW+08]

Numerische Lösung

Numerische Methoden werden zur Berechnung von Lösungen in Annäherung an die analytischen Lösungen herangezogen. Hierbei werden sowohl der Weg x als auch die Zeit t diskret und in äquidistanten Schrittweiten Δx und Δt betrachtet, als Konsequenz liegen daher zu lösende Differenzgleichungen (Gleichungen mit Differenzenquotienten) statt Differentialgleichungen vor. Diese Methoden werden daher auch als *Finite-Differenzen-Methoden* bezeichnet. Numerische Ansätze sind im Bereich der Simulation makroskopischer Verkehrsflussmodelle weit verbreitet. Die Einfachheit der numerischen Ansätze erlaubt es, komplexe Modelle wie Second-Order-Modelle zu simulieren und darüber hinaus besondere Modellelemente (vgl. 3.2.1) in das System zu integrieren. Numerische Lösungsverfahren haben den Vorteil, selbst für komplexe Systeme oftmals einfach und schnell lösbar zu sein, jedoch weicht die Lösung stets von der exakten Lösung ab und es müssen numerische Stabilitätsbedingungen berücksichtigt werden. Im Bereich der makroskopischen Verkehrsflussmodelle haben sich verschiedene numerische Ansätze etabliert. Einige ausgewählte sollen im Folgenden exemplarisch gegenübergestellt werden. Erweiterte Übersichten zu entsprechenden numerischen Lösungsansätzen sind bspw. in [GCR16] und [HT99] gegeben. Außerdem sei angemerkt, dass implizite und explizite numerische Methoden existieren, sich hier jedoch ausschließlich auf explizite Methoden bezogen wird.

Die Gleichungen (3-50) bis (3-52) zeigen drei Finite-Differenzen-Methoden zur Berechnung der Verkehrsdichte auf dem diskreten xt -Gitter für die Zeitfolge t_k mit $k = 1 \dots n$ und $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ sowie für die Wegfolge x_i mit $i = 1 \dots p$ und $x_{i+1} = x_i + \Delta x$. In Abbildung 3-32 sind diese Methoden zudem grafisch dargestellt. Die diskreten Stützstellen sind dabei als farbige Kreise dargestellt. In allen vier Fällen wird der Dichtewert ρ_i^{k+1} berechnet, also die Verkehrsdichte an der Stelle x_i für den nächsten Zeitschritt. Der Verkehrsfluss Q_i^k berechnet sich als Produkt von mittlerer Flussgeschwindigkeit V_i^k und der Verkehrsdichte ρ_i^k (vgl. (3-49)), wobei sich die Berechnung der Geschwindigkeit entweder aus einem statischen Zusammenhang (First-Order-Modell) oder einer weiteren diskreten Dynamikgleichung ergeben kann.

$$Q_i^k = V_i^k \cdot \rho_i^k \quad (3-49)$$

$$\text{Upwind:} \quad \rho_i^{k+1} = \rho_i^k - \left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right) \cdot (Q_i^k - Q_{i-1}^k) \quad (3-50)$$

$$\text{Lax-Friedrich:} \quad \rho_i^{k+1} = \frac{1}{2} \cdot (\rho_{i+1}^k + \rho_{i-1}^k) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right) \cdot (Q_{i-1}^k - Q_{i+1}^k) \quad (3-51)$$

$$\text{McCormack:} \quad \underbrace{\tilde{\rho}_i^{k+1} = \rho_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (Q_i^k - Q_{i-1}^k)}_{\text{Prädiktor}} \quad (3-52)$$

$$\rho_i^{k+1} = \frac{1}{2} \cdot \underbrace{\left(\tilde{\rho}_i^{k+1} + \rho_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (\tilde{Q}_{i+1}^{k+1} - \tilde{Q}_i^{k+1})\right)}_{\text{Korrektor}}$$

Anhand der Gleichungen (3-50) bis (3-52) und der grafischen Darstellung in Abbildung 3-32 lässt sich gut erkennen, dass die Methoden unterschiedliche Ansätze verfolgen. So werden in der *Upwind*-Methode zur Berechnung der Verkehrsdichte ρ_i^{k+1} am Ort x_i im nächsten Zeitschritt $k + 1$ Informationen aus dem aktuellen Zeitschritt k vom Ort x_i und vom Ort x_{i-1} als räumliche Differenz benötigt. Diese Stromaufwärtsdifferenz sorgt für die Namensgebung der Methode und dafür, dass sich Effekte über der Zeit primär für wachsende x_i auswirken. Daher ist diese Methode somit für Verkehrsflussmodelle weniger geeignet ist, da diese bekannterweise entgegen der Fahrtrichtung wandernde Staufronten enthalten können. Im Beispiel der *Lax-Friedrich*-Methode wird hingegen keine einseitige, sondern eine beidseitige Differenzenbildung verwendet. Hier werden also zur Berechnung der Verkehrsdichte ρ_i^{k+1} im nächsten Zeitschritt am Ort x_i Informationen aus dem aktuellen Zeitschritt der Orte x_{i-1} und x_{i+1} benötigt. Ein weiterer großer Unterschied ist, dass der aktuelle Wert der Verkehrsdichte ρ_i^k nicht zur Berechnung des nächsten Zeitschritts verwendet wird. Das letzte Beispiel für eine Finite-Differenz-Methode ist die *McCormack*-Methode, die gewissermaßen einen Halbschritt-Ansatz darstellt. Diese Methode besteht aus drei Teilen, zwei Prädiktoren, welche die (Schätz-)Verkehrsdichten $\tilde{\rho}_i^{k+1}$ und $\tilde{\rho}_{i+1}^{k+1}$ gemäß der *Upwind*-Methode berechnen, und einem Korrektor, der diese Werte zur Bestimmung des endgültigen Wertes ρ_i^{k+1} nutzt. Zur Berechnung der Verkehrsdichte im nächsten Zeitschritt sind also insgesamt drei Berechnungsschritte notwendig, sodass diese Methode einen höheren Berechnungsaufwand aufweist. Die *McCormack*-Methode hat sich nach [TK10] als zuverlässige Methode etabliert. In Abbildung 3-25 wurde bereits ein Beispiel für ein Verkehrsflussmodell (Payne-Witham-Modell) gezeigt, welches mit der *McCormack*-Methode gelöst wurde.

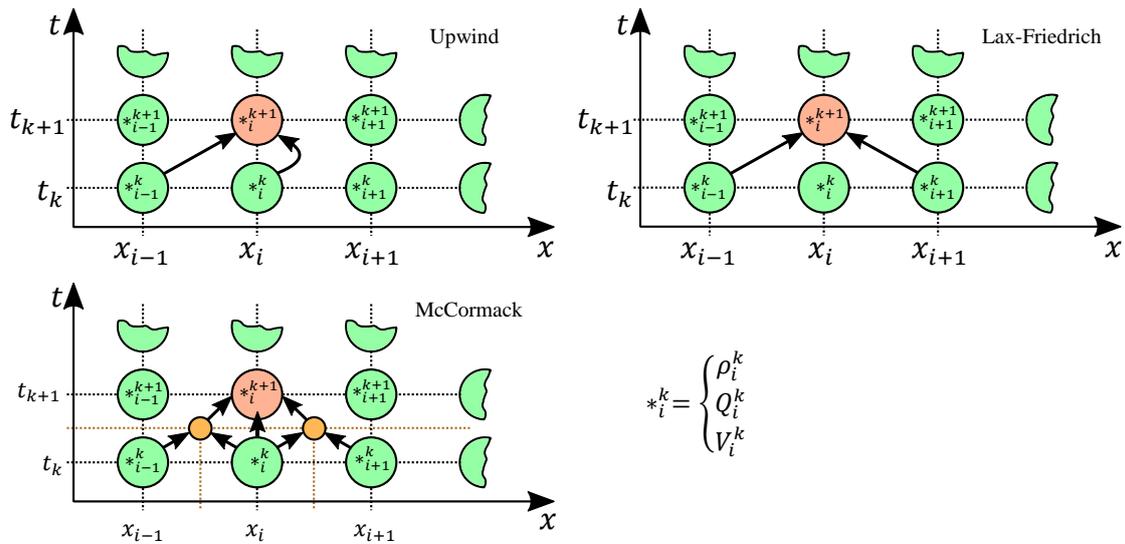


Abbildung 3-32: Grafische Darstellung der Abhängigkeiten verschiedener Finite-Differenzen-Methoden (sog. Stencils) zur numerischen Lösung von partiellen Differentialgleichungen, links oben: Upwind-Methode, rechts oben: Lax-Friedrichs-Methode, links unten: McCormack

Für Second-Order-Modelle muss im gleichen Maße auch die dynamische Geschwindigkeitsgleichung in diskreter Form aufgestellt werden. Wird zum Beispiel die dynamische Geschwindigkeit des Payne-Witham-Modells in (3-26) herangezogen, so lässt sich diese mit der Lax-Friedrichs-Methode (man beachte die Indizes bei den Differenztermen) wie folgt in diskreter Weise beschreiben (Hinweis: Für eine verkürzte Schreibweise wird hier nun statt $V_e(\rho(x, t))$ einfach $V_e(\rho)$ und $V_e'(\rho)$ statt $\frac{dV_e(\rho(x,t))}{d\rho}$ geschrieben, die substantielle Ableitung $\frac{DV(x,t)}{Dt}$ wird zudem nachfolgend ausgeschrieben):

$$\frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + V(x, t) \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = \frac{V_e(\rho) - V(x, t)}{\tau} + \frac{V'_e(\rho)}{2\tau\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \quad (3-53)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} = -V(x, t) \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} + \frac{V_e(\rho) - V(x, t)}{\tau} + \frac{V'_e(\rho)}{2\tau\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} \quad (3-54)$$

$$\Rightarrow V(x, t) =$$

$$\int -V(x, t) \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} + \frac{V_e(\rho) - V(x, t)}{\tau} + \frac{V'_e(\rho)}{2\tau\rho(x, t)} \cdot \frac{\partial \rho(x, t)}{\partial x} dt \quad (3-55)$$

$$x \rightarrow x_i, t \rightarrow t_k$$

$$V_i^{k+1} = V_i^k +$$

$$\Delta t \cdot \underbrace{\left(-V_i^k \frac{(V_{i-1}^k - V_{i+1}^k)}{2\Delta x} + \frac{(V_e(\rho_i^k) - V_i^k)}{\tau} + \frac{V'_e(\rho_i^k)}{2\tau\rho_i^k} \cdot \frac{(\rho_{i-1}^k - \rho_{i+1}^k)}{2\Delta x} \right)}_{\Delta V_i^{k \rightarrow k+1}} \quad (3-56)$$

Die dynamische Geschwindigkeitsgleichung (3-53) kann zunächst umgestellt und integriert werden (Gleichungen (3-54) und (3-55)). Mit der Lax-Friedrich-Methode und dem Übergang in die diskrete Beschreibung des Ortes und der Zeit folgt in Gleichung (3-56) die Berechnung der Geschwindigkeit V_i^{k+1} im nächsten Zeitschritt t_{k+1} am Ort x_i durch Addition der Geschwindigkeitsänderung $\Delta V_i^{k \rightarrow k+1}$ zur aktuellen Geschwindigkeit.

Für alle numerischen Methoden gilt die Voraussetzung, dass diese numerisch stabil sein müssen, also die berechneten Lösungen nicht alleine aufgrund der verwendeten Methode Instabilitäten aufzeigen dürfen (wie dies z.B. in der Downwind-Methode, dem spiegelverkehrten Gegenstück zur Upwind-Methode der Fall ist). Zur Sicherstellung der numerischen Stabilität kann die *Courant-Friedrich-Lewy-Bedingung* (s. (3-57)) herangezogen werden. Die Bedingung stellt im Kontext der Verkehrsflussmodelle sicher, dass sich kein Fahrzeug unter Berücksichtigung der maximal möglichen mittleren Flussgeschwindigkeit V_{max} innerhalb eines diskreten Zeitschritts Δt über mehr als eine diskrete Wegdistanz Δx hinweg bewegen kann. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass keine Zeitkonstanten im Modell auftreten, die kleiner als die Zeitschrittweite Δt sind. Ist z.B. eine Relaxationszeitkonstante τ (vgl. Gleichung (3-24)) enthalten, so muss die Bedingung in (3-58) ebenfalls gelten.

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \leq V_{max} \quad (3-57)$$

$$\Delta t < \tau \quad (3-58)$$

In Modellen, die Diffusionsterme enthalten (vgl. (3-24)), muss zusätzlich folgende Bedingung in (3-59) erfüllt sein:

$$\Delta t < \frac{(\Delta x)^2}{2 \cdot D} \quad (3-59)$$

Die verschiedenen numerischen Methoden haben unterschiedliche Vor- und Nachteile, je nach Einsatzzweck. Grundsätzlich liegt der größte Unterschied der Finite-Differenzen-Methoden in der Genauigkeit und der Berechnungskomplexität (sofern man grundsätzliche numerische Stabilität voraussetzt). Wie zuvor erwähnt, nähern sich die numerischen Lösungen den exakten Lösungen an, wie es in Abbildung 3-33 dargestellt ist. Die typischerweise vorkommenden Knickstellen der Schockwellen in First-Order-Modellen können z.B. mit numerischen Methoden nicht abgebildet werden, sondern werden geglättet. Dies ist im Kontext der makroskopischen Verkehrsflussmodelle jedoch hinnehmbar, da solch abrupte Übergänge ohnehin nicht realistisch sind.

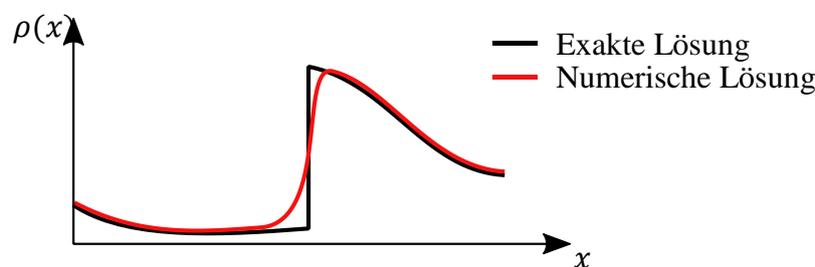


Abbildung 3-33: Beispielhafte qualitative Glättung durch numerische Lösung

Ein weiterer Unterschied ist die (Genauigkeits-)Ordnung der numerischen Methoden. Verringert sich der Fehler der Lösung um den Faktor α , wenn die Diskretisierungsschrittweiten jeweils um den Faktor α verringert werden ($\Delta t_{neu} = \alpha \cdot \Delta t$, $\Delta x_{neu} = \alpha \cdot \Delta x$, $0 < \alpha < 1$), so spricht man von Methoden erster Ordnung. Finite-Differenzen-Methoden zweiter Ordnung liegen hingegen vor, wenn sich der Fehler im selben Fall um den Faktor α^2 verringert. Auch wenn Methoden zweiter Ordnung meist eine höhere Genauigkeit aufweisen, so sind diese jedoch gleichzeitig sensibler gegenüber Modellinstabilitäten und aufwändiger zu berechnen [HT99].

Im Beispiel der vorgestellten Methoden erweist sich, dass die Upwind- und die Lax-Friedrich-Methode eine stärkere Glättung der Lösung bewirken und robuster gegenüber Modellinstabilitäten sind, jedoch gleichzeitig eine geringere Genauigkeit gegenüber der McCormack-Methode aufweisen [HT99], [GCR16].

3.2.3 Stabilität von makroskopischen Verkehrsflussmodellen

Nachdem die Grundlagen der makroskopischen Verkehrsflussmodelle und die Lösungsmöglichkeiten selbiger erläutert wurden, soll in diesem Kapitel darauf eingegangen werden, inwieweit solche Modelle Aussagen über die Verkehrsstabilität machen können und wie der Begriff der Stabilität in diesem Kontext zu definieren ist.

Allgemeine Stabilität im Verkehrsfluss

Die allgemeine Bedeutung von Stabilität im Verkehrsfluss kann anhand eines einfachen Beispiels erläutert werden. In Abbildung 3-34 sind drei Verkehrssituationen zu sehen, die alle in einem Gleichgewichtsfluss beginnen. In jeder Situation sind aufeinanderfolgende Fahrzeuge mit den individuellen Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten v_i beteiligt und das erste Fahrzeug ($i = 0$) weist eine kleine Störung im Geschwindigkeitsverlauf v_0 auf. Der Verkehrsfluss ist nun als stabil anzusehen, wenn diese Störung nicht verstärkt wird (aufschwingt) und nach einiger Zeit wieder vollständig verschwindet, wie es in Abbildung 3-34 oben links zu sehen ist. In dem Fall, dass diese Störung von den nachfolgenden Fahrzeugen verstärkt wird und die einzelnen Fahrzeuge keinen Gleichgewichtsfluss wiedererlangen können (die Störampplituden wachsen weiter an), wie dies oben rechts in Abbildung 3-34 zu sehen ist, dann wird der Verkehr als lokal instabil bezeichnet. Ein weiterer Fall ist die sog. Kolonneninstabilität, in diesem Fall wird die Störung zwar wie zuvor verstärkt, dies wirkt sich jedoch nur zeitweise auf die Fahrzeuge aus, d.h. die Störung selbst wächst an, Fahrzeuge, welche die Störung wieder verlassen haben, können allerdings einen Gleichgewichtsfluss wiedererlangen (vgl. Abbildung 3-34 unten links).

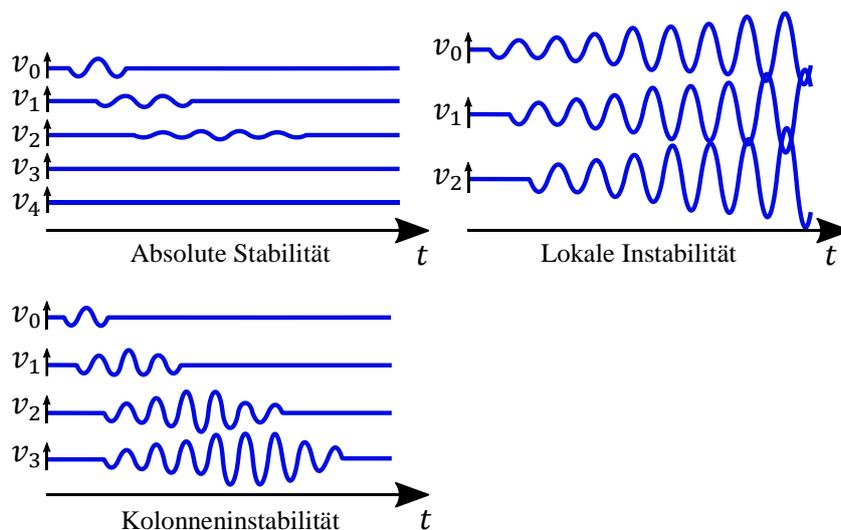


Abbildung 3-34: Verschiedene Stabilitätsfälle nach [Kes19]

Die lokale Instabilität (Abbildung 3-34 oben rechts) resultiert aus kleinen Abstandsschwankungen zwischen einzelnen Fahrzeugen und wird hauptsächlich für mikroskopische Betrachtungen herangezogen. Im Folgenden wird der Fokus daher auf die Kolonnenstabilität gelegt, welche die typischen Welleneffekte bedingt und in makroskopischen Verkehrsflussmodellen untersucht werden kann.

Eigenschaften der Kolonnenstabilität

Die Kolonnenstabilität ist eine Aussage über die Stabilität über eine Vielzahl von Fahrzeugen und kann sich über mehrere Kilometer erstreckende Effekte wie Stauwellen berücksichtigen. Der Stabilitätsbegriff wird hierbei nicht lediglich in stabil oder instabil unterschieden, da der Ansatz auf der Auswirkung einer Störung beruht. Die Stabilität wird

anhand der Größe der Initialstörung sowie der Ausbreitungseigenschaften selbiger beurteilt.

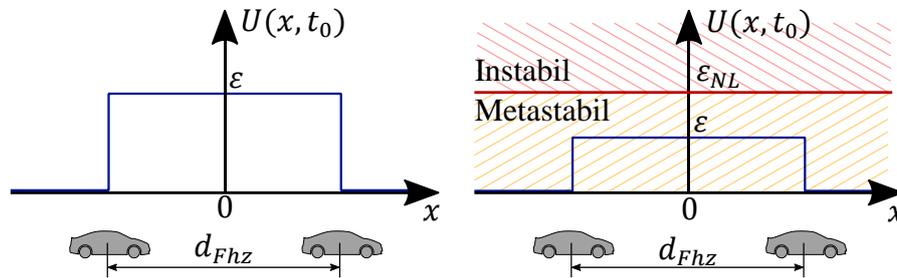


Abbildung 3-35: Prinzip des Störgrößenansatzes nach [TK10]

Sei für einen unendlich langen Streckenabschnitt ein Gleichgewichtsverkehrszustand gegeben, der an einer Stelle eine Initialstörung $\varepsilon > 0$ enthält. Die Störung ε kann hierbei unterschiedliche Störungsarten beschreiben, z.B. wie die Abweichung der Verkehrsdichte zur Gleichgewichtsverkehrsdichte oder die Abweichung der mittleren Flussgeschwindigkeit zur Gleichgewichtsgeschwindigkeit. Die Störung wird nun als lokal begrenzt aufgefasst und wirkt nur im Bereich des Fahrzeugabstands d_{FHZ} zweier Fahrzeuge (dies ist gleichbedeutend damit, dass ein einzelner Fahrer im Gleichgewichtsfluss eine Störung ausübt). Die Initialstörung $U(x, t_0)$ kann daher wie in (3-61) definiert werden und lässt sich anschaulich wie in Abbildung 3-35 links verstehen. Für die Stabilitätsbeurteilung dieser Initialstörung wird nun ihre Entwicklung über der Zeit für $t \rightarrow \infty$ betrachtet, wie dies in (3-62) skizziert ist.

$$\varepsilon > 0 \tag{3-60}$$

$$U(x, t_0) = \begin{cases} \varepsilon & |x| < \frac{d_{FHZ}}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3-61}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \max U(x, t) = ? \tag{3-62}$$

Abhängig von der zeitlichen Entwicklung der Störung kann nun eine Aussage zur Kolonnenstabilität getroffen werden, die sich als stabil, metastabil oder instabil erweisen kann. Eine Übersicht über die Einteilung ist zusätzlich in Abbildung 3-36 zu finden. Im einfachen Fall, dass für $t \rightarrow \infty$ und für jedes beliebige $\varepsilon > 0$ die Störung abklingt und verschwindet, ist der Verkehrsfluss stabil, d.h. jede kleine und große Störung durch einen einzelnen Fahrer verschwindet nach einiger Zeit, wie dies beispielhaft in Abbildung 3-34 links oben dargestellt ist. Lässt sich jedoch ein Schwellenwert ε_{NL} für die Initialstörung finden, sodass die Störung für $0 < \varepsilon < \varepsilon_{NL}$ sowie $t \rightarrow \infty$ abklingt und verschwindet, für $\varepsilon \geq \varepsilon_{NL}$ hingegen anwächst, so liegt ein metastabiles System vor. Ein metastabiles Sys-

tem wird daher als linear stabil (linear \triangleq kleine Störungen) und nichtlinear instabil (nicht-linear \triangleq große Störungen) bezeichnet. Diese Grenze ist schematisch in Abbildung 3-36 rechts zu sehen. Absolute Instabilität herrscht, wenn der Schwellenwert ε_{NL} gegen Null geht und somit der metastabile Bereich verschwindet. In einem solchen Fall führt jede kleine Störung im Verkehrsfluss zu einem Aufklingen und Anwachsen der Störung ohne je wieder abzunehmen.

	Stabilität	$\lim_{t \rightarrow \infty} \max U(x, t) = 0$	$\varepsilon > 0$	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <p style="text-align: center;">Instabilität</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> $\lim_{t \rightarrow \infty} U(0, t)$ > 0 </div> <div style="text-align: center;"> $= 0$ </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 5px;"> <div style="text-align: center; width: 40%;"> Abso- lute </div> <div style="text-align: center; width: 40%;"> Kon- vektive </div> </div> </div>
Linear	Meta-	$\lim_{t \rightarrow \infty} \max U(x, t) = 0$	$0 < \varepsilon < \varepsilon_{NL}$	
	stabilität	$\lim_{t \rightarrow \infty} \max U(x, t) > 0$	$\varepsilon \geq \varepsilon_{NL}$	
Nichtlinear	In-	$\lim_{t \rightarrow \infty} \max U(x, t) > 0$	$\varepsilon_{NL} \rightarrow 0$	
	stabilität			

Abbildung 3-36: Einteilung von Kolonnen-Verkehrsstabilitätskriterien in Anlehnung an [TK10]

Zusätzlich zur zeitlichen Entwicklung der Initialstörung $U(x, t_0)$ wird die Ausbreitungsrichtung der Störung für metastabile und instabile Systeme betrachtet (s. Abbildung 3-36 blauer Kasten). Liegt ein metastabiles oder instabiles System vor, so ist dieses konvektiv instabil, wenn sich die Störung ausschließlich in eine Richtung (stromauf- oder stromabwärts) ausbreitet (d.h., die Störung im Ursprung $U(0, t)$ verschwindet für $t \rightarrow \infty$). Diese Art der Instabilität ist die am häufigsten im realen Verkehr, vornehmlich auf Fernstraßen, vorkommende Form der Instabilität. Durch bspw. punktuelle Störungen hervorgerufene Staus auf Autobahnen breiten sich stets entgegen der Fahrtrichtung aus. So kann es zwar stromabwärts nach der Störung zu einer reduzierten Kapazität kommen (Capacity Drop), jedoch liegt kein instabiles Verhalten des Verkehrsflusses vor. Breiten sich die Störungen jedoch in beide Richtungen aus, verschwindet die Störung im Ursprung nicht und es liegt absolute Instabilität vor. Diese Einteilung ist schematisch in Abbildung 3-37 abgebildet.

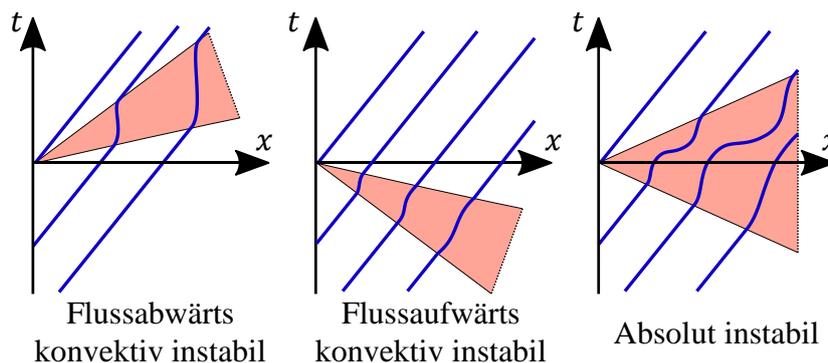


Abbildung 3-37: Schematische Unterteilung zwischen konvektiver und absoluter Kolonneninstabilität nach [WW11]

Lineare Kolonnenstabilität in makroskopischen Verkehrsflussmodellen

Für makroskopische Verkehrsflussmodelle zweiter Ordnung kann die *lineare Kolonnenstabilität* untersucht werden, indem die Modellgleichungen (3-16) um den stationären Zustand (Equilibriumzustand $V_e(\rho)$ aus einem Fundamentaldiagramm) linearisiert werden. Aus den linearisierten Gleichungen und dem Initialzustand kann dann mit Hilfe eines Wellen-Ansatzes und der Wellenzahl eine allgemeine Bedingung für die Stabilität von Second-Order-Modellen hergeleitet werden. Die Herleitung der Stabilitätsbedingung wird aus Gründen des Umfangs an dieser Stelle nicht angegeben und kann im Detail in [TK10] und [MV14] nachgeschlagen werden. Als Ergebnis der Herleitung resultieren allgemeine makroskopische Stabilitätsbedingungen für lokale und nichtlokale²² Modelle. Im Folgenden ist beispielweise die derart bestimmte konkrete lineare Kolonnenstabilitätsbedingung für das Payne-Witham-Modell (3-26) nach [TK10] zu sehen:

$$\left(\rho(x, t) \cdot \frac{dV_e(\rho(x, t))}{d\rho} \right)^2 \leq - \frac{dV_e(\rho(x, t))}{d\rho} \cdot \frac{1}{2\tau\rho(x, t)} \tag{3-63}$$

$$\Rightarrow - \frac{dV_e(\rho(x, t))}{d\rho} = \left| \frac{dV_e(\rho(x, t))}{d\rho} \right| \leq \frac{1}{2\tau\rho^2(x, t)} \tag{3-64}$$

²² Lokal: Ohne Antizipation in der Geschwindigkeitsdynamik, nichtlokal: Mit Antizipation in der Geschwindigkeitsdynamik

Es ist zu erkennen, dass das Payne-Witham-Modell linear kolonnenstabil ist, wenn die absolute Steigung des Fundamentaldiagramms $|V_e'(\rho)|$ geringer als ein von der Relaxationszeit τ und der Verkehrsdichte $\rho(x, t)$ abhängiger Term ist. Die Stabilität lässt sich hierbei anschaulich anhand der Relaxationszeit (der Anpassungszeit der Fahrzeuge an die Gleichgewichtsgeschwindigkeit $V_e(\rho)$) als wählbarer Modellparameter erläutern: Ist die Relaxationszeit groß und die Reaktion der Fahrer somit langsam, ist eine Kolonneninstabilität schon bei geringerer Verkehrsdichte zu erkennen, als dies der Fall ist, wenn die Relaxationszeit klein ist (entspricht einer kurzen Reaktionszeit der Fahrer).

Wird als Beispiel ein Payne-Witham-Modell mit einem Greenshields-Fundamentaldiagramm ($V_{max} = 100 \text{ km/h}$, $\rho_{jam} = 150 \text{ Fhz/km}$) herangezogen, so ist die Grenze zwischen dem stabilen und instabilen Bereich im Diagramm der Relaxationszeit über der Verkehrsdichte zu sehen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3-38 dargestellt. Wird die Relaxationszeit, welche ausschließlich im Nenner der Dynamikgleichung der Geschwindigkeit (3-26) vorkommt, weiter verringert und nähert sich einem Wert von Null, resultiert eine Beschleunigung, die ins Unendliche steigt. Im Grenzfalle ($\tau \rightarrow 0$) entspricht das Payne-Witham-Modell daher einem First-Order-Modell (genauer: dem LWR-Modell) mit einer instantanen Geschwindigkeitsanpassung und ist daher für alle Verkehrsdichten immer linear kolonnenstabil. Dies entspricht auch der Erkenntnis, dass First-Order-Modelle keine Instabilitäten ausbilden können.

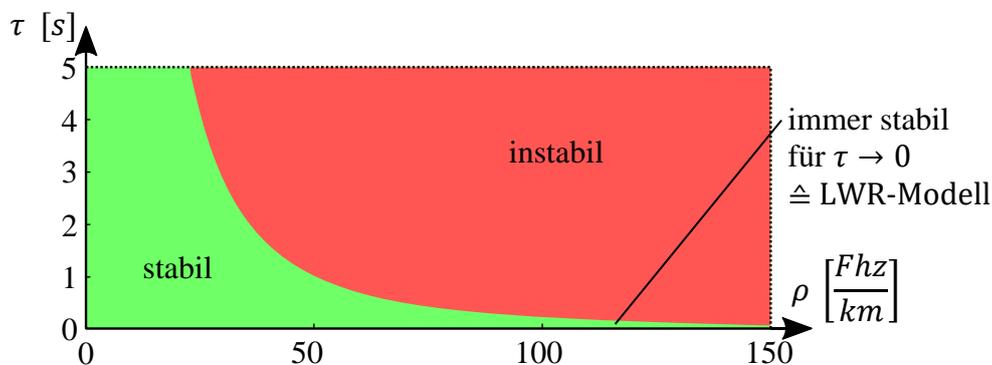


Abbildung 3-38: Kolonnenstabilitätsbereiche für das Payne-Witham-Modell mit einem Greenshields-Fundamentaldiagramm und $V_{max} = 100 \text{ km/h}$ sowie $\rho_{max} = 150 \text{ Fhz/km}$

Es sei an dieser Stelle zur Vollständigkeit noch auf eine alternative Bestimmung der linearen Kolonnenstabilität durch Beschreibung nichtlinearer Differentialgleichungen in Graphen hingewiesen [BTY07].

Nichtlineare Instabilitäten in makroskopischen Verkehrsflussmodellen

Bisher wurden nur lineare Kolonneninstabilitäten bei der Untersuchung makroskopischer Verkehrsflussmodelle betrachtet, nichtlineare Instabilitäten sind i.d.R. schwer bis gar nicht analytisch auswertbar, da z.B. eine Linearisierung um den Gleichgewichtszustand,

wie zuvor vorgestellt, nur für kleine Störungen gültig ist. Aus diesem Grund wird in diesen Fällen oft auf simulative Untersuchungen zurückgegriffen. Nachfolgend wird nun zunächst knapp auf einen analytischen Ansatz zur Beurteilung der nichtlinearen Kolonnenstabilität makroskopischer Verkehrsflussmodelle eingegangen, gefolgt von einem Ansatz, bei dem Aussagen zur Stabilität mit sog. Stabilitäts- und Phasendiagrammen getroffen werden können, die aus Simulationen bestimmt wurden.

Wavefront-Expansion-Methode

Mit der sog. Wavefront-Expansion-Methode kann die nichtlineare Instabilität von makroskopischen Verkehrsflussmodellen zweiter Ordnung analytisch nachgewiesen werden. Die Methode formuliert auf Grundlage einer Initialdichteverteilung eine relativ große Störung (nichtlinear).

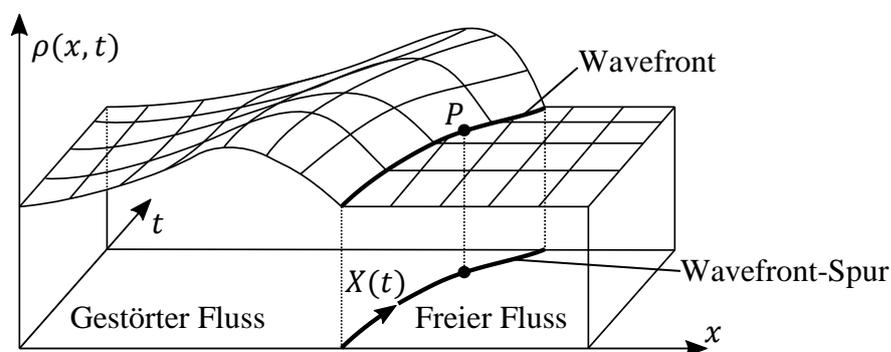


Abbildung 3-39: Idee der Wavefront-Expansion-Methode nach [YLA+02]

Wie in Abbildung 3-39 abgebildet, erfolgt die Ausbreitung dieser Störung in Form einer Dichteschwankung (Welle) entlang der Koordinate $X(t)$ und trennt somit den Bereich des freien vom Bereich des gestörten Verkehrsflusses mit Knickstelle im Übergang. Abhängig von der Parametrierung des Fundamentaldiagramms (V_{max}, ρ_{max}) und der Relaxationszeit τ in der Geschwindigkeitsdynamikgleichung lässt sich analytisch eine charakteristische Ausbreitungsgeschwindigkeit $\dot{X}(t)$ der Dichteschwankung bestimmen, die von der vorherrschenden Initialgrunddichte ρ_0 abhängt. Für diese Ausbreitungsgeschwindigkeit gelten dann verschiedene Stabilitätsbedingungen, um die sog. Ausbreitungsstabilität zu erfüllen. Von den Bedingungen kann jedoch nur eine einzige im Allgemeinen nicht erfüllt sein und muss somit gesondert geprüft werden. Die exakte Herleitung ist relativ umfangreich und kann u. a. in [YLA+02], [GS10] nachgeschlagen werden. In (3-65) ist die Bedingung zu sehen, für die ein Second-Order-Modell nichtlinear instabil ist:

$$\gamma \cdot \sqrt{-\frac{V_e'(\rho)}{2\tau}} > \rho \cdot V_e'(\rho) \quad (3-65)$$

Hierbei ist γ ein durch die Modellierung des Verkehrsdrucks $P(x, t)$ im verwendeten Second-Order-Modell vorgegebener, konstant positiver Wert. Durch Auflösen dieser Stabilitätsbedingung nach der Verkehrsdichte können Schwellen für die Initialverkehrsdichte bestimmt werden. Die Schwellen definieren, für welche großen Störungen das Modell stabil ist, also die Störungen verschwinden oder aber instabil ist, sodass die Störungen anwachsen. Abhängig von der Gestalt des verwendeten Fundamentaldiagramms kann es hierbei mehrere Lösungen geben, also mehrere Bereiche mit abwechselnder Stabilität. Im Fall des einfachen Greenshields-Fundamentaldiagramms resultiert beispielsweise nur eine einfache Lösung aufgrund der skalaren Ableitung $V_e'(\rho_0)$, während sich z.B. für das Kerner-Konhäuser-Fundamentaldiagramm²³ (vgl. [KK93]) in (3-66) nach [GS10] zwei Lösungen, ρ_{c_1} und ρ_{c_2} , ergeben.

$$V_e(\rho) = V_{max} \cdot \left(1 + e^{\frac{\left(\frac{\rho}{\rho_{max}}\right) + p_0}{p_1}} \right)^{-1} + p_2 \quad (3-66)$$

Die Lösungen stellen Randwerte für die Stabilitätsbereiche dar, im o.g. Beispiel zeigt sich die Stabilität für den Verkehrsfluss wie folgt: Stabil für $0 \leq \rho < \rho_{c_1}$, nichtlinear instabil für $\rho_{c_1} \leq \rho < \rho_{c_2}$ und wieder stabil für $\rho_{c_2} \leq \rho \leq \rho_{max}$.

Stabilitäts- und Phasendiagramme

Eine weitere Möglichkeit, die Stabilität von Verkehrsmodellen zu beurteilen, ist durch Simulation und Auswertung selbiger. Wie [TK10] vorstellt, lässt sich eine große Ringstraße mit vielen Fahrzeugen ohne externe Zu- oder Abflüsse als geschlossenes System simulieren, in dem alle Fahrzeuge und Fahrer als identisch betrachtet werden. Im Initialzustand wird ein globaler Gleichgewichtszustand mit konstanter Verkehrsdichte ρ_e mit einer einzelnen Störung angenommen. Um nun die sog. Stabilitätsdiagramme zu erstellen, wird der Wert der Grunddichte ρ_e vom Minimalwert schrittweise bis zum Maximalwert ρ_{max} erhöht und die Simulation jeweils mit einer sehr kleinen und einer sehr großen Initialstörung gestartet und ausgewertet.

²³ p_1, p_2 und p_3 sind weitere konstante Modellparameter

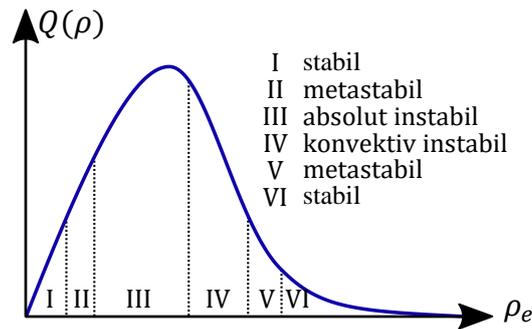


Abbildung 3-40: Stabilitätsdiagramm anhand von Simulationsergebnissen nach [TK13]

Als Ergebnis lässt sich das Fundamentaldiagramm in entsprechende Bereiche der Stabilität einteilen, wie dies in Abbildung 3-40 gezeigt ist. Die einzelnen Bereiche in Abbildung 3-40 sind nur qualitativ eingezeichnet und müssen nicht zwangsläufig für jedes zugrundeliegende Verkehrsflussmodell existieren.

Neben dem Stabilitätsdiagramm gibt es nach [HTK+09] und [TK10] eine Methode, die Stabilitätseinteilung nicht durch Simulation in Abhängigkeit einer Grunddichte ρ_e vorzunehmen. Stattdessen erfolgt die Einteilung durch die Definition einer Engstelle mit reduzierter Kapazität und der Verkehrsnachfrage, was dem realen Verkehr besser entspricht. Außerdem wird die Simulation nicht wie zuvor als geschlossenes Ringsystem, sondern als offenes System betrachtet. In Abbildung 3-41 links ist der Ansatz dargestellt. Gegeben sei eine Engstelle, bei der ein Rampenverkehrsfluss auf den Hauptverkehrsfluss trifft. Die Kapazität C ist durch den maximal möglichen Verkehrsfluss Q_{max} der Hauptstrecke definiert und damit durch das zugrundeliegende Fundamentaldiagramm vorgegeben (vgl. Abbildung 3-3). An der Engstelle wird diese Kapazität jedoch durch den zusätzlichen Verkehrsfluss Q_{ramp} reduziert, wie es nachfolgend in (3-67) gezeigt ist und ergibt die statisch reduzierte Kapazität C_B^{stat} . In der Realität treten jedoch i.d.R. Effekte auf, die bereits am Anfang von Kapitel 3.2 erläutert wurden. Ein wesentlicher Effekt ist der Capacity Drop, also eine Kapazitätsreduzierung nach einer Engstelle, die den Verkehrsfluss nachhaltig stört.

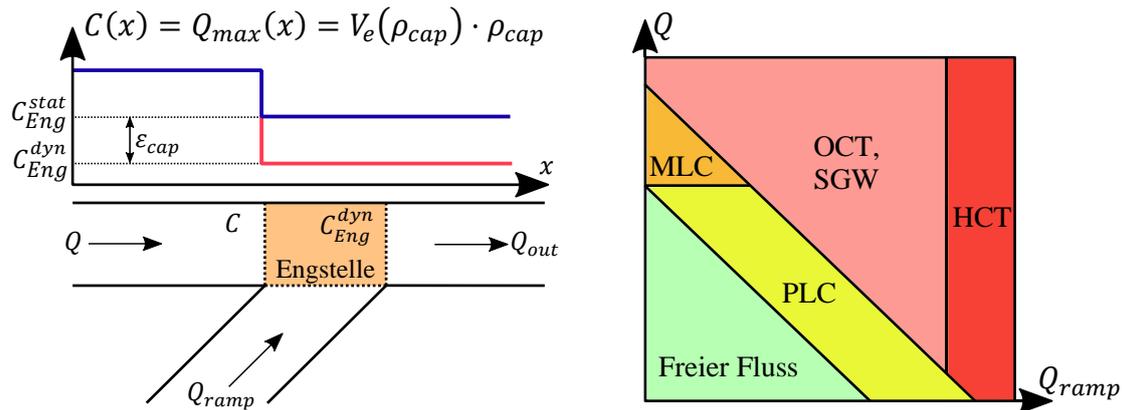


Abbildung 3-41: Links: Darstellung der dynamischen Kapazitätsreduzierung an einer Engstelle um den Faktor ϵ_{cap} (Capacity Drop), Rechts: Beispielhaftes Phasendiagramm als Ergebnis

Dieser Effekt wird nun auf die modellierte Engstelle angewendet und reduziert die Kapazität um einen weiteren Faktor ϵ_{cap} , der üblicherweise einen Wert von ca. 10% hat. Die dynamisch reduzierte Kapazität C_{Eng}^{dyn} berechnet sich also folglich wie in (3-68):

$$C_{Eng}^{stat} = C - Q_{ramp} \quad (3-67)$$

$$C_{Eng}^{dyn} = (1 - \epsilon_{cap}) \cdot C_{Eng}^{stat} \quad (3-68)$$

$\epsilon \in [0,1]$

Anhand der Simulationsergebnisse können nun typische Staumuster identifiziert werden, die abhängig von der Kapazitätsreduzierung durch den Rampenfluss Q_{ramp} sind und in entsprechende Phasendiagramme, wie in Abbildung 3-41 rechts dargestellt, eingezeichnet werden. Die Staumuster lassen sich nach [HT99] z.B. in die folgenden Klassen einteilen:

- *Freier Fluss:*
Ungestörter Verkehrsfluss
- *Moving Localized Clusters (MLC):*
Wandernde Stauwellen, die nicht aus der Engstelle resultieren, diese jedoch passieren, ohne einen weiteren Verkehrszusammenbruch zu erzeugen
- *Pinned Localized Clusters (PLC):*
Eine sich an der Engstelle aufbauende und stehende Stauwelle
- *Oscillating Congested Traffic (OCT):*
Einzelne, sich an der Engstelle aufbauende und wandernde Stauwellen ohne freien Verkehr zwischen den Stauwellen
- *Stop-And-Go Waves (SGW):*

Einzelne, sich an der Engstelle aufbauende und wandernde Stauwellen mit freiem Verkehr zwischen den Stauwellen

- *Homogeneous Congested Traffic (HCT)*:
Zähfließender homogener Verkehr

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Begriffe der Stabilität und Instabilität nicht in einfacher Weise für Verkehrsflussmodelle definiert werden können. Vielmehr existieren z.B. verschiedene Abstufungen der Instabilität und teilweise unterschiedliche Begrifflichkeiten. Außerdem existieren einige Möglichkeiten zur Untersuchung von Verkehrsflussmodellen auf Stabilität. Wie sich gezeigt hat, sind diese jedoch häufig aufgrund der Komplexität nur durch Simulation und nicht durch systemtheoretische Analyseansätze möglich.

3.2.4 Makroskopische Fundamentaldiagramme

Makroskopische Fundamentaldiagramme sind eine weitere Methode, den Verkehr makroskopisch zu beschreiben. Ähnlich wie Fundamentaldiagramme, wie sie in Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 am Anfang des Kapitels 3.2 eingeführt wurden, stellen die makroskopischen Fundamentaldiagramme die statische Beziehung zwischen Verkehrsdichte, Verkehrsfluss und mittlerer Flussgeschwindigkeit her. Der Unterschied liegt jedoch darin, dass sich diese Zusammenhänge nicht auf einen begrenzten Streckenabschnitt einer Straße beziehen (z.B. ein Autobahnabschnitt wie in Abbildung 3-3), sondern auf Straßennetausschnitte, die aus mehreren Kreuzungen und Straßen bestehen. Makroskopische Fundamentaldiagramme werden in der Literatur i.d.R. dazu verwendet, Straßen und Kreuzungen urbaner Gebiete oder ganzer Städte in einem einzigen Zusammenhang darzustellen. In Abbildung 3-42 sind beispielsweise die makroskopischen Fundamentaldiagramme für die Städte Yokohama und San Francisco in Form von Messpunkten aufgetragen. Interessanterweise ergeben sich ähnliche qualitative (und konkave) Verläufe, wie dies bei den Fundamentaldiagrammen (vgl. Abbildung 3-3) der Fall ist, jedoch ist diese Eigenschaft nicht für jeden beliebigen Straßennetausschnitt erfüllt. So wird in [DG08] wird gezeigt, dass ein makroskopisches Fundamentaldiagramm grundsätzlich für jeden Straßennetausschnitt existiert, der klare charakteristische Verlauf (vgl. Abbildung 3-42) jedoch maßgeblich von der Wahl der Ausdehnung des betrachteten Netzausschnitts abhängt [HM17].

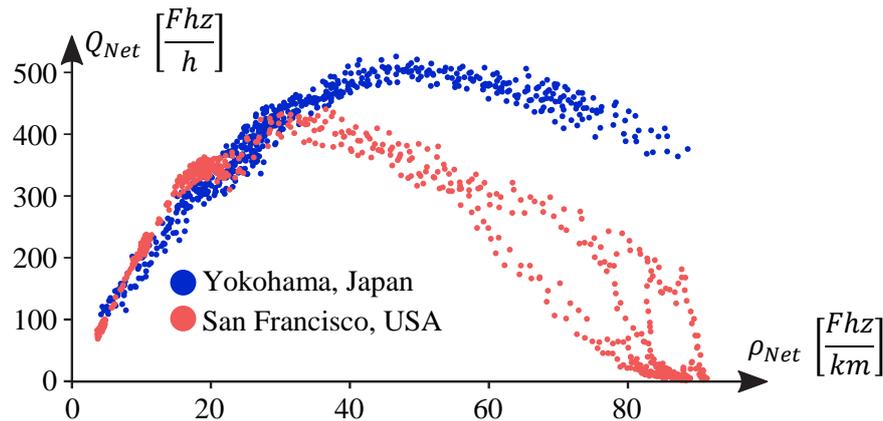


Abbildung 3-42: Makroskopische Fundamentaldiagramme aus Messdaten für Yokohama und San Francisco nach [GCL+09], Index „Net“: Netzausschnitt

Die Größen der Flussgeschwindigkeit, der Verkehrsdichte und des Verkehrsflusses sind bei makroskopischen Fundamentaldiagrammen ähnlich wie in (3-1) - (3-3) definiert, jedoch beziehen sich diese nun auf alle Streckenlängen und Fahrzeuge in dem betrachteten Straßennetausschnitt. Die Verkehrsdichte ρ_{Net} des Straßennetausschnitts ist daher in Anlehnung an [GD07], [KHv12] und [HM17] wie folgt zu berechnen:

$$\rho_{Net}(t) = \frac{N_{Net}(t)}{\sum_{i=1}^M l_i} \quad (3-69)$$

Hierbei gibt $N_{Net}(t)$ die aktuelle Anzahl der Fahrzeuge und M die Anzahl der Straßen innerhalb des betrachteten Straßennetausschnitts an. l_i definiert die Länge der Straße i . Die Berechnung ist also derart aufzufassen, als würden alle Straßen im Straßennetausschnitt aneinandergelagert und für die resultierende Gesamtstrecke die Verkehrsdichte berechnet werden. Analog kann auch der Belegungsgrad $O_{Net}(t)$ berechnet werden, welcher in der Literatur häufiger Anwendung findet.

Wird ein Straßennetz modelltechnisch in mehrere Straßennetausschnitte eingeteilt und für jeden Ausschnitt ein makroskopisches Fundamentaldiagramm zur Zustandsbeschreibung herangezogen, so ist nach [HM17] darauf Wert zu legen, dass die Ausschnitte ausreichende und vergleichbare Größen aufweisen („homogene Regionen“), damit makroskopische Fundamentaldiagramme mit wenig Streuungen resultieren. Diese verbundenen Ausschnitte stellen die Grundlage der in Kapitel 2.3 vorgestellten intelligenten Verkehrsregionen-Steuerungen (Perimeter Control) dar.

4 Hierarchisches autonomes Verkehrsmanagement

In diesem Kapitel wird das entwickelte Konzept eines hierarchischen autonomen Verkehrsmanagements erläutert. Zunächst wird die Idee des Ansatzes und die Gesamtstruktur vorgestellt, anschließend werden die drei Hierarchieebenen mit ihren jeweiligen Funktionen näher beschrieben.

4.1 Idee und Gesamtstruktur

Bevor nun die Struktur im Überblick und im Detail erläutert wird, soll zunächst geklärt werden, welches Verkehrsszenario als Grundlage herangezogen wird und wie die Ziele des entwickelten Verkehrsmanagementsystems lauten.

Betrachtetes Verkehrsszenario

Wie in der Motivation der Arbeit beschrieben, werden als Grundlage des Verkehrsmanagementsystems einige Voraussetzungen und Vereinfachungen gegenüber dem (heutigen) sehr komplexen realen Verkehr definiert, um die generelle Funktionsfähigkeit des Ansatzes nachzuweisen. Der vorgestellte Ansatz ist jedoch nicht auf dieses vereinfachte Szenario beschränkt.

Betrachtet wird das Szenario eines stark ausgelasteten Verkehrszustands wie dies z.B. üblicherweise in Stoßzeiten in den Morgen- oder Nachmittagsstunden der Fall ist. Ferner wird ein vollautonomer und vernetzter Verkehr vorausgesetzt, d.h. ein Mischverkehr mit nicht-autonomen und autonomen Fahrzeugen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Im betrachteten Verkehrsszenario existieren folglich keine Fahrer mehr, sondern ausschließlich Fahrgäste, die sich dadurch unterscheiden lassen, welche Start- und Zielpunkte diese haben. Besondere Eigenarten, wie bspw. Priorisierungen von Einzelfahrzeugen, wie etwa Einsatzfahrzeuge, werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Zudem wird stets eine homogene Fahrzeugflotte betrachtet, d.h. die Fahrzeuge verfügen über dieselben geometrischen Abmessungen und dynamischen Eigenschaften (Beschleunigungs- und Bremsvermögen). Die Flotte aller im Straßennetz befindlichen Fahrzeuge ist mit Hilfe dieser Annahme durch den vorgestellten Ansatz aktiv beeinflussbar und ermöglicht neuartige Regelungskonzepte für das Gesamtsystem. In erster Instanz wird davon ausgegangen, dass die autonomen Fahrzeuge ein perfektes Folgeverhalten aufweisen. Aus diesem Grund wird ein Szenario betrachtet, bei dem Lichtsignalanlagen aufgrund der autonomen Fahrzeuge und der Car2X-Kommunikation obsolet sind. Die Fahrzeuge werden stattdessen vom Verkehrsmanagementsystem kollisionsfrei durch die Kreuzungen geführt. Fußgänger und andere Verkehrsteilnehmer, welche die Straßen kreuzen wollen, werden daher ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die Annahmen und Vereinfachungen sind im Folgenden noch einmal kompakt zusammengefasst:

- Stark Ausgelasteter Verkehrszustand
- Vollautonomer, vernetzter Verkehr
- Perfektes Folgeverhalten der Fahrzeuge
- Homogene Fahrzeugflotte
- Keine Priorisierungen von Einzelfahrzeugen
- Keine weiteren Verkehrsteilnehmer
- Keine Lichtsignalanlagen

Ziele des Verkehrsmanagementsystems

Das Ziel des entwickelten Verkehrsmanagementsystems ist dafür zu sorgen, dass der Verkehrsfluss im genannten Szenario stets erhalten bleibt und sich keine Stauungen ausbilden, die den Verkehr in Teilen des betrachteten Straßennetzes zum Erliegen bringen (oder anders ausgedrückt: den Verkehrsfluss zu stabilisieren). Es resultiert aus der Annahme, dass die Reisezeiten aller Fahrzeuge im Mittel reduziert werden und der Fahrzeugdurchsatz für einen Straßennetausschnitt erhöht wird, wenn der Verkehrsfluss erhalten bleibt und keine Fahrzeuge zum Stillstand kommen. Außerdem soll zusätzlich eine Homogenisierung des Verkehrsflusses erfolgen, sodass dieser nicht lediglich erhalten bleibt, sondern sich über das gesamte Straßennetz in einem etwa gleichen Zustand befindet. Dieses Ziel folgt der Annahme, dass der Verkehrsfluss unter derartigen Bedingungen besser erhalten werden kann und die Risiken für Stauungen reduziert werden. Die genannten Annahmen gilt es allerdings im Folgenden noch zu prüfen. Neben der Erhaltung des Verkehrsflusses ergibt sich das sekundäre Ziel der Reduzierung von Emissionen (Schadstoffe, Feinstaub, Lärm, etc.).

Es werden also explizit keine individuellen Ziele einzelner Verkehrsteilnehmer (wie z.B. kürzeste Reisezeiten, Strecken usw.) berücksichtigt, sondern kollektive Ziele definiert:

- Erhaltung des Verkehrsflusses
- Homogenisierung des Verkehrsflusses
- Reduzierung des Staurisikos
- Reduzierung der mittleren Reisezeit / Erhöhung des Fahrzeugdurchsatzes
- Reduzierung von Emissionen

Die genannten Ziele und die dafür notwendigen Strategien, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, weisen im Übrigen bewusst Ähnlichkeiten zu den bereits in Tabelle 2 aufgeführten Zielen und Stellmöglichkeiten auf, welche in diesem Rahmen als Ideengrundlage aufgefasst werden können.

Struktur des Verkehrsmanagementsystems

Das real existierende Straßennetz ist eine sehr komplexe und geometrisch weitläufige Struktur, die sich als Einheit betrachtet über Landes- und Staatsgrenzen hinweg erstreckt. Verkehrseffekte, wie sie in Kapitel 3 erläutert wurden und die daraus resultierenden Ver-

kehrszustände sind jedoch lokal begrenzt und damit in ihrer Ausdehnung um Größenordnungen geringer als die Ausmaße des Straßennetzes. Ein Ansatz für ein Verkehrsmanagementsystem ist daher ohne definierte Betrachtungsgrenzen nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Hierarchie für das Verkehrsmanagement mit mehreren Ebenen eingeführt, die den Verkehr in einem räumlich begrenzten Gebiet beeinflusst. Die Hierarchieebenen umfassen jeweils unterschiedlich abstrahierte Betrachtungen des Verkehrsgeschehens und darauf aufsetzende Steuerungs- und Regelungsalgorithmen, außerdem steigt die räumliche Betrachtungsgröße je höher die entsprechende Ebene liegt. Während sich also Ebene 1 auf einzelne Fahrzeuge bezieht (mikroskopische Betrachtung), werden in Ebene 2 ganze Straßenzüge mit mehreren Kreuzungen und in Ebene 3 Netze aus solchen Systemen betrachtet. Da auf diese Weise die Komplexität in den höheren Ebenen wesentlich steigt (mehr Verkehrsteilnehmer, mehr Straßen und Kreuzungen), wird hier zur Abstraktion eine makroskopische Verkehrsbetrachtung verwendet, welche die Komplexität deutlich verringert. Der vorgestellte Ansatz besteht aus drei Hierarchieebenen, jedoch ist diese Anzahl an Ebenen nicht beschränkt, wie sich im Weiteren noch zeigen wird.

Tabelle 3: Die drei Hierarchieebenen des vorgestellten Ansatzes für ein autonomes Verkehrsmanagementsystem

Hierarchieebene	Abstraktionsgrad	Betrachtung des Verkehrs	Funktionen
1	Gering	<i>Mikroskopisch</i> <ul style="list-style-type: none"> Betrachtete Systeme: Einzelfahrzeuge Zustände: Fahrzeugzustand 	<ul style="list-style-type: none"> Kollisionsfreie Längs- und Querverführung der Fahrzeuge Vorgabe kollisionsfreier Einzelfahrzeugtrajektorien zum Passieren von Kreuzungen
2	Hoch	<i>Mikroskopisch + Makroskopisch</i> <ul style="list-style-type: none"> Betrachtete Systeme: Einzelne Bilanzräume Zustände: Kreuzungsdichten 	<ul style="list-style-type: none"> Vorgabe mittlerer Kreuzungs-Sollgeschwindigkeiten (Verkehrsdichteregulierung) Vorgabe von Sollrouten durch Bilanzräume
3	Sehr hoch	<i>Mikroskopisch + Makroskopisch</i> <ul style="list-style-type: none"> Betrachtete Systeme: Menge von Bilanzräumen Zustände: Bilanzraumdichten 	<ul style="list-style-type: none"> Vorgabe von Sollrouten über Bilanzräume Vorgabe von Eingangs- und Ausgangsstraßen der zu passierenden Bilanzräume
...

↓ Abstraktion ↑

Wie bereits bei den Zielen genannt, beruht auch die Wahl der Hierarchieebenen sowie der Funktionen einerseits auf den in Tabelle 2 genannten Gründen sowie auf Vorarbeiten, die an den entsprechenden Stellen gesondert erwähnt werden.

In den folgenden Unterkapitel 4.2 bis 4.4 werden die in Tabelle 3 genannten Hierarchieebenen im Detail erläutert.

4.2 Ebene 1: Mikroskopisches Management

Die erste zu beschreibende Ebene stellt die mikroskopische Ebene dar, auf der alle Fahrzeuge als eigenständige Einheiten betrachtet werden. Das eingangs erläuterte Szenario vollautonomer und untereinander via Car2X-Kommunikation vernetzter Fahrzeuge bildet für den vorgestellten Ansatz die Grundlage. Die mikroskopische Ebene umfasst hierbei die umfangreichsten Aufgaben aller Ebenen, denn hier müssen alle Funktionen berücksichtigt werden, die für einen sicheren autonomen Verkehr notwendig sind (vgl. Kapitel 2.1). Zu diesen Funktionen gehören typischerweise die Sensierung und Erfassung der Umwelt inklusive einer Objekterkennung, die darauf basierende Interpretation der Situation sowie nachgelagerte Entscheidungsprozesse für die entsprechenden notwendigen Handlungen. Schließlich müssen die getroffenen Handlungsentscheidungen kontrolliert umgesetzt werden. Bei jeder einzelnen dieser Funktionen können vielseitige Probleme auftreten. Beispielsweise erschweren Sensorfehler oder eine Fehlinterpretation der Situation die Entscheidungsprozesse wesentlich. Es ist offensichtlich, dass die notwendigen und vielschichten Funktionen für die Abbildung eines autonomen Verkehrs zu komplex sind, als dass diese in ihrer Gesamtheit berücksichtigt werden können.

Aus diesem Grund wird sich im Folgenden auf zwei Kernfunktionen als exemplarische Beispiele der mikroskopischen Ebene beschränkt. Diese Kernfunktionen lauten:

1. Autonomes Kreuzungsmanagement ohne Lichtsignalanlagen durch Vorgabe berechneter kollisionsfreier Fahrzeugtrajektorien
2. Kontrollierte Längsführung der Fahrzeuge mittels Fahrzeugfolgmodellen wie in Kapitel 3.1 vorgestellt.

Die unter Punkt Eins genannte Funktion wird nachfolgend in Kapitel 4.2.1 detaillierter erläutert, da diese den wesentlichen Anteil der mikroskopischen Ebene im vorgestellten Ansatz des Verkehrsmanagements ausmacht. Die Umsetzung der zweiten Funktion wird im Kapitel 5.2.1 erläutert. Für die zuvor genannten weiteren Funktionen werden nun unter Berücksichtigung des autonomen Kreuzungsmanagements folgende Annahmen getroffen:

1. Die Sensierung und Erfassung der Umwelt wird als ideal betrachtet, d.h. zu jedem Zeitpunkt liegen vollständige und korrekte Informationen über die Umwelt vor.
2. Die Objekterkennung und Interpretation der Situation wird ebenfalls als ideal betrachtet, sodass keine Fehlinterpretationen möglich sind.

3. Die Entscheidungsprozesse für alle Handlungen, die nicht die beiden zuvor erwähnten Kernaufgaben betreffen (z.B. Spurwechsel, Notbremsung, usw.), werden stets als ideal aufgefasst. Ein Fehlverhalten der Fahrzeuge ist somit ausgeschlossen.
4. Die Fahrzeuge weisen stets ein ideales Folgeverhalten auf, d.h., dass die Fahrzeuge z.B. einer vorgegebenen Trajektorie perfekt folgen.

4.2.1 Beispiel eines autonomen Kreuzungsmanagements

Im betrachteten Szenario werden nachfolgend Straßen und Kreuzungen betrachtet. Die Fahrzeuge fahren vollständig autonom und sind sowohl untereinander als auch mit der Infrastruktur über Car2X-Kommunikation vernetzt. Der Ansatz des Kreuzungsmanagements übernimmt hierbei die Koordination der Fahrzeuge an Kreuzungen und ersetzt somit die Lichtsignalanlagen, welche hierdurch im vereinfachten Szenario als obsolet zu betrachten sind. Die Hauptaufgabe von Lichtsignalanlagen ist, wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, unverträgliche Verkehrsflüsse sicher und kollisionsfrei durch Kreuzungen zu leiten. Durch eine fremdbestimmte Verhaltensvorgabe in Form eines Kreuzungsmanagements ist es mit autonomen Fahrzeugen nun möglich, nicht lediglich die Aufgaben einer Lichtsignalanlage zu übernehmen, sondern auch deren Leistungsfähigkeit deutlich zu erhöhen. Dies wird erreicht, da Fahrzeuge dichter auffahren bzw. aneinander vorbeifahren können. Die Räumzeiten, welche bei der Auslegung von Lichtsignalanlagenprogrammen einen wichtigen Anteil ausmachen, können daher vernachlässigt werden. Auf diese Weise ist es möglich, Trajektorien mit stetiger Geschwindigkeitsanpassung derart zu planen, dass Halts mitsamt den nachteiligen Umweltauswirkungen durch Emissionen nicht immer notwendig sind.

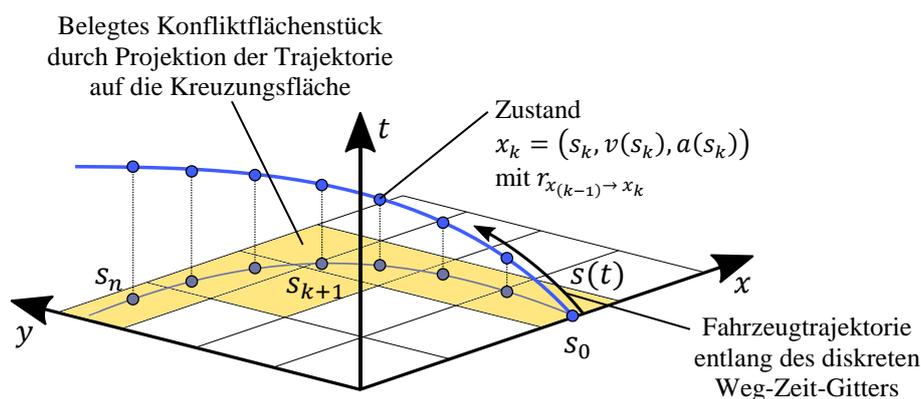


Abbildung 4-1: Prinzip des diskreten Weg-Zeit-Gitters für das Kreuzungsmanagement

Zur Umsetzung erhält jede Kreuzung im Straßennetz eine Recheneinheit (symbolisch), die mit den in die Kreuzung einfahrenden Fahrzeugen kommuniziert und die notwendigen Berechnungen durchführt. Die entsprechenden kollisionsfreien Trajektorien werden dann den jeweiligen Fahrzeugen zurückgegeben. Im Wesentlichen beruht der Ansatz auf der

von [TA09] und [Tho11] vorgestellten Idee und wurde um einige Funktionen erweitert. Er zeichnet sich dadurch aus, dass der Weg durch eine Kreuzung nur in diskreten Schritten Δs betrachtet wird, welche aber nicht notwendigerweise äquidistant sein müssen. Auf diese Weise lässt sich jeder mögliche Fahrweg durch eine Kreuzung als eine Folge von n Wegstützstellen auffassen, entlang derer sich die Fahrzeuge durch die Kreuzung bewegen. Die Bewegung zwischen den Stützstellen wird hierbei als kontinuierlich betrachtet, wie dies auch in Abbildung 4-1 dargestellt ist. Jedes Fahrzeug ist hierbei durch den Zustand $x_k = (s_k, v(s_k), a(s_k))$ an jeder Stützstelle charakterisiert, also mit der aktuellen Beschleunigung $a(s_k)$, der aktuellen Geschwindigkeit $v(s_k)$ und der aktuellen Position s_k entlang des Pfades durch die Kreuzung. Die Zustände werden durch einfache Integration des Rucks $r(s_k)$ als Eingang über der zur Erreichung der nächsten Wegstützstelle s_{k+1} benötigten Zeit T_r berechnet, welche zu den kontinuierlichen Funktionen $a(t)$, $v(t)$ und $s(t)$ zwischen den Stützstellen führt. Die Werte für a_0 , v_0 und s_0 dienen hierbei als Initialwerte des Systems (siehe Gleichungen (4-1) bis (4-3)). Für alle Zustandsgrößen und die Eingangsgröße gelten die Beschränkungen gemäß Gleichung (4-4).

$$a(t) = r_k(t) \cdot T_r + a_0 \quad (4-1)$$

$$v(t) = \frac{1}{2} \cdot r_k(t) \cdot T_r^2 + a_0 \cdot T_r + v_0 \quad (4-2)$$

$$s(t) = \frac{1}{6} \cdot r_k(t) \cdot T_r^3 + \frac{1}{2} \cdot a_0 \cdot T_r^2 + v_0 \cdot T_r + s_0 \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} r_{Min} &\leq r_k(t) \leq r_{Max} \\ a_{Min} &\leq a(t) \leq a_{Max} \\ v_{Min} &\leq v(t) \leq v_{Max} \\ 0 &\leq s(t) \leq s_n \end{aligned} \quad (4-4)$$

Zusätzlich wird die Kreuzungsfläche (Konfliktfläche der nichtverträglichen Verkehrsflüsse), wie in Abbildung 4-1 gezeigt, in Flächenstücke diskretisiert, durch welche die Kreuzungspfade führen. Um Kollisionen zu verhindern, muss der noch vorzustellende Algorithmus dafür sorgen, dass zu jedem diskreten Zeitpunkt t_k jedes der erwähnten Flächenstücke nur von maximal einem Fahrzeug (teilweise) bedeckt ist. Durch geeignete Definition der Diskretisierungsschrittweiten (z.B. unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit) kann damit garantiert werden, dass diese Bedingung auch in der Zeit zwischen zwei diskreten Zeitschritten nicht verletzt werden kann.

Im Folgenden soll der logische Ablauf des Algorithmus zur Berechnung kollisionsfreier Trajektorien erläutert werden.

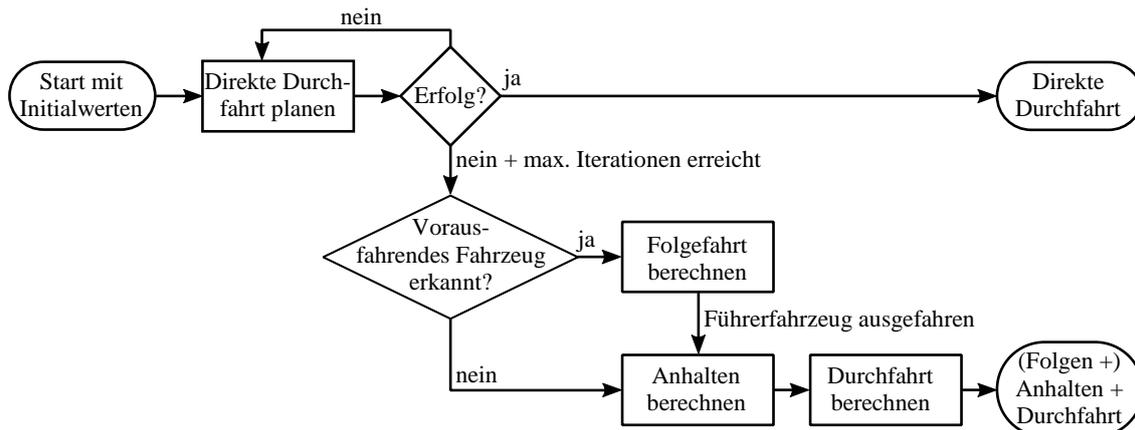


Abbildung 4-2: Grundsätzlicher Ablauf der Trajektorienplanung des Kreuzungsmanagements

In Abbildung 4-2 ist der grundsätzliche Ablauf schematisch dargestellt. Fährt ein Fahrzeug auf eine Kreuzung zu, so wird die Recheneinheit aktiviert, sobald das Fahrzeug eine definierte Grenzmarkierung überfahren hat. Zu diesem Zeitpunkt teilt das Fahrzeug der Recheneinheit seinen aktuellen Zustand (Beschleunigung, Geschwindigkeit und zurückgelegter Weg) sowie die Wunschausfahrtsrichtung über Car2X-Kommunikation mit. Diese Informationen werden an dieser Stelle als Initialzustand des Fahrzeugs verstanden. Zunächst wird versucht, eine kollisionsfreie Durchfahrtstrajektorie zu finden, bei der das Fahrzeug nicht anhalten muss (direkte Durchfahrt, oberer Pfad). Hierzu wird auf dem Ruck basierend eine Vielzahl fahrdynamisch umsetzbarer Trajektorien durch die Kreuzung generiert, die maximale Querbeschleunigungen und Geschwindigkeiten berücksichtigen (die Trajektoriengenerierung wird im Anschluss noch detaillierter erläutert). Alle generierten, fahrdynamisch umsetzbaren Trajektorien werden anschließend mit einer Kostenfunktion bewertet, die z.B. auf der benötigten Reisezeit durch die Kreuzung, dem Fahrkomfort oder der Effizienz basieren können. Ist jede Trajektorie mit der Kostenfunktion ausgewertet, wird die Menge an Trajektorien entsprechend der Kosten sortiert. Beginnend mit der Trajektorie mit den geringsten Kosten (beste Trajektorie) wird nun ein iterativer Prozess gestartet. Für die aktuell beste Trajektorie wird geprüft, ob diese kollisionsfrei ist, d.h. ob die vom Fahrzeug bedeckten Kreuzungsflächen (vgl. Abbildung 4-1) nicht bereits zu einem diskreten Zeitpunkt von einem weiteren Fahrzeug belegt sind. Hierzu liegt ein Datenspeicher vor, der für jede Kreuzungsfläche speichert, zu welchen diskreten Zeitpunkten diese belegt sind. Wird eine Kollision erkannt, so wird die Trajektorie verworfen und dieselbe Prüfung für die nächstbeste Trajektorie vollzogen, bis schließlich eine kollisionsfreie Trajektorie gefunden wurde. Für die gefundene Trajektorie werden nun im Datenspeicher alle bedeckten Kreuzungsflächen und die zugehörigen diskreten Zeitpunkte gespeichert, sodass diese für andere zukünftige Fahrzeuge gesperrt sind. Für das betrachtete Fahrzeug ist also die Berechnung abgeschlossen und eine direkte Durchfahrt, wie dies im oberen Zweig in Abbildung 4-2 zu sehen ist, möglich.

Tritt jedoch der Fall ein, dass keine einzige kollisionsfreie Trajektorie gefunden werden kann, bei der das Fahrzeug die Kreuzung mit einer direkten Durchfahrt passieren kann, so ist dieses gezwungen, an der Kreuzung zu halten (vgl. Abbildung 4-2, unterer Zweig). Dies kann z.B. der Fall sein, wenn eine hohe Verkehrsbelastung vorliegt und infolgedessen auch die Kreuzung sehr ausgelastet ist. Das Kreuzungsmanagement berechnet daher zwei Trajektorien: Eine Anhaltetrajektorie und eine nachgelagerte Durchfahrtstrajektorie nach einer Wartezeit an der Kreuzung. Hierbei wird jedoch unterschieden, ob zu dem betrachteten Fahrzeug ein vorausfahrendes Fahrzeug existiert, dessen Trajektorie bereits berechnet wurde. Ist dies der Fall, kann die Trajektorie des vorausfahrenden Fahrzeugs zur Planung berücksichtigt werden und eine weitere Trajektorie berechnet werden, die dem Anhalten vorgezogen ist. Das Kreuzungsmanagement berechnet in diesem Fall also eine Folgetrajektorie mit definiertem Abstand für das betrachtete Fahrzeug zum vorausfahrenden Fahrzeug. Ist das Führerfahrzeug aus der Kreuzung ausgefahren oder wartet noch an der Kreuzung, so kann, wie im Fall ohne Führerfahrzeug, eine Anhaltetrajektorie und eine Durchfahrtstrajektorie berechnet werden.

Die Berechnung im Kreuzungsmanagement wird pro Fahrzeug lediglich ein einziges Mal gestartet, sodass die Planung folglich starr ist. Es werden also etwaige Lösungen (Kombinationen von Trajektorien der Fahrzeuge) vernachlässigt, die ggf. bessere Ergebnisse erzielen könnten. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn der Ansatz wiederholt für alle Fahrzeuge gestartet würde. Dieser Nachteil ist in diesem Kontext bekannt, wird jedoch nicht weiter betrachtet, da dieser einen wesentlich höheren Berechnungsaufwand erfordert dies im vorgestellten Anwendungsfall gegenüber dem vorgestellten Ansatz nicht im Verhältnis zum Qualitätsgewinn steht.

Trajektorien-generierung

Die Trajektorien-generierung berücksichtigt, wie zuvor erwähnt, die Einhaltung von maximal erlaubten Höchstgeschwindigkeiten sowie zulässigen maximalen Querschleunigungen. Während die erlaubte Höchstgeschwindigkeit i.d.R. durch die Verkehrsregeln vor Ort vorgegeben ist und direkt berücksichtigt werden kann, wird für die maximal zulässige Querschleunigung eine vereinfachte Berechnung über die Zentripetalbeschleunigung herangezogen, die in [GR17] und [MRA15] detailliert erläutert wird und auch in dem als Grundlage betrachteten Ansatz [Tho11] Verwendung findet.

$$r = \frac{1}{\kappa} \quad (4-5)$$

$$a_z = \kappa \cdot v^2 \quad (4-6)$$

$$v = \pm \sqrt{\frac{a_z}{\kappa}} \quad (4-7)$$

$$v_{max} = \pm \sqrt{\frac{a_{max}}{\kappa}} \quad (4-8)$$

$$v_{max} = \max \left(\pm \sqrt{\frac{a_{max}}{\kappa(s)}} \right) \quad (4-9)$$

Die Zentripetalbeschleunigung a_z kann über die Kurvenkrümmung κ sowie die Geschwindigkeit v , wie in Gleichung (4-6) angegeben, berechnet werden. Hierbei wird die Kurvenkrümmung als das Reziproke des Kurvenradius r ausgedrückt (4-5). Zusätzlich kann der Radius und damit die Krümmung der Kurve auch als nicht-konstanter Wert, als Funktion der Bogenlänge betrachtet werden (also $\kappa(s)$). Die maximal zulässige Geschwindigkeit v_{max} für eine Kurve berechnet sich demnach also wie in Gleichungen (4-8) und (4-9) angegeben.

In dem hier vorgestellten Ansatz wird die Krümmung $\kappa(s)$ einer Trajektorie durch die Kreuzung durch eine parametrische Kurve mit vier Stützpunkten, einer sog. kubischen Bézier-Kurve $\underline{c}(s)$, realisiert, die in Gleichung (4-10) zu sehen ist. Die Kurve beschreibt den statischen Pfad, auf dem sich ein Fahrzeug durch die Kreuzung bewegt, mit einer zusätzlichen Zeitinformation kann also eine Trajektorie definiert werden. Die Berechnung der Trajektorie wird für jede Kreuzung mehrfach durchgeführt, da von jeder Eingangsstraße zu jeder Ausgangsstraße eine Bézier-Kurve erzeugt werden muss. An die zu berechnenden Kurven wird hierbei die Anforderung gestellt, dass diese die Eingangs- und Ausgangsstraßen derart verbinden, dass die Krümmung über die gesamte Kurve stetig ist (die Bézier-Kurve selbst muss also stetig differenzierbar sein), da in diesem Fall Lenkwinkelsprünge der Fahrzeuge beim Durchfahren der Kreuzung vermieden werden. Für den einfachen Sonderfall, dass ein Geradenstück zwei in Flucht verlaufende Eingangs- und Ausgangsstraßen verbindet, ist die Berechnung einer Bézier-Kurve außerdem nicht erforderlich. Da die Bézier-Kurve nur in der Ebene definiert ist, kann diese auch komponentenweise durch $c_x(s)$ und $c_y(s)$ angegeben werden. Die Funktion wird über den Kurvenparameter s ausgewertet, welcher der normierten Bogenlänge mit Werten zwischen Null und Eins entspricht. Die vier Stützpunkte \underline{p}_0 bis \underline{p}_3 charakterisieren hierbei die Bézier-Kurve eindeutig. Eine exemplarische grafische Darstellung ist in Abbildung 4-3 links zu sehen.

$$\underline{c}(s) = \begin{bmatrix} c_x(s) \\ c_y(s) \end{bmatrix}$$

$$= (1-s)^2 \cdot \underline{P}_0 + 3s(1-s)^2 \cdot \underline{P}_1 + 3s^2(1-s) \cdot \underline{P}_2 + s^3 \cdot \underline{P}_3 \quad (4-10)$$

mit $0 \leq s \leq 1$

$$\kappa(s) = \frac{c'_x(s) \cdot c''_y(s) - c'_y(s) \cdot c''_x(s)}{(c'^2_x(s) + c'^2_y(s))^{\frac{3}{2}}} \quad (4-11)$$

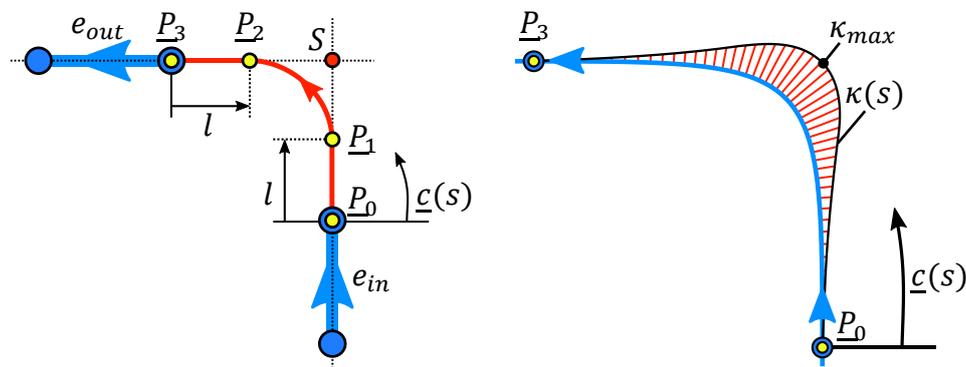


Abbildung 4-3: Links: Hilfszeichnung zur Berechnung des Kurvenverlaufs aus zwei Geradenstücken e_{in} und e_{out} , rechts: Krümmungsverlauf für exemplarische Kurve

Die Verwendung der Bézier-Kurve ermöglicht nun die analytische Bestimmung der Krümmung $\kappa(s)$ durch Differentiation der Kurvenfunktion $\underline{c}(s)$, wie in Gleichung (4-11) gezeigt. Auf diese Weise kann folglich die in Gleichung (4-9) gezeigte Methode zur Bestimmung der maximal erlaubten Höchstgeschwindigkeit in der Kreuzungskurve verwendet werden. Damit die Bézier-Kurve nun eindeutig definiert ist, muss die Lage der Stützpunkte \underline{P}_0 bis \underline{P}_3 im Algorithmus des Kreuzungsmanagements berechnet werden. Hierzu werden die Endstücke der entsprechenden Eingangs- und Ausgangsstraße der Kreuzung (e_{in} und e_{out}) wie dargestellt vereinfacht als Geradenstücke angenommen. Die Stützpunkte \underline{P}_0 der Eingangsstraße sowie \underline{P}_3 der Ausgangsstraße sind somit bereits bestimmt.

Für die Lage der Stützpunkte \underline{P}_1 und \underline{P}_2 existieren im Unterschied dazu unendlich viele Lösungen. Damit jedoch die zuvor erwähnte Forderung der stetigen Differenzierbarkeit für $\underline{c}(s)$ erfüllt wird, werden \underline{P}_1 und \underline{P}_2 durch Lösung eines beschränkten Optimierungsproblems berechnet, welches die Startkrümmung $\kappa(s=0)$ und die Endkrümmung $\kappa(s=1)$ minimiert. Die Stützpunkte werden um den zu bestimmenden Betrag l entlang der jeweiligen Geraden in Richtung des Schnittpunkts S beider Straßen verschoben. Die Minimierungsfunktion ist in Gleichung (4-12) gegeben.

$$\min_{l \in \mathbb{R}} \kappa(l, 0)^2 + \kappa(l, 1)^2 \tag{4-12}$$

Durch die Berechnung von l sind die Punkte \underline{P}_1 und \underline{P}_2 ebenfalls eindeutig bestimmt. Einen beispielhaften Verlauf für eine Bézier-Kurve mit einer verschwindenden Anfangs- und Endkrümmung ist in Abbildung 4-3 rechts gezeigt.

Direkte Durchfahrt

Liegen nach der Bestimmung der maximal möglichen Durchquerungsgeschwindigkeit und des Durchfahrtpfades auch sämtliche weiteren Beschränkungen für die Trajektorien-generierung vor (vgl. (4-4)), können nun Trajektorien für die direkte Durchfahrt der Kreuzung erzeugt werden. Im vorgestellten Ansatz wird dafür ein diskreter Zustandsraum aufgespannt, der eine Baumstruktur aufweist, siehe Abbildung 4-4.

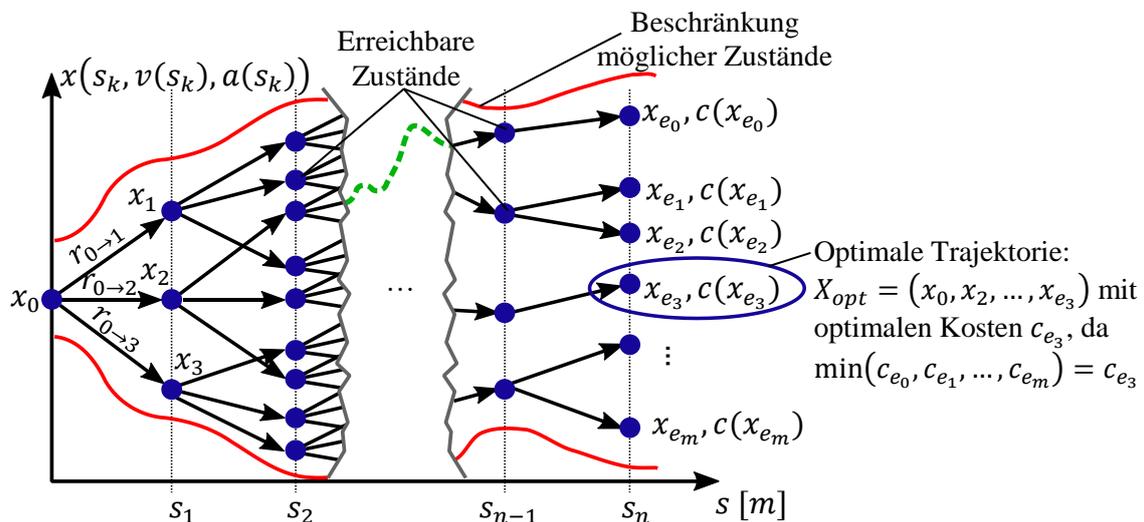


Abbildung 4-4: Prinzip der Zustandsraumexploration und Bestimmung der optimalen Trajektorie

Jedes Fahrzeug besitzt beim Überfahren der Grenzmarkierung einen Initialzustand x_0 . Ausgehend von diesem Initialzustand wird in der Trajektoriengenerierung die Eingangsgröße $r(s_k)$ innerhalb der Beschränkungen (4-4) variiert, jedoch zwischen zwei Wegstützstellen als konstant angenommen und ist damit also als stückweise konstante Funktion zu verstehen. Durch verschiedene Ruckwerte (z.B. $r_{0 \rightarrow 1}$, $r_{0 \rightarrow 2}$ und $r_{0 \rightarrow 3}$) werden im Beispiel mögliche diskrete Folgezustände x_1 , x_2 und x_3 erreicht (siehe Wegstützstelle s_1). Für jeden erreichten Folgezustand wird zusätzlich geprüft, ob alle Beschränkungen unverletzt geblieben sind, die Zustände also innerhalb der Begrenzung liegen. Diese Prozedur wird rekursiv wiederholt, d.h. für jeden möglichen diskreten Folgezustand werden die Initialwerte an den aktuellen Zustand angepasst und Ruckwerte innerhalb der Beschränkungen variiert, um weitere Folgezustände zu bestimmen (z.B. bei s_2). Die Berechnung weiterer Folgezustände wird gestoppt, wenn die Abbruchbedingung erfüllt ist,

die zu fahrende Strecke also vollständig abgedeckt ist. Durch den rekursiven Ansatz wird ein immer größer werdender Zustandsraum aufgespannt, dessen Blätter die Endzustände definieren, bei denen das Fahrzeug die Kreuzung wieder verlässt. Eine mögliche Trajektorie X ist schließlich eine Aneinanderreihung solcher diskreter und verbundener Zustände, ausgehend vom Initialzustand x_0 bis zu einem beliebigen Endzustand x_{e_p} . Für den Zufahrtsbereich ab der Grenzmarkierung bis zum Kreuzungsinnenbereich und dem Abbiegen innerhalb der Kreuzung selbst wird dieser Ansatz in zwei zu generierende und aneinanderhängende Trajektorien getrennt. Dies hat den Vorteil, dass die unterschiedlichen Beschränkungen besser berücksichtigt werden können, ohne dass sich etwas am Ansatz selbst ändert.

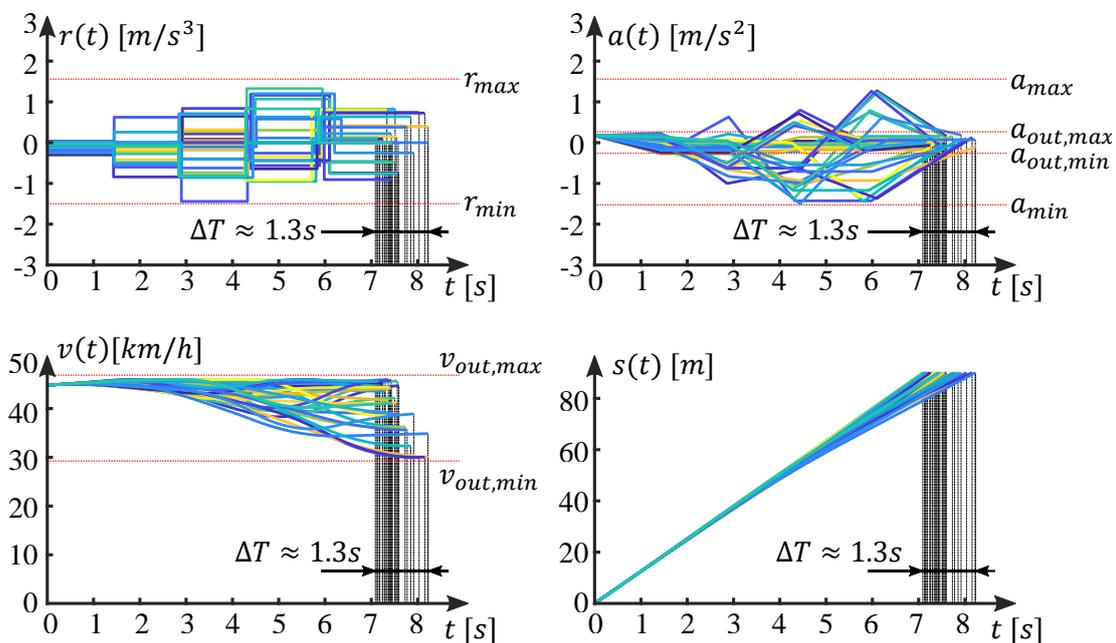


Abbildung 4-5: Beispielhafter Ausschnitt aus generierten Trajektorien mit der vorgestellten Methode

In Abbildung 4-5 ist nun ein beispielhafter Ausschnitt aus generierten Trajektorien mit dem beschriebenen Ansatz (inklusive der kontinuierlichen Zwischenwerte) zu sehen, welche von der Grenzmarkierung bis zum Kreuzungsinnenbereich führen. Wie erläutert, liegt der Eingangsruck als stückweise konstante Funktion vor und ist im Beispiel auf Werte zwischen $\pm 1,5 \text{ m/s}^3$ beschränkt. Die Beschleunigung (oben rechts in Abbildung 4-5) zeigt sich entsprechend in stetig linearen Verläufen. Zudem ist erkennbar, dass hier durch Beschränkungen nur Werte im Bereich von $\pm 1,5 \text{ m/s}^2$ erreicht werden und sich die Ausgangsbeschleunigungen (also am Ende des Einfahrtsbereichs bzw. am Anfang des Kreuzungsinnenbereichs) auf Werte nahe Null einpendeln. Der Grund dafür ist, dass das Fahrzeug mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit den Kreuzungsinnenbereich durchfahren soll. Aus den Geschwindigkeitsverläufen (Abbildung 4-5 unten links) ist ersichtlich, dass alle Verläufe die minimalen und maximalen Kreuzungsinnegeschwindigkeiten

$v_{out,min}$ bzw. $v_{out,max}$ einhalten. Unten rechts ist schließlich die gefahrene Strecke der Trajektorien zu sehen. In allen Verläufen sind die unterschiedlichen Ankunftszeiten am Kreuzungsinnenbereichen mit einer Differenzspanne von ΔT zu sehen, innerhalb der das Fahrzeug letztendlich das Ziel erreichen kann. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Lösungen (Trajektorien) erwartungsgemäß mit fortschreitender Zeit immer weiter aufspreizen und so den Zustandsraum, wie in Abbildung 4-4 skizziert, bilden.

Neben der Bestimmung möglicher Folgezustände muss jedem Zustand außerdem ein Kostenwert zugeordnet werden, um eine nachgelagerte Bewertung der möglichen Trajektorien vornehmen zu können. Wird die maximale Längsbeschleunigung a_{max} bzw. a_{min} in der Trajektoriengenerierung zur Berücksichtigung eines ausreichenden Fahrkomforts, wie im gezeigten Beispiel in Abbildung 4-5, auf $\pm 1,5 \text{ m/s}^2$ beschränkt, hat sich die Reisezeit als einfache aber geeignete Kostenfunktion bewährt (in Abbildung 4-5 unten rechts wäre das die Trajektorie, die am weitesten links liegt). Mit einer diskreten Wegschrittweite von Δs ergeben sich also für jeden Zustand Kosten von $c(x_k)$, welche die Teilreisezeit $T_{x_{(k-1)} \rightarrow x_k}$ zwischen dem vorherigen und dem aktuellen Zustand, wie in Gleichung (4-13) gezeigt, angeben. Jeder Endzustand verfügt somit über Kosten gleich der summierten Kosten aller direkten Vorgänger. Dies entspricht der Reisezeit entlang des Pfades (vgl. (4-14)).

$$c(x_k) = c(x_{k-1}) + T_{x_{(k-1)} \rightarrow x_k} \quad (4-13)$$

$$c(x_k) = \sum_k^1 T_{x_{(k-1)} \rightarrow x_k} \quad (4-14)$$

Zur Kollisionsprüfung wird für den nächsten Schritt aus der Menge aller Endzustände der Endzustand mit den geringsten Kosten (also mit der geringsten Reisezeit) näher betrachtet (im Beispiel: $\min(c(x_{e_0}), c(x_{e_1}), \dots, c(x_{e_m})) = c(x_{e_3})$). Zur Bestimmung der Trajektorie wird ausgehend vom Endzustand so lange der Vorgängerzustand zurückverfolgt, bis der Initialzustand erreicht ist. Die Trajektorie setzt sich aus den dabei „besuchten“ Zuständen x_k zusammen.

Durchfahrt mit Halt

Alle zuvor gefundenen Trajektorien werden gemäß der Kosten aufsteigend (von niedrigen zu hohen Kosten) nacheinander geprüft. Führt dies nun zu keiner einzigen kollisionsfreien Trajektorie, bei der das Fahrzeug die Kreuzung mit einer direkten Durchfahrt passieren kann, wird die nachgelagerte Trajektoriengenerierung mit Halt an der Kreuzung eingeleitet. Der Ansatz basiert auf der Idee, dass für das betrachtete Fahrzeug mögliche Durchfahrtstrajektorien gefunden werden können, wenn dieses einige Zeit an der Kreuzung verweilt. Kollisionen im Bereich der Kreuzungszufahrt können außerdem ausgeschlossen werden, wenn die bereits bekannte Trajektorie des vorausfahrenden Fahrzeugs in die Planung einbezogen wird. Zunächst muss eine geeignete Position s_E für das Halten bestimmt werden, im einfachsten Fall ist dies die Summe der Fahrzeuglängen L_i aller N_{Krz} aktuell

an der Kreuzung wartenden Fahrzeuge zuzüglich eines Halteabstands d_H , wie in Gleichung (4-15) angegeben.

$$s_E = \sum_{i=1}^{N_{Krz}} L_i + d_H \quad (4-15)$$

Im Unterschied zum vorherigen Ansatz wird an dieser Stelle ein nichtlineares bedingtes Optimierungsproblem mit Beschränkungen gelöst, welches ebenfalls den Ruck als stückweise konstante Eingangsgröße verwendet. Die zunächst zu prüfende Bedingung ist, ob ein vorausfahrendes Fahrzeug mit bereits geplanter Trajektorie erkannt wurde und daher zunächst eine Folgefahrt eingeleitet wird, bevor die eigentliche Anhaltetrajektorie und Durchfahrtstrajektorie geplant werden. Abbildung 4-6 zeigt das Prinzip der Umschaltung vereinfacht. Zum Zeitpunkt t_1 sei ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt worden und befindet sich an der Position $s_P(t_1)$, also noch vor der geplanten Halteposition s_E . Daher ist in diesem Fall das Optimierungsziel, den Abstand beider Fahrzeuge auf den Sicherheitsabstand d zu regeln als auch die Differenzgeschwindigkeit anzugleichen, um eine Folgefahrt zu planen. Zum Zeitpunkt t_2 hat das vorausfahrende Fahrzeug die geplante Halteposition des betrachteten Fahrzeugs bereits überfahren (d.h. $s_P(t_2) > s_E$), aus diesem Grund hat sich das Optimierungsziel dahingehend geändert, dass das betrachtete Fahrzeug bei $s(t) = s_E$ zum Stillstand kommt (der eingeregelter Sicherheitsabstand d ist hierbei derart parametrisiert, dass die Optimierung eine Anhaltetrajektorie bestimmen kann).

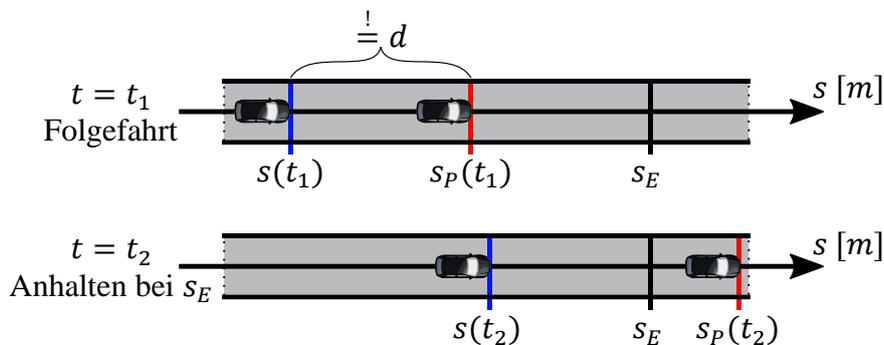


Abbildung 4-6: Umschaltung zwischen den Optimierungszielen

In den Gleichungen (4-16) bis (4-18) sind die beiden Fälle dargestellt, zunächst allerdings zum Verständnis mit kontinuierlicher Zeit t und dem folglich kontinuierlichen Ruck $r(t)$. Ist ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt worden, so wird der Ruck $r(t)$ des Folgefahrzeugs mit der Minimierungsfunktion $J_F(r, t)$ bis zu dem Zeitpunkt optimiert, an dem das vorausfahrende Fahrzeug die geplante Halteposition s_E des Folgefahrzeugs überfahren hat. Die Folgefahrt minimiert den quadratischen Abstand unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabstands d sowie der Differenzgeschwindigkeit beider Fahrzeuge, wie in (4-17) dargestellt. Beide Terme sind mit den Koeffizienten w_0 und w_1 gewichtet.

$$\begin{cases} \min_r J_F(r(t), t) & s_P(t) \leq s_E \\ \min_r J_H(r(t), t) & s_P(t) > s_E \wedge s(t) < s_E \end{cases} \quad (4-16)$$

$$J_F(r(t), t) = w_0(s_P(t) - s(t) - d)^2 + w_1(v_P(t) - v(t))^2 \quad (4-17)$$

$$J_H(r(t), t) = \frac{1}{(s_E - s(t))^2} \left(w_2(a_E - a(t))^2 + w_3(v_E - v(t))^2 + w_4(s_E - s(t))^2 \right) \quad (4-18)$$

Hat das vorausfahrende Fahrzeug die geplante Halteposition des Folgefahrzeugs überfahren ($s_P(t) > s_E$), wird die zugrunde gelegte Minimierungsfunktion $J_F(r(t), t)$ durch die Minimierungsfunktion $J_H(r(t), t)$ ersetzt, welche die Anhaltetrajektorie des betrachteten Fahrzeugs berechnet. Die Minimierungsfunktion besitzt hierfür einen quadratisch reziproken Gewichtungsterm, der mit Annäherung an die geplante Halteposition s_E anwächst. Die Anhaltetrajektorie prägt sich dadurch aus, dass beim Erreichen der geplanten Halteposition s_E für die Geschwindigkeit $v(t) \stackrel{!}{=} 0$ und für die Beschleunigung ebenfalls $a(t) \stackrel{!}{=} 0$ gilt. Die Gewichtung erfolgt an dieser Stelle analog über die Koeffizienten w_2, w_3 und w_4 . Hat das Fahrzeug die Halteposition erreicht (es gilt $s(t) = s_E$), terminiert die Optimierung und die geplante Haltetrajektorie liegt vollständig vor. Im Übergang zur diskreten Betrachtung wird die bedingte Optimierung zu diskreten Zeitpunkten t_k ausgewertet und der kontinuierliche Ruckverlauf $r(t)$ geht in eine Folge stückweise konstanter Ruckwerte über, wie dies bereits bei der direkten Durchfahrt der Fall war.

Für die anschließende Weiterfahrt durch die Kreuzung wird auf dieselbe Methode zurückgegriffen, wie bei der direkten Durchfahrt. Hierzu wird, ausgehend von einer zunächst minimalen Wartezeit T_H , erneut ein Zustandsraum über Variation des Rucks aufgespannt und die resultierenden Gesamttrajektorien entsprechend bewertet. Abschließend sind in Abbildung 4-7 die beiden Ansätze der Trajektoriengenerierung (direkte Durchfahrt und Durchfahrt mit Halt) mit den verschiedenen Phasen grafisch vergleichend dargestellt.

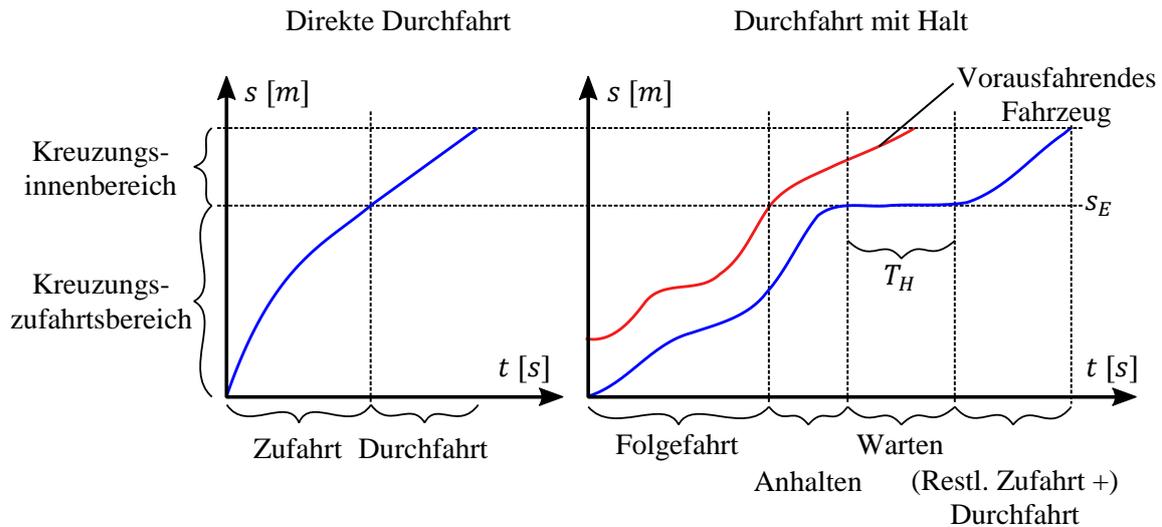


Abbildung 4-7: Prinzip beider Ansätze der Trajektoriengenerierung im Vergleich

Kollisionsprüfung

Mit dem vorgestellten Ansatz der Trajektoriengenerierung liegt nun für ein betrachtetes Fahrzeug eine Vielzahl von möglichen Trajektorien vor. Nachfolgend muss folglich eine dieser Trajektorien ausgewählt und für das Fahrzeug reserviert werden. Wie bereits zuvor erläutert, wird dies durch eine iterative Kollisionsprüfung für die Trajektorien vorgenommen, angefangen bei der jeweils besten Trajektorie des geringsten Kostenwerts (also der geringsten Reisezeit). Dieser iterative Prozess wird abgebrochen, sobald die aktuell beste Trajektorie kollisionsfrei ist. Um eine Trajektorie auf Kollisionen zu prüfen, wird ein globales ebenes Gitter aus Quadraten auf die gesamte Kreuzung inklusive der Zufahrten „gelegt“. Dieses Kollisionsraster K besteht aus einer Menge von n einzelnen aneinander liegenden Kollisionsquadraten q_i (Gleichung (4-19)). Alle Kollisionsquadrate weisen dieselbe Seitenlänge auf und sind, wie in Gleichung (4-20) gezeigt, eindeutig über die Koordinaten einer Ecke definiert.

$$K = \{q_1, q_2, \dots, q_n\} \quad (4-19)$$

$$q_n = (x, y) \in \mathbb{R}^2 \quad (4-20)$$

Für die Kollisionsprüfung gelte nun, dass jedes Kollisionsquadrat q_i zu einem Zeitpunkt nur von einem Fahrzeug flächenmäßig bedeckt sein darf. Dies gilt auch, wenn das Kollisionsquadrat nur teilweise bedeckt wird. Jedes Fahrzeug erhält eine Bounding-Box, also ein umhüllendes Rechteck, welches die jeweilige Fahrzeugausdehnung komplett umschließt und als vereinfachte ebene Geometrie des Fahrzeugs weiterverwendet wird. Zur Prüfung wird die Zeit erneut in diskreten Schritten aufgefasst und die Bounding-Box entsprechend der Trajektorie durch das Kollisionsraster bewegt, wie dies in Abbildung 4-8 links dargestellt ist. Für jeden diskreten Zeitschritt wird nun ermittelt, welche Kollisions-

quadrate von der Bounding-Box (teilweise) abgedeckt werden (die roten Quadrate in Abbildung 4-8 links). Hierbei ist es wichtig, dass die Zeitschrittweite Δt für die Prüfung klein genug gewählt wird, sodass kein Kollisionsquadrat entlang der Trajektorie übersprungen werden kann.

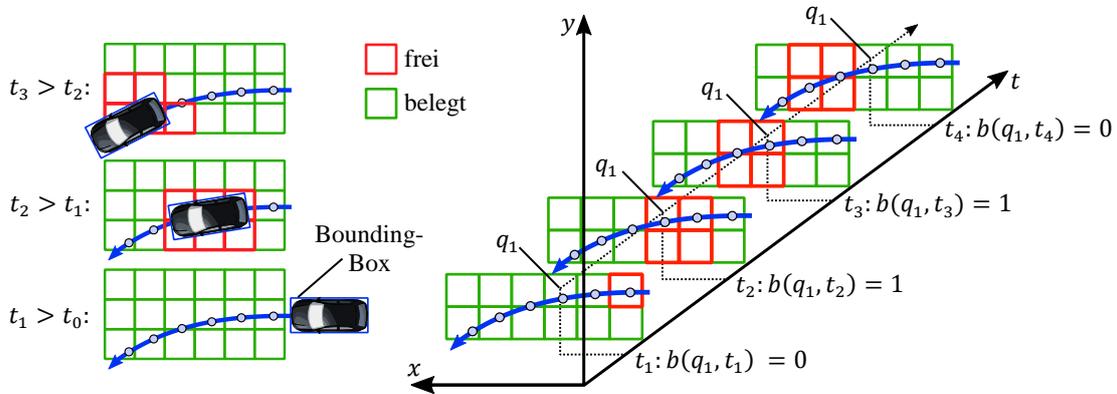


Abbildung 4-8: Prinzip der Kollisionsprüfung, links: Ermittlung der Überlappung mittels rechteckiger Bounding-Box für die Fahrzeuggeometrie, rechts: Beispiele für die Belegungsfunktion $b(q, t)$ für verschiedene Zeiten

Nachdem nun die abgedeckten Kollisionsquadrate ermittelt wurden, muss nachfolgend geprüft werden, ob diese schon zum jeweiligen diskreten Zeitschritt von einem anderen Fahrzeug bedeckt sind, also eine Kollision vorliegt. Hierzu wird eine Hashfunktion²⁴ $h(q, t)$ definiert, die eine Zusammensetzung aus dem entsprechenden Kollisionsquadrat und dem diskreten Zeitpunkt t_k darstellt (vgl. Gleichung (4-21)).

$$h(q_i, t_k): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{N} \quad (4-21)$$

$$b(q_i, t_k): \begin{cases} 1 & h(q_i, t_k) \text{ existiert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-22)$$

Auf Grundlage dieser Hashfunktion wird eine Belegungsfunktion $b(q_i, t_k)$ definiert, die lediglich die binären Werte 1 und 0 annehmen kann und damit angibt, ob das Kollisionsquadrat q_i zum Zeitpunkt t_k bereits belegt ist oder nicht. Hierzu umfasst die Belegungsfunktion einen Speicher, in dem abgelegt ist, ob der Wert der Hashfunktion bereits existiert oder nicht. In Abbildung 4-8 rechts sind einige Beispiele für Werte der Belegungsfunktion für das Kollisionsquadrat q_1 zu verschiedenen Zeiten t_1 bis t_4 zu sehen. Zu den Zeitpunkten t_1 und t_4 ist das Kollisionsquadrat q_1 nicht belegt, daher nimmt die Belegungsfunktion hier erwartungsgemäß den Wert Null an. Bei Zeitpunkten t_2 und t_3 ist q_1

²⁴ Eine Streuwertfunktion, die eine große Eingabemenge (Schlüssel) auf eine kleine Zielmenge (Hashwerte) abbildet. Eine wichtige Eigenschaft einer Hashfunktion ist, dass diese möglichst injektiv ist, d.h. keine zwei unterschiedlichen Schlüssel zum selben Hashwert führen (auch perfekte Hash-Funktion genannt).

jedoch belegt, somit gilt $b(q_1, t_2) = b(q_1, t_3) = 1$. Diese Prüfung ist für alle Kollisionsquadrate erforderlich, die durch die aktuelle Trajektorie abgedeckt werden.

Sofern für alle Kollisionsquadrate q_i einer Trajektorie $b(q_i, t_k) = 0$ gilt (für alle k), ist eine kollisionsfreie Trajektorie gefunden worden, welche dem Fahrzeug zugewiesen werden kann. In diesem Fall müssen die Hashwerte im Speicher der Belegungsfunktion abgelegt werden, um diese für nachfolgende Trajektorien zu sperren.

In Abbildung 4-9 ist abschließend das Simulationsergebnis für eine Kreuzungszufahrt einer T-Kreuzung gezeigt. Es ist zu sehen, dass die Trajektorien 1 und 2 der ersten beiden Fahrzeuge eine direkte Durchfahrt ermöglichen. Anschließend ist die Kreuzungsfläche eine Zeit lang von anderen Fahrzeugen ausgelastet und gesperrt (rote Flächen), sodass die nachfolgenden drei Fahrzeuge jeweils eine Trajektorie mit Anhalten umsetzen müssen. Es ist hierbei gut zu erkennen, dass Trajektorie 3 eine einfache Anhaltetrajektorie ist, während Trajektorien 4 und 5 zunächst eine Folgefahrt umsetzen, bevor diese ebenfalls zur Anhaltetrajektorie wechseln, wie dies in auch in Abbildung 4-7 rechts gezeigt wurde. Nach den unterschiedlichen Wartezeiten der Trajektorien 3 bis 5 können die Fahrzeuge die Kreuzung schließlich passieren. Das Fahrzeug mit der Trajektorie 6 hat wieder die Möglichkeit, die Kreuzung per direkter Durchfahrt zu passieren.

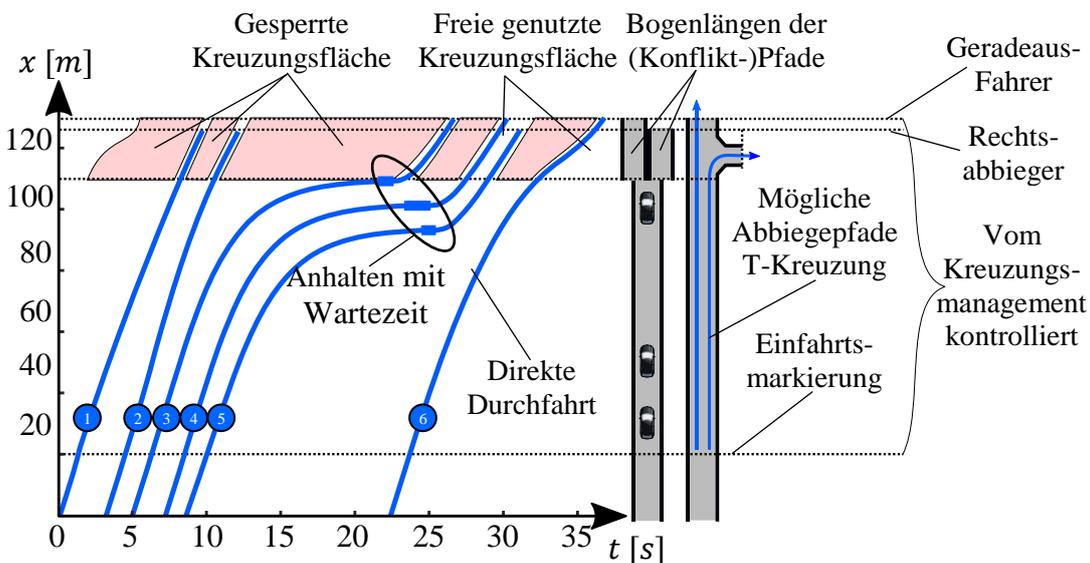


Abbildung 4-9: Beispieltrajektorien einer Fahrtrichtung mit dem vorgestellten Ansatz des Kreuzungsmanagements

4.3 Ebene 2: Makroskopisches Bilanzraummanagement

Die erste Ebene des in dieser Arbeit entwickelten hierarchischen Verkehrsmanagements ist vollständig auf der mikroskopischen Ebene angesiedelt und betrachtet insofern jedes Fahrzeug als eigenständige Einheit. So wird für jedes einzelne Fahrzeug im Beispiel des vorgestellten Kreuzungsmanagements eine eigene kollisionsfreie Trajektorie generiert und dem Fahrzeug zugewiesen. Im Gegensatz dazu betrachtet die im Folgenden erläuterte zweite Ebene den Verkehr hauptsächlich in makroskopischen Größen, also losgelöst von Einzelfahrzeuginformationen. Durch diese abstrahierte Betrachtungsweise in Form von Verkehrsdichte, Verkehrsfluss und mittlerer Flussgeschwindigkeit (siehe Kapitel 3.2) ist es möglich, neuartige Regelungsansätze zur Koordinierung des Verkehrs zu konzipieren.

Nachfolgend wird zunächst die Idee und Funktion des Bilanzraummanagements auf der zweiten Ebene erläutert. Der vorgestellte Ansatz basiert auf Konsens-Algorithmen, daher wird im Anschluss eine kurze Übersicht zu den notwendigen Grundlagen gegeben gefolgt von der detaillierten Erläuterung der entwickelten Regelungsstruktur. Wie sich zeigen wird, besteht die Sollwertbildung aus zwei Teilen: Zum einen, aus der Verkehrsdichteregulierung mittels Konsensalgorithmen und zum zweiten aus einem lokalen Inner-Bilanzraumrouting. Letzteres wird anschließend gesondert erläutert. Das Unterkapitel schließt mit der Thematik ab, wie Bilanzräume für das Regelungskonzept geeignet definiert werden können.

4.3.1 Funktion des Bilanzraummanagements

Auf der zweiten Hierarchieebene des Verkehrsmanagements stehen gekapselte Verbünde von Straßen und Kreuzungen im Fokus, die jeweils einen sog. Bilanzraum definieren (zuvor auch als Straßennettausschnitt bezeichnet). Alle Funktionen der zweiten Ebene existieren also entsprechend für jeden Bilanzraum. Die Idee für das Bilanzraummanagement basiert auf der noch zu prüfenden Annahme, dass eine Harmonisierung der Verkehrsflüsse bzw. Verkehrsdichten in einem Bilanzraum positive Auswirkungen auf den allgemeinen Verkehrszustand (auch über die Grenzen des Bilanzraums hinaus) hat und die Leistungsfähigkeit dadurch insgesamt steigern kann. In Abbildung 4-10 ist das Prinzip der Verkehrsflussharmonisierung dargestellt. Werden für alle im Bilanzraum vorhandenen Streckenabschnitte die makroskopischen Zustände bestimmt, so zeigen sich bei einem nicht harmonisierten Verkehrsszenario deutliche Unterschiede. Das Bilanzraummanagement hat nun die Aufgabe, die Zustände aneinander anzugleichen, d.h. die Unterschiede der Zustände zu minimieren (siehe grüne Linien in Abbildung 4-10). Liegen durch die Regelung alle makroskopischen Zustände nah beieinander, befindet sich der gesamte Bilanzraum in dem gewünschten Gleichgewichtszustand.

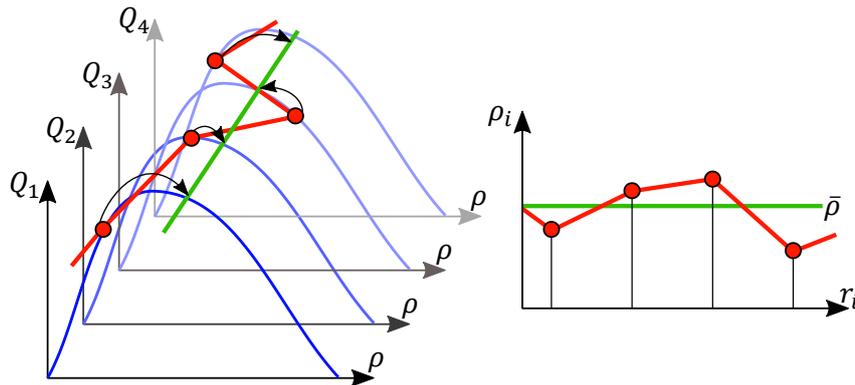


Abbildung 4-10: Prinzip der Idee der Verkehrsflussharmonisierung
(links: Verkehrsflüsse über Dichten,
rechts: Verkehrsdichten über die Straßen r_i)

Zusätzlich zu dem erwarteten Vorteil der erhöhten Verkehrseffizienz (geringere mittlere Reisezeiten, weniger Verkehrsstörungen) gilt außerdem, dass die Anforderungen für die in Kapitel 3.2.4 erwähnten makroskopischen Fundamentaldiagramme erfüllt sind. Daher sind die dort vorgestellten Regelungskonzepte als übergeordnete Schicht für das Bilanzraummanagement geeignet. Der Ansatz der Harmonisierung des Verkehrs durch den Einsatz von Konsensalgorithmen ist in der Literatur bereits mehrfach aufgegriffen worden. So stellen etwa die Autoren in [WLL+13] ein Konzept vor, das Konsensalgorithmen zur Grünzeitbestimmung von Lichtsignalanlagen einsetzt, um den Verkehr durch gezieltes Zu- und Abfließen in einem regionalen Netz gleichmäßig zu verteilen. Einen ähnlichen Ansatz, ebenfalls mit Konsensalgorithmen, nutzen die Autoren in [KA14]. In diesem Ansatz werden Zu- und Abflüsse eines Autobahnnetzes derart kontrolliert, dass sich die Verkehrsdichten aller Straßen auf einen ähnlichen Wert einpendeln. Dieser Ansatz ähnelt damit den in Kapitel 2.3 vorgestellten intelligenten Verkehrsmanagementsystemen. Beide Ansätze beeinflussen die Zu- und Abflüsse von Verkehrsflüssen zur Harmonisierung des Verkehrs, gehen hierbei jedoch von einem nichtautonomen Verkehr aus.

Im Gegensatz dazu stellen die Autoren in [WT13a] und [WT14] ein Konzept vor, das auf einem vollkommen autonomen Verkehr basiert. In dem Ansatz wird daher anstelle der Zu- und Abflüsse direkt die mittlere Flussgeschwindigkeit beeinflusst, um eine Balancierung der Verkehrsdichte in einem Bilanzraum zu erreichen.

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz basiert auf den Grundlagen dieser Ideen und besteht aus zwei wesentlichen Teilen:

1. Verkehrsdichteregulierung durch verteilte Regelungsstruktur und Durchschnittskonsensalgorithmus, siehe Kapitel 4.3.3.
2. Lokales Inner-Bilanzraumrouting auf Grundlage der Verkehrsdichte und Reisezeit entlang der Route, siehe Kapitel 4.3.4.

4.3.2 Grundlagen Konsensalgorithmen

Konsensalgorithmen haben eine lange Geschichte und finden Verwendung in verteilten Systemen, bei denen sich die einzelnen Teilsysteme als gleichartige Agenten²⁵ beschreiben lassen. Solche Systeme werden daher auch als Multiagentensysteme bezeichnet. Konsensalgorithmen bilden in diesem Kontext die Schnittmenge zwischen System- und Graphentheorie, um ein definiertes gemeinsames Ziel kooperativ und mittels Kommunikation zu erreichen. Das Erreichen des Ziels ist somit als „Konsens“ aller Agenten zu verstehen. Bei Multiagentensystemen, die durch Konsensalgorithmen beeinflusst werden, sind die Agentenzustände und -dynamik, die Kommunikationstopologie zwischen den Agenten sowie die Zieldefinition bzw. Zielzustände von besonderer Bedeutung.

Agentenzustände und -dynamik

Alle Agenten sind als gleichartig zu sehen, d.h., dass die Dynamik aller Agenten ist identisch. Die Beschreibung der Agentendynamik erfolgt wie in der Systemtheorie mittels Übertragungsfunktionen im Bildbereich. Die Definition des Übertragungsverhaltens hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab, im einfachsten Fall kann jedoch für jeden Agenten eine einfache Integratordynamik, wie in der Übertragungsfunktion (4-23) gezeigt, herangezogen werden. Dies hat sich in der Literatur als zielführender Ansatz bewährt (siehe z.B. [Wei08], [LD14] oder [Lun14]).

$$A_i(s) = \frac{Y_i(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{s} \quad (4-23)$$

Die Ausgänge $Y_i(s)$ der Agenten $A_i(s)$ entsprechen den Zuständen und hängen also ausschließlich vom jeweiligen Systemeingang $U_i(s)$ sowie dem Initialzustand ab. Sowohl Agentendynamiken höherer Ordnung als auch generell komplexere Agentendynamiken sind möglich (und Gegenstand der Forschung), werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter beleuchtet. Wird ein Agentenzustand im Zeitbereich betrachtet, so wird dieser i.d.R. als $x_i(t)$ bezeichnet und das System aller Agentenzustände mit $\underline{x}(t)$.

Kommunikationstopologie

Damit die verteilten Agenten überhaupt in der Lage sind, ein gemeinsames Ziel zu erreichen, ist es zwingend notwendig, dass diese untereinander Informationen austauschen können. Bei Multiagentensystemen mit Konsensalgorithmen werden gerichtete Graphen für die Beschreibung der Kommunikationstopologie verwendet. Ein solcher (Kommunikations-) Graph G besteht hierbei, wie in Gleichung (4-24) angegeben, aus den Knoten V und den Kanten E . Jede Kante $e_{ij} \in E$ entspricht hierbei einem Paar aus der Menge der Knoten und ist über den Quell- bzw. Zielknoten definiert.

²⁵ Ein (Software-) Agent ist ein Programm, welches zu einem eigenständigen und eigendynamischen Verhalten fähig ist.

$$G(V, E), E \subseteq \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\} \quad (4-24)$$

Im Kontext des Konsensalgorithmus wird nun jeder Agent als Knoten und jeder Kommunikationskanal als Kante modelliert, wie in Abbildung 4-11 dargestellt. Jeder Kommunikationskanal besitzt einen Quell- und einen Zielagenten für die Informationsübertragung, in Abbildung 4-11 besteht beispielsweise ein bidirektionaler Informationsaustausch zwischen allen Agenten, daher liegt hier ein ungerichteter Graph vor. Das Konzept des Konsensalgorithmus basiert auf Grundlage des so beschriebenen Kommunikationsgraphen und wird nachfolgend erläutert.

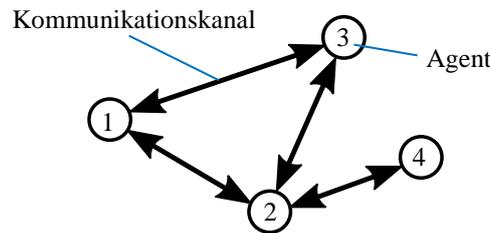


Abbildung 4-11: Netzwerk aus Agenten mit ungerichteter (bidirektionaler) Kommunikation

Es sei angemerkt, dass die Kommunikationstopologie auch zeitvariant (sodass E nicht statisch, sondern von der Zeit abhängig ist: $E(t)$) und mit gerichteten Kanten modelliert werden kann, beides wird jedoch im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

Zieldefinition

Die Zieldefinition ist für die Funktion des Konsensalgorithmus wesentlich, denn diese beeinflusst das Verhalten aller Agenten. Ziel des Konsensalgorithmus ist es, einen Konsens über die Zustände aller Agenten zu erreichen. Hierbei haben sich in der Literatur zwei unterschiedliche Ansätze mit jeweils unterschiedlichen Abwandlungen etabliert (s. z.B. [LD14]): (1) Der Durchschnitts-Konsensalgorithmus und der (2) Leader-Follower-Konsensalgorithmus. Bei letzterem wird ein Agent als Führer definiert während sich alle restlichen Agenten mittels Konsensalgorithmus dem Zustand des Führers $x_l(t)$ angleichen, wie in Gleichung (4-25) gezeigt:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{x}(t) = x_l(t) \quad (4-25)$$

In Hinsicht auf das im Rahmen dieser Arbeit definierte Gesamtziel einer Verkehrsfluss-balancierung ist dieser Ansatz jedoch nicht zielführend und wird daher nicht weiter erläutert. Stattdessen wird der Fokus auf den Durchschnitts-Konsensalgorithmus gesetzt. Hierbei ist das Ziel, dass alle Agenten denselben Zustand des entsprechenden Durchschnitts aller Initialzustände annehmen, vgl. Gleichung (4-26):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i(t=0) = \underline{\bar{x}}(0) \quad (4-26)$$

Ein beispielhafter qualitativer Verlauf von vier Agentenzuständen, die durch einen Durchschnitts-Konsensalgorithmus beeinflusst werden, ist in Abbildung 4-13 oben links abgebildet.

Durchschnitts-Konsensalgorithmus

Die als Graph vorliegende Kommunikationstopologie aller Agenten kann mathematisch in Form von Adjazenz- und Gradmatrix ausgedrückt werden. Für beide Matrizen gilt, dass der Grad gleich der Anzahl der Graphknoten, also der Anzahl an Agenten ist und diese Matrizen folglich quadratisch sind. Die Adjazenzmatrix \underline{A} gibt an, welche Knoten im Graphen miteinander verbunden sind (Zeile-zu-Spalte-Beziehungen). Ein Wert von eins bezeichnet hierbei einen vorhandenen Kommunikationskanal zwischen den Agenten (von Zeile zu Spalte), ein Wert von Null bedeutet, dass keine Kommunikation existiert. Die Diagonale der Adjazenzmatrix ist daher stets gleich Null, da ein Kommunikationskanal von einem Agenten zu sich selbst nicht sinnvoll ist. Liegen ausschließlich bidirektionale Kommunikationskanäle (ungerichteter Graph) vor, so ergibt sich auf diese Weise eine symmetrische Adjazenzmatrix. Die Gradmatrix \underline{D} gibt für jeden Knoten den (Ausgangs-) Grad an, dies ist gleichbedeutend damit, mit wie vielen anderen Agenten jeder Agent in Kommunikation steht. Die Gradmatrix ist eine Diagonalmatrix und derart definiert, dass ihre Werte den Zeilensummen der Adjazenzmatrix entsprechen. Aus der Adjazenzmatrix und der Gradmatrix kann entsprechend Gleichung (4-27) die Laplacematrix bestimmt werden, die zur Berechnung der Konsensdynamik herangezogen wird. Die allgemeine Änderung der Agentenzustände $\dot{\underline{x}}(t)$ kann schließlich als Matrix-Differentialgleichung mit der Laplacematrix wie in Gleichung (4-28) bestimmt werden. Die Dynamikgleichung kann auch in Form eines Blockschaltbildes im Bildbereich interpretiert werden, wie dies in Abbildung 4-12 zu sehen ist. Das System aus (Einfach-) Integrator-Agenten verfügt über eine Rückführung mit der Rückführmatrix \underline{L} und einer Vergleichsummationsstelle. Ist der Soll-Offset $\underline{b} = \underline{0}$, so ergibt sich genau dann ein Eingang von $\underline{u} = \dot{\underline{x}} = \underline{0}$, wenn alle Agenten denselben Zustand erlangt haben.

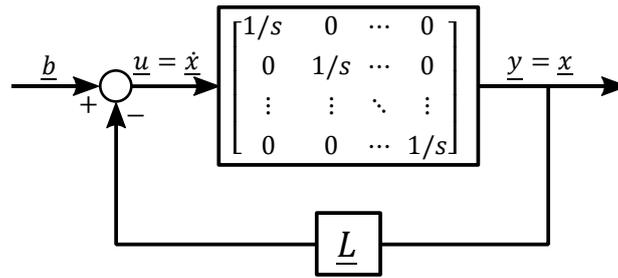


Abbildung 4-12: Darstellung des Konsensalgorithmus als ein System aus Agenten mit Integratordynamik nach [OFM07]

Gleichung (4-28) gilt für den kontinuierlichen Bereich, für eine Implementierung ist es jedoch zwingend notwendig, eine diskrete Formulierung der Dynamikgleichung vorzunehmen. Mit der festen Abtastzeit ΔT kann die sog. Perronmatrix \underline{P} bestimmt werden (vgl. Gleichung (4-29)). Die diskrete Dynamikgleichung des Durchschnitts-Konsensalgorithmus lautet daher wie in Gleichung (4-30) angegeben:

$$\underline{L} = \underline{D} - \underline{A} \quad (4-27)$$

$$\dot{\underline{x}}(t) = -\underline{L} \cdot \underline{x}(t) \quad (4-28)$$

$$\underline{P} = \underline{I} - \Delta T \cdot \underline{L} \quad (4-29)$$

$$\underline{x}(k+1) = \underline{P} \cdot \underline{x}(k) \quad (4-30)$$

Als Beispiel soll im Folgenden die Berechnung des dynamischen Agentenzustands $x_2(t)$ im Kontinuierlichen bzw. $x_2(k+1)$ im Diskreten anhand der Kommunikationstopologie des Beispiels in Abbildung 4-11 gezeigt werden. Zunächst werden die Adjazenz-, Grad- und Laplacematrix berechnet. Da der Graph ausschließlich bidirektionale Kommunikationskanäle enthält, sind die resultierenden Matrizen quadratisch und sogar symmetrisch (siehe (4-31) und (4-32)):

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \underline{D} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-31)$$

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-32)$$

Aus Gleichung (4-28) folgt schließlich die Berechnung des Agentenzustands $x_2(t)$ im Kontinuierlichen:

$$\dot{x}_2(t) = 1 \cdot \dot{x}_1(t) - 3 \cdot \dot{x}_2(t) + 1 \cdot \dot{x}_3(t) + 1 \cdot \dot{x}_4(t) \quad (4-33)$$

$$\dot{x}_2(t) = \dot{x}_1(t) - 3\dot{x}_2(t) + \dot{x}_3(t) + \dot{x}_4(t) \quad (4-34)$$

Im Diskreten folgt aus Gleichung (4-29) mit einer Abtastzeit $\Delta T = 0,1s$ folgende Perronmatrix für das Beispiel:

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,1 & 0,1 & 0 \\ 0,1 & 0,7 & 0,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 & 0,8 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0,9 \end{bmatrix} \quad (4-35)$$

$$x_2(k+1) = 0,1 \cdot x_1(k) + 0,7 \cdot x_2(k) + 0,1 \cdot x_3(k) + 0,1 \cdot x_4(k) \quad (4-36)$$

Die Berechnung der anderen Zustände erfolgt im Kontinuierlichen als auch im Diskreten analog zum gezeigten Beispiel. Der Zusammenhang zwischen der kontinuierlichen und diskreten Zustandsbestimmung kann anhand des Beispiels x_2 auch wie folgt verdeutlicht werden:

$$\Delta x_2(k+1) = x_2(k+1) - x_2(k) \quad (4-37)$$

$$\Delta x_2(k+1) = 0,1 \cdot x_1(k) - 0,3 \cdot x_2(k) + 0,1 \cdot x_3(k) + 0,1 \cdot x_4(k) \quad (4-38)$$

$$\Delta x_2(k+1) = \Delta T \cdot (x_1(k) - 3x_2(k) + x_3(k) + x_4(k)) \quad (4-39)$$

Es ist ersichtlich, dass die diskrete Änderung $\Delta x_2(k+1)$ in (4-39) der kontinuierlichen Änderung $\dot{x}_2(t)$ unter Berücksichtigung der Abtastzeit ΔT entspricht.

Stabilität von Durchschnitts-Konsensalgorithmen

Der Stabilitätsbegriff für Durchschnitts-Konsensalgorithmen lässt sich nach [Mor04] als das Erreichen des Konsenszustands für $t \rightarrow \infty$ definieren, siehe auch (4-26). Die asymptotische Stabilität lässt sich für ungerichtete, zusammenhängende²⁶ und zeitinvariante Kommunikationsgraphen für beliebige Initialzustände der Agenten nachweisen, sowohl für den kontinuierlichen als auch den diskreten Fall.

Ohne auf den Stabilitätsbeweis und dessen Herleitung einzugehen (siehe hierfür [Mor04] oder [OFM07]), reduziert sich die Stabilitätsbedingung im Kontinuierlichen auf die Prüfung der Laplacematrix \underline{L} . Ist diese positiv semidefinit, so konvergiert das System in den entsprechenden Mittelwert $\bar{x}(0)$. Die Prüfung der Definitheit kann über die Eigenwerte von \underline{L} wie in (4-40) vorgenommen werden:

²⁶ Zusammenhängend bedeutet, dass keine unverbundenen Knoten im Graphen existieren

$$\det(\underline{L} - \lambda \underline{I}) \stackrel{!}{=} 0 \quad (4-40)$$

$$0 = \lambda_1 < \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n \leq 2\Lambda \quad (4-41)$$

$$\Lambda = \max_{\substack{i=1,\dots,m \\ j=1,\dots,n}} d_{ij} \text{ mit } \underline{D} = (d_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (4-42)$$

In (4-41) ist zu sehen, dass die Laplacematrix \underline{L} immer einen trivialen Eigenwert $\lambda_1 = 0$ besitzt, darüber hinaus jedoch ausschließlich Eigenwerte größer Null aufweist, die durch den maximalen Grad Λ des Graphen beschränkt sind. Die Forderung der positiven Semidefinitheit ist daher für ungerichtete, zusammenhängende und zeitinvariante Kommunikationsgraphen immer erfüllt und der Durchschnitts-Konsensalgorithmus somit unter Annahme der erfüllten Bedingungen immer asymptotisch stabil. Die Eigenwerte von \underline{L} ergeben sich, wie zuvor gesehen, aus der Topologie des Kommunikationsgraphen und haben direkten Einfluss auf die Dynamik des Durchschnitts-Konsensalgorithmus. Ein Durchschnitts-Konsensalgorithmus mit stark vernetztem (oder gar vollständigem) Kommunikationsgraphen weist daher kleinere Eigenwerte λ_i auf und konvergiert schneller zum Konsenszustand (s. Abbildung 4-13 oben rechts), als dies mit einem schwach vernetzten Kommunikationsgraph der Fall ist (s. Abbildung 4-13 oben links).

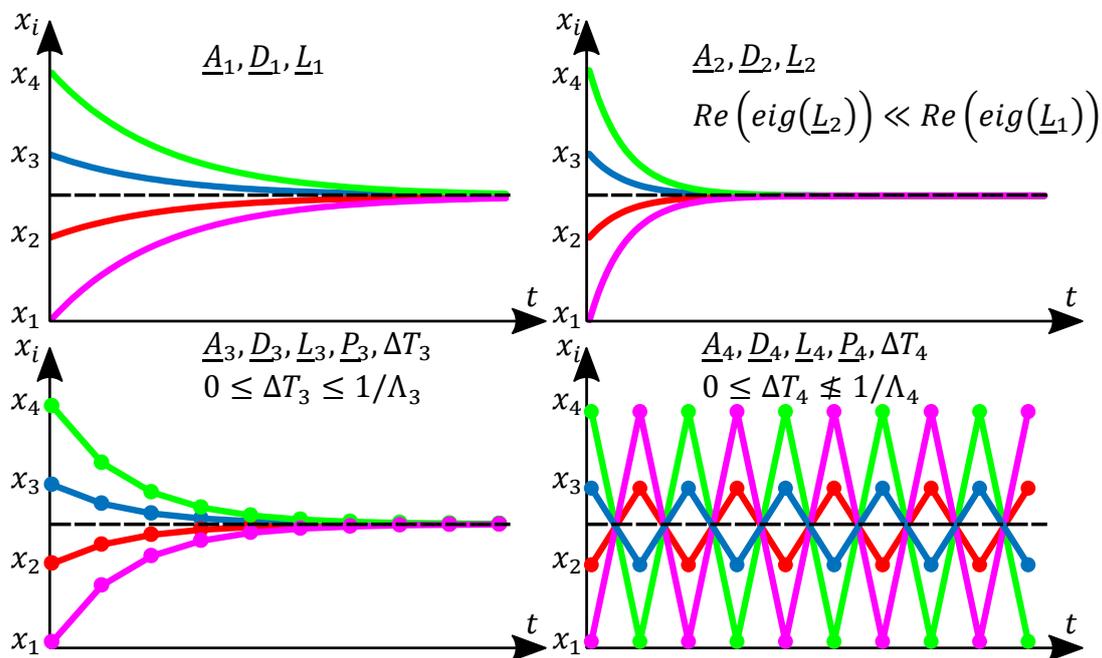


Abbildung 4-13: Beispiele für Agentenverhalten mit Durchschnitts-Konsensalgorithmus. Oben links: Kontinuierlicher Fall, oben rechts: Kontinuierlicher Fall mit kleineren Eigenwerten, unten links: Diskreter Fall mit stabiler Schrittweitenwahl, unten rechts: Diskreter Fall mit instabiler Schrittweitenwahl

Wird der diskrete Fall betrachtet, so hängt die asymptotische Stabilität des Durchschnitts-Konsensalgorithmus von der Gestalt der Perronmatrix \underline{P} sowie der Abtastzeit ΔT ab. Für die Perronmatrix \underline{P} gilt, dass diese eine nicht-negative, zeilenstochastische Matrix mit einem trivialen Eigenwert von $\lambda_1 = 1$ ist und sich zudem alle Eigenwerte im Einheitskreis (inkl. Rand) befinden. Daher liegt in diesem Fall ein asymptotisch stabiles Verhalten für den diskreten Durchschnitts-Konsensalgorithmus vor, wenn zusätzlich folgende Ungleichung (4-43) erfüllt ist:

$$0 < \Delta T < \frac{1}{\Lambda} \quad (4-43)$$

In Abbildung 4-13 sind in der unteren Zeile zwei Beispiele für einen diskreten Durchschnitts-Konsensalgorithmus gezeigt. Das linke Beispiel erfüllt die Stabilitätsbedingung (4-43) für die Abtastzeit ΔT , sodass sich erwartungsgemäß ein Konsenzzustand einstellt. Wird diese Bedingung jedoch verletzt, ist eine Stabilität nicht gewährleistet, das System kann also zu starken Schwingungen neigen, wie dies in Abbildung 4-13 unten rechts gezeigt ist oder sogar aufschwingen und somit keinen Konsenzzustand erreichen.

Im Folgenden wird häufig der Begriff „Regelung“ in Kombination mit dem Durchschnitts-Konsensalgorithmus verwendet, obwohl keine klassische Struktur eines Regelkreises vorliegt. So existieren z.B. kein Soll-Ist-Wert-Vergleich und auch keine explizite Sollwertvorgabe, vielmehr bestimmt sich dieser aus dem Ansatz in Form des Mittelwerts von selbst. Aus diesem Grund und da die Agenten für die betrachtete Systemklasse immer in den Konsenzzustand konvergieren, ist ein Soll-Ist-Wert-Vergleich zudem nicht notwendig oder sinnvoll. Da genau dieses Verhalten jedoch erwünscht ist, soll der Begriff „Regelung“ nachfolgend in diesem Kontext als korrektes Synonym verstanden werden.

4.3.3 Verkehrsdichteregulierung mittels Durchschnitts-Konsensalgorithmus

In der zweiten Hierarchieebene wird nun der vorgestellte Ansatz des Durchschnitts-Konsensalgorithmus genutzt, um die Verkehrsdichte zu harmonisieren. Abbildung 4-14 zeigt das Konzept des Ansatzes: Ausgehend von einem beispielsweise ungleich ausgelasteten Bilanzraum (Straßennettausschnitt) mit verschiedenen Verkehrsdichten $\rho_i(t)$, soll der vorzustellende Ansatz eine Balancierung aller Verkehrsdichten (und damit auch der Verkehrsflüsse) vornehmen, sodass im gesamten Bilanzraum ein ähnlicher Zustand herrscht. Befinden sich alle Straßen des Bilanzraums im exakt selben Zustand (Idealfall), so lässt sich der gesamte Bilanzraumzustand durch lediglich drei makroskopische Größen der Verkehrsdichte, des Verkehrsflusses und der mittleren Verkehrsgeschwindigkeit ausdrücken und erfüllt damit die Anforderung für die in Kapitel 3.2.4 vorgestellten makroskopischen Fundamentaldiagramme. Positive Effekte homogener Zustände im Bilanzraum sind (in Annahme dieser Arbeit), dass trotz gleichbleibender Gesamtzahl der Fahrzeuge

ein störungsfreieres Abfließen der Fahrzeuge ermöglicht wird und somit weniger Risiken für lokale Überlastungen und Stauungen bestehen.

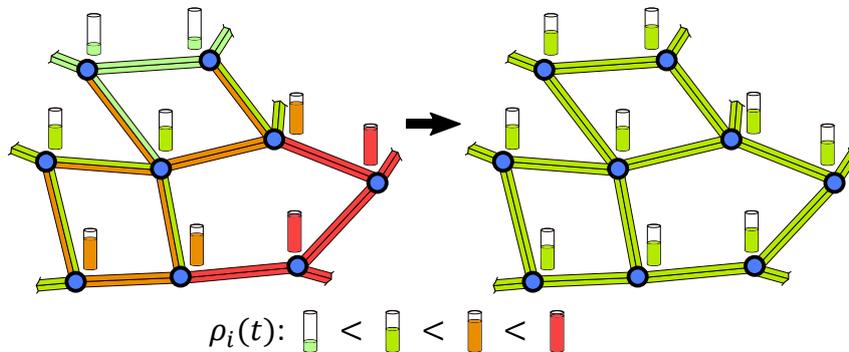


Abbildung 4-14: Konzeptidee der Harmonisierung des Verkehrs in einem Bilanzraum mittels Durchschnitts-Konsensalgorithmen

Im Folgenden wird nun gezeigt, wie der Durchschnitts-Konsensalgorithmus dazu genutzt werden kann, diese Funktionalität umzusetzen. Wie bereits in Kapitel 4.3.2 erläutert, sind die Definition der Agenten sowie deren Dynamik, die Festlegung der Kommunikationstopologie zwischen den Agenten und die Zieldefinition von entscheidender Wichtigkeit.

Agenten und Agentendynamik

In einem Bilanzraum mit mehreren Kreuzungen und Straßen stellt sich die Frage, inwiefern ein geeigneter Agent definiert werden kann. Naheliegender ist, dass die in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Struktur des Kreuzungsmanagements, deren Berechnung die Kreuzungsmanager (also eine Berechnungseinheit pro Kreuzung) übernommen haben, in ähnlicher Weise als Agenten für den Durchschnitts-Konsensalgorithmus herangezogen werden. Folglich liegen mit diesem Ansatz genauso viele Agenten wie Kreuzungen pro Bilanzraum vor. Jeder Agent besitzt eine eigene Dynamik und kommuniziert mit anderen Agenten zum Informationsaustausch. Die zugrunde gelegte Agentendynamik wird, wie dies schon in den Grundlagen zu Konsensalgorithmen erläutert wurde, als Einfach-Integrator-Dynamik aufgefasst, sodass jeder Agent genau einen noch zu definierenden Zustand besitzt. Im nachfolgenden Abschnitt wird darauf noch einmal genauer eingegangen.

Da mit dem Durchschnitts-Konsensalgorithmus eine Harmonisierung der Verkehrsdichte erfolgen soll, ist die Wahl der Verkehrsdichte als Zustand für die Agenten naheliegender. Hierzu ist es jedoch erforderlich, eine geeignete Definition der Verkehrsdichte für einen Agenten zu finden, da jeder Agent in Form einer Kreuzung mit mehreren Straßen verbunden ist, die jeweils unterschiedliche Verkehrsdichteverläufe aufweisen können. Es muss also eine Richtlinie definiert werden, welche Verkehrsdichteverläufe welcher Straßen zum Zustand eines Agenten beitragen.

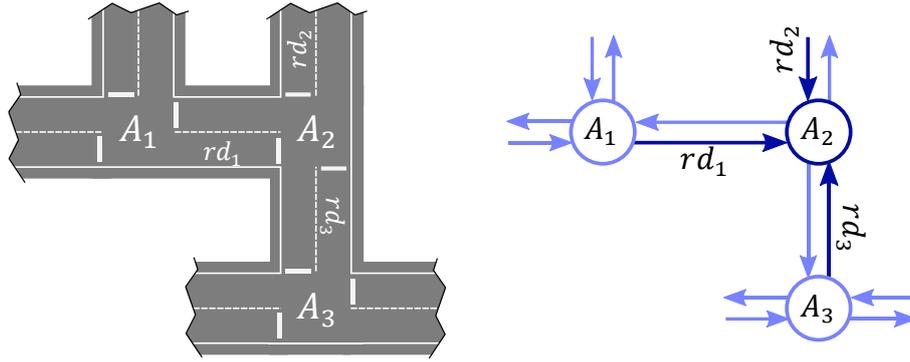


Abbildung 4-15: Beispiel zur Berechnung des Agentenzustands für Kreuzungsagent A_2

In Abbildung 4-15 links ist ein beispielhafter Ausschnitt eines Bilanzraums zu sehen, der aus drei Kreuzungen und somit aus drei Agenten A_1 bis A_3 besteht. Rechts in Abbildung 4-15 sind die Verkehrsflussrichtungen in Form von Pfeilen für dasselbe Szenario zwischen den Agenten dargestellt. Auf den Agenten A_2 fließen drei Verkehrsflüsse zu, von denen einer ein externer Verkehrsfluss von außen ist. Werden die mittleren zeitabhängigen Verkehrsdichten der auf Agent A_2 zufließenden Straßen (rd_1 , rd_2 und rd_3) als bekannt angenommen (vgl. exemplarisch $\bar{\rho}_{rd_1}(t)$ in (4-45)), so kann der Agentenzustand $\rho_{A_2}(t)$ beispielhaft wie nachfolgend in (4-46) definiert werden:

$$l_{rd_1} = \int_{x_{0,rd_1}}^{x_{E,rd_1}} x \, dx \quad (4-44)$$

$$\bar{\rho}_{rd_1}(t) = \frac{1}{l_{rd_1}} \cdot \int_{x_{0,rd_1}}^{x_{E,rd_1}} \rho_{rd_1}(x, t) \, dx \quad (4-45)$$

$$\rho_{A_2}(t) = \frac{1}{3} \cdot \left(\bar{\rho}_{rd_1}(t) + \bar{\rho}_{rd_2}(t) + \bar{\rho}_{rd_3}(t) \right) \quad (4-46)$$

Hierbei beschreibt l_{rd_1} die Bogenlänge der Straße rd_1 vom Start x_{0,rd_1} bis zum Ende x_{E,rd_1} , analog zu $\bar{\rho}_{rd_1}(t)$ in Gleichung (4-45) werden $\bar{\rho}_{rd_2}(t)$ und $\bar{\rho}_{rd_3}(t)$ bestimmt. Alle auf eine Kreuzung zufließenden Straßen eines Bilanzraums werden somit zur Berechnung des Agentenzustands genau einmal berücksichtigt und somit ergibt sich also eine eindeutige Zuordnung von Straßen zu Agenten. Der Nachteil des in (4-46) gezeigten Ansatzes ist jedoch, dass die Verkehrsdichte ein über die Streckenlänge normierter Wert ist und die tatsächlichen Straßenlängen nicht berücksichtigt werden. Daher ist dieser Ansatz wenig geeignet, um den aktuellen Verkehrszustand in den Agentenzuständen abzubilden (z.B. könnte eine sehr kurze Straße mit hoher Verkehrsdichte einen höheren Einfluss auf den Agentenzustand haben, wie eine sehr lange Straße mit mittlerer Dichte, obwohl diese deutlich mehr Fahrzeuge enthält).

Werden die einzelnen auf die jeweilige Kreuzung zufließenden Straßen wie eine einzige, zusammengesetzte Straße betrachtet, so lässt sich die Berechnung der Verkehrsdichte $\rho_{A_i}^k$ für Agent A_i in einer geeigneteren Weise wie nachfolgend in Gleichung (4-47) bestimmen, die diesen Nachteil behebt. Ebenfalls ist auch hierzu zwangsläufig die Kenntnis der Längen l_{rd_i} der entsprechenden zufließenden Straßen als bekannt anzunehmen:

$$\rho_{A_i}(t) = \frac{\sum N_{rd_i}(t)}{\sum l_{rd_i}} = \frac{\sum \bar{\rho}_{rd_i}(t) \cdot l_{rd_i}}{\sum l_{rd_i}} \quad (4-47)$$

$$\Rightarrow \rho_{A_2}(t) = \frac{\bar{\rho}_{rd_1}(t) \cdot l_{rd_1} + \bar{\rho}_{rd_2}(t) \cdot l_{rd_2} + \bar{\rho}_{rd_3}(t) \cdot l_{rd_3}}{l_{rd_1} + l_{rd_2} + l_{rd_3}} \quad (4-48)$$

Für den Agenten A_2 wird der Zustand beispielhaft wie in Gleichung (4-48) berechnet. In zeitdiskreter Schreibweise lässt sich der Zustand $\rho_{A_i}(t)$ des Agenten A_i zum Zeitpunkt $t = k \cdot \Delta T$ nun definieren zu:

$$\rho_{A_i}^k = \frac{\sum N_{rd_i}^k}{\sum l_{rd_i}} = \frac{\sum \rho_{rd_i}^k \cdot l_{rd_i}}{\sum l_{rd_i}} \quad (4-49)$$

Die berechneten Agentenzustände $\rho_{A_i}(t)$ bzw. $\rho_{A_i}^k$ werden im Folgenden als Kreuzungsdichten bezeichnet.

Dynamikgleichung des Durchschnitts-Konsensalgorithmus

Die angepasste Zieldefinition aus (4-26) führt nun im Kontext der Verkehrsdichteregung zu:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \underline{\rho}_A(t) = \frac{1}{n} \sum_i^n \rho_{A_i}(t=0) = \underline{\bar{\rho}}_A(0) \quad (4-50)$$

bzw. im Diskreten zu:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \underline{\rho}_A^k = \frac{1}{n} \sum_i^n \rho_{A_i}(k=0 \cdot \Delta T) = \underline{\bar{\rho}}_A^0 \quad (4-51)$$

Die Zieldefinitionen (4-50) bzw. (4-51) sollen hierbei dafür sorgen, dass durch den Durchschnitts-Konsensalgorithmus die Kreuzungsdichten $\rho_{A_i}^k$ asymptotisch in den Mittelwert aller Initialverkehrsdichten $\underline{\bar{\rho}}_A^0$ der Agenten streben und somit eine Balancierung des Verkehrs stattfindet.

Bevor nun die Dynamikgleichung des Durchschnitts-Konsensalgorithmus eingeführt wird, soll für das Verständnis noch einmal auf die Wahl der zuvor erwähnten Agentendynamik eingegangen werden. Die verwendete Einfach-Integrator-Dynamik suggeriert

an dieser Stelle, dass die abzubildende Dynamik der Verkehrsdichte nach Gleichung (4-49) ebenfalls diese Dynamik aufweist. Dies ist jedoch nicht Fall, wie sich in den Grundlagen der Verkehrsmodellierung in Kapitel 3 gezeigt hat. Im Unterschied zum üblichen in der Literatur zu findenden Ansatz (vgl. 4.3.2), entspricht in dem hier vorgestellten Ansatz die Einfach-Integrator-Dynamik der Agenten nicht der tatsächlichen Streckendynamik des betrachteten Systems, sondern wird lediglich zur Bestimmung der Sollgröße (Sollkreuzungsdichte) verwendet. Die Dynamikgleichung des Durchschnitts-Konsensalgorithmus fungiert hier also in der Rolle eines reinen Reglers (und nicht als Regler mit Strecke). Die Dynamik des Durchschnitts-Konsensalgorithmus definiert somit ausschließlich, wie schnell sich ein Konsenzzustand bei gleichbleibendem Verkehrszustand einstellen würde. Da sich die Kreuzungsdichten jedoch in der Realität oft verändern, werden die Agentenzustände in jedem Zeitschritt mit aktuellen Messwerten der Strecke aktualisiert und die berechnete mittlere Kreuzungsdichte im nächsten Zeitschritt $\underline{\rho}_A^{k+1}$ als Sollgröße weiterverwendet.

In Abbildung 4-16 ist die Struktur des Regelkreises exemplarisch für einen Agenten dargestellt. Die Regelstrecke besteht aus der vom Agenten beeinflussten Kreuzung mit der (komplexen) Verkehrsdynamik. Für die Kreuzung wird der Gleichung (4-49) entsprechend die Kreuzungsdichte berechnet und bildet in Kombination mit den Kreuzungsdichten der anderen Agenten den aktuellen Zustandsvektor $\underline{\rho}_A^k$ aller Kreuzungsdichten.

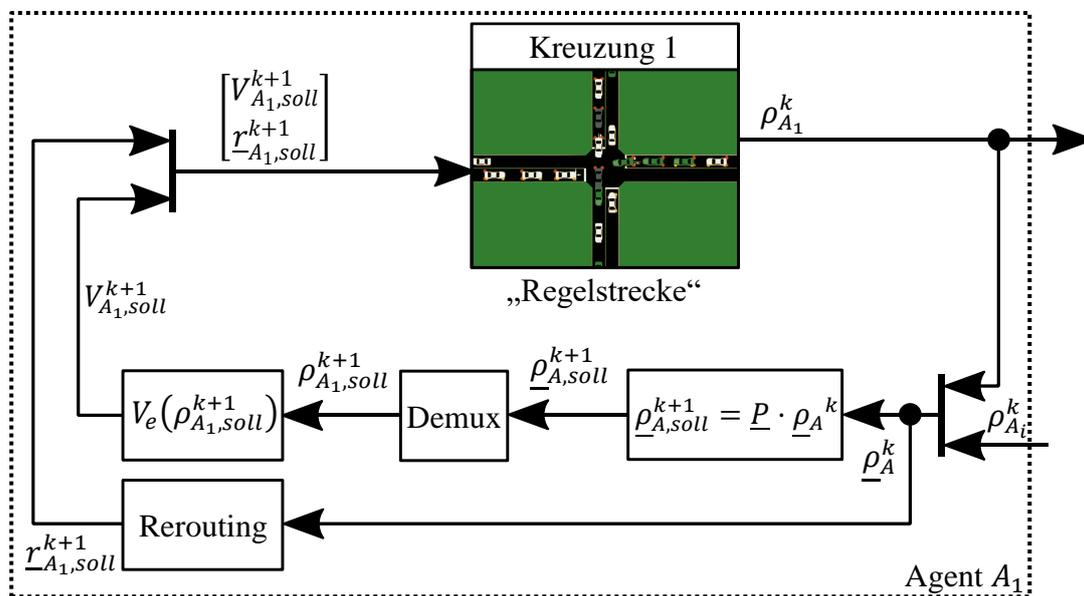


Abbildung 4-16: Regelungsstruktur der Verkehrsdichteregung mittels Durchschnitts-Konsensalgorithmus

Anschließend folgen zwei parallele Pfade, von denen zunächst der obere näher beleuchtet wird. Mit der Dynamikgleichung des Durchschnitts-Konsensalgorithmus wird ein neuer

Zustandsvektor $\underline{\rho}_{A,soll}^{k+1}$ der Kreuzungsdichten berechnet, der (bei Einfach-Integrator-Dynamik) zum Mittelwert $\underline{\rho}_A^k$ führen würde. In Gleichungen (4-52) und (4-53) ist die Berechnung des Zustandsvektors im Kontinuierlichen und im Diskreten zu sehen (vgl. (4-27) - (4-30)). Auf Details zu den Kommunikationstopologien und den daraus resultierenden Laplace- und Perronmatrizen wird im anschließenden Abschnitt eingegangen.

$$\begin{aligned} \dot{\underline{\rho}}_{A,soll}(t) &= -\underline{L} \cdot \underline{\rho}_A(t) \\ \text{mit } \underline{L} &= \underline{D} - \underline{A} \end{aligned} \quad (4-52)$$

$$\begin{aligned} \underline{\rho}_{A,soll}^{k+1} &= \underline{P} \cdot \underline{\rho}_A^k \\ \text{mit } \underline{P} &= \underline{I} - \Delta T \cdot \underline{L} \end{aligned} \quad (4-53)$$

Der Zustandsvektor $\underline{\rho}_{A,soll}^{k+1}$ enthält nun die Sollkreuzungsdichten aller Agenten, daher entnimmt jeder Agent den für ihn resultierenden Wert zur weiteren Berechnung (vgl. „Demux“ in Abbildung 4-16). Die resultierende Sollverkehrsichte $\rho_{A_i,soll}^{k+1}$ für den jeweiligen Agenten soll nun in der Regelstrecke eingeregelt werden, jedoch ist dies kein sinnvoller Sollwert, der den autonomen Fahrzeugen direkt vorgegeben werden kann. Es ist daher erforderlich, dass die Sollkreuzungsdichte in eine geeignete Sollgröße umgewandelt wird, die mit ihr im Zusammenhang steht und zum gewünschten Regelziel führt. An dieser Stelle kommt daher ein Fundamentaldiagramm, wie es bereits in den Grundlagen der Verkehrsmodellierung in Kapitel 3 erläutert wurde, zum Einsatz. Das Fundamentaldiagramm schließt die funktionale Lücke zwischen Verkehrsdichte und mittlerer Flussgeschwindigkeit. Aus der Kreuzungsdichte wird folglich eine mittlere Sollflussgeschwindigkeit $V_{A_1,soll}^{k+1}$ berechnet, die den autonomen Fahrzeugen als direkte Sollgeschwindigkeit vorgegeben werden kann. Damit keine Geschwindigkeiten resultieren können, die den Verkehrsfluss zum Erliegen bringen (Werte gegen Null), wird das Fundamentaldiagramm, wie in Abbildung 4-17 gezeigt, beschränkt. Diese Stellgrößenbeschränkung hat keinen negativen Einfluss auf die Stabilität des Regelkreises, dies wird sich später in den Simulationsergebnissen in Kapitel 5 zeigen.

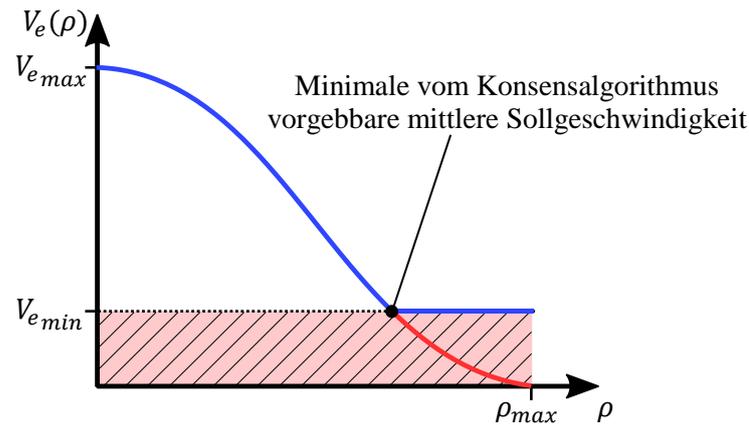


Abbildung 4-17: Beschränkung der vom Konsensalgorithmus minimal vorgebbaren mittleren Sollverkehrsgeschwindigkeit

Der untere Pfad in Abbildung 4-16 bezieht sich auf die zweite Stellgröße neben der mittleren Sollflussgeschwindigkeit und definiert die Sollrouten $\underline{r}_{A_1, \text{soll}}^{k+1}$ der Fahrzeuge durch den Bilanzraum A_1 für den nächsten Zeitschritt. Auf die Details dieser Stellgröße wird in Kapitel 4.3.4 näher eingegangen.

Kommunikationstopologie

Pro Kreuzung existiert nach dem zuvor beschriebenen Ansatz ein Agent, der die Verkehrsdichten der auf sich zufließenden Straßen zur Zustandsbestimmung verwendet. Die Kommunikationstopologie zwischen den Agenten beschreibt also eine Kommunikation zwischen den Kreuzungen. Da durch moderne Kommunikationstechnologien (z.B. WiFi, 5G) im Grunde keine Beschränkung für die Kommunikationstopologie besteht, kann diese weitestgehend frei festgelegt werden und gehört damit zu den Stellschrauben, mit denen das resultierende Gesamtsystem nachfolgend optimiert werden kann. Als Beispiel sollen dennoch zwei einfache und mögliche Kommunikationstopologien vorgestellt werden, die auch im späteren Verlauf dieser Arbeit wieder aufgegriffen werden.

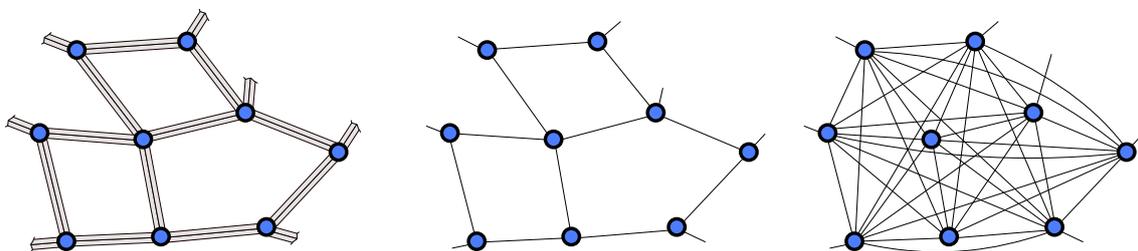


Abbildung 4-18: Beispiele für Kommunikationstopologien als Graphen.
Links: Zugrundeliegendes Straßennetz, Mitte: Direkte Nachbarn (nearest-neighbor), Rechts: Vollvermascht (each-to-each)

In Abbildung 4-18 ist der zuvor bereits gezeigte Beispielbilanzraum zu sehen sowie rechts davon zwei exemplarische Kommunikationstopologien in Form von Graphen. In der

Mitte ist die Kommunikation zwischen Agenten mit ausschließlich direkten Nachbarn zu sehen. Hier besteht eine Kommunikation nur zwischen Agenten, die tatsächlich über Straßen direkt miteinander verbunden sind. Der Graph weist daher dieselbe Gestalt wie das Straßennetz auf. Auf der rechten Seite in Abbildung 4-18 ist eine Topologie zu sehen, in der jeder Agent in direkter Kommunikation mit allen anderen Agenten steht, daher liegt bei diesem Fall ein vollvermaschter Kommunikationsgraph vor. Im Abschnitt zu den Grundlagen der Konsensalgorithmen wurde bereits erläutert, dass die Topologie wesentlichen Einfluss auf die Konsensdynamik hat. Ein stark vermaschter Kommunikationsgraph führt also schneller zum Konsenszustand als ein wenig vermaschter Kommunikationsgraph. Für das Beispiel in Abbildung 4-18 folgt daher, dass der Konsensalgorithmus für die rechte Kommunikationstopologie deutlich schneller zum Konsenszustand konvergiert als für die linke Kommunikationstopologie.

Im vorherigen Abschnitt wurde erklärt, dass die Agentendynamik nicht der Verkehrsdynamik entspricht und lediglich in der Rolle eines Reglers fungiert. Diese Eigenschaft erlaubt es auch, künstliche, sonst nicht realisierbare Kommunikationstopologien zu berücksichtigen und damit eine Wunschdynamik des Durchschnitts-Konsensalgorithmus zu realisieren. Die dynamischen Eigenschaften resultieren nach (4-27) und (4-28) aus der Adjazenz- und Gradmatrix, welche die Laplacematrix definieren. Da die Eigenwerte der Laplacematrix maßgeblich für die Dynamik des Durchschnitts-Konsensalgorithmus sind, ist es offensichtlich, dass die Dynamik z.B. erhöht werden kann, indem die Eigenwerte kleinere Realteile aufweisen. Dies kann durch virtuelle Mehrfachkommunikationswege im Kommunikationsgraphen umgesetzt werden, siehe Abbildung 4-19.

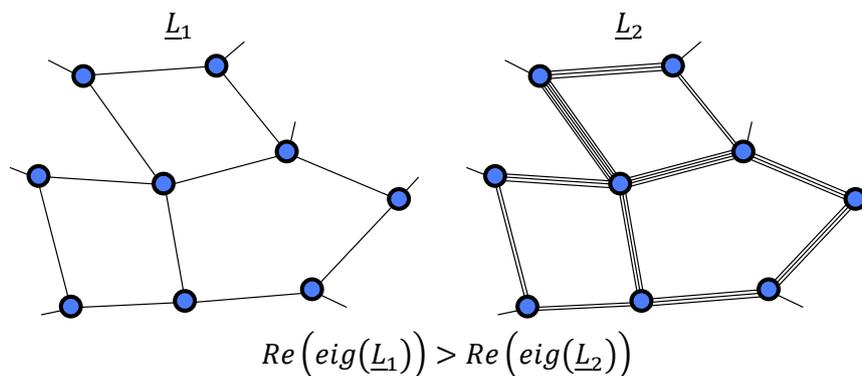


Abbildung 4-19: Konzept der virtuellen Mehrfachkommunikationswege in Kommunikationsgraphen

Existieren zwischen den Agenten mehrere redundante Kommunikationskanäle, so verschieben sich die zugehörigen Eigenwerte auf der Realachse nach links und der Konsenszustand (Mittelwert) wird für die entsprechenden Agenten schneller erreicht. Diese Eigenschaft wirkt für eine reale Kommunikationstopologie wenig sinnvoll. Hier ist dies jedoch als zusätzlicher Freiheitsgrad bei der Systemoptimierung zu sehen. Im Falle des

diskreten Durchschnitts-Konsensalgorithmus muss jedoch zusätzlich auf die sich ebenfalls strenger werdende Anforderung für asymptotisch stabiles Verhalten bezüglich der maximalen Abtastzeit ΔT gemäß (4-43) geachtet werden.

4.3.4 Strategie des lokalen Inner-Bilanzraumroutings

Die zuvor vorgestellte Kreuzungsdichteregelung mittels Durchschnitts-Konsensalgorithmus ermöglicht die Beeinflussung der Fahrzeuge durch Vorgabe von mittleren Flussgeschwindigkeiten. In einem Bilanzraum, der aus mehreren Straßen und Kreuzungen besteht, sind jedoch noch weitere Stellgrößen denkbar. Viele Fahrzeuge, die in einen Bilanzraum einfahren, durchqueren diesen, sodass i.d.R. mehrere Routenmöglichkeiten durch einen Bilanzraum hindurch existieren. Werden manche Straßen innerhalb eines Bilanzraums vermehrt von den Fahrzeugen befahren (z.B. Hauptverkehrsrichtungen) und andere Straßen gemieden, so wird das Kapazitätspotential des Bilanzraumes nicht effizient ausgenutzt und Stauungen durch Überlastungen provoziert. Es kann in einem solchen Fall positive Auswirkungen auf den gesamten Verkehr haben, wenn sich dieser auf alle vorliegenden Straßen eines Bilanzraums verteilt, auch wenn die Fahrzeuge hierdurch ggf. nicht die kürzeste Fahrstrecke verwenden. Es ist daher naheliegend, den Verkehr nicht ausschließlich durch Adaption der Geschwindigkeiten zu balancieren, sondern zusätzlich durch alternierende Routenwahlen. Diese Idee wurde bereits im Stand der Technik in Abbildung 2-9 erwähnt. Diese zweite Stellmöglichkeit der Vorgabe von Individualfahrzeug-Sollrouten als zusätzlicher Pfad im Regelkreis (vgl. Abbildung 4-16) wird in diesem Unterkapitel vorgestellt.

Modellierung des Straßennetzes als Graph

Die Bestimmung von Routen durch einen Bilanzraum lässt sich in einfacher Weise auf das Finden kürzester Wege in Graphen reduzieren. Wird das Straßennetz also als Graph modelliert, so steht eine Vielzahl an möglichen Kürzeste-Wege-Algorithmen aus der Literatur zur Verfügung, die verwendet werden können. Es bietet sich an, die Straßen und Kreuzungen im Bilanzraum ähnlich zum Kommunikationsgraphen des Durchschnitts-Konsensalgorithmus, mit Nearest-Neighbor-Topologie zu modellieren. Hierbei werden die Kreuzungen als Knoten und die Straßen als Kanten zwischen den Knoten modelliert, dies ist in Abbildung 4-20 beispielhaft zu sehen.

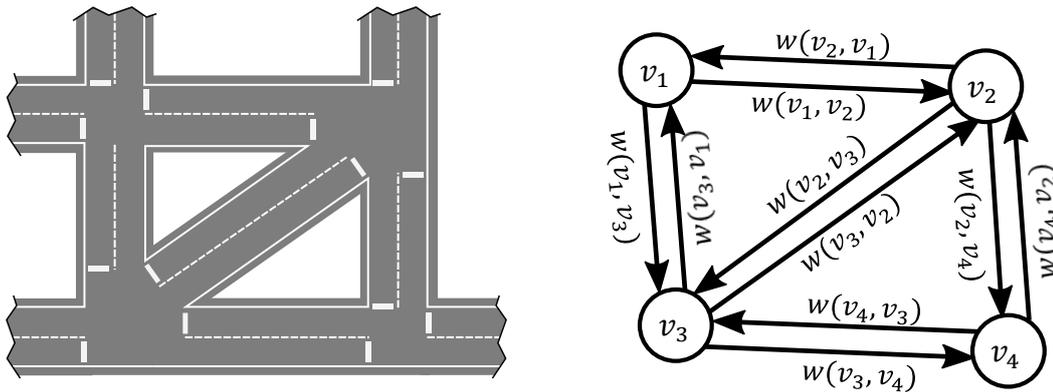


Abbildung 4-20: Straßennetz als Graph mit Kantengewichten

Es ist anzumerken, dass die Begrenzung des Bilanzraums dazu führt, dass Straßen „aufgetrennt“ werden, wie dies links in Abbildung 4-20 zu sehen ist. Diese Straßen werden in der Graphenrepräsentation des Bilanzraums nicht berücksichtigt, da es ausschließlich eine Route innerhalb des Bilanzraums zu finden gilt. Die Straßen zwischen Knoten müssen zudem nicht zwangsläufig wie im Beispiel als gerade Stücke vorliegen. Kurvige Straßenverläufe werden in der Graphenrepräsentation vernachlässigt, da sämtliche Informationen in der Existenz einer Kante sowie deren Kantengewicht abgebildet wird (die Bogenlänge einer Straße könnte somit berücksichtigt werden). Die Definition eines allgemeinen Graphen gemäß (4-24) kann an dieser Stelle gleichermaßen verwendet werden, jedoch erweitert um die Kantengewichte w , siehe (4-54) und (4-55).

$$G(V, E, w), E \subseteq \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j\} \quad (4-54)$$

$$w: V^2 \rightarrow \mathbb{R} \quad (4-55)$$

Es resultiert somit ein Graph mit der Knotenmenge V und der Kantenmenge E , in der jede Kante nach (4-55) ein Kantengewicht w besitzt, welches die Kosten für die Beschreitung dieser Kante angibt. Das Kantengewicht w bildet vom kartesischen Produkt der Knotenmenge V mit sich selbst auf eine reelle Zahl ab und kann im einfachsten Fall eine Konstante sein oder als beliebig komplexe Funktion vorliegen. Für das Beispiel in Abbildung 4-20 rechts bedeutet dies, dass für den direkten Übergang von Knoten v_3 (Kreuzung unten links) zu Knoten v_4 (Kreuzung unten rechts) die Kosten $w(v_3, v_4)$ anfallen.

Bestimmung von Routen

Der vorliegende Graph bildet bereits die Grundlage, bewährte Ansätze aus der Literatur zum Auffinden von Routen durch einen Graph anzuwenden. Diese sog. Kürzeste-Wege-Algorithmen können je nach Zweck sowohl zwischen bestimmten Knoten als auch zwischen allen Knoten kürzeste Wege (Wege geringster Kosten) berechnen, die von den Kantengewichten abhängen. In dieser Arbeit wird der Dijkstra-Algorithmus eingesetzt,

um kürzeste Wege in Graphen zu berechnen. Grundlagen sowohl zum Dijkstra-Algorithmus als auch zu weiteren Ansätzen können z.B. in [Deh11] oder [BE05] nachgeschlagen werden. An dieser Stelle wird auf eine nähere Ausführung dieser Algorithmen verzichtet, da der Fokus auf die Adaption der Kantengewichte gelegt werden soll.

Eine bereits durch den Dijkstra-Algorithmus bestimmte und vorliegende Route $r_{(v_s, v_d)}$ mit Startknoten v_s und Endknoten v_d durch den als Graph modellierten Bilanzraum kann nun als n -Tupel aus den Knoten v_s, \dots, v_d angegeben werden, wie in Gleichung (4-56) gezeigt:

$$r_{(v_s, v_d)} = (v_s, \dots, v_d) := \{(v_s = v_0, v_1), \dots, (v_{n-1}, v_d = v_n)\} \text{ mit} \quad (4-56)$$

$$\forall (v_i, v_{i+1}) \in r_{(v_s, v_d)}: (v_i, v_{i+1}) \in E \text{ für } 0 \leq i < |r_{(v_s, v_d)}| \quad (4-57)$$

Durch (4-57) ist zudem gewährleistet, dass alle aufeinanderfolgenden Knotenpaare der Route $r_{(v_s, v_d)}$ auch tatsächlich in der Menge der Kanten E existieren und adjazent sind, sich also jeweils eine verbindende Straße zwischen den Knoten befindet.

Die Einführung der Kostenfunktion w erlaubt es nun, wie nachfolgend in (4-58) gezeigt, die Gesamtkosten W für eine Route $r_{(v_s, v_d)}$ als Summe der einzelnen Kantengewichte $w(v_i, v_j)$ zu beschreiben. Es ist offensichtlich, dass hierbei eine Vielzahl verschiedener Routen existieren kann, die dieselben Quell- und Zielknoten v_s und v_d besitzen, jedoch über verschiedene Zwischenknoten verlaufen und daher auch unterschiedliche Gesamtkosten W aufweisen. Liegt eine solche Vielzahl von Routen für ein gegebenes Quell-/Ziel-Knotenpaar vor (z.B. p Stück), so bilden die jeweiligen Gesamtkosten dieser möglichen Routen, wie in (4-59) angegeben, insgesamt die Menge aller Routenkosten $W_{(v_s, v_d)}^*$. Die Funktion $\delta(v_s, v_d)$ gibt für die Menge aller Routenkosten $W_{(v_s, v_d)}^*$ zwischen zwei Knoten im Graphen die geringsten Gesamtkosten an und gibt unendlich aus, falls keine einzige Route existiert (vgl. (4-60)).

$$W(r_{(v_s, v_d)}) = \sum_{i=0}^{n=|r_{(v_s, v_d)}|-1} w(v_i, v_{i+1}) \quad (4-58)$$

$$W_{(v_s, v_d)}^* = \{W(r_{(v_s, v_d), 0}), \dots, W(r_{(v_s, v_d), q}), \dots, W(r_{(v_s, v_d), p})\} \\ \text{mit } 0 \leq q \leq p \quad (4-59)$$

$$\delta(v_s, v_d) = \begin{cases} \min_{\infty}(W_{(v_s, v_d)}^*) & W_{(v_s, v_d)}^* \neq \emptyset \\ \infty & \text{sonst} \end{cases} \quad (4-60)$$

Soll beispielhaft die kostengünstigste Route von v_1 zu v_4 in dem in Abbildung 4-20 rechts dargestellten Graphen gefunden werden, so lauten die möglichen Routen unter der Beschränkung, dass Schleifen in Routen unzulässig sind (jeder Knoten wird maximal einmal besucht), wie folgt:

$$\begin{aligned} r_{(v_1, v_4), 1} &= (v_1, v_2, v_4), r_{(v_1, v_4), 2} = (v_1, v_3, v_4), \\ r_{(v_1, v_4), 3} &= (v_1, v_2, v_3, v_4), r_{(v_1, v_4), 4} = (v_1, v_3, v_2, v_4) \end{aligned} \quad (4-61)$$

Die günstigsten Gesamtkosten $\delta(v_1, v_4)$ ergeben sich dann in Abhängigkeit der Kostenfunktionen zu:

$$\delta(v_1, v_4) = \min \begin{pmatrix} w(v_1, v_2) + w(v_2, v_4), \\ w(v_1, v_3) + w(v_3, v_4), \\ w(v_1, v_2) + w(v_2, v_3) + w(v_3, v_4), \\ w(v_1, v_3) + w(v_3, v_2) + w(v_2, v_4) \end{pmatrix} \quad (4-62)$$

Definition einer Kostenfunktion

Zuvor wurde gezeigt, wie kürzeste Routen bzw. Routen geringsten Gewichts durch einen als Graph modellierten Bilanzraum gefunden werden können. Hierbei ist die Wahl eines geeigneten Kostenfunktionalen von entscheidender Bedeutung, denn dieses hat maßgeblichen Einfluss auf die Routenwahl. Im Kontext der zuvor präsentierten Kreuzungsdichteregulation mit dem Ziel der Balancierung der Kreuzungsdichten ist die Kostenfunktion derart zu wählen, dass das Erreichen des Ziels unterstützt wird und diesem in keinem Fall entgegenwirken darf. Wird beispielsweise folgende Kostenfunktion in (4-63) verwendet

$$w(v_i, v_j) = 1, \forall i, j \in \{0, \dots, n-1\} \quad (4-63)$$

so besitzt jede Kante im Graphen dieselben Kosten von eins. Der Dijkstra-Algorithmus wird daher ausschließlich Routen finden, welche die Anzahl der zu befahrenen Kanten minimiert, ohne den aktuellen Verkehrszustand zu berücksichtigen. Durch diese Kostenfunktion würden Fahrzeuge mit identischem Quell- und Zielknoten in jedem Fall dieselbe Route zugewiesen bekommen, sodass Überlastungen provoziert würden. Es ist also sinnvoll, den aktuellen Verkehrszustand in der Kostenfunktion zu beachten. Im zweiten Beispiel wird die Kostenfunktion wie in (4-64) definiert:

$$w(v_i, v_j, t) = w_{\bar{\rho}}(v_i, v_j, t) = \frac{1}{l_{(v_i, v_j)}} \cdot \int_0^{l_{(v_i, v_j)}} \rho_{(v_i, v_j)}(x, t) dx \quad (4-64)$$

Die Kostenfunktion einer Kante enthält also die durchschnittliche Verkehrsdichte entlang der Straße für einen gegebenen Zeitpunkt t und berücksichtigt damit den aktuellen Verkehrszustand. Fahrzeuge mit identischen Quell- zu einem Zielknoten können daher unterschiedliche Routen durch den Bilanzraum erhalten, abhängig davon, wie die Verkehrsdichte entlang der Route zum Ziel ist. Bei einem Bilanzraum, der im Bereich um den Quellknoten hohe Verkehrsdichten in allen Straßen aufweist, werden auf diese Weise vorrangig Routen zum Ziel berechnet, die wenig ausgelastete Straßen in der weiteren

Umgebung nutzen. Dies kann zur Folge haben, dass die Routen unnötig lange Umwege aufweisen und sich damit auch die Reisezeiten für die Fahrzeuge deutlich erhöhen. Ein solcher Ansatz könnte durch Fahrgäste als störend und nicht nachvollziehbar empfunden werden, weshalb eine Berücksichtigung der Routenlänge oder der Reisezeit in der Kostenfunktion ebenfalls als sinnvoll anzusehen ist. In Gleichung (4-65) wird die Kostenfunktion vorgestellt, welche in dem hier vorgestellten Ansatz verwendet wird und eine kombinierte Berücksichtigung der aktuellen Verkehrsdichte (siehe (4-66)) mit der zu erwartenden Reisezeit entlang der Route (siehe (4-67)) berücksichtigt:

$$w_{\bar{t}}(v_i, v_j, t) = \frac{l_{(v_i, v_j)}}{\underbrace{\int_0^{l_{(v_i, v_j)}} V_{(v_i, v_j)}(x, t) dx}_{\bar{v}_{(v_i, v_j)}^{-1}(t)}} \cdot l_{(v_i, v_j)} \quad (4-65)$$

$$w(v_i, v_j, t) = \alpha \cdot w_{\bar{\rho}}(v_i, v_j, t) + \beta \cdot w_{\bar{t}}(v_i, v_j, t) \quad (4-66)$$

Die zu erwartende Reisezeit für eine Kante zwischen zwei Knoten kann über den Durchschnitt der mittleren Flussgeschwindigkeit $V_{(v_i, v_j)}(x, t)$ entlang der Kante und der bereits bekannten Straßenlänge $l_{(v_i, v_j)}$ wie in (4-65) angegeben berechnet werden. In (4-66) ist die resultierende Kostenfunktion für das Inner-Bilanzraum-Routing mit den Gewichtungsfaktoren α und β zu sehen, über die der Kompromiss zwischen Verkehrsdichte und erwarteter Reisezeit entlang der Route eingestellt werden kann.

In Abbildung 4-21 ist ein konkretes Zahlenbeispiel für den vorgestellten Ansatz zu sehen, der für das bessere Verständnis erläutert werden soll. Der als Graph modellierte Bilanzraum besitzt dieselbe Struktur wie zuvor in Abbildung 4-20 gezeigt. Die Kantengewichte weisen nun aber konkrete Zahlenwerte für die Verkehrsdichte und der zu erwartenden Reisezeit zum hier betrachteten Zeitpunkt $t = t_0$ auf. Soll nun wie zuvor, die Route mit den geringsten Kosten von Knoten v_1 zu Knoten v_4 gefunden werden, so gilt es aus den aktuellen Messwerten die resultierenden Kantengewichte zu bestimmen.

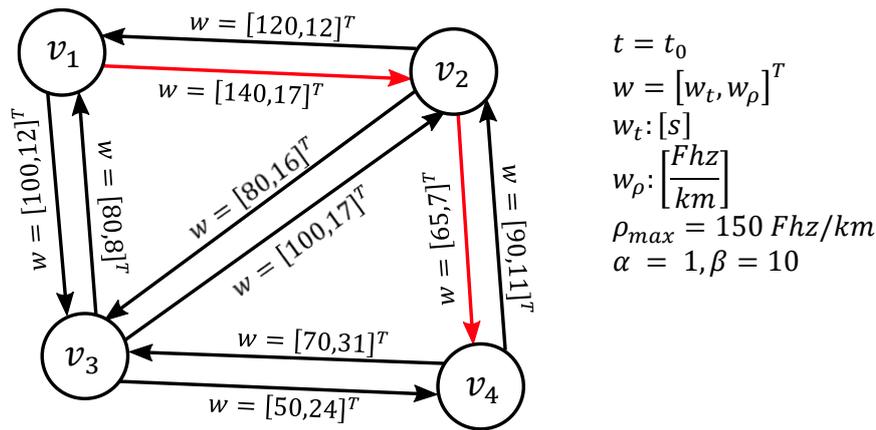


Abbildung 4-21: Zahlenbeispiel für den vorgestellten Ansatz des Inner-Bilanzraum-Routings

Mit dem Dijkstra-Algorithmus wird unter Berücksichtigung der Kantengewichte die Route mit minimalen Kosten bestimmt, wobei wie zuvor nur die in (4-61) gezeigten Routen infrage kommen, da Zyklen nicht zulässig sind. Der Algorithmus bestimmt daher mit $\delta(v_1, v_4)$ die Route geringster Kosten zu $r_{(v_1, v_4), \min} = r_{(v_1, v_4), 1} = (v_1, v_2, v_4)$, wie dies in (4-67) zu sehen ist. Interessanterweise ist hier zu erkennen, dass durch die kombinierte Kostenfunktion eine andere Route gewählt wurde, als dies der Fall wäre, wenn ausschließlich die Verkehrsdichte betrachtet worden wäre. In diesem Falle wäre die Route $r_{(v_1, v_4), 2} = (v_1, v_3, v_4)$ günstiger (vgl. Vektorkomponenten in (4-67)).

$$\begin{aligned}
 \delta(v_1, v_4) &= \min \begin{pmatrix} (140 + 170) + (65 + 70), & r_{(v_1, v_4), 1} \\ (100 + 120) + (50 + 240), & r_{(v_1, v_4), 2} \\ (140 + 170) + (80 + 160) + (50 + 240), & r_{(v_1, v_4), 3} \\ (100 + 120) + (100 + 170) + (65 + 70) & r_{(v_1, v_4), 4} \end{pmatrix} \\
 &= \min \left(\underbrace{\begin{pmatrix} 205 \\ 150 \\ 270 \\ 265 \end{pmatrix}}_{\alpha \cdot w_\rho} + \underbrace{\begin{pmatrix} 240 \\ 360 \\ 570 \\ 360 \end{pmatrix}}_{\beta \cdot w_t} \right) = \min \begin{pmatrix} 445 \\ 510 \\ 840 \\ 625 \end{pmatrix} = 445 \quad (4-67)
 \end{aligned}$$

4.3.5 Bestimmung der Bilanzraumgröße

Die vorherigen Unterkapitel 4.3.1 bis 4.3.4 beschreiben den Ansatz der Verkehrsdichteregulierung sowie des lokalen Inner-Bilanzraumroutings auf Grundlage eines definierten Bilanzraums. Bisher wurde jedoch noch nicht geklärt, wie ein solcher Bilanzraum geeignet zu definieren ist, d.h. wie groß dieser sein und welche Form dieser aufweisen sollte. Aus diesem Grund soll in diesem Unterkapitel ein Algorithmus vorgestellt werden, der statische Informationen zum Straßennetz nutzt, um mögliche Bilanzräume zu finden.

Da die Topologien der weltweiten Straßennetze untereinander deutliche Unterschiede aufweisen und ein allgemeingültiger und intuitiver Ansatz daher schwer zu definieren ist, soll für das bessere Verständnis zunächst kurz auf die geschichtliche Entwicklung der Straßenhierarchien sowie typische Arten von Straßennetzen eingegangen werden. Darauf folgend werden die notwendigen Grundlagen und der Algorithmus selbst vorgestellt.

Entwicklung der Straßennetztopologien und -hierarchien

Wird die historische Entwicklung des heutigen Straßennetzes betrachtet, so sind deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der geographischen Lage zu erkennen, die eine Einordnung in verschiedene Straßennetz-Typen erlauben. Zunächst ist es nach [BD10] zum Beispiel für europäische Städte typisch, dass diese häufig eine zentral orientierte Ring- oder Gürtelstruktur aufweisen, die auf den frühen Stadtmauern des 12. bis 17. Jahrhunderts basieren. Bei der Untersuchung der historischen Entwicklung 15 europäischer Städte fanden die Autoren heraus, dass sich die Städte i.d.R. radial über ihre alten Stadtformen nach außen erweitern, hierbei den Bezug zur Zentralität aber beibehalten. In Abbildung 4-22 links ist beispielhaft die zeitliche Ausdehnung der Stadt München vom 12./13. Jahrhundert bis heute zu sehen.

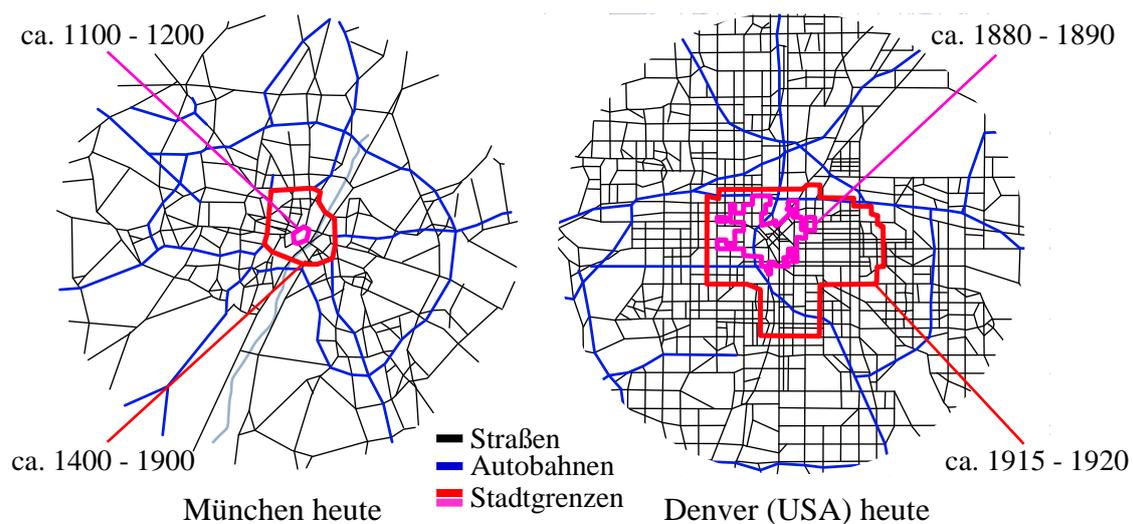


Abbildung 4-22: *Geschichtliche Entwicklung der Stadtgrenzen in Anlehnung an [BD10], links: München, rechts: Denver (USA)*

Die Stadtgrenzen weisen hier eine deutliche radiale Ausdehnung mit gleichbleibendem Zentrum auf, unter dessen Berücksichtigung sich ebenfalls die Straßen ausbreiteten und somit zu den typischen Ringstrukturen führten (siehe z.B. die Autobahnen in blau). Ein ähnliches Muster, jedoch in deutlich kürzerer Zeit entstanden, ist auch in der amerikanischen Stadt Denver zu erkennen (Abbildung 4-22 rechts). Bemerkenswert ist hierbei, dass trotz des ähnlichen Ausbreitungscharakters die Straßennetze von München und Denver deutliche Unterschiede in den Straßenverläufen aufweisen. So weist München eine eher organisch gewachsene Struktur mit Zentrumsbezug auf, während Denver eine Blockstruktur (Rechtecke) aufweist, die typisch für US-Städte ist.

Genau diese Unterschiede in der heutigen Straßennetztopologie betrachten die Autoren in [LB14], um eine Klassifizierung durch einen typischen „Fingerabdruck“ vorzunehmen. Die Untersuchung ist auf jedoch auf Städte (ohne Umland) fokussiert und betrachtet 131 Städte weltweit. Die Autoren führten die Ergebnisse zu einer Klassifizierung der (Stadt-) Straßennetztopologien in vier Gruppen, die durch jeweils ein exemplarisches Beispiel in Abbildung 4-23 zu sehen sind und in die sich die untersuchten Städte einordnen lassen.

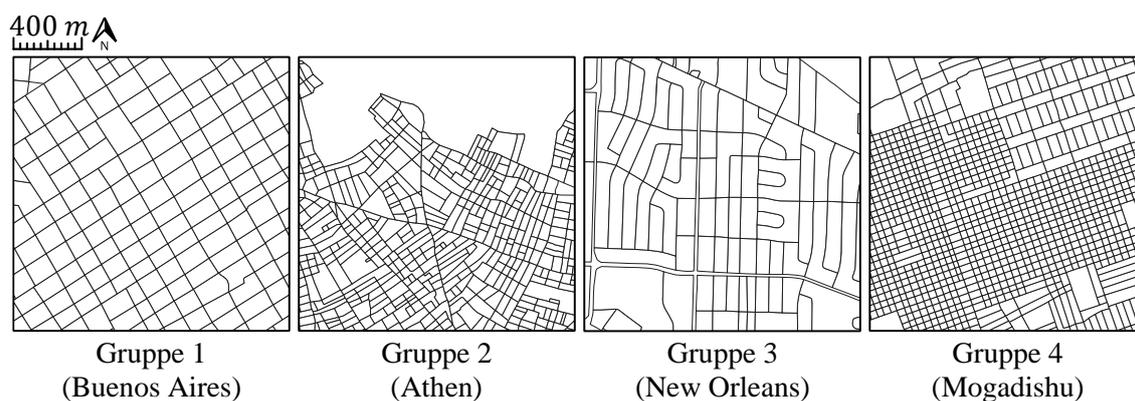


Abbildung 4-23: Typische Städte für die nach [LB14] getroffene Klassifizierung von Straßennetztopologien

Die erste Gruppe zeichnet sich hierbei dadurch aus, dass quadratische und regelmäßig angeordnete Blöcke mittlerer Größe vorliegen. Gleiches gilt für Gruppe vier, jedoch sind hier die Blockgrößen wesentlich kleiner. Die zweite Gruppe weist eine Vielzahl unregelmäßig angeordneter kleiner Blöcke auf, Gruppe drei ist ähnlich zu Gruppe zwei mit dem Unterschied, dass hier größere Blöcke vorliegen und die Verteilung selbiger gleichmäßiger ist. Nach Erkenntnis der Autoren lassen sich mit einigen Ausnahmen fast alle nord-amerikanischen und europäischen Städte in Gruppe drei einordnen.

Werden nicht wie zuvor lediglich die Verläufe der Straßen untersucht, sondern auch der Ausbau, die Kapazität und die Funktion der Straßen betrachtet, so lässt sich zusätzlich eine Hierarchisierung der Straßen vornehmen. In [EMB01] stellen die Autoren eine vierstufige Hierarchie für Straßennetze zur Netzplanung vor, die auf Grundlage amerikanischer Straßen entwickelt wurde, sich jedoch auch in Abwandlung auf deutsche Städte

übertragen lässt. In der vorgestellten Straßenhierarchie, welche in Abbildung 4-24 dargestellt ist, verbinden Ein- und Ausfallstraßen entfernte weitläufige Gebiete und führen dabei große Verkehrsmengen. In Deutschland können Bundesautobahnen als Analogie dazu angesehen werden. An die Ein- und Ausfallstraßen sind Hauptverkehrsstraßen angebunden, welche die Verkehrsmengen zwischen den aneinandergrenzenden Gebieten sowie zwischen Ein- und Ausfallstraßen austauschen (dies wären in Deutschland z.B. Bundes- und Landstraßen zwischen Ortschaften). In bebauten Gebieten finden sich überwiegend Sammelstraßen, die den Verkehr aus Wohn- und Gewerbegebieten zu den Hauptverkehrsstraßen führen sowie Wohnstraßen mit überwiegend langsamerem Verkehr.

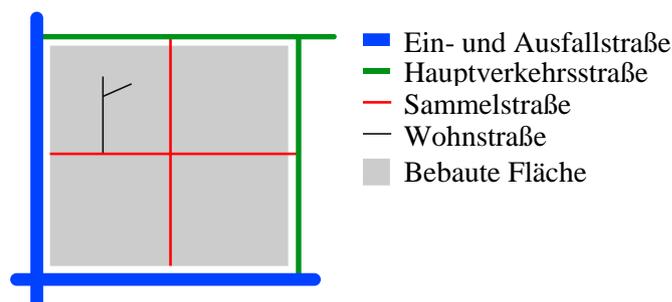


Abbildung 4-24: Hierarchiestufen für Straßen nach [EMB01]

Für die nachfolgenden Grundlagen und für den anschließend vorzustellenden Algorithmus gilt daher, dass stets die geografisch übliche Straßennetztopologie sowie die Straßenhierarchie berücksichtigt werden müssen.

Statische Analyse von Straßennetzen

Für die Bestimmung geeigneter Bilanzräume muss das vorliegende Straßennetz zunächst unter Einbeziehung der zuvor genannten Punkte untersucht werden. Liegen z.B. neuralgische Stellen vor, die besonders für Überlastungen und Stauungen gefährdet sind (z.B. eine Brücke, die zwei durch einen Fluss getrennte Stadtteile miteinander verbindet), so sollten diese bei der Festlegung der Bilanzräume besonders berücksichtigt werden.

In der Literatur finden sich einige Ansätze, Straßennetze zu analysieren. Beispielsweise legen die Autoren in [RAB+15] für jede Straße einen „Wichtigkeitswert“ fest, der angibt, wie essentiell die Straße zur Erhaltung aller Quell- und Zielverbindungen ist. Hierbei wird berücksichtigt, wie sehr eine Straße üblicherweise ausgelastet ist und welchen negativen Einfluss die Sperrung selbiger mit sich brächte. Aus den ermittelten Werten kann eine Rangfolge der Wichtigkeit aller Straßen ermittelt werden. In Anlehnung an die in Kapitel 3.2.4 vorgestellten makroskopischen Fundamentaldiagramme und die Verkehrsregionen-Steuerungen in Kapitel 2.3 wird in [SG16] ein dreistufiger iterativer Clustering-Algorithmus vorgestellt, der ein gegebenes Straßennetz in homogene Regionen teilen kann, die jeweils durch ein makroskopisches Fundamentaldiagramm dargestellt werden können.

Weitere Ansätze beruhen auf Graphen-basierte Algorithmen, die sich die einfache Modellierbarkeit des Straßennetzes als Graph zu Nutze machen (siehe z.B. Kapitel 4.3.4). In [JC04] stellen die Autoren ein Konzept vor, bei dem das als Graph modellierte Straßennetz mit verschiedenen Graphen-basierten Algorithmen reduziert („gefiltert“) wird, um wesentliche Strukturen und Straßen besonderer Wichtigkeit zu extrahieren. Dieser Ansatz wird in [DSV08] und [CJR14] erneut aufgegriffen und erweitert. Hier wenden die Autoren Algorithmen zur Bestimmung verschiedener Zentralitätsmetriken auf die als Graph modellierten Straßennetze an, um kritische Straßen allein auf Grundlage der Straßennetztopologie ausfindig zu machen.

Da der hier vorzustellende Ansatz ebenfalls auf diesem Konzept basiert, wird im Folgenden zunächst kurz erläutert, was Zentralitätsmetriken im Kontext der Graphanalyse bedeuten.

Strukturelle Analyse von Graphen mit Zentralitätsmetriken

Zentralitätsmetriken sind Berechnungsvorschriften, die für jeden Knoten oder jede Kante innerhalb eines Graphen einen numerischen Wert auf Grundlage der vorliegenden Kostenfunktionen berechnen können. Die Idee ist hierbei nach [BE05], das „intuitive Gefühl, dass in den meisten Netzwerken einige Knoten oder Kanten zentraler [(wichtiger)] als andere sind“ zu quantifizieren. Ein einfaches Beispiel ist der Vernetzungsgraph von Personen in einem sozialen Onlineportal, wie in Abbildung 4-25 dargestellt:

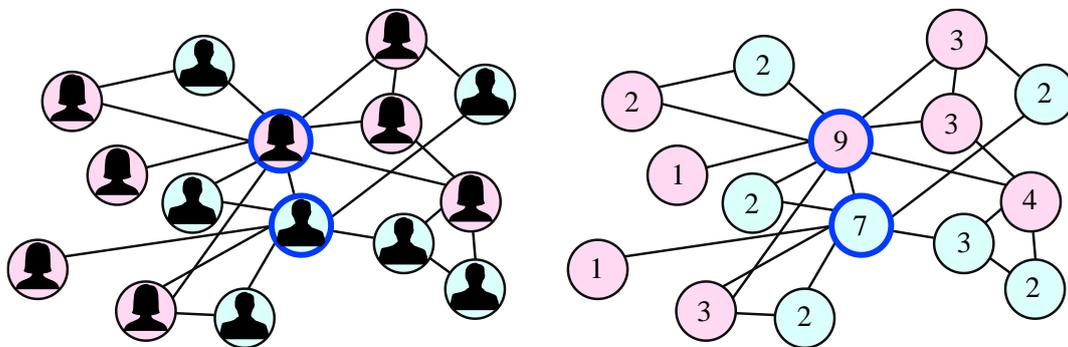


Abbildung 4-25: Links: Beispiel für einen Vernetzungsgraphen in einem sozialen Onlineportal, Rechts: Knotengrad als Zentralitätsmetrik

In dem Beispiel stellen die Knoten die entsprechenden Personen im Onlineportal dar und die Kanten geben an, ob zwei Personen im Onlineportal miteinander vernetzt sind. Werden im Beispiel die beiden blau hervorgehobenen Personen in der Mitte betrachtet, so fällt auf, dass diese eine zentrale Rolle im Vernetzungsgraphen einnehmen. Gewissermaßen verbinden sie die Kontakte auf der linken Seite mit den Kontakten der rechten Seite, die unter sich selbst keine Verbindungen aufweisen. Die beiden Personen in der Mitte spielen also für die Gesamtopologie eine entscheidende Rolle und sind als „wichtiger“

anzusehen als ein Kontakt am äußeren Rand, der nur mit einer weiteren Person in Verbindung steht. Um diese Metrik der „Wichtigkeit“ zu quantifizieren, können die erwähnten Zentralitätsmetriken angewandt werden. Wie der Begriff der „Wichtigkeit“ im Kontext der Straßennetze zu definieren ist, wird im nachfolgenden Absatz erläutert.

Es existieren sehr viele verschiedene Zentralitätsmetriken zur Untersuchung von Graphen, in [Deh11] und [BE05] werden einige Beispiele vorgestellt. Eine ganzheitliche Übersicht von 231 Zentralitätsmetriken sowie Implementierungshinweise zu diesen sind detailliert in [JSA+15] zu finden. Als Beispiel soll an dieser Stelle eine einfache (Knoten-) Zentralitätsmetrik auf Grundlage des in Abbildung 4-25 gezeigten Beispiels vorgestellt werden. Der Knotengrad, welcher bereits in Form der Gradmatrix bei den Grundlagen der Durchschnitts-Konsensalgorithmen in Kapitel 4.3.2 verwendet wurde, ist eine typische Zentralitätsmetrik, da diese Berechnungsvorschrift jedem Knoten im Graph einen eindeutigen numerischen Wert zuweisen kann. Für einen ungerichteten Graph $G = (V, E)$ kann der Knotengrad d_v für den Knoten $v \in V$ durch einfache Zeilen- oder Spaltensumme der Adjazenzmatrix \underline{A} berechnet werden und entspricht damit der Anzahl der Kanten, die mit dem betrachteten Knoten verbunden sind:

$$d_v = \sum_i A_{v,v_i} \quad (4-68)$$

Wird eine Berechnung wie diese für jeden Knoten im Graphen ausgeführt, so besitzen alle Knoten einen i.d.R. einheitenlosen numerischen Wert, der je nach Zentralitätsmetrik geeignet interpretiert werden muss, um die angesprochene „Wichtigkeit“ abzubilden. Im Beispiel in Abbildung 4-25 rechts sind die Knotengrade in den Knoten eingetragen. Die intuitive Annahme, dass die beiden Personen in der Mitte eine wichtigere Rolle als die restlichen Personen in der Graphtopologie einnehmen, lässt sich hier anhand der einfachen Knotengrad-Zentralitätsmetrik numerisch zeigen, denn die beiden Knoten weisen deutlich höhere Werte auf.

Am Beispiel ist zu erkennen, dass sich die Zentralitätsmetriken sehr gut für eine automatisierte Auswertung großer Graphen eignen und einen tieferen Einblick in die Topologie und die „Wichtigkeit“ einzelner Knoten und Kanten ermöglichen können. Diese Möglichkeit wird nun nachfolgend genutzt, um große Straßennetze als Graph zu modellieren und mit verschiedenen Zentralitätsmetriken zu untersuchen.

Algorithmus zur Bestimmung kritischer Straßen in Straßennetzen

Bevor der Algorithmus zur Untersuchung von Straßennetzen vorgestellt wird, soll zunächst in diesem Kontext der Begriff der „Wichtigkeit“ erläutert werden. Da es jedoch schwer ist, eine scharfe Definition des Begriffs anzugeben und diese zudem maßgeblich von den verwendeten Zentralitätsmetriken abhängt, wird eine Wunschbeschreibung der zu findenden Objekte im Straßennetz gegeben:

In einem als Graph modellierten Straßennetz, in dem die Knoten Kreuzungen und die Kanten Straßen darstellen, soll für jede Kante ein Wert berechnet werden, aus dem ersichtlich wird, wie „kritisch“ bzw. „neuralgisch“ diese Straße im Gesamtgefüge ist. „Kritisch“ ist an dieser Stelle als ein Maß der Verschlechterung des Verkehrszustands für den Fall zu betrachten, wenn diese Kante aus dem Graph entfernt werden würde. Dies ist im übertragenen Sinne gleichzusetzen mit dem Sperren einer Straße und der Untersuchung der Auswirkungen auf den Verkehr. Der Unterschied zur Analogie besteht darin, dass die Berechnung ausschließlich auf Grundlage des Graphen und damit auf statischen Werten beruht, also keine zeitlich veränderlichen Verkehrszustände berücksichtigt werden. Kritische Kanten, die auf diese Weise gefunden werden, sind also allein aus Gründen der Topologie als kritisch zu verstehen. Eine erste Voruntersuchung in [Eve15] stellte sich als vielversprechend heraus.

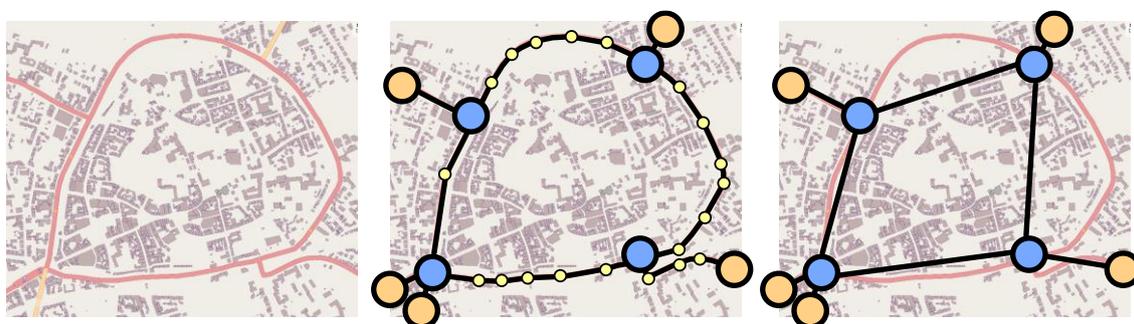


Abbildung 4-26: Abbildung eines realen Straßennetzes als Graph (hier: Paderborn), links: Betrachtetes Straßennetz, mitte: OSM-Datenrepräsentation, rechts: Graphmodell

Straßennetausschnitte können zur Untersuchung aus freien Internetquellen für die Untersuchung exportiert und herangezogen werden. Beispielsweise erlaubt es die Plattform OpenStreetMap (OSM)²⁷, kostenlose und durch die Nutzer aktuell gehaltene, detaillierte Straßennetausschnitte für beliebige Zwecke zu nutzen. In Abbildung 4-26 ist beispielhaft ein von OpenStreetMap exportiertes Straßennetzstück der Stadt Paderborn zu sehen, welches auf die Ringstraße (rot) und die angrenzenden Zubringerstraßen (orange) reduziert ist. Die Daten des Straßennetausschnittes werden bereits ähnlich zu einem Graphen in Form von Knoten (orange: Ein- und Ausgangsknoten, blau: Innenknoten) und Kanten gespeichert (Abbildung 4-26 Mitte). Um aus der OSM-Datenrepräsentation einen Graph zu erzeugen, werden die zur Approximation von Kurvenstücken enthaltenen Stützpunkte (gelb) entfernt, sodass ein für den Algorithmus geeigneter Graph resultiert, wie in Abbildung 4-26 rechts dargestellt. Die Frage nach möglichen Kantengewichten für diesen Anwendungsfall wird an späterer Stelle noch aufgegriffen und geklärt.

Für die Definition eines Bilanzraumes ist die Größe bzw. die Ausdehnung maßgeblich. Da ein beliebig kleiner Bilanzraum für den Durchschnitts-Konsensalgorithmus aufgrund

²⁷ <https://www.openstreetmap.org>

der notwendigen Kommunikation nicht sinnvoll ist, gilt für einen Bilanzraum die in Abbildung 4-27 folgende minimale Bilanzraumgröße, die nicht unterschritten werden kann.

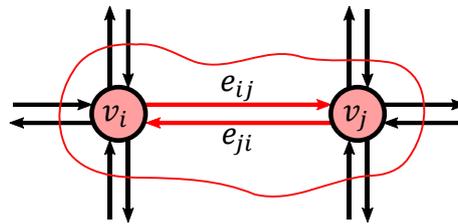


Abbildung 4-27: Minimal definierbarer Bilanzraum bestehend aus zwei über Straßen verbundene Kreuzungen

Da eine gefundene kritische Kante in jedem Fall einen Quell- und einen Zielknoten aufweist und für die Kommunikation im Durchschnitts-Konsensalgorithmus mindestens zwei Agenten notwendig sind, ist es offensichtlich, dass der minimal definierbare Bilanzraum aus zwei Knoten und einer oder zwei Kanten (abhängig davon, ob die Verbindung uni- oder bidirektional ist) besteht.

Es wurde im vorherigen Abschnitt erläutert, dass Zentralitätsmetriken für Knoten und Kanten existieren. Im vorgestellten Ansatz sollen kritische Kanten (Straßen) gefunden werden, weil das Auffinden kritischer Knoten (Kreuzungen) aufgrund des autonomen Kreuzungsmanagements, welches in Kapitel 4.2 vorgestellt wurde, nicht sinnvoll ist. Die Beschränkung auf Kanten reduziert die Menge an vorhandenen Zentralitätsmetriken, da Knotenmetriken nicht auf Kanten angewandt werden können. Die zuvor vorgestellte Metrik des Knotengrades ist z.B. nicht auf die Kanten eines Graphen anwendbar. Um diesen Nachteil auszugleichen, wird der vorliegende Graph $G(V, E)$ vor der Analyse durch die Zentralitätsmetriken zunächst zusätzlich in einen äquivalenten Liniengraphen $L(G(V, E)) := (V', E')$ transformiert, bei dem die Knoten zu Kanten und die Kanten zu Knoten werden. Diese Transformation erlaubt es dann, auch Knotenmetriken zur Kantenbewertung auf den Graphen anzuwenden. Ein Liniengraph ist definiert durch die Knoten V' , bei denen jeder Knoten genau einer Kante des ursprünglichen Graphen entspricht, siehe (4-69).

$$V' = E \quad (4-69)$$

$$E' = ((i, j), (j, k)) \text{ mit } (i, j), (j, k) \in E \quad (4-70)$$

In (4-70) ist die Bedingung zu sehen, dass die Kanten E' des Liniengraphen aus adjazenten Knoten des Ursprungsgraphen bestehen. Diese Tatsache bedeutet, dass im Unterschied zur eindeutigen Zuordnung von Kanten des Ursprungsgraphen E zu Knoten des Liniengraphen V' eine mehrfache Zuordnung von Knoten des Ursprungsgraphen V zu Kanten des Liniengraphen E' möglich und wahrscheinlich ist. Abbildung 4-28 zeigt eine beispielhafte Transformation eines Graphen $G(V, E)$ in einen äquivalenten Liniengraphen

$L(G(V, E))$. Es ist leicht erkennbar, dass jede Kante des Ursprungsgraphen definitionsgemäß als Knoten des Liniengraphen existiert. Die Knoten des Ursprungsgraphen liegen jedoch mehrfach als Kanten im Liniengraph vor, wie dies z.B. der Fall für Knoten $v_1 \in V$ ist. Der Knoten v_1 existiert dreimal als Kante im Liniengraphen, da dieser genau drei Kanten des Ursprungsgraphen miteinander verbindet.

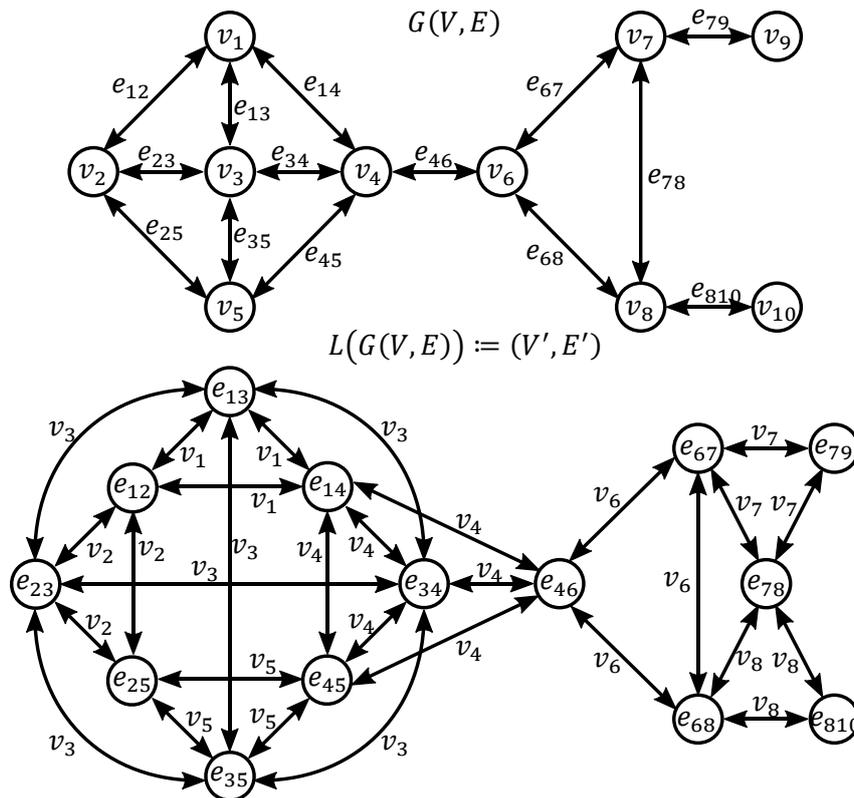


Abbildung 4-28: Beispiel für den Liniengraphen $L(G(V, E))$ eines Graphen $G(V, E)$

Der vorgestellte Algorithmus zur Bestimmung kritischer Kanten weist im Wesentlichen die in Abbildung 4-29 gezeigte Struktur auf. Die vorliegende Graph-Repräsentation eines Straßennetausschnitts wird durch mehrere (Kanten-) Zentralitätsmetriken unabhängig voneinander ausgewertet. Bei n verschiedenen Zentralitätsmetriken liegen als Ergebnis also n numerische Werte für jede Kante des Graphen vor. Diese Ergebnisse können unterschiedliche Größenordnungen annehmen, daher werden die Werte zunächst normalisiert, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Eine nachgelagerte Gewichtung der Zentralitätsmetriken in Kombination mit einer Schwellwertentscheidung bildet die n normalisierten und gewichteten numerischen Werte letztendlich auf einen binären Wert ab. Dieser Wert entspricht eins, sofern die Kante als kritisch gilt und analog dazu null, falls dies nicht der Fall ist:

$$c_{crit}(e_i): \mathbb{R}^n \rightarrow \{0,1\} \quad (4-71)$$

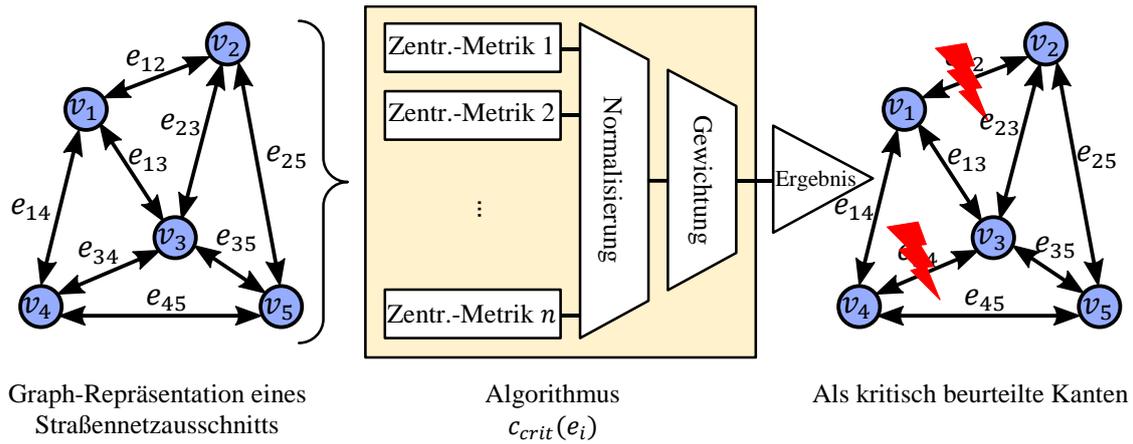


Abbildung 4-29: Prinzip des Algorithmus zur Bestimmung kritischer Straßen in Straßennetz-ausschnitten

Das Ergebnis des Algorithmus ist eine binäre Entscheidung für jede Kante des Graphen, ob diese als kritisch oder unkritisch erkannt worden ist. Der vorgestellte Ansatz besteht hierbei aus vier kombinierten Zentralitätsmetriken, ist jedoch nicht auf diese beschränkt: Es werden die Ansätze *Edge-Degree*, *Edge-Betweenness*, *Edge-Closeness-Vitality* sowie *Edge-Closeness* verwendet. Während die Berechnung der *Edge-Degree* auf Grundlage des Liniengraphen beruht, werden die restlichen Zentralitätsmetriken direkt auf den Ursprungs-Graphen angewandt. Diese Zentralitätsmetriken sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Wie zuvor erläutert, beschreibt der Grad die Eingebundenheit eines Knotens im Graphen, im Falle des *Edge-Degree* ist dies jedoch nicht ohne weiteres zu ermitteln. Für die Berechnung wird der zuvor hergeleitete Liniengraph $L(G(V, E)) := (V', E')$ herangezogen. Für den betrachteten Knoten e im Liniengraph (welcher der Kante e im Ursprungsgraphen entspricht) wird der Knotengrad $c_{ED}(L, e)$ berechnet. Das Ergebnis nimmt kleine Werte an, wenn die Kante nur zu sehr wenigen anderen Kanten eine Verbindung aufweist. Ist die Kante jedoch über einen oder beide Knoten mit vielen weiteren Kanten verbunden, so kann $c_{ED}(L, e)$ große Werte annehmen. Die Berechnungsvorschrift ist nachfolgend in (4-72) gegeben. Hier wird die Zeilensumme der Adjazenzmatrix A_L des Liniengraphen (aus der Menge der Graphen Γ) für die entsprechende Quellkante e berechnet, dies entspricht dem gesuchten (Ausgangs-)Knotengrad:

$$c_{ED}(L, e) = \sum_f a_{e,f} \tag{4-72}$$

$c_{ED}: \Gamma \times V' \rightarrow [0, \infty] \in \mathbb{R}$
 mit $L \in \Gamma, e, f \in V', e \neq f, a_{e,f} \in A_L$

Die Zentralitätsmetrik der *Edge-Betweenness* ist ein Gesamtverhältnis zwischen der Anzahl von günstigsten Pfaden im Graph. Der Wert $c_{EB}(e)$ wird für jede Kante berechnet,

indem die Anzahl aller günstigsten Pfade zwischen allen Knoten des Graphen, die über die betrachtete Kante e verlaufen, ins Verhältnis zu allen günstigsten Pfaden zwischen allen Knoten gesetzt wird. Das Ergebnis kann daher nur reelle Zahlen im Intervall $[0,1]$ annehmen. Der Wert geht gegen null, sofern nur sehr wenige günstigste Pfade über die betrachte Kante e verlaufen. Führen hingegen sehr viele der günstigsten Pfade über die betrachtete Kante e , so strebt der Wert gegen eins. Die Berechnungsvorschrift ist in (4-73) angegeben:

$$c_{EB}(G, e) = \sum_{e \neq f \neq g} \frac{\sigma_e(f, g)}{\sigma(f, g)} \quad (4-73)$$

$$c_{EB}: \Gamma \times E \rightarrow [0,1] \in \mathbb{R}$$

$$\text{mit } G \in \Gamma, e, f, g \in E$$

$\sigma_e(f, g)$: Anzahl aller günstigsten Pfade von f zu g , die e passieren

$\sigma(f, g)$: Anzahl aller günstigsten Pfade von f zu g

Der Ansatz der *Edge-Closeness-Vitality* verfolgt einen anderen Ansatz, hier wird nicht die Anzahl der günstigsten Pfade, sondern vielmehr werden die tatsächlichen Kosten der günstigsten Pfade betrachtet. Hierzu wird der sog. Wiener-Index des Graphen $I_W(G)$ in zwei Varianten berechnet: In einer Variante wird der Wiener-Index für den gesamten Graphen berechnet, in der zweiten Variante wird dies wiederholt, jedoch unter vorheriger Herausnahme der betrachteten Kante e . Der Wiener-Index berechnet die summierten Kosten aller günstigsten Pfade zwischen allen Knoten im Graphen. Wird die betrachtete Kante e aus dem Graph entnommen und dieselbe Berechnung erneut durchgeführt, so kann dies Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Führen viele günstigste Pfade über die betrachtete Kante e und/oder sind die Kosten der Kante sehr gering, so wird der Wert der Differenz große negative Werte annehmen. Im umgekehrten Fall bildet der Wert Null die obere Grenze und ist gleichbedeutend damit, dass die Herausnahme der betrachteten Kante keinen Einfluss auf die günstigsten Pfade im Graph hat. Einen Sonderfall stellen einfach angebundene Knoten und Brückenknoten dar, denn durch die Herausnahme solcher Knoten resultiert $c_{CV}(G, e) = -\infty$, da Teile des Graphen nicht mehr erreichbar sind. Dieser Fall muss also gesondert berücksichtigt werden (z.B. durch eine negative Sättigung). Die Berechnungsvorschrift für den Wiener-Index $I_W(G)$ ist nachfolgend in (4-74) angegeben, die Berechnung von $c_{CV}(G, e)$ findet sich in (4-75):

$$I_W(G) = \sum_f \sum_g \delta(f, g) \quad (4-74)$$

$$c_{CV}(G, e) = I_W(G) - I_W(G \setminus \{e\})$$

$$c_{CV}: \Gamma \times E \rightarrow [-\infty, 0] \in \mathbb{R} \quad (4-75)$$

mit $G \in \Gamma, e, f, g \in E$

$\delta(e, f)$: Kosten des günstigsten Pfades zwischen e und f

Im Ansatz der *Edge-Closeness* wird die reziproke Summe aller günstigsten Pfade zu allen Knoten berechnet, die von der betrachteten Kante e starten. Unter der Annahme, dass für die Kantengewichte üblicherweise $c_i(e) \geq 0$ gilt, wird der Wert also größer, wenn die summierten Kosten gering sind, es also von e aus günstig ist, alle anderen Kanten zu erreichen. Ist es andererseits jedoch „teurer“, von Kante e aus alle anderen Kanten zu erreichen, so wird der Wert für $c_{ECC}(L(G), e)$ entsprechend klein, jedoch nicht negativ. In (4-76) ist die Berechnungsvorschrift für die *Edge-Closeness* angegeben:

$$c_{ECC}(G, e) = \frac{1}{\sum \delta(e, f)} \quad (4-76)$$

$$c_{ECC}: \Gamma \times E \rightarrow [0, \infty] \in \mathbb{R}$$

mit $G \in \Gamma, e, f \in E$

$\delta(e, f)$: Kosten des günstigsten Pfades zwischen e und f

Die drei Zentralitätsmetriken *Edge-Betweenness*, *Edge-Closeness-Vitality* sowie *Edge-Closeness* basieren jeweils auf der Kenntnis des günstigen Pfades zwischen zwei Kanten. In Kapitel 4.3.4 wurde bereits die Thematik der kürzesten Wege in Graphen thematisiert, jedoch basierten die dort vorgestellten Methoden auf Pfaden von Quell- zu Zielknoten, nicht zwischen zwei Kanten des Graphen. Werden Pfade von einer Quellkante zu einer Zielkante gesucht, so ergeben sich für den Fall, dass ein ungerichteter Graph vorliegt (analog dazu: Es existieren keine Einbahnstraßen), mehrere Möglichkeiten, wie dies auch in Abbildung 4-30 dargestellt ist.

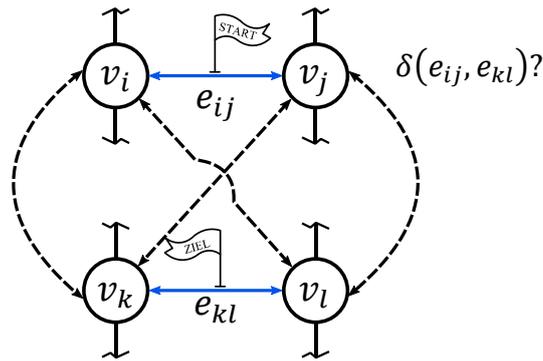


Abbildung 4-30: Definition der Route geringster Kosten zwischen zwei Kanten anstatt zwischen zwei Knoten

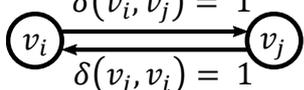
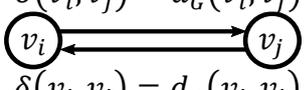
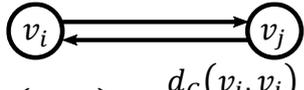
Im gezeigten Beispiel ist die Kante e_{ij} die Quellkante und e_{kl} die Zielkante. Wird ein üblicher Kürzeste-Wege-Algorithmus, wie z.B. der Dijkstra-Algorithmus zur Berechnung verwendet, so können in dem exemplarischen Szenario vier kürzeste Pfade zwischen den Knoten berechnet werden (gestrichelte Linien). Eine Definition für den kürzesten/günstigsten Pfad zwischen zwei Kanten kann daher in einfacher Weise, wie nachfolgend in (4-77) bestimmt werden. Die Kantenkosten der Quell- sowie Zielkante fließen jeweils zur Hälfte in die Pfadkosten zusammen mit den Kosten für den kürzesten der vier möglichen Pfade, die auf die übliche Weise bestimmt werden können.

$$\delta(e_{ij}, e_{kl}) = \frac{\delta(v_i, v_j)}{2} + \min \begin{pmatrix} \delta(v_i, v_k) \\ \delta(v_i, v_l) \\ \delta(v_j, v_k) \\ \delta(v_j, v_l) \end{pmatrix} + \frac{\delta(v_k, v_l)}{2} \quad (4-77)$$

Nachdem nun erläutert wurde, wie der Algorithmus kritische Straßen auf Grundlage verschiedener Zentralitätsmetriken berechnen kann, soll abschließend noch eine Möglichkeit gezeigt werden, wie die Ergebnisse durch Einbindung weiterer Modellkenntnisse verbessert werden können. Die Kantengewichte $\delta(v_i, v_j)$ können im Kontext des Straßennetzes unterschiedlich gewählt werden. Im trivialen Fall können alle Kantengewichte mit demselben Wert Eins belegt werden, also $\delta(v_i, v_j) = 1$. Hierdurch besitzen alle Straßen im Graph dieselben Kosten, ganz gleich, welche Länge die Straßen aufweisen oder welche Geschwindigkeiten dort zulässig sind. Diese Modellierung ist wenig sinnvoll, da z.B. keine Unterscheidung bezüglich der Straßenhierarchie möglich ist (Autobahnen und Wohnstraßen werden z.B. gleichbehandelt). Werden die Kanten mit den Bogenlängen der Straßen zwischen zwei Kreuzungen modelliert, also $\delta(v_i, v_j) = d_G(v_i, v_j)$, so kann eine bessere Analyse des Straßennetzes erfolgen, da nun eine solche Unterscheidung möglich ist. Die Information zu den Bogenlängen kann hierbei leicht aus der OSM-Datengrundlage ermittelt werden. Eine Erweiterung stellt die Modellierung der Kantengewichte durch die zu erwartende Reisezeit dar, hierzu wird wie zuvor die Bogenlänge und zusätzlich die maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit der Straße verwendet. Auf diese Weise

können Graphen bezüglich der kürzesten Reisezeiten untersucht werden. Eine Übersicht dieser drei unterschiedlichen Modellierungstiefen ist in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Vergleich der Modellierungstiefen für den Algorithmus

Modellierungstiefe	Beispiel
Standard [-]	$\delta(v_i, v_j) = 1$  $\delta(v_j, v_i) = 1$
Bogenlänge der Straße [m]	$\delta(v_i, v_j) = d_G(v_i, v_j)$  $\delta(v_j, v_i) = d_G(v_j, v_i)$
Reisezeit der Straße [s]	$\delta(v_i, v_j) = \frac{d_G(v_i, v_j)}{V_{max}(v_i, v_j)}$  $\delta(v_j, v_i) = \frac{d_G(v_j, v_i)}{V_{max}(v_j, v_i)}$

Werden die Zentralitätsmetriken (ohne Kombination durch den Algorithmus) auf einen exemplarischen Straßennetzsausschnitt mit dem Modell der Reisezeit angewendet, so können sich einheitenlose Rohwerte ergeben, wie diese in Abbildung 4-31 für die bayrische Stadt Neusäß dargestellt sind. Die vorliegenden Kantengewichte werden dann, wie zuvor beschrieben, vom Algorithmus im Nachgang normalisiert und gewichtet, um eine finale Schwellenwertentscheidung für die Beurteilung der Kritikalität vorzunehmen. Im Beispiel in Abbildung 4-31 ist nun zu erkennen, dass die Ergebnisse der *Edge-Betweenness*-Methode gut mit den Ergebnissen der *Closeness-Vitality*-Methode korrespondieren, d.h. viele gleiche Kanten durch die jeweiligen Extremwerte der Zentralitätsmetriken belegt werden (siehe rote Färbungen). Diese Straßen sind im Kontext der Graphtopologie also von erhöhter Wichtigkeit und weisen erwartungsgemäß i.d.R. häufig Übereinstimmungen mit Hauptverkehrsstraßen auf.

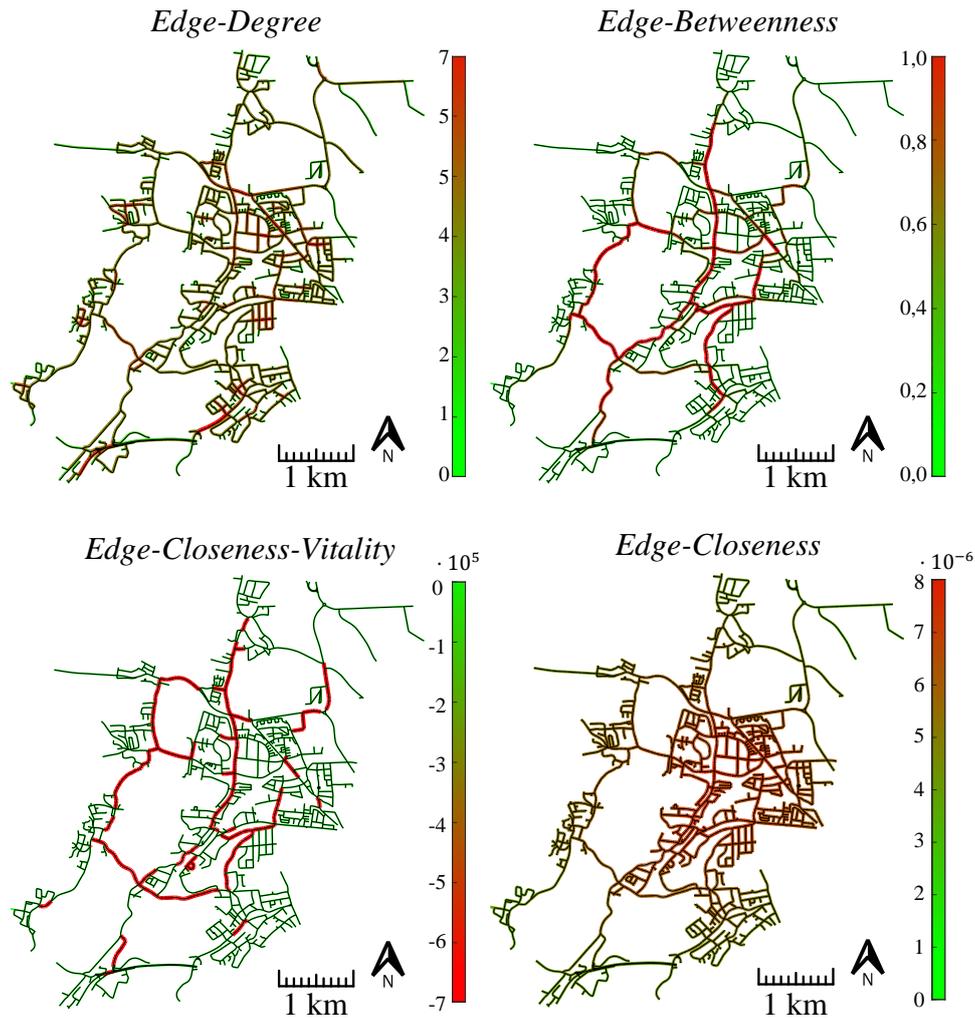


Abbildung 4-31: Vergleich der ausgewählten Zentralitätsmetriken für das exemplarische Straßennetz Neusäß (Modellierung: Reisezeit)

Die Ergebnisse der *Edge-Degree*- und der *Edge-Closeness*-Methoden weisen deutlich andere Charakteristiken auf und bemessen dicht vermaschte Kanten mit vielen Verbindungen mit einem höheren Wert. Daher sind kontinuierlichere und weniger abrupte Übergänge bei den Werten zu erkennen, wie dies bei den beiden vorherigen Zentralitätsmetriken der Fall war.

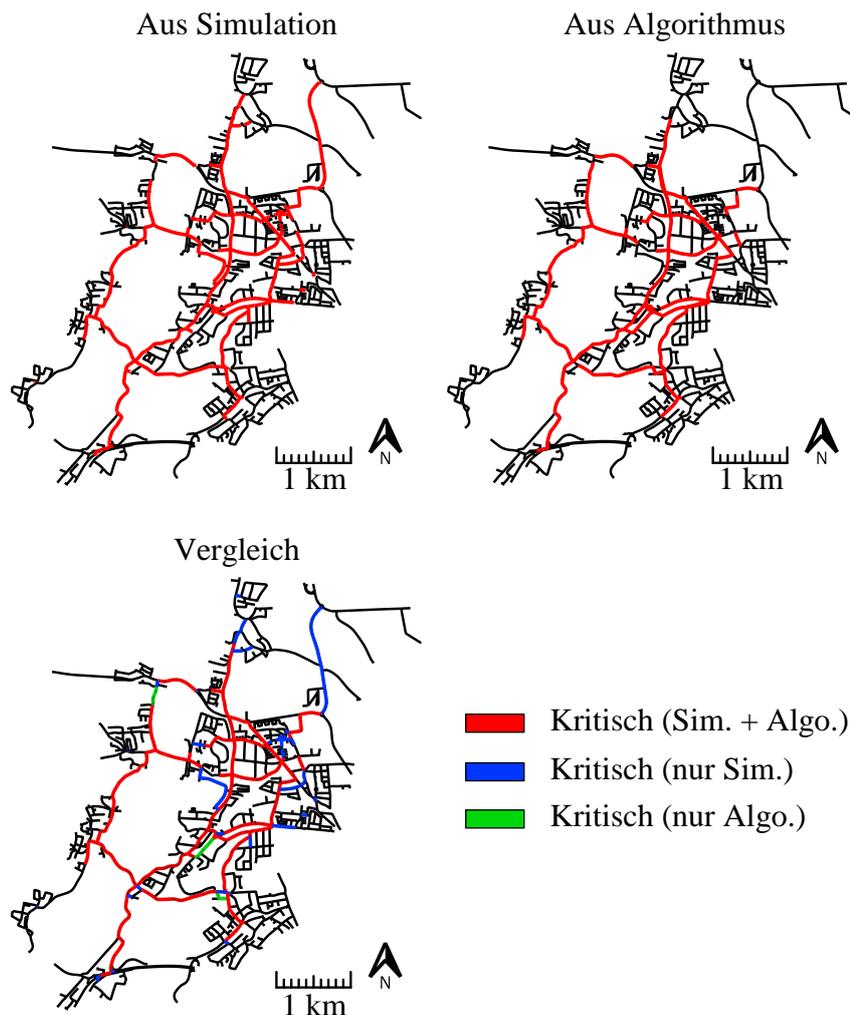


Abbildung 4-32: Vergleich der erkannten kritischen Straßen durch Simulation und durch den Algorithmus

Durch eine geeignete Gewichtung und eine simulative Untersuchung kann der Algorithmus derart parametrisiert werden, dass eine gute Erkennungsquote kritischer Straßen erreicht werden kann. In Abbildung 4-32 ist das beispielhafte Ergebnis für das zuvor betrachtete Straßennetz der bayrischen Stadt Neusäß zu sehen. Das Straßennetz wurde mit zufällig generiertem Verkehr in einer mikroskopischen Verkehrssimulation simuliert, um kritische Stellen mit erhöhtem oder gar sich stauendem Verkehr zu identifizieren. Auf die Details der Simulation wird an dieser Stelle zunächst nicht näher eingegangen, da diese im Kapitel 5.2 ausführlich vorgestellt wird. Abbildung 4-32 zeigt nun das Ergebnis der als kritisch erkannten Straßen. Das Ergebnis der linken Seite basiert hierbei auf Daten der Simulation, das Ergebnis auf der rechten Seite hingegen basiert auf den statischen Informationen des Straßennetzes und dem zuvor erläuterten Algorithmus zur Bestimmung kritischer Straßen. Der unten dargestellte direkte Vergleich der exemplarischen Ergebnisse zeigt eine gute Übereinstimmung beider Varianten bei der Erkennung kritischer Straßen.

Eine ausführliche Untersuchung des Algorithmus anhand 40 mittelgroßer deutscher Städte, die von Ausdehnung und Bevölkerung vergleichbar sind, wurde in [HBA+17b] vorgestellt. Der Anteil kritischer Straßen an der jeweiligen Gesamtzahl aller Straßen der Städte lag hierbei im Mittel bei etwa 15%. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass von diesen insgesamt mindestens die Hälfte (52% - 56%) erkannt werden konnte, die sich ebenfalls durch die Simulation als kritisch herausgestellt hatten. Wird der generell geringe Anteil der kritischen Straßen an der Gesamtzahl aller Straßen berücksichtigt, ist dies als ein gutes Ergebnis zu werten, welches durch eine bessere Feinabstimmung oder der Integration weiterer Zentralitätsmetriken zusätzlich verbessert werden kann.

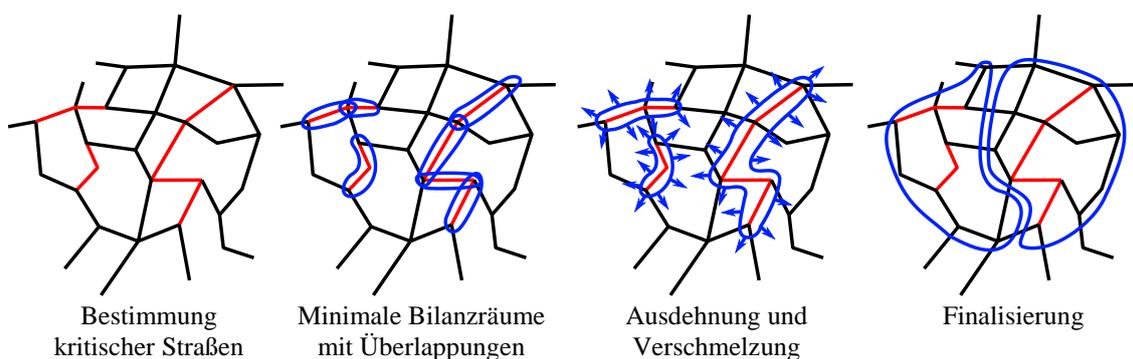


Abbildung 4-33: *Bestimmung von möglichen Bilanzräumen*
(Schwarz: Straße, rot: Kritische Straße, blau: Bilanzraum)

Abschließend muss nun noch geklärt werden, wie sich die Erkenntnisse der kritischen Straßen für die Wahl geeigneter Bilanzräume für den Durchschnitts-Konsensalgorithmus verwenden lassen. Liegen die bekannten kritischen Kanten eines Straßennetausschnitts aus dem vorgestellten Algorithmus vor, so lassen sich auf dieser Grundlage mögliche Ursprünge für Bilanzräume definieren. Die Kreuzungsagenten eines Bilanzraums können nur Einfluss auf die Fahrzeuge nehmen, die sich im Bilanzraum befinden und auf die entsprechenden Kreuzungen zufahren (vgl. Kapitel 4.3.3). Um eine bestmögliche Beeinflussung der als kritisch erkannten Straßen zu gewährleisten, ist es somit sinnvoll, dass diese nicht über Bilanzraumgrenzen verlaufen, sondern innerhalb derer liegen. Werden also minimale Bilanzräume, wie in Abbildung 4-27 dargestellt, um alle kritischen Straßen definiert, so können diese mit wachsender Ausdehnung miteinander verschmolzen werden und bilden je nach Größe dann entsprechende finale Bilanzräume. Dieser Prozess ist auch in Abbildung 4-33 dargestellt. Eine erste Untersuchung zum Einfluss der Bilanzraumgrößen wurde in [Col15] angestellt, wobei jedoch kein nennenswerter Einfluss auf den Durchschnitts-Konsensalgorithmus für das dort untersuchte, stark reduzierte Straßennetz festgestellt werden konnte. Dennoch lassen sich drei Hauptanforderungen ableiten, wie sich in den späteren Kapiteln noch zeigen wird: (1) Der Bilanzraum muss groß genug sein, um makroskopische Effekte abbilden zu können und somit im Kontext der makroskopischen Fundamentaldiagramme als gültig angesehen werden. (2) Der Bilanzraum

darf nicht beliebig groß sein, da die Beeinflussung durch den Durchschnitts-Konsensalgorithmus weitreichend ist, also Fahrzeuge beeinflusst werden könnten, die sehr weit von einer ausgelasteten Verkehrssituation entfernt sind. Es ist z.B. nicht sinnvoll, wenn ein stark ausgelasteter Stadtteil Einfluss auf einen entfernten, fast Fahrzeugleeren Stadtteil hätte. (3) Die Bilanzraumgröße muss mit Rücksicht auf die Skalierbarkeit und den Berechnungsaufwands beschränkt werden.

4.4 Ebene 3: Globales makroskopisches Management

In den vorherigen Unterkapiteln 4.2 und 4.3 wurden die unteren Hierarchieebenen des autonomen Verkehrsmanagementsystems vorgestellt. Während die erste Ebene das beispielhafte mikroskopische Kreuzungsmanagement implementiert, ist die Verkehrsdichteregulierung auf Grundlage des Durchschnitts-Konsensalgorithmus zusammen mit dem lokalen Rerouting im Bilanzraum auf zweiter Ebene angesiedelt. Der in dieser Arbeit vorgestellte hierarchische Ansatz ist bewusst nicht auf eine statische Anzahl von Ebenen beschränkt, umfasst an dieser Stelle jedoch insgesamt drei Ebenen. Die dritte und damit höchste Ebene des hier vorgestellten Ansatzes beinhaltet das globale makroskopische Management, welches die einzelnen geregelten Bilanzräume miteinander verkoppelt.

4.4.1 Funktion und Idee

Das globale makroskopische Management hat die Aufgabe, die Bilanzräume miteinander zu koppeln. Abhängig von der Größe der Bilanzräume, welche wie zuvor erklärt beschränkt ist, müssen Fahrzeuge auf der Route zwischen Start und Ziel mehrere Bilanzräume überqueren. Die Bilanzräume decken hierbei das gesamte Straßennetz inselfrei ab, d.h. es existieren keine unregulierten Bilanzräume, auch wenn es möglich ist, dies zu berücksichtigen.

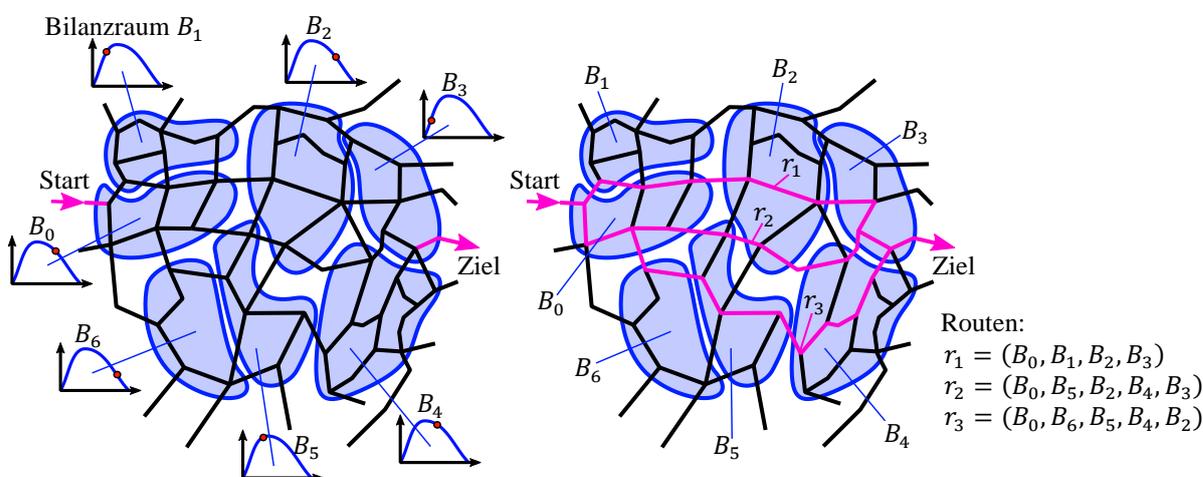


Abbildung 4-34: Bilanzraumzustände und Routen über Bilanzräume

Es wurde bereits beschrieben, dass die Verkehrsdichteregulierung mit dem Durchschnittskonsensalgorithmus im Idealfall zu einer perfekten Harmonisierung des Verkehrs führt und somit die Gültigkeit makroskopischer Fundamentaldiagramme erfüllt, was die Voraussetzung für deren Anwendung ist (vgl. Kapitel 4.3.1). Wie dies beispielhaft in Abbildung 4-34 links dargestellt ist, erlauben es die makroskopischen Fundamentaldiagramme hierbei, den (Verkehrs-) Zustand eines gesamten Bilanzraums in Form der drei bekannten Flussgrößen $\rho_N(t)$, $Q_N(t)$ und $V_N(t)$ zu beschreiben und für eine weitere Planung auf höherer Ebene zu nutzen. Da viele Fahrzeuge zwangsläufig mehrere Bilanzräume überqueren müssen, um zum jeweiligen Ziel zu gelangen, ist es also naheliegend, diese Routen über die Bilanzräume intelligent, mit Rücksicht auf die Verkehrszustände zu planen, da i.d.R. viele mögliche Routen existieren (siehe zum Beispiel Abbildung 4-34 rechts). Im Folgenden wird daher eine Routing-Strategie vorgestellt, die Fahrzeuge in Abhängigkeit der makroskopischen Bilanzraumzustände vom Start zum Ziel über die entsprechenden Bilanzräume leitet. Es sind im Zuge dessen drei wesentliche Fragestellungen zu klären, die im Weiteren beantwortet werden:

1. Wie kann eine Route über Bilanzräume bestimmt werden?
2. Welche Übergangskante zwischen Bilanzräumen ist zu wählen, wenn es mehrere Alternativen gibt?
3. Wie kann ein geeignetes Kostenfunktional zur Berechnung entsprechender Routen definiert werden?

4.4.2 Globale Routing-Strategie

Wie bereits beim Inner-Bilanzraumrouting in Kapitel 4.3.4 vorgestellt, basiert auch das globale Routing im Wesentlichen auf dem Finden kürzester Wege bzw. von Wegen geringster Kosten in Graphen. Die Menge der Bilanzräume muss hierzu in geeigneter Weise als Graph mit verbindenden Kanten modelliert werden, welches zunächst erläutert werden soll.

Modellbildung

Das Prinzip der Modellbildung besteht aus vier Schritten und ist in Abbildung 4-35 schematisch für ein Beispielstraßennetz dargestellt. Zunächst wird das gesamte Straßennetz inklusive aller Straßen betrachtet. Aus der Menge der Straßen sind zunächst alle Straßen zu bestimmen, die zwei Bilanzräume miteinander verbinden (s. rote Straßen der Abbildung 4-35 oben links). Im nächsten Schritt (oben rechts) werden alle Straßen, die keine Bilanzräume miteinander verbinden und somit lediglich innerhalb von Bilanzräumen auftreten entfernt. Aus den resultierenden Bilanzräumen und Straßen wird nun im Folgeschritt ein Graph $G_B = (V_B, E_B)$ erzeugt, der explizit redundante Kanten beinhalten darf, denn i.d.R. existieren mehrere Straßen zwischen zwei Bilanzräumen (s. Abbildung 4-35 unten links). Wie bereits zuvor angedeutet wurde und sich im Anschluss zudem zeigen

wird, ist die Problematik des Auffindens einer Route sowie die Bestimmung von Übergangskanten zwischen Knoten im Falle redundanter Kanten in zwei separate Schritte getrennt worden. Die redundanten Kanten werden daher entsprechend Abbildung 4-35 unten rechts zu Cluster-Kanten zusammengefasst und fortan als eine einzige Kante behandelt. Die Entscheidung darüber, welche Kante aus der Cluster-Kante letztendlich zum Routing gewählt wird, folgt also an späterer Stelle. Als Ergebnis der Modellbildung liegt abschließend ein Bilanzraumgraph bestehend aus Bilanzräumen als Knoten sowie Straßen als Kanten bzw. als Cluster-Kanten vor.

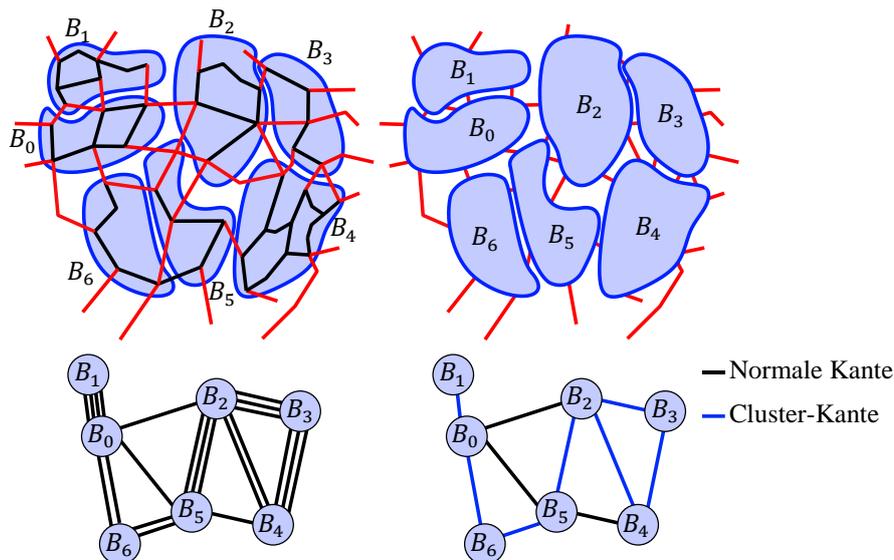


Abbildung 4-35: Prinzip der Bilanzraumgraphen: Obere Reihe: Übergangskanten zwischen den Bilanzräumen (rot). Unten links: Bilanzraumgraph mit allen Übergangskanten, unten rechts: Graph mit geclusterten Mehrfach-Kanten (Cluster-Kanten)

Routing im Bilanzraumgraphen

Um auf Grundlage des Bilanzraumgraphen nun einen Kürzesten-Wege-Algorithmus wie den Dijkstra-Algorithmus verwenden zu können, ist es notwendig, geeignete Kantengewichte zu definieren. An dieser Stelle sind jedoch die Zustände der Bilanzräume von entscheidender Bedeutung und von größerem Gewicht (Bilanzräume umfassen eine Vielzahl von Straßen und Kreuzungen) als die Kanten, welche die Bilanzräume miteinander verbinden. Daher soll das Routing statt der Kanten die Knoten mit den Bilanzraumzuständen berücksichtigen und wird entsprechend modifiziert. In Abbildung 4-36 ist die Anpassung dargestellt. Alle Kanten im Graph erhalten jeweils das Gewicht des Bilanzraums (Bilanzraumzustand), zu dem diese führen. Zur Verdeutlichung werden die bidirektionalen Kanten daher gesondert für jede Richtung dargestellt. Die Route $r = (B_1, B_0, B_2, B_3)$ besäße im Beispiel also dementsprechend Gesamtkosten von $c_r = w_{B_0} + w_{B_2} + w_{B_3}$. Die Kantengewichte w_{B_i} sind hierbei wie nachfolgend in (4-79) definiert:

$$\rho_{Net}(B_i, t) = \frac{N_{Net}(B_i, t)}{\sum_{i=1}^M l_i} \quad (4-78)$$

$$w_{B_i} = w(B_j, B_i, t) = \rho_{Net}(B_i, t) \text{ mit } (B_j, B_i) \in E_B \quad (4-79)$$

Für jeden Bilanzraum kann, wie in Kapitel 3.2.4 erläutert, ein makroskopisches Fundamentaldiagramm bestimmt werden und der Zustand des gesamten Bilanzraums dementsprechend durch eine mittlere Netzverkehrsichte ρ_{Net} , einen mittleren Netzverkehrsfluss Q_{Net} sowie eine mittlere Netzflussgeschwindigkeit V_{Net} ausgedrückt werden. Zur Bestimmung der mittleren Netzverkehrsichte des Bilanzraums B_i zum Zeitpunkt t wird die Anzahl aller im Bilanzraum enthaltender Fahrzeuge $N_{Net}(B_i, t)$ durch die summierte Länge aller M im Bilanzraum existierender Straßen $\sum_{i=1}^M l_i$ geteilt. Die so berechnete mittlere Netzverkehrsichte $\rho_{Net}(B_i, t)$ entspricht exakt dem Kantengewicht jener Straßen, die zum entsprechenden Bilanzraum führen, Quell- und Zielbilanzraum müssen im Graphen also adjazent sein (vgl. (4-79)).

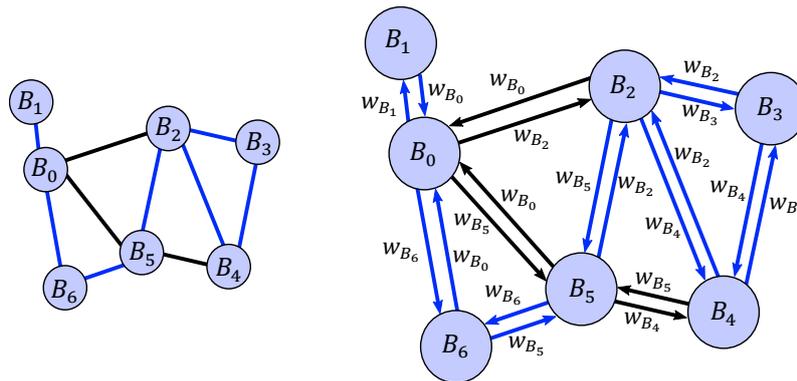


Abbildung 4-36: Bilanzraumgraph mit angepassten Kantengewichten

Mit einem vorliegenden Bilanzraumgraphen und den zuvor beschriebenen Kantengewichten kann folglich ein kürzeste-Wege-Algorithmus Routen über diejenigen Bilanzräume finden, welche die geringsten mittleren Netzverkehrsichten aufweisen. Eine Erweiterung der Kantengewichte in Abhängigkeit der Reisezeit, wie schon beim Inner-Bilanzraumrouting oder anhand der zu erwartenden Streckenlänge, ist an dieser Stelle ebenfalls sinnvoll und möglich, jedoch im Umfang dieser Arbeit zunächst nicht berücksichtigt.

Auswahl der Übergangskanten

Liegt eine Route über Bilanzräume vor, so kann diese, wie beschrieben, Cluster-Kanten enthalten. In einem solchen Fall liegt also keine eindeutige Route vor, denn zwischen mindestens zwei Bilanzräumen auf der Route existieren redundante Kanten, die alle als finale Übergangskanten in Betracht kommen, wie beispielhaft in Abbildung 4-37 darge-

stellt. Für die zuvor erwähnte Route $r = (B_1, B_0, B_2, B_3)$ liegen zum Beispiel vier mögliche Kanten für den Übergang von Bilanzraum B_1 zu Bilanzraum B_0 sowie drei mögliche Kanten für den Übergang von Bilanzraum B_2 zu Bilanzraum B_3 vor (siehe Abbildung 4-35).

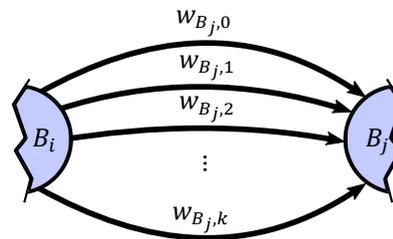


Abbildung 4-37: Redundante Übergangskanten zwischen Bilanzräumen

Es gilt daher, eine Auswahl der geeignetsten Kanten aus allen Cluster-Kanten zu finden. Naheliegender ist, den Ansatz der geringsten Verkehrsbelastung auch an dieser Stelle heranzuziehen, d.h. die Kanten entsprechend der aktuellen Verkehrssituation zu beurteilen. Hierzu lässt sich erneut die aktuell vorherrschende Verkehrsdichte für jede Kante entsprechend (4-64) auswerten. Liegen mehrere Kanten vor, so wird, wie in (4-81) gezeigt, die Kante mit minimaler mittlerer Verkehrsdichte (bezüglich der Bogenlänge) gewählt. Die Reisezeit kann wie in (4-66) ebenfalls berücksichtigt werden, wird an dieser Stelle jedoch vernachlässigt.

$$w_{B_j,p} = \bar{\rho}_p(t) \quad (4-80)$$

mit $0 \leq p \leq k$

$$\min \{w_{B_j,0}, w_{B_j,1}, \dots, w_{B_j,p}, \dots, w_{B_j,k}\} \quad (4-81)$$

Aus der Hierarchieebene des globalen Routings resultiert mit dem vorgestellten Ansatz für jedes Fahrzeug eine individuelle Route über Bilanzräume vom Ursprung bis zum Ziel. Hierbei wird zunächst auf Grundlage der Verkehrsdichte geplant, welche Bilanzräume zu durchqueren sind. Anschließend wird aus vorhandenen redundanten Kanten zwischen Bilanzräumen auf der Route diejenige Kante gewählt, die verkehrstechnisch am wenigsten ausgelastet ist und die geringste Verkehrsdichte aufweist. Der Ansatz für die Routenbestimmung lediglich anhand der Verkehrsdichten und Reisezeiten ist in dieser Arbeit bewusst einfach gewählt, um eine erste Untersuchung des Verbesserungspotentials zu ermöglichen. Weiterführend ist es denkbar und sinnvoll, z.B. den Typ einer Straße (Sammelstraße, Landstraße oder Autobahn), wie in Kapitel 4.3.5 erläutert, oder die örtliche Bebauung (urban / ländlich / Siedlung) zu integrieren. Auf diese Weise könnten die verschiedenen Gegebenheiten und auch Fernstraßen besser berücksichtigt werden. Es sei angemerkt, dass die Routen, welche beim Innerbilanzraum-Routing in der zweiten Hierarchieebene generiert werden, von der hier vorgestellten Routenplanung weitestgehend un-

berührt bleiben, jedoch auf der Wahl der Übergangskanten basiert (d.h. für das Innerbilanzraum-Routing ist die Kenntnis der Übergangskanten zwingend erforderlich, um eine Route innerhalb eines Bilanzraums bestimmen zu können).

4.5 Zusammenfassende Übersicht

Abschließend zum Kapitel des hierarchischen Verkehrsmanagements soll an dieser Stelle zur besseren Nachvollziehbarkeit noch eine knappe zusammenfassende Übersicht der einzelnen Ebenen sowie der jeweiligen Aufgaben gegeben werden.

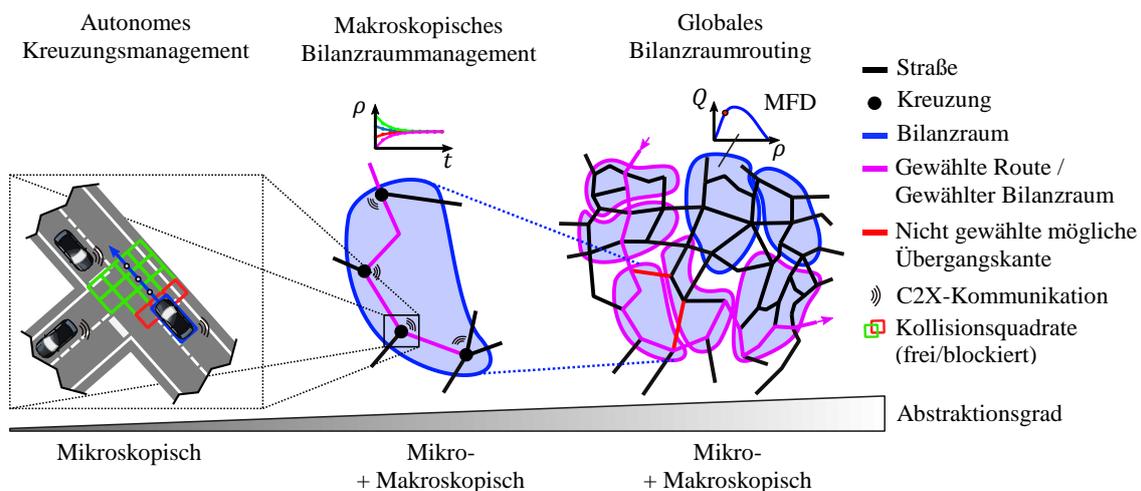


Abbildung 4-38: Gesamtes Konzept des hierarchischen Verkehrsmanagements

In Abbildung 4-38 ist das gesamte Konzept mit einigen Details dargestellt. Die drei Hierarchieebenen gliedern sich in die mikroskopische Ebene mit dem dort als Beispiel vorgestellten autonomen Kreuzungsmanagement (links), das makroskopische Bilanzraummanagement (Mitte) sowie das globale makroskopische Management (rechts).

Das autonome Kreuzungsmanagement der ersten Hierarchieebene sorgt hierbei dafür, dass die Fahrzeuge ohne Lichtsignalanlagen und im besten Fall ohne Anhalten die Kreuzungen passieren können. Dazu wird für jedes Fahrzeug eine Vielzahl von fahrdynamisch möglichen Trajektorien durch die Kreuzung generiert, aus denen dann mithilfe eines Kostenfunktionalis die beste kollisionsfreie Trajektorie ausgewählt wird. Für die Kollisionsprüfung wird die Kreuzungsfläche entsprechend in gleichmäßig angeordnete Quadratflächen unterteilt, die zu einem Zeitpunkt nur von maximal einem Fahrzeug (teilweise) bedeckt sein dürfen. Weitere Funktionen auf dieser Ebene sind diejenigen, die im heutigen Straßenverkehr für einen autonomen Betrieb notwendig sind, z.B. die einfache Fahrfahrt, Spurwechselmanöver usw. (vgl. Kapitel 2.1). Im Rahmen dieser Arbeit wurden sie allerdings nicht weiter betrachtet. Alle Funktionen dieser Ebene sind der mikroskopischen Abstraktionsebene zuzuordnen, da diese für jedes Fahrzeug einzeln und individuell umgesetzt werden.

Auf der zweiten Hierarchieebene ist das makroskopische Bilanzraummanagement angesiedelt (Abbildung 4-38 Mitte). Im Gegensatz zur ersten Hierarchieebene werden hier makroskopische Verkehrsgrößen in Form von Verkehrsdichte, Verkehrsfluss und mittlerer Flussgeschwindigkeit betrachtet. Grundvoraussetzung für die Funktionen dieser Ebene ist, dass das Straßennetz in geeignete Bilanzräume unterteilt wird. Dies erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mit dem in Kapitel 4.3.5 gezeigten Ansatz über die statische Ermittlung kritischer Straßen. Ist das Straßennetz inselbfrei in Bilanzräume unterteilt, so wird für jeden Bilanzraum ein verteilter Regelkreis bestehend aus zwei parallelen Stellgrößen implementiert: Zum einen wird über einen Durchschnitts-Konsensalgorithmus die Verkehrsdichte im Bilanzraum geregelt, sodass sich eine möglichst harmonisierte Verkehrsdichte einstellt. Für die verteilte Verkehrsdichteregulierung wird an jeder Kreuzung im Bilanzraum ein Agent definiert, der in Kommunikation mit den anderen Agenten steht. Die Agenten berechnen auf Grundlage des Informationsaustauschs und des Durchschnitts-Konsensalgorithmus mittlere Sollflussgeschwindigkeiten, die den Fahrzeugen in der Umgebung der Agenten vorgegeben werden. Als zweite Stellgröße neben der Vorgabe mittlerer Sollflussgeschwindigkeiten werden fahrzeugindividuelle Routen durch den Bilanzraum berechnet. Die Routenplanung basiert hierbei auf einem Kürzeste-Wege-Algorithmus, der jedoch eine erweiterte Kantengewichtsfunktion umfasst und die Verkehrsdichte sowie die zu erwartende Reisezeit entlang der Route berücksichtigt. Die Routen der Fahrzeuge werden daher so gewählt, dass bereits stark belastete Straßen gemieden werden. Es wird darüber hinaus jedoch berücksichtigt, dass die Reisezeiten nicht zu groß werden. Durch diese Maßnahmen ist es schließlich möglich, eine Harmonisierung der makroskopischen Flussgrößen im Bilanzraum zu erreichen und damit auch die Gültigkeitsvoraussetzungen für die Beschreibung mittels makroskopischer Fundamentaldiagramme zu schaffen, die für die nächsthöhere Hierarchieebene von großer Bedeutung sind. Die Abstraktion dieser Hierarchieebene ist aufgrund der Verkehrsdichteregulierung und des verkehrsdichteabhängigen Routings zum einen im Makroskopischen angesiedelt, umfasst jedoch durch die individuellen Routen auch mikroskopische Anteile.

In der dritten und damit höchsten Hierarchieebene des autonomen Verkehrsmanagements (Abbildung 4-38 rechts) liegen nun verkehrsdichtegeregelte Bilanzräume als Grundlage vor, welche untereinander über Straßen miteinander vernetzt sind. Das globale makroskopische Management basiert auf dem in Kapitel 3.2.4 vorgestellten Konzept, dass sich ein Straßennetz ausschnitt in Form eines makroskopischen Fundamentaldiagramms (MFD) beschreiben lässt. Der Zustand der Gesamtheit aller im Straßennetz ausschnitt befindlichen Straßen kann also in Form von Netzverkehrsdichte, Netzverkehrsfluss und mittlerer Netzflussgeschwindigkeit ausgedrückt werden. Die Gültigkeitsvoraussetzungen hierfür sind durch die Verkehrsdichteregulierung und der daraus folgenden Harmonisierung in der mittleren Hierarchieebene erfüllt. Folglich kann für jeden Bilanzraum ein Zustand gemäß eines makroskopischen Fundamentaldiagramms definiert werden, der den aktuellen Verkehrszustand widerspiegelt. In der dritten Hierarchieebene ist auf Basis dieser Bilanzraumzustände ein übergeordnetes Routing implementiert. Die Routingstrategie besteht aus einem zweistufigen Entscheidungsprozess, bei dem in der ersten Stufe unter

Berücksichtigung der Bilanzraumzustände fahrzeugindividuelle Routen vom jeweiligen Start bis zum Ziel über die Bilanzräume geplant werden. Da zwischen den Bilanzräumen teilweise mehrere Übergangsstraßen existieren, wird in der zweiten Stufe eine Auswahl der am besten geeigneten Übergangsstraße getroffen, die ebenfalls die jeweiligen Verkehrsauslastungen berücksichtigt. Die Innerbilanzraum-Routen bleiben durch das übergeordnete Routing unberührt. Aufgrund der makroskopischen Netzgrößen ist die Abstraktion auf dieser Ebene höher als in der mittleren Ebene, jedoch werden auch hier die fahrzeugindividuellen Routen beeinflusst, sodass entsprechend auch mikroskopische Anteile enthalten sind.

5 Modellbildung und Simulation

Im folgenden Kapitel soll der in Kapitel 4 vorgestellte Ansatz implementiert und simulativ validiert werden. Zur Untersuchung aller Hierarchieebenen des Ansatzes ist es erforderlich, eine erweiterte Simulationsumgebung zu entwickeln, die den Verkehr sowohl mikroskopisch als auch makroskopisch beschreiben kann. Vor dieser ganzheitlichen Untersuchung soll jedoch zunächst eine gesonderte und beschränkte Untersuchung des Konsensalgorithmus aus Ebene zwei erfolgen. Aus diesem Grund teilt sich dieses Kapitel in zwei Teile. Im ersten wird ausschließlich die Leistungsfähigkeit des Konsensalgorithmus auf Grundlage eines numerisch gelösten makroskopischen Verkehrsflussmodells zweiter Ordnung (vgl. Kapitel 3.2) untersucht. Der zweite Teil widmet sich der Leistungsfähigkeit des gesamten Ansatzes inklusive aller Funktionen der Ebenen eins bis drei (mikroskopisch und makroskopisch) und beinhaltet eine detaillierte Beschreibung der dafür entwickelten Simulationsumgebung.

5.1 Untersuchung des Konsensalgorithmus anhand des PW-Modells

Da der Konsensalgorithmus auf makroskopischen Größen basiert (die Regelgröße ist die Verkehrsdichte ρ , die Sollvorgabe an die Fahrzeuge eine mittlere Sollgeschwindigkeit V), ist es naheliegend, eine Untersuchung der generellen Funktionsfähigkeit in der Domäne der makroskopischen Größen vorzunehmen und die vielseitigen Einflussfaktoren durch eine mikroskopische Verkehrsbetrachtung *zunächst* zu vernachlässigen. Die nachfolgende Modellbildung eines exemplarischen Straßennetzes für die Untersuchung basiert auf den in Kapitel 3 vorgestellten Grundlagen des Payne-Witham-Modells (PW-Modell). Sie ist um notwendige Modellkomponenten erweitert worden, damit nicht lediglich ein Straßenstück, sondern ein Straßennetz simulativ untersucht werden kann.

Die in diesem Kapitel zu klärende Fragestellung ist, ob der Konsensalgorithmus in der Lage ist, den Verkehrsfluss und die -dichte in endlicher Zeit zu harmonisieren, d.h., Dichteschwankungen und Schockwellen zu reduzieren oder gänzlich zu unterbinden. Dafür wird bei den Untersuchungen ein grundsätzlich stark ausgelasteter, jedoch ungleich verteilter Verkehrszustand angenommen.

5.1.1 Modellbildung eines exemplarischen Straßennetzes

Für die Untersuchung wird ein stark reduziertes Straßennetz verwendet, das die wesentlichen Voraussetzungen für eine Untersuchung erfüllt. Zu den Voraussetzungen gehört, dass das Straßennetz über mehrere Kreuzungen verfügt, die jeweils von einem Kreuzungsmanager beeinflusst werden. Außerdem ist es notwendig, dass die Kreuzungen untereinander verbunden sind, da sonst keine Koordinierung der Kreuzungsmanager mit

dem Konsensalgorithmus möglich ist (siehe Kapitel 4.3). Die Komplexität des betrachteten Straßennetzes ist neben diesen Voraussetzungen aufgrund des erhöhten Berechnungsaufwands²⁸ beschränkt. Die Auswirkungen des Konsensalgorithmus bei Funktionsfähigkeit sind auch in diesem beschränkten Szenario nachweisbar. Eine vereinfachte Modellbildung, die für das nachfolgende Modell eine erste Grundlage darstellte, wurde in [Dow19] vorgestellt.

Das betrachtete und mit dem Konsensalgorithmus zu regelnde 2x2-Straßennetz ist nachfolgend in Abbildung 5-1 dargestellt.

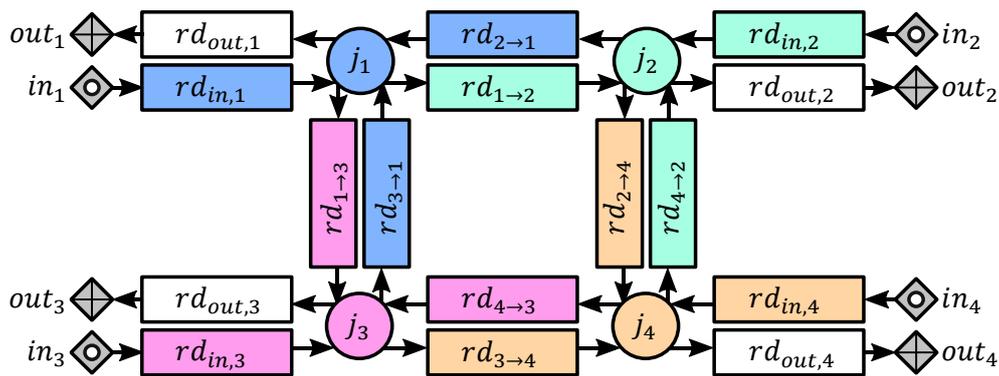


Abbildung 5-1: Modellstruktur des betrachteten Straßennetzes

Zur Modellierung des Straßennetzes werden vier verschiedene Modellkomponenten verwendet, die jeweils eine eigene Parametrierung erlauben: Straßen, Kreuzungen, Flussquellen sowie Flusssenken. Das Straßennetz besteht im vorgestellten Fall aus 16 Straßen, die über vier Kreuzungen zu einem zentralen Ring verbunden sind. Zudem existieren vier Flussquellen und vier Flusssenken, abhängig davon, ob eine Eingangs- oder Ausgangsstraße vorliegt.

Straßen

Alle im Netz vorhandenen Straßen (z.B. $rd_{1 \rightarrow 2}$) sind in Form der numerischen Lösung des Payne-Witham-Modells mit dynamischer Geschwindigkeit gemäß Gleichung (3-26) bzw. in diskreter Form mit der Zeitschrittweite Δt und der Wegschrittweite Δx nach dem Kerner-Konhäuser-Ansatz gemäß Gleichung (3-52) implementiert. Überdies verfügen alle Straßen über dasselbe Fundamentaldiagramm (ebenfalls nach Kerner-Konhäuser, siehe Gleichung (3-66)) zur Berechnung der Gleichgewichtsgrößen wie in Abbildung 5-2 dargestellt. Die Straßenlänge L , die maximale Verkehrsdichte ρ_j , die maximale mittlere

²⁸ Im Widerspruch zum bereits erwähnten Vorteil des geringen Berechnungsaufwands makroskopischer Verkehrsflussmodelle erhöht sich dieser hier jedoch durch den Einsatz des Konsensalgorithmus.

Flussgeschwindigkeit V_{max} sowie die Reaktionszeit τ der Fahrer ist ebenfalls für alle Straßen identisch modelliert. Die Unterschiede liegen folglich ausschließlich in den Initialzuständen ρ_0 und den zeitlichen Verläufen der Einzelverkehrsdichten der Straßen infolge der Ein- und Ausgangsverkehrsflüsse. Die Zahlenwerte der einzelnen Parameter aller Straßen sind zusammengefasst in Tabelle 5 zu sehen.

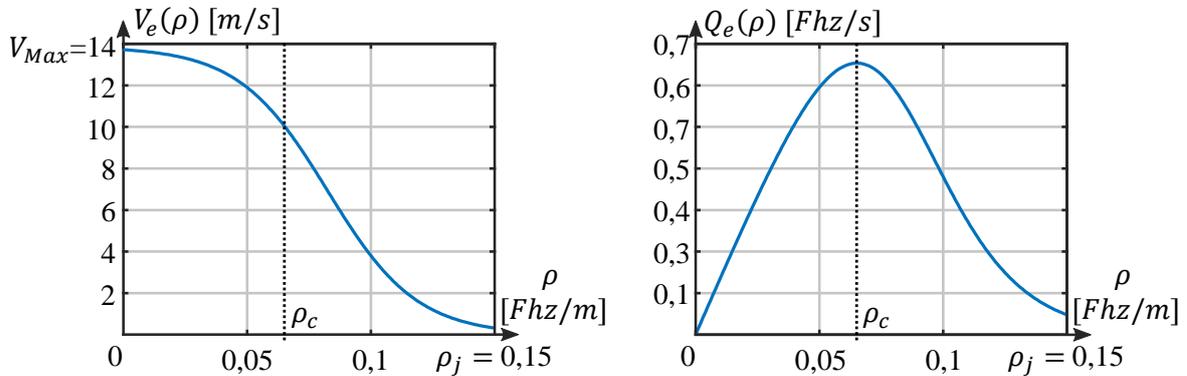


Abbildung 5-2: Das im Simulationsmodell verwendete Fundamentaldiagramm nach Kerner-Konhäuser [GS10]

Die numerische Stabilität des Modells ist nach Gleichungen (3-57) und (3-58) erfüllt:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = 100 \frac{m}{s} > V_{max} = 14 \frac{m}{s} \quad (5-1)$$

$$\tau = 25 s > \Delta t = 0,5 s \quad (5-2)$$

Eine Untersuchung der numerischen Stabilität bezüglich einer in den Modellgleichungen vorhandenen Diffusion nach Gleichung (3-59) entfällt, da das Payne-Witham-Modell nicht über einen Diffusionsterm verfügt. Verkehrsbedingte Instabilitäten, wie sie in Kapitel 3.2.3 vorgestellt wurden, können jedoch durchaus auftreten, dazu gehören insbesondere auch nichtlineare Instabilitäten wie etwa Stop-And-Go-Wellen.

Tabelle 5: Parameterwerte des zur Untersuchung eingesetzten Verkehrsflussmodells

Parameter	Wert
l	500 m
Δx	50 m
T_{sim}	600 s
Δt	0,5 s
τ	25 s
ρ_{max}	0,15 Fhz/m
V_{max}	14 m/s
$Q_{max}(\rho_{crit})$	0,65 Fhz/s

p_0 (Fund. Diag.)	-0,55
p_1 (Fund. Diag.)	0,12
p_2 (Fund. Diag.)	0

Kreuzungen

Kreuzungen verknüpfen mehrere Straßen miteinander und sind zwingend notwendig, damit ein Netz aus Straßen simuliert werden kann. Jede Kreuzung (in Bild Abbildung 5-1: j_1 bis j_4) enthält eine Flussaufteilungsmatrix $\underline{\Theta}_{j_i}$, welche die Verhältnisse von allen Eingangsstraßen zu allen Ausgangsstraßen beschreibt, wie dies in Abbildung 5-3 dargestellt ist.

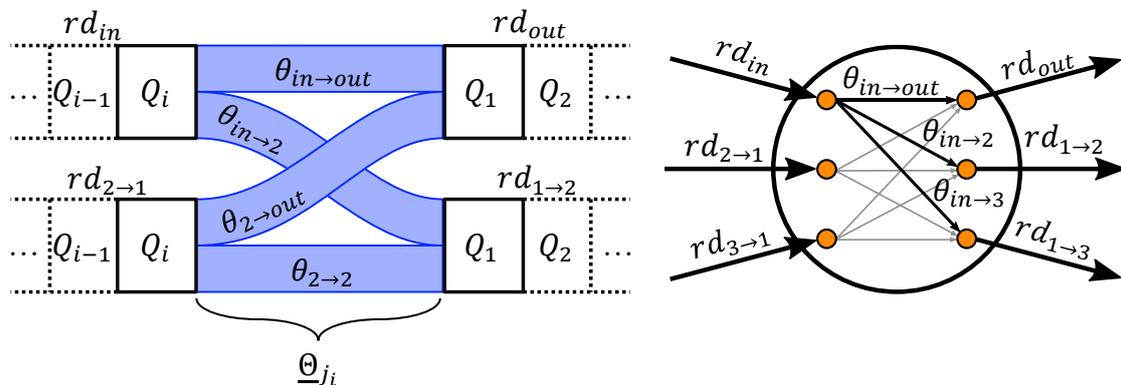


Abbildung 5-3: Prinzip der Flussaufteilung in Kreuzungen, links: 2x2-Kreuzung in Detaildarstellung, rechts: 3x3-Kreuzung in reduzierter Darstellung

Die Flussaufteilungsmatrix $\underline{\Theta}_{j_i}$ gibt hierbei an, mit welchem Anteil eine Eingangsstraße auf eine Ausgangsstraße wirkt, folglich ergeben sich Zeilensummen von exakt eins, sodass eine zeilenstochastische Matrix vorliegt. Im Beispiel in Gleichung (5-3) wirkt die Eingangsstraße rd_{in} zu gleichen Teilen (je 50%) auf die beiden Ausgangsstraßen $rd_{1 \rightarrow 2}$ und $rd_{1 \rightarrow 3}$, jedoch nicht auf die Ausgangsstraße rd_{out} .

$$\underline{\Theta}_{j_1} = \begin{matrix} & rd_{out} & rd_{1 \rightarrow 2} & rd_{1 \rightarrow 3} \\ \begin{matrix} rd_{in} \\ rd_{2 \rightarrow 1} \\ rd_{3 \rightarrow 1} \end{matrix} & \begin{pmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 \\ \theta_4 & \theta_5 & \theta_6 \\ \theta_7 & \theta_8 & \theta_9 \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (5-3)$$

Alle Kreuzungen im Modell (vgl. Abbildung 5-1) sind ähnlich zu $\underline{\Theta}_{j_1}$ parametrisiert, d.h. ein Eingangsfluss teilt sich immer symmetrisch auf jene Ausgangsflüsse auf, die in eine andere Richtung zeigen (es werden also keine Wendemanöver, sog. „U-Turns“ berücksichtigt, daher sind alle Diagonalen von $\underline{\Theta}_{j_i}$ gleich Null). Wird der resultierende Verkehrsfluss für eine Ausgangsstraße einer Kreuzung berechnet, so muss die Kapazität der

Ausgangsstraße ebenfalls berücksichtigt werden, denn der summierte Ausgangsverkehrfluss kann diese übersteigen. In einem solchen Fall kann nur der maximal mögliche Verkehrsfluss der Ausgangsstraße abfließen und es werden sich je nach Aufteilungsmatrix eine oder mehrere Dichteschwankungen oder Schockwellen auf den Eingangsstraßen ausbilden. Zur Modellierung dieser Charakteristik wurde das Modell nach *Jin* und *Zhang* [NL05] eingesetzt, welches bereits in Kapitel 3.2.1 erläutert wurde. Das Modell wurde in Abbildung 3-29 exemplarisch für zwei Eingangsstraßen und eine Ausgangsstraße (also eine reine Flussverschmelzung) gezeigt, lässt sich jedoch auf beliebige Kreuzungen übertragen, wie dies bereits in Abbildung 3-28 vorgestellt wurde.

Flussquellen/Flusssenken

Die Flussquellen (z.B. in_1) und Flusssenken (z.B. out_1) sind notwendig für die Eingangs- und Ausgangsstraßen des modellierten Straßennetzes und werden dafür verwendet, einen zeitlich definierten Verkehrsfluss an den Quellen in das Netz fließen zu lassen bzw. an den Senken abfließen zu lassen. Wird beispielsweise ein Ausgangsverkehrfluss von 0 Fhz/h an einer Senke definiert, so wird sich der Verkehr infolgedessen aufstauen, sofern ein Verkehrsfluss in die Ausgangsstraße fließt. Die parametrisierten Werte für Flussquellen und -senken sind hierbei jedoch immer als Schranken aufzufassen, da z.B. aus einer bereits ausgelasteten Eingangsstraße kein zusätzlicher Verkehrsfluss fließen kann oder im Falle einer Flusssenke nicht mehr herausfließen kann, als auf der Ausgangsstraße vorhanden ist.

Vereinfachende Annahmen für das Straßennetzmodell

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Modellierung auf der makroskopischen Ebene Vereinfachungen bezüglich der Flüsse voraussetzt. So kann der Verkehr nur an den Flussquellen und -senken in das System fließen oder dieses verlassen, nicht jedoch in Kreuzungen oder in den Straßen selbst. Daher ist eine Abbildung von Fahrzeugen, die beispielsweise eine Straße zum Parken verlassen, derzeit nicht vorgesehen (jedoch möglich). Außerdem wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass sich die Verkehrsflüsse störungsfrei verschmelzen und spalten, also keine Störungen im Fluss allein aufgrund der Verschmelzung oder der Aufspaltung resultieren. Auch eine Wartezeit von Fahrzeugen ist nicht berücksichtigt, es wird also davon ausgegangen, dass die Verkehrsflüsse ideal und kollisionsfrei eine Kreuzung passieren, ohne dass Fahrzeuge anhalten müssen. Diese Annahme basiert auf dem als ideal angenommenen Kreuzungsmanagement, welches in Kapitel 4.2.1 vorgestellt wurde. Da alle Straßen identisch parametrisiert sind (bis auf den Initialzustand ρ_0), wird zudem davon ausgegangen, dass sich alle Fahrer gleich verhalten, was vereinbar mit der Annahme eines vollkommen autonomen Verkehrs ist (es gibt also keine Störungen im Fluss durch „Trödler“ oder „Raser“). Zuletzt wird eine an allen Kreuzungen statische und symmetrische Aufteilungsmatrix $\underline{\theta}_{ji}$ angenommen, auch wenn zeitliche Änderungen der Aufteilungskoeffizienten durchaus modelliert werden könnten.

Durchschnitts-Konsensalgorithmus

Für den Durchschnitts-Konsensalgorithmus ist zunächst die Kommunikationstopologie der Kreuzungsagenten zu klären. Wie in Abbildung 5-4 dargestellt, kommunizieren im vorgestellten Szenario jeweils die über Straßen miteinander verbundenen Kreuzungsagenten (Nearest-Neighbor-Kommunikation), weitere Kommunikationstopologien werden an dieser Stelle nicht weiter untersucht. Jeder Kreuzungsagent kann auf die in seine Kreuzung einfallenden Verkehrsflüsse Einfluss nehmen (dies entspricht der farbigen Hervorhebung der Straßen in Abbildung 5-1).

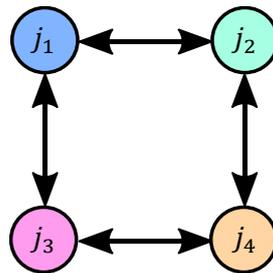


Abbildung 5-4: *Kommunikationstopologie der Kreuzungsagenten im Durchschnitts-Konsensalgorithmus*

Aus der Kommunikationstopologie ergeben sich, wie in Kapitel 4.3.2 vorgestellt, die Adjazenzmatrix \underline{A} , die Gradmatrix \underline{D} und die Laplace-Matrix \underline{L} (vgl. Gleichungen (5-4) und (5-5)):

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \underline{D} = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (5-4)$$

$$\underline{L} = \underline{D} - \underline{A} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (5-5)$$

Im diskreten Fall folgt mit der Abtastzeit T_c die Perronmatrix \underline{P} sowie die dynamische Konsensgleichung der Agenten in den Gleichungen (5-6) bis (5-8):

$$\Delta T = 0,5s \text{ mit } 0 \leq \Delta T \leq \frac{1}{\max_i d_i} \quad (5-6)$$

$$\underline{P} = \underline{I} - \Delta T \cdot \underline{L} = \begin{pmatrix} 0 & 0,5 & 0,5 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0,5 & 0,5 & 0 \end{pmatrix} \quad (5-7)$$

$$\underline{\rho}_{soll}^{k+1} = \underline{P} \cdot \underline{\rho}^k \quad (5-8)$$

Die Vorgabe der Sollverkehrsdichten $\underline{\rho}_{soll}^{k+1}$ aller Kreuzungsagenten wird, wie bereits im Kapitel 4.3.2 erläutert, über die Adaption der mittleren Flussgeschwindigkeit realisiert. Jedoch kann die dynamische Geschwindigkeit im makroskopischen Payne-Witham-Modell nicht direkt beeinflusst werden, da dies instantane Geschwindigkeitsänderungen in den Modellgleichungen zur Folge hätte und daher nicht realistisch ist. Der hier vorgestellte Ansatz beruht auf der Adaption der Gleichgewichtsgeschwindigkeit V_e , welche in der dynamischen Geschwindigkeitsgleichung des Payne-Witham-Modells als Zielgeschwindigkeit dient und dafür sorgt, dass sich der Verkehrsfluss nach Möglichkeit innerhalb der Relaxationszeit τ auf diesen Wert einpendelt. Statt der Berechnung der Gleichgewichtsgeschwindigkeit V_e mit einem Fundamentaldiagramm und der aktuell vorherrschenden Verkehrsdichte ρ , wird im geregelten Ansatz also die Gleichgewichtsgeschwindigkeit der Sollverkehrsdichte ρ_{soll}^{k+1} berechnet und für die Berechnung der dynamischen Geschwindigkeit V verwendet. Es gilt also folgende Substitution in der dynamischen Geschwindigkeitsgleichung (vgl. (3-26)):

$$V_e(\rho^k) := \max(V_e(\rho_{soll}^{k+1}), V_{e,min}) \quad (5-9)$$

Das Prinzip dieses Ansatzes ist zusätzlich in Abbildung 5-5 dargestellt. Für jede Wegstützstelle aller Straßen des diskreten Payne-Witham-Modells wird statt der zur jeweiligen Verkehrsdichte zugehörigen Gleichgewichtsgeschwindigkeit die Gleichgewichtsgeschwindigkeit der Sollverkehrsdichte berechnet. Durch diesen Ansatz bleibt die dynamische Geschwindigkeit samt der Relaxationsdynamik erhalten. Der Fluss tendiert dagegen dazu, sich derjenigen Gleichgewichtsgeschwindigkeit anzugleichen, für welche die berechnete Sollverkehrsdichte vom Durchschnitts-Konsensalgorithmus eingestellt wird. Dies ist gleichbedeutend damit, dass das modellierte menschliche Fahrerverhalten im Payne-Witham-Modell (die Tendenz zur Gleichgewichtsgeschwindigkeit $V_e(\rho)$ zu streben) durch die Vorgabe des Durchschnitts-Konsensalgorithmus ausgetauscht wurde.

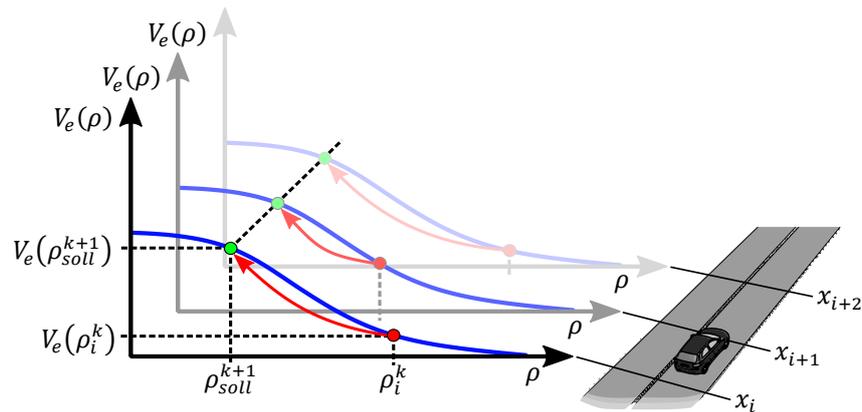


Abbildung 5-5: Prinzip der Geschwindigkeitsadaption anhand der Sollverkehrsdichte

Wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben (siehe auch Abbildung 4-17) ist eine minimal vom Durchschnitts-Konsensalgorithmus vorgebbare mittlere Sollgeschwindigkeit $V_{e,min}$ definiert, um zu verhindern, dass der Fluss durch den Ansatz zum Erliegen kommen kann.

5.1.2 Simulation und Lösung unter Berücksichtigung von Randbedingungen

Die Simulation des in Abbildung 5-1 gezeigten Straßennetzmodells erfolgt mit einer hohen Grundverkehrsdichte (alle Straßen weisen initial eine hohe Verkehrsdichte auf), da das Szenario eines stark ausgelasteten Verkehrsnetzes zu Grunde gelegt wird. Die Eingangs- und Ausgangsflüsse werden zeitlich variiert und das Systemverhalten mit und ohne Durchschnitts-Konsensalgorithmus verglichen. Hierbei gilt es, besonderes Augenmerk auf den inneren Straßenring zu legen, da die Verkehrsinstabilitäten hier besonders deutlich zu erkennen sind. Der Grund hierfür ist, dass alle Flussaufteilungsmatrizen symmetrische Flussaufteilungskoeffizienten enthalten, d.h. ein Teil des Verkehrsflusses, der in den Ring fließt, eine Zeit lang in diesem verbleibt.

Zusätzlich ist die Gesamtbilanz der Eingangs- und Ausgangsflüsse von entscheidender Bedeutung. Ist diese negativ (also $\sum_i Q_{out,i} - \sum_i Q_{in,i} < 0$), fließen mehr Fahrzeuge in das System hinein, als heraus. Infolgedessen werden die Verkehrsdichten im Straßennetz steigen und sich ggf. Stauwellen ausbilden. Im umgekehrten Fall einer positiven Gesamtbilanz fließen mehr Fahrzeuge aus dem System heraus als hinein, das System entleert sich also.

Untersuchungsszenarien

Für die Untersuchung wurden drei verschiedene Grundszzenarien herangezogen, die im unregelmäßigen und regelmäßigen Fall verglichen werden sollen und bei denen verschiedene Systemcharakteristika von besonderer Bedeutung sind:

1. Hohe zufällige Grundverkehrsdichte, keine Eingangsverkehrsflüsse, hohe zufällige Ausgangsverkehrsflüsse, d.h.

$$\underline{\rho}_0 \approx 75\% \cdot \rho_{max} \quad (5-10)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q_{out,i} \approx 4 \cdot (90\% \cdot Q_{max}) \gg \sum_{i=1}^4 Q_{in,i} = 0 \quad (5-11)$$

Hauptaugenmerk auf:

Dauer der „Entleerung“ des Straßennetzes

2. Hohe zufällige Grundverkehrsdichte, hohe zufällige Eingangsverkehrsflüsse, hohe zufällige Ausgangsverkehrsflüsse, d.h.

$$\underline{\rho}_0 \approx 75\% \cdot \rho_{max} \quad (5-12)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q_{out,i} \approx \sum_{i=1}^4 Q_{in,i} \approx 4 \cdot (90\% \cdot Q_{max}) \quad (5-13)$$

Hauptaugenmerk auf:

Harmonisierung der Verkehrsflüsse (Stabilisierung), Ausprägung von Stauwellen

3. Hohe zufällige Grundverkehrsdichte, hohe zufällige Eingangsverkehrsflüsse, mittlere zufällige Ausgangsverkehrsflüsse, d.h.

$$\underline{\rho}_0 \approx 75\% \cdot \rho_{max} \quad (5-14)$$

$$\sum_{i=1}^4 Q_{out,i} \approx 4 \cdot (60\% \cdot Q_{max}) < \sum_{i=1}^4 Q_{in,i} \approx 4 \cdot (90\% \cdot Q_{max}) \quad (5-15)$$

Hauptaugenmerk auf:

Harmonisierung der Verkehrsflüsse (Stabilisierung), Ausprägung von Stauwellen, Dauer bis zum vollständigen Stauungsfall (ρ_{max} im gesamten Straßennetz)

5.1.3 Ergebnisse und Bedeutung im Kontext

Die drei vorgestellten Szenarien wurden jeweils ungeregelt, also das reine Streckenverhalten ohne Durchschnitts-Konsensalgorithmus und geregelt simuliert sowie die Ergebnisse erfasst.

In Tabelle 6 ist eine Übersicht zu den durchschnittlichen mittleren Verkehrsflüssen und Flussgeschwindigkeiten im betrachteten Straßennetz für die drei Szenarien zu sehen. Hierbei ist deutlich erkennbar, dass die Ergebnisse generell besser sind (ca. Faktor 1,8 - 2 beim Verkehrsfluss, ca. Faktor 1,1 - 1,6 bei der Flussgeschwindigkeit), wenn die Regelung aktiv ist. Interessant ist hierbei, dass im geregelten Fall der mittlere Verkehrsfluss teilweise deutlich über dem vom verwendeten Fundamentaldiagramm berechneten maximalen Verkehrsfluss von $Q_{max} = 0,65 \text{ Fhz/s}$ liegt. Auch wenn dies zunächst nicht plausibel erscheint, kann an dieser Stelle jedoch eine plausible Erklärung gegeben werden: Initial wird von einer hohen Grundverkehrsdichte im Straßennetz ausgegangen. Berechnet der Durchschnitts-Konsensalgorithmus nun Sollverkehrsdichten $\underline{\rho}_{soll}^{k+1}$, die zumindest für einige Straßen deutlich niedriger als die aktuellen Zustände sind, so kann dieser Wert nur dann erreicht werden, wenn sich die entsprechenden Straßen entleeren. Demnach müssen mehr Fahrzeuge aus dem Streckenabschnitt heraus- als hineinfahren. Dies ist nach dem stationären Fluss im Fundamentaldiagramm nicht möglich. Im Szenario autonomer Fahrzeuge ist dies jedoch eine gültige Annahme, da das Fundamentaldiagramm die menschliche Fahrweise modelliert. Autonome Fahrzeuge sind darüber hinaus allerdings in der Lage, auch bei höheren Geschwindigkeiten sicher in geringerem Abstand hintereinander her zu fahren. Diese Tatsache entspricht in makroskopischen Größen einem gesteigerten Verkehrsfluss, was auch in den Simulationsergebnissen zu erkennen ist. Das geregelte System ist also durch den Durchschnitts-Konsensalgorithmus in der Lage, einen deutlich höheren Verkehrsfluss umzusetzen.

Tabelle 6: Übersicht der Simulationsergebnisse

Szenario	Mittlerer makroskopischer Verkehrsfluss [Fhz/s]		Mittlere makroskopische Flussgeschwindigkeit [m/s]	
	Ohne Regelung	Mit Regelung	Ohne Regelung	Mit Regelung
1	0,25	0,50	11,97	13,13
2	0,51	0,90	11,00	13,10
3	0,47	0,89	8,12	12,95

In Abbildung 5-6 sind die Simulationsergebnisse für Szenario 1 auf der linken und Szenario 3 auf der rechten Seite abgebildet. Die Diagramme zeigen die Agentenzustände der vier kommunizierenden Kreuzungsagenten, d.h. die mittleren Verkehrsdichten ρ_{j_1} bis ρ_{j_4} sowie den aktuellen Mittelwert $\bar{\rho}_{j_i}$, in den die Agenten konvergieren. Oben sind die Ergebnisse des unregulierten Straßennetzes und unten des regulierten Straßennetzes dargestellt. Für das Szenario 1 ist zu erkennen, dass die mittleren Verkehrsdichten (Agentenzustände) erwartungsgemäß abfallen, da in diesem Fall kein Eingangsverkehrsfluss existiert und der Verkehr aus dem Netz fließt. Die Unterschiede zwischen dem unregulierten und regulierten Straßennetz sind hier sehr gering und zeigen lediglich ein einheitlicheres Abklingen im regulierten Fall. Die zuvor angemerkte „Entleerungsdauer“ ist in beiden Fällen annähernd identisch.

Für das Szenario 3 (rechts) sieht das Ergebnis gänzlich anders aus. Hier ist zu sehen, dass die mittleren Verkehrsdichten (Agentenzustände) im unregulierten Fall ca. ab Sekunde 100 deutlich unterschiedliche Werte aufweisen und sich auch keine Harmonisierung des Verkehrsflusses einstellt. Hierdurch kommt es zu Stauwellen, die durch das Straßennetz wandern. Die sich ausprägenden Stauwellen sind zusätzlich in Abbildung 5-7 deutlich im exemplarischen Weg-Zeit-Verkehrsdichte-Diagramm der Straße $rd_{1 \rightarrow 2}$ erkennbar. Die Fahrzeuge müssen in diesem Fall immer wieder stark bremsen und beschleunigen (siehe beispielhafte Einzelfahrzeugtrajektorien).

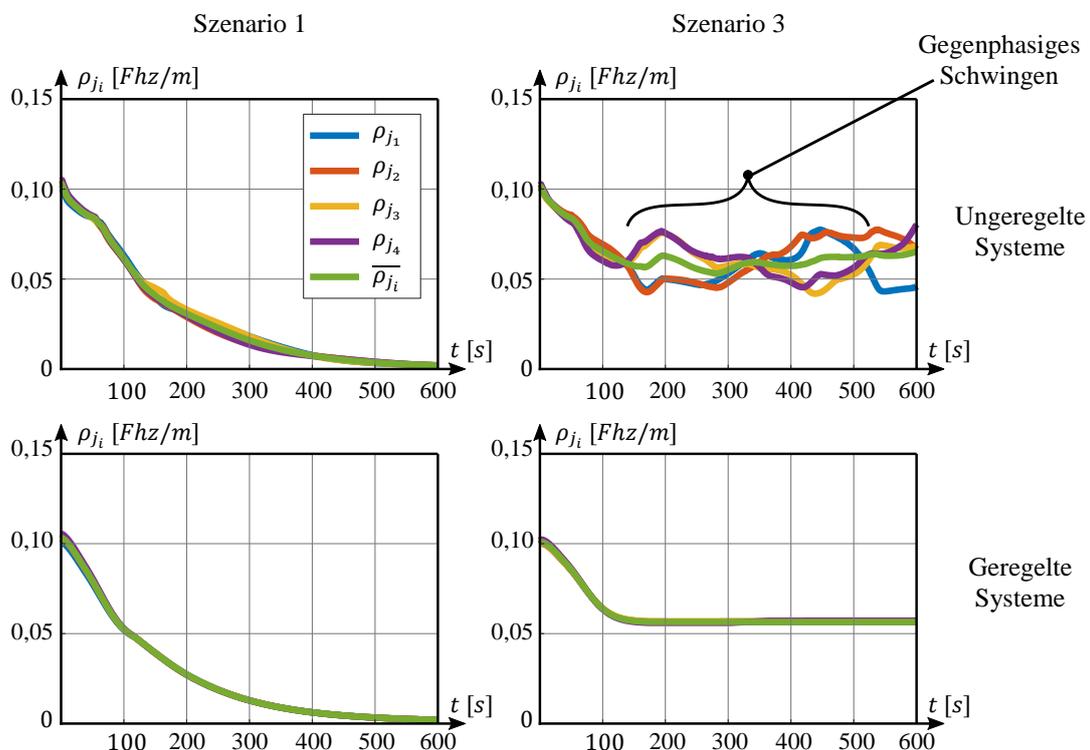


Abbildung 5-6: Simulationsergebnisse für Szenario 1 (links) und Szenario 3 (rechts), obere Reihe: Ungeregeltes System, untere Reihe: geregeltes System

Insbesondere ist in den Ergebnissen zu erkennen, dass diese Stauwellen den inneren Ring kreisförmig umlaufen, denn die mittleren Verkehrsdichten weisen in Abbildung 5-6 ein gegenphasiges Schwingen zueinander auf, welches genau hieraus resultiert (siehe ρ_{j_1}, ρ_{j_2} zu ρ_{j_3}, ρ_{j_4} im Zeitbereich von ca. 150s bis 500s). Im geregelten Fall sind diese Schwingungen nicht existent, durch den Durchschnitts-Konsensalgorithmus ergibt sich in sehr kurzer Zeit ein homogener, sich im Gleichgewicht befindlicher Verkehrsfluss, der sich auf einen stationären Endwert einpendelt. In Abbildung 5-7 rechts ist zu sehen, dass sich die initiale Verkehrsdichte, anders als im unregulierten Fall, in Fahrtrichtung ausbreitet, sich jedoch dann sehr schnell auflöst und in den homogenen Fluss übergeht.

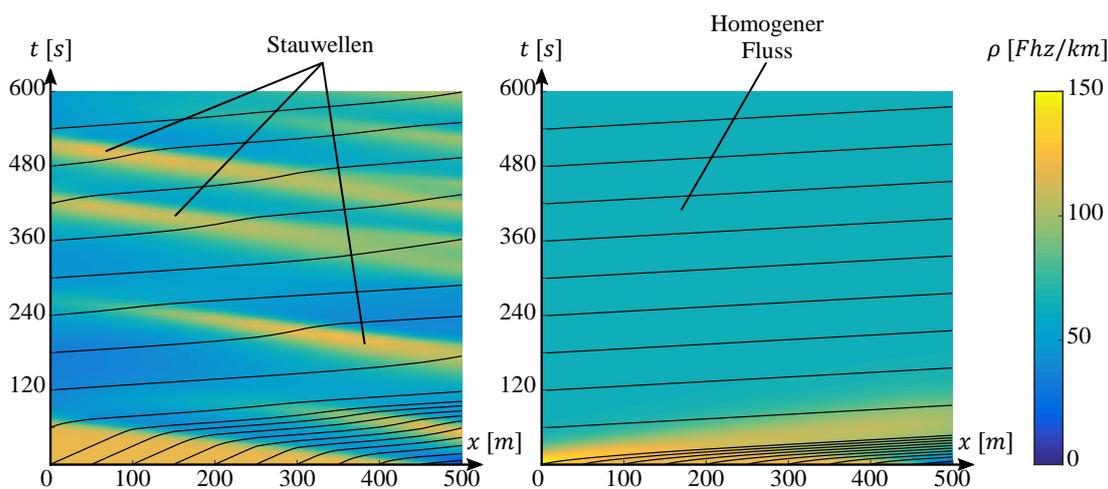


Abbildung 5-7: Simulationsergebnisse mit exemplarischen Einzelfahrzeugtrajektorien der Straße $rd_{1 \rightarrow 2}$ für Szenario 3, links: Ungeregelter Fall, rechts: Geregelter Fall

Zuletzt sei auf die Tatsache hingewiesen, dass die mittleren Verkehrsdichten im unregulierten Fall keine steigenden Tendenzen im Simulationszeitraum aufweisen und sich im geregelten Fall gar stationäre Endwerte einpendeln, obwohl der summierte Ausgangsverkehrsfluss kleiner ist als der summierte Eingangsverkehrsfluss. Dieses zunächst unerwartete Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass im unregulierten Fall der sich dynamisch einstellende Verkehrsfluss nicht an den maximalen stationären Verkehrsfluss Q_{max} gebunden ist und vom stationären Verhalten des Fundamentaldiagramms abweichen kann. Dieses Phänomen ist sehr deutlich in Abbildung 5-8 links zu beobachten. Hier wird aus dem Vergleich der Einzelwerte aus der Simulation zu den stationären Zuständen aus dem Fundamentaldiagramm sichtbar, dass die dynamischen Größen teilweise deutlich abweichen. Würde das Verhältnis zwischen Ausgangs- und Eingangsverkehrsfluss noch weiter erhöht, käme der Verkehrsfluss im Straßennetz infolgedessen also tatsächlich zum Erliegen.

Im geregelten Fall liegt zudem die Annahme zu Grunde, dass autonome Fahrzeuge ein anderes Fahrverhalten umsetzen können als das den Menschen. Daher ist auch in diesem

Fall ein höherer Verkehrsfluss möglich, wodurch sich die Kapazität der Straßen erhöht. Selbst im Fall, dass eine durch das Fundamentaldiagramm definierte maximale Verkehrsdichte vorliegt, ist es mit dem Durchschnitts-Konsensalgorithmus noch möglich, einen Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten und Verkehrsinstabilitäten zu verhindern. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 5-8 rechts dargestellt. Es ist außerdem zu erkennen, dass sich der gesteigerte Verkehrsfluss durch die Regelung bis zu einem Wert von ca. $0,12 \text{ Fhz/m}$ annähernd linear zur Verkehrsdichte verhält und dann in einer Sättigungszone mit Hysterese endet.

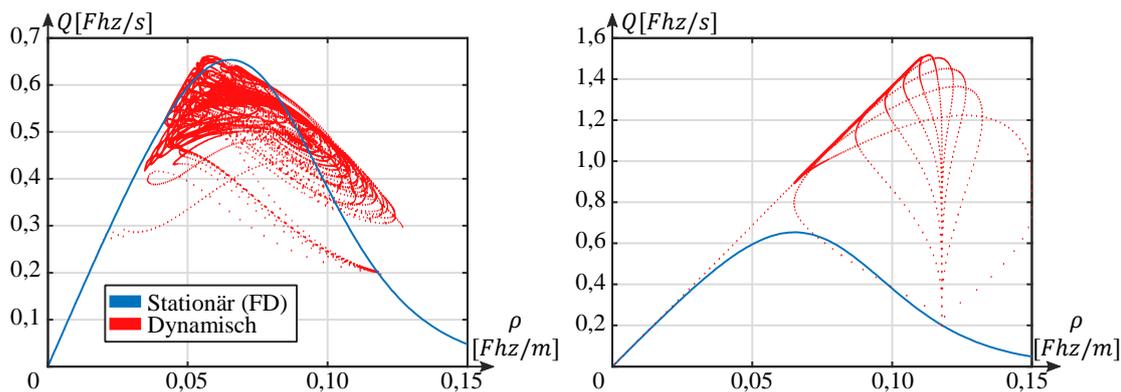


Abbildung 5-8: Vergleich der in der Simulation erreichten dynamischen Zustände der Straße $rd_{1 \rightarrow 2}$ im unregulierten Fall (links) und im regulierten Fall (rechts)

Die Simulationsergebnisse des mit dem Durchschnitts-Konsensalgorithmus geregelten makroskopischen Verkehrsflussmodells zeigen, dass der Ansatz grundsätzlich in der Lage ist, Verkehrsflüsse in einem Straßennetz positiv zu beeinflussen und zu harmonisieren. Weitere positive Effekte, die hieraus resultieren, sind beispielsweise die deutlich gesteigerten Kapazitäten der Straßen und die gänzliche Unterdrückung von Verkehrsinstabilitäten wie Stauwellen.

Der Ansatz scheint also vielversprechend für weitere Untersuchungen mit komplexeren Simulationsmodellen und kann als obere Leistungsschranke verstanden werden, insbesondere unter Berücksichtigung von Effekten, die eingangs dieses Kapitels als vereinfachende Annahmen zurückgestellt wurden. Zu diesen gehören z.B. die Berücksichtigung von Einzelfahrzeugverhalten sowie die Interaktion zwischen Fahrzeugen auf mikroskopischer Ebene. Im gezeigten makroskopischen Verkehrsflussmodell verhielten sich die Verkehrsflüsse bisher ideal (z.B. an den Kreuzungen), diese Vereinfachung wird jedoch unter Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen nicht immer möglich sein. Deshalb wird der Verkehrsfluss Störungen unterliegen, die durch den Durchschnitts-Konsensalgorithmus ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Die Wechselwirkungen zwischen den makroskopischen Sollvorgaben des Durchschnitts-Konsensalgorithmus und den Fahrzeugen auf mikroskopischer Ebene, die diese umsetzen sollen, werden im Weiteren noch von Interesse sein.

5.2 Simulation des Gesamtsystems mit mikroskopisch simuliertem Verkehr

Im vorherigen Unterkapitel wurde gezeigt, dass der Durchschnitts-Konsensalgorithmus grundsätzlich in der Lage ist, einen makroskopisch modellierten Bilanzraum positiv zu beeinflussen und damit vielversprechend für weitere Untersuchungen scheint. Das in derselben Ebene angesiedelte Inner-Bilanzraumrouting wurde dabei jedoch nicht berücksichtigt. Darüber hinaus sind die Funktionen der Ebenen eins und drei bisher völlig vernachlässigt worden. Um die Leistungsfähigkeit des in Kapitel 4 vorgestellten Gesamtansatzes zu untersuchen, wird zu diesem Zweck nachfolgend zunächst die Entwicklung eines umfangreichen Simulationsframeworks erläutert. Anschließend erfolgt eine Vorstellung der für die Untersuchung betrachteten und modellierten Straßennetze sowie der berücksichtigten Vergleichsszenarien. In Unterkapitel 5.2.3 werden anschließend die Simulationsergebnisse vorgestellt und mit geeigneten Bewertungsmetriken ausgewertet. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht möglicher sinnvoller Modellerweiterungen für zukünftige Untersuchungen ab, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr berücksichtigt werden konnten.

5.2.1 Simulationsframework

Für die Untersuchung des hierarchischen Verkehrsmanagements wurde ein umfangreiches Simulationsframework in der Hochsprache Java entwickelt, welches im Folgenden erläutert werden soll.

Das Framework umfasst im Wesentlichen die in Kapitel 4 vorgestellten Ansätze der drei Hierarchieebenen sowie eine gekoppelte mikroskopisch basierte Verkehrssimulation. In Abbildung 5-9 ist die vereinfachte Struktur des Simulationsframeworks zu sehen. Grundlage für eine simulative Untersuchung ist ein gegebenes Straßennetz(-stück), welches mittels Zentralitätsmetriken statisch auf kritische Straßen analysiert und in Bilanzräume eingeteilt werden kann (vgl. Kapitel 4.3.5). Zusätzlich benötigt das Simulationsframework selbst Informationen über das Straßennetz, welches daher vom Kern des Frameworks, dem *Simulations-Manager*, geeignet interpretiert und in einer Datenhaltung abgelegt wird. Dieses in der Datenhaltung abgelegte detaillierte Modell des zu untersuchenden Straßennetzes umfasst hierbei z.B. auch die notwendigen Kreuzungsgeometrien und die Bilanzraumdefinitionen. Zusätzlich werden hier alle Simulationsparameter gespeichert und Statistiken zur Simulation aufgezeichnet. Neben der Modellbildung und Speicherung des Straßennetzes hat der Simulations-Manager die Aufgabe, die Funktionen der drei Hierarchieebenen (Autonomes Kreuzungsmanagement für mehrere Kreuzungen, Bilanzraummanagement für mehrere Bilanzräume und das globale Bilanzraum-Routing) zu integrieren sowie eine Schnittstelle zur eingesetzten mikroskopischen Verkehrssimulation umzusetzen. Eine detaillierte Übersicht der Struktur des Simulationsframeworks kann

den vereinfachten Klassendiagrammen im Anhang A.1.1 entnommen werden. Ein beispielhafter Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche des Simulationsframeworks ist in Abbildung A-5 zu sehen.

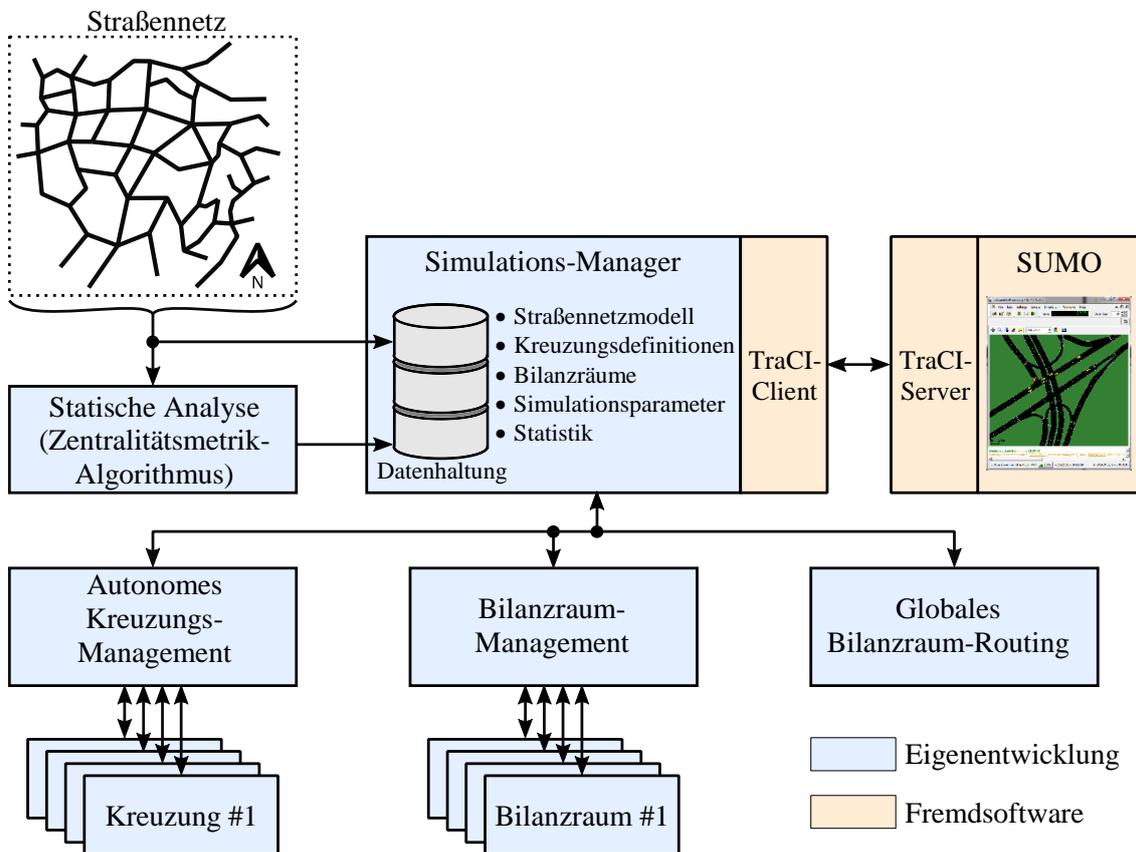


Abbildung 5-9: Vereinfachte Struktur des in der Arbeit entwickelten Simulationsframeworks

Für die Generierung von fahrdynamisch möglichen Trajektorien mittels des in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Optimierungsansatzes werden die externen Java-Bibliotheken JOM (Java Optimization Modeler) [Mar18] und IPOpt (Interior Point OPTimizer) [WB06] verwendet, die eine Vielzahl an numerischen Optimierungsansätzen zur Verfügung stellen.

Da die gekoppelte mikroskopische Verkehrssimulation mit ihren Funktionen ein wesentlicher Bestandteil des Simulationsframeworks ist, soll diese im nächsten Abschnitt kurz vorgestellt werden.

SUMO – Simulation of Urban Mobility

SUMO (s. [LBB+18]) ist eine Open-Source-Software, die vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde und seit dem Jahr 2001 zur Verfügung steht. SUMO ist eine mikroskopisch basierte, zeitdiskrete, weg-kontinuierliche Verkehrssimu-

lation mit sehr großem Funktionsumfang und aktiver Entwicklungs-Community. Die Simulationssoftware erlaubt es, große Straßennetze zu modellieren und mit multimodalem Verkehr zu simulieren. Hierbei können verschiedene Straßenarten (z.B. normale Straße, Fußwege, Fahrradwege, Busspuren usw.) definiert werden und zudem über mehrere Spuren und Messeinrichtungen (z.B. Induktionsschleifen) verfügen. Für die Simulation können verschiedene Verkehrsteilnehmer (z.B. Fußgänger, Fahrradfahrer, LKW, Busse, Motorräder, Einsatzfahrzeuge u.v.m.) mit individuellen Eigenschaften berücksichtigt werden, während die Anzahl der Verkehrsteilnehmer nicht begrenzt ist. Lichtsignalanlagen können in SUMO als Festzeitlogik hinterlegt werden oder automatisch adaptiv auf den Verkehr reagieren.

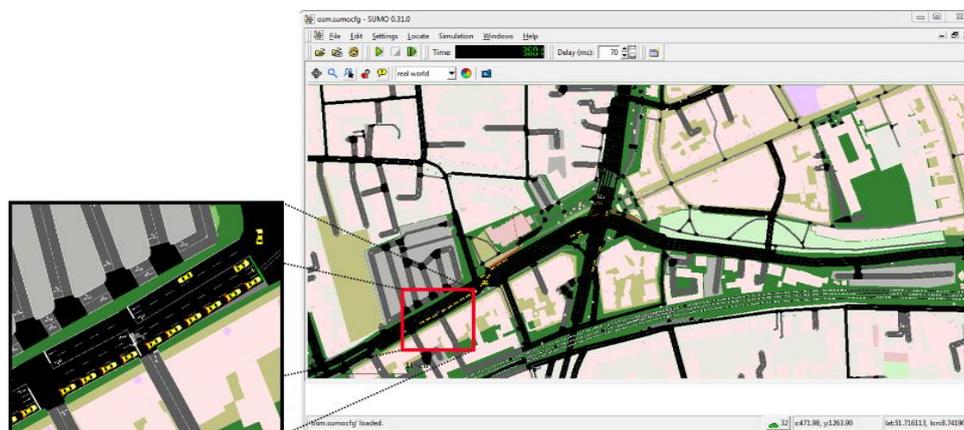


Abbildung 5-10: Screenshot der Verkehrssimulationssoftware SUMO mit einem Ausschnitt des Straßennetzes aus Paderborn (Westerntor)

Für das Fahrerverhalten in Längsrichtung stehen mehrere Fahrzeugfolgemodelle (vgl. Kapitel 3.1) und in Querrichtung mehrere Spurwechselmodelle zur Verfügung. Überdies sind die Fahrermodelle in gewissem Maße „intelligent“ und halten sich beispielsweise an Verkehrsregeln wie Rechts-vor-Links und können somit Kreuzungen kollisionsfrei passieren. Die Fahrermodelle erlauben zudem eine individuelle Parametrierung, um z.B. das menschliche Verhalten besser nachzuahmen (wie etwa Mindestabstände, Ungeduld oder Imperfektion). SUMO ermöglicht folglich realistische Verkehrssimulationen mit großen Straßennetzen und vielen verschiedenen Verkehrsteilnehmern, wie dies als Ausschnitt in Abbildung 5-10 in einem Screenshot der Software zu sehen ist. Neben der Simulation weist SUMO die Funktionalität auf, umfangreiche „Messgrößen“ aufzuzeichnen. So können einerseits zu jedem Fahrzeug Einzelfahrzeuginformationen (Routen, Geschwindigkeiten, usw.) abgefragt werden. Andererseits ist es auch möglich, aggregierte Daten wie z.B. die aus den vorherigen Kapiteln bekannten Größen der Verkehrsdichte, des Verkehrsflusses und der mittleren Flussgeschwindigkeit für jede Straße zu bestimmen. Größen wie die mittlere Reisezeit, die mittlere Wartezeit oder die mittlere prozentuale Flächenabdeckung durch Fahrzeuge pro Straße können zusätzlich abgefragt werden. SUMO

besitzt außerdem ein open-source Emissions-Modell (HBEFA²⁹ in der Version 3.1), das Verbrenner- und Elektromotoren beinhaltet, daher sind überschlägige simulative Untersuchungen der Umweltbelastung mittels SUMO möglich. Details zur Implementierung können in [KHW+14] eingesehen werden.

Die Wahl der verwendeten Verkehrssimulation ist im Rahmen dieser Arbeit auf SUMO gefallen, da SUMO einen sehr umfangreichen und bewährten Funktionsumfang besitzt. Dies erleichtert eine Implementierung von z.B. Verkehrssteuerlogiken wie in dieser Arbeit, weil nicht zusätzlich die komplexe Verkehrssimulation implementiert werden muss. Neben SUMO existieren noch weitere Verkehrssimulationen (z.B. Paramics, VISSIM, Aimsum, Matsim oder Corsim, eine vergleichende Übersicht kann in [SEE16] eingesehen werden), die jedoch entweder proprietär vertrieben werden, einen geringeren Funktionsumfang oder eine wesentlich kleinere Entwicklungs-Community im Vergleich zu SUMO aufweisen. Gerade Letzteres ist ein wesentlicher Vorteil von SUMO, da regelmäßig sinnvolle Verbesserungen und neue Funktionen integriert werden und Probleme von der Entwicklungs-Community schnell gelöst werden können.

Integration zum Simulationsframework

Damit SUMO in ein fremdes Simulationsframework eingebettet werden kann, ist die Netzwerkschnittstelle TraCI (Traffic Control Interface) integriert, die es mittels TCP-Sockets erlaubt, die gesamte Simulation in SUMO zu steuern und zu beeinflussen [WPR+08]. Alle zuvor genannten Funktionen können genutzt und alle erwähnten Messgrößen abgefragt werden, indem ein geeignetes Kommunikations-Gegenstück in das Simulationsframework integriert wird. Dies ist in Abbildung 5-9 vereinfacht als Verbindung (TraCI-Server ↔ TraCI-Client) dargestellt. In Quellcode 1 ist ein einfaches Beispiel für die Kopplung zwischen dem Simulationsframework und SUMO für Java durch TraCI gezeigt. Hier wird zunächst über das Kommunikationsobjekt *sumoConn* die Route des Fahrzeugs mit der ID 1 abgefragt und anschließend wird für dasselbe Fahrzeug die mögliche (Höchst-)Geschwindigkeit auf 50 km/h gesetzt.

Quellcode 1: Beispiel für das Abfragen und Setzen von Parametern in SUMO mit der TCP-Schnittstelle TraCI

```
// Simulationswerte aus SUMO abfragen
SumoStringList route =
    (SumoStringList) sumoConn.do_job_get(Vehicle.getRoute(„1“));

// Simulationsparameter in SUMO setzen
sumoConn.do_job_set(Vehicle.setSpeed(„1“, 50/3.6));
```

²⁹ Das **Handbuch für Emissionsfaktoren**, weitere Informationen in [UI+20].

Das Simulationsframework übernimmt auf diese Weise die vollständige Steuerung der Simulation in SUMO und bildet darüber hinaus die Grundzeitbasis der gesamten Simulation und bestimmt somit die Simulationsschrittweite. Das Simulationsframework stößt nach dem erforderlichen Datenaustausch und den notwendigen Berechnungen in jeder Iteration den nächsten Simulationsschritt in SUMO an, folglich liegt eine synchrone Co-Simulation vor. In Abbildung 5-11 ist das Prinzip des Ablaufschemas der Co-Simulation dargestellt. In der Initialisierung wird eine Vielzahl von Einstellungen vorgenommen sowie das Straßennetz eingelesen und interpretiert. Wird die Simulation gestartet, so wird SUMO über die Schnittstelle TraCI gestartet und eingerichtet. Das Simulationsframework enthält nun eine Hauptschleife, in welcher in jeder Iteration alle notwendigen Berechnungen erfolgen, d.h. zunächst wird ein Simulationsschritt in SUMO angestoßen und darauffolgend werden alle Funktionen der drei Hierarchieebenen des Verkehrsmanagements durchlaufen. Neben SUMO können weitere Komponenten gekoppelt werden, hierzu gehören z.B. eine in diesem Kontext entwickelte 3D-Visualisierung der Simulation, die automatisiert 3D-Szenarien auf Grundlage des Straßennetzmodells generiert. Zusätzlich können Echtzeitanwendungen, wie z.B. einfache Fahrsimulatoren, die per USB an einen Computer angeschlossen werden, oder komplexe Fahrsimulatoren/Fahrzeugdynamikmodelle, die auf einer Echtzeithardware berechnet werden, in die Simulation integriert werden. Hierzu können Ego-Fahrzeuge definiert werden, sodass ein menschlicher Fahrer mit in dem simulierten Verkehrsszenario interagieren kann (jedoch ohne die hier vorgestellten Verkehrsmanagementsysteme). Ein Beispiel-Screenshot von einer Simulation mit gekoppelter 3D-Visualisierung ist im Anhang in Abbildung A-6 zu finden.

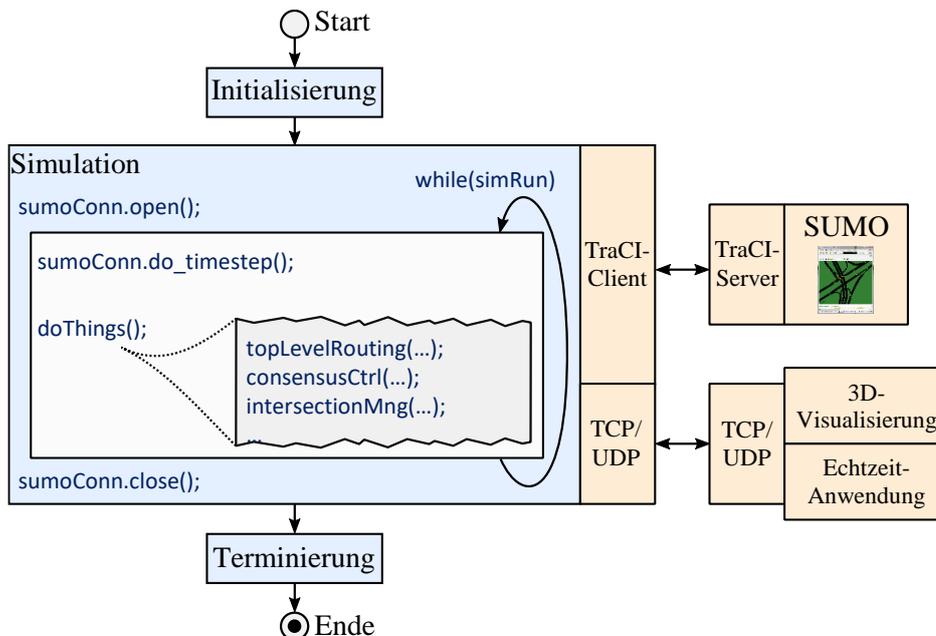


Abbildung 5-11: Prinzip des Ablaufschemas der Co-Simulation

Abschließend zum Kapitel des Simulationsframeworks ist es noch erwähnenswert, in welcher Reihenfolge die Berechnungen der Sollvorgaben für die autonomen Fahrzeuge erfolgen. Wie in Abbildung 5-12 gezeigt, geschieht dies beginnend von der höchsten zur niedrigsten Hierarchieebene, da nur auf diese Weise die jeweiligen Abhängigkeiten berücksichtigt werden können. In der höchsten Hierarchieebene (3) des globalen makroskopischen Managements werden zu makroskopischen Zustandsgrößen der Bilanzräume zwei Sollvorgaben für jedes Fahrzeug berechnet: Die Bilanzraumroute sowie die jeweils zu wählende Übergangsstraße zwischen zwei Bilanzräumen. Die Kenntnis der hier bestimmten Übergangsstraßen ist unverzichtbar für die Berechnungen der zweiten Hierarchieebene (2), welche sich jeweils auf einen Bilanzraum bezieht. In dieser Ebene müssen neben den mittleren Sollflussgeschwindigkeiten auch Inner-Bilanzraumrouten für jedes Fahrzeug individuell geplant werden. Dies ist aber nur dann sinnvoll möglich, wenn bekannt ist, von welcher Eingangsstraße zu welcher Ausgangsstraße des betrachteten Bilanzraums die Route geplant werden muss. Würden diese Vorgaben nicht berücksichtigt werden, wäre das globale makroskopische Verkehrsmanagement der Hierarchieebene (3) funktionslos, da dessen Sollvorgaben schlicht keinen Einfluss hätten. Entsprechend wären negative Auswirkungen auf die Bilanzraumzustände die Folge (z.B. Überlastung einzelner Bilanzräume). Aus diesem Grund besteht eine Abhängigkeit zwischen den Hierarchieebenen, bzw. genauer: Hierarchieebene (2) ist abhängig von Hierarchieebene (3). Eine weitere Abhängigkeit liegt zwischen Hierarchieebene (1) und (2) vor, denn eine kollisionsfreie Solltrajektorie durch eine Kreuzung bedarf der Kenntnis über die Fahrtrichtung des Fahrzeugs, welche wiederum von der in der zweiten Hierarchieebene berechneten Inner-Bilanzraumroute abhängt. Zu diesem Zweck wird die Berechnung der zweiten Hierarchieebene vor der Berechnung der ersten durchgeführt und das Ergebnis der Inner-Bilanzraumroute weitergereicht. Mit diesem Ergebnis ist der Algorithmus der ersten Hierarchieebene nun in der Lage, entsprechende Trajektorien durch die Kreuzungen zu berechnen.

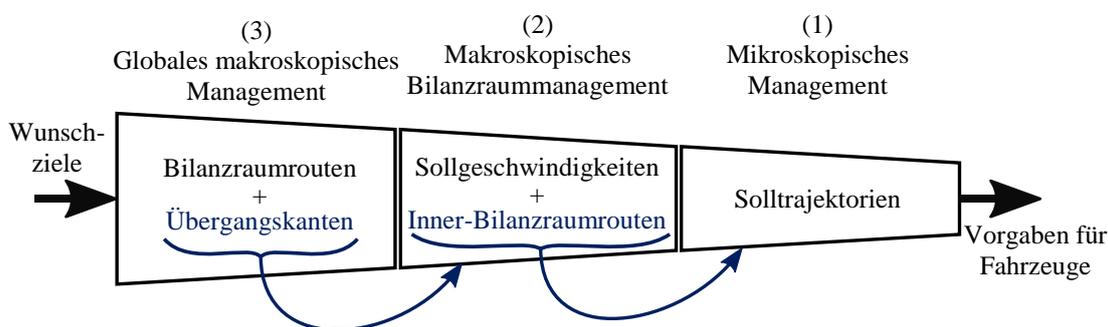


Abbildung 5-12: Berechnungsreihenfolge der drei Hierarchieebenen im Simulationsframework

Diese Berechnungsreihenfolge der Sollvorgaben ist im vorgestellten Simulationsframework bereits entsprechend berücksichtigt.

5.2.2 Betrachtete Straßennetze und Vergleichsszenarien

Im folgenden Unterkapitel sollen die für diese Arbeit herangezogenen Simulationsszenarien vorgestellt werden. Zunächst werden die untersuchten Straßennetze, welche sich in synthetische und reale Straßennetze teilen, vorgestellt. Anschließend wird knapp erläutert, wie die Vergleichsszenarien zum autonomen hierarchischen Verkehrsmanagement aussehen. Mit der nachfolgenden Auflistung der für die Simulation getroffenen vereinfachenden Annahmen folgt am Ende des Unterkapitels eine Übersicht über die resultierenden Simulationskonfigurationen, die im nächsten Unterkapitel untersucht und ausgewertet werden.

Untersuchte Straßennetze

Zur Untersuchung des hierarchischen Verkehrsmanagements werden in dieser Arbeit neun Straßennetze herangezogen. Zu diesen Straßennetzen gehören sieben synthetisch erzeugte und zwei reale Straßennetze. Die Untersuchung mit synthetisch erzeugten Straßennetzen birgt den Vorteil, dass diese derart modelliert werden können, dass sich die Auswirkungen der Funktionen des hierarchischen Verkehrsmanagements deutlicher herausstellen. Auf diese Weise können Aussagen zur grundsätzlichen Funktionsfähigkeit leichter getroffen werden, als dies bei komplexen realen Straßennetzen der Fall ist. Eine Auswahl der untersuchten Straßennetze ist in Abbildung 5-13 zu sehen.

Die erste Gruppe besteht aus drei Netzen mit „synthetischen Verengungen“ sowie ausschließlich Einbahnstraßen. Das Netz 1.1 aus Abbildung 5-13 ist ein Beispiel aus dieser Gruppe und zeigt das 6-über-3-zu-4-Netz, d.h. über sechs Eingangsstraßen werden die Fahrzeuge zu einer Verengung mit drei gleichzeitig möglichen kollisionsfreien Pfaden geführt, welche letztendlich zu vier Ausgangsstraßen führen. Da der Verkehr hier nur in eine Richtung fließen kann (von links nach rechts) und zudem alle Netze dieser Gruppe lediglich einen Bilanzraum enthalten, liegt hier ein sehr vereinfachtes Szenario vor. Dennoch eignen sich die Netze dieser Gruppe, um Auskunft über die Funktionsfähigkeit der zweiten Hierarchieebene zu geben (Durchschnitts-Konsensalgorithmus und Inner-Bilanzraumrouting). Das Netz 2.2 in Abbildung 5-13 ist ein Beispiel für die synthetischen Blocknetze, die weitläufige und eng vermaschte Straßennetze repräsentieren. In dieser Gruppe werden symmetrisch verteilte Bilanzräume definiert, sodass die Einflüsse der Hierarchieebenen isolierter untersucht werden können als dies bei einem asymmetrischen Straßennetz möglich ist. Die dritte Gruppe besteht aus einem synthetisch erzeugten Straßennetz, welches die Eigenschaften typischer europäischer Städte (siehe Kapitel 4.3.5) erfüllt. In 3.1 ist zu sehen, dass dieses Straßennetz eine organische Struktur und eine enthaltene Ringstruktur aufweist (rot). Die Straßenverläufe im Inneren des Rings sind enger vermascht, als dies außerhalb der Fall ist, ähnlich zu einer Ringstraße einer Stadt. Die

Straßennetze 4.1 und 4.2 sind reale Straßennetzabschnitte der Städte Bielefeld und Paderborn und weisen ebenfalls die zuvor erwähnten typischen Eigenschaften auf (z.B. eng vermaschte Straßen oder eine Ringstruktur).

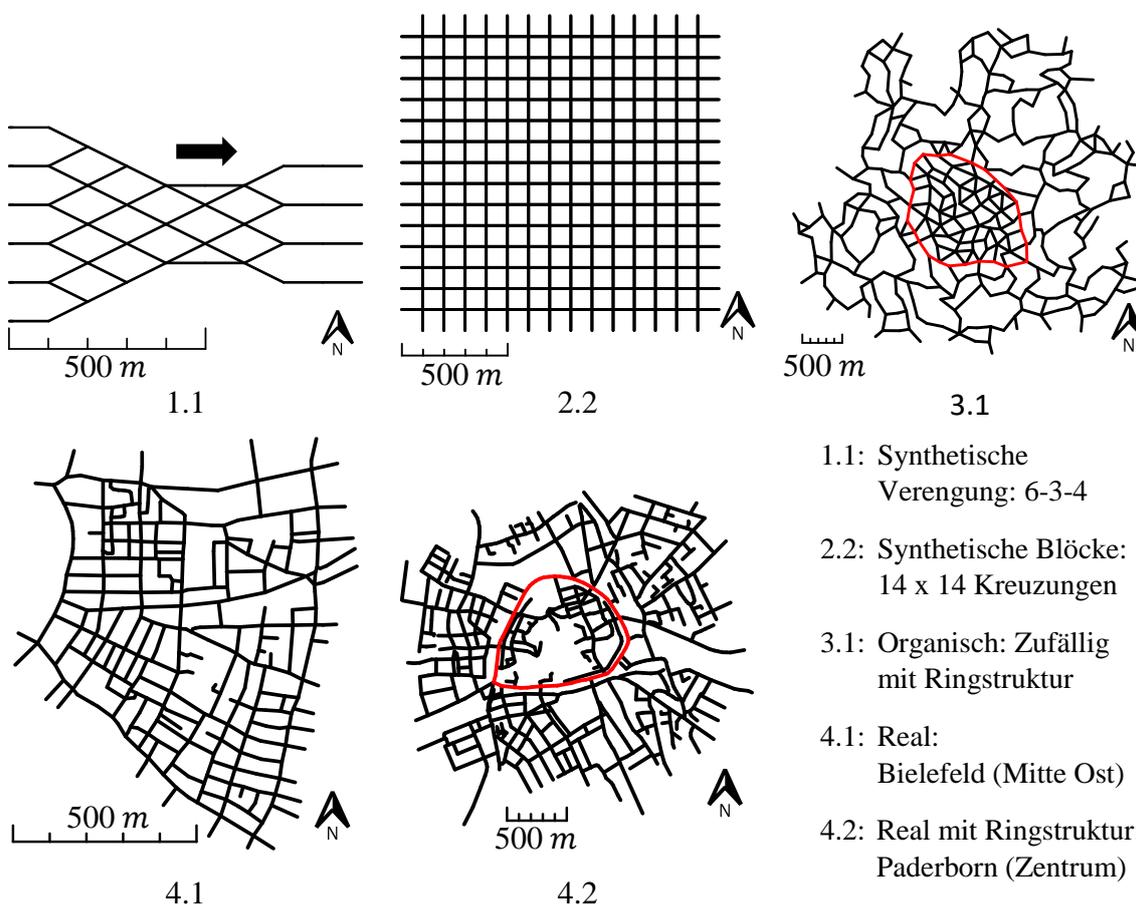


Abbildung 5-13: Auswahl der untersuchten Straßennetze

Eine Gesamtübersicht aller zur Untersuchung herangezogenen Straßennetze wird in Tabelle 8 im Unterkapitel der resultierenden Simulationskonfigurationen gegeben. Zusätzlich sind in Abbildung A-7 und Abbildung A-8 des Anhangs die für den Ansatz des hierarchischen Verkehrsmanagements notwendigen Einteilungen in Bilanzräume zu finden.

Vergleichsszenarien

Eine Untersuchung des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes des hierarchischen Verkehrsmanagements und die Beurteilung der Leistungsfähigkeit kann nur dann sinnvoll erfolgen, wenn die Ergebnisse in ein Verhältnis zu anderen Verkehrsmanagementsystemen gestellt werden.

Als Vergleichsszenario wird daher ebenfalls das Szenario eines vollautonomen Individualverkehrs betrachtet, jedoch mit eingeschränkter Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur. Jedes Fahrzeug ist insofern für sich selbst verantwortlich und wählt seine Route und Geschwindigkeiten eigenständig. Diese Aufgabe wird dabei vollständig vom SUMO-Fahrermodell übernommen. In beiden Szenarien wird jedoch angenommen, dass keine Lichtsignalanlagen existieren und das Kreuzungsmanagement die Koordination an Kreuzungen übernimmt (daher besteht auch im Vergleichsszenario eine Kommunikation, allerdings ausschließlich mit den Kreuzungsmanagern). Diese Entscheidung begründet sich darin, dass sich die Szenarien sonst zu sehr unterscheiden und sich ein Vergleich schwierig gestalten würde. Ohne diese Art der Kreuzungsorganisation des Kreuzungsmanagements müsste (für das Szenario ohne übergeordnetes Verkehrsmanagement) eine alternative Koordination der Fahrzeuge mittels Vorfahrtsregeln oder Lichtsignalanlagen herangezogen werden. Dies hätte aller Voraussicht nach jedoch durchweg deutlich schlechtere Ergebnisse zur Folge. Es soll also alleinig das Verbesserungspotential fokussiert werden, welches durch die höheren Hierarchieebenen zwei und drei, also dem Durchschnitts-Konsensalgorithmus, dem Innerbilanzraum-Routing und dem globalen Routing ermöglicht wird.

Neben den Steuereingriffsmöglichkeiten des hierarchischen Verkehrsmanagements ist die vorherrschende Grundverkehrsbelastung von entscheidender Wichtigkeit für die Untersuchung. Das vorgestellte Konzept des hierarchischen Verkehrsmanagements soll seine Stärken in sehr ausgelasteten Verkehrssituationen ausspielen, in denen es leicht zu Stauungen kommen kann. Ist das vorliegende Straßennetz hingegen „fahrzeugleer“ (z.B. in der Nacht), so hat der Ansatz ohnehin wenig Einfluss und eine Untersuchung ist wenig erkenntnisreich. Für die Simulationen wird aus diesem Grund eine grundsätzlich hohe Verkehrsbelastung, wie sie zu Stoßzeiten (z.B. Feierabendverkehr) vorkommt, angenommen. Zusätzlich wird vereinzelt zwischen homogenen und inhomogenen Nachfragen unterschieden. Hierdurch können die unterschiedlichen Auswirkungen untersucht werden, wenn alle Straßen etwa gleich häufig von Fahrzeugen als Ziel gewählt werden oder wenn einzelne Straßen besonders oft als Ziel gewählt werden.

Getroffene Vereinfachungen im Simulationsframework

Ziel der Simulation ist es, die Funktionsfähigkeit des vorgestellten hierarchischen Verkehrsmanagements für eine sehr große Anzahl an Fahrzeugen in exemplarischen Szenarien nachzuweisen. Diese große Anzahl an Fahrzeugen erfordert einige vereinfachende Annahmen, damit die Berechnungs- und Simulationszeiten in einem annehmbaren Rahmen bleiben. Neben den bewusst gewählten Vereinfachungen enthält SUMO selbst ebenfalls Vereinfachungen, die somit berücksichtigt werden müssen. Alle in der Verkehrssimulation SUMO enthaltenen sowie selbst getroffenen Vereinfachungen sind im Folgenden in Tabelle 7 aufgelistet:

Tabelle 7: *Getroffene Vereinfachungen für das Simulationsframework*

Getroffene Vereinfachung	Eigene Vorgabe / SUMO-Vorgabe?	Erläuterung
Kurven-approximation durch Geradenstücke	SUMO-Vorgabe	SUMO unterstützt keine kurvigen Straßenverläufe mit Krümmung. Sämtliche Kurven werden daher durch aneinanderhängende Geradenstücke angenähert.
Beschränkte Bewegungsfreiheitsgrade	SUMO-Vorgabe	Da SUMO eine 2D-Simulation ist, besitzt jeder Verkehrsteilnehmer lediglich zwei translatorische (x, y) Freiheitsgrade in der Ebene und einen rotatorischen Freiheitsgrad (φ) um die z -Achse (Gieren). Translatorische Bewegungen entlang der z -Achse sowie Nick- und Wankbewegungen sind somit nicht berücksichtigt.
Simple Fahrzeugdynamik	SUMO-Vorgabe	Fahrzeuge besitzen entsprechend der beschränkten Freiheitsgrade nur eine sehr einfache, beschleunigungs-basierte ebene Längs- und Querdynamik. Die Gierbewegung weist keine Dynamik auf und erfolgt verzögerungsfrei.
Einfaches Fahrzeugfolgemodell als Fahrermodell / autonome Fahrfunktionen	SUMO-Vorgabe	Je nach gewähltem Fahrzeugfolgemodell wird das individuelle menschliche Verhalten in sehr reduzierter Weise durch wenige Parameter wie z.B. dem Imperfektionsfaktor oder dem Minimalabstand modelliert. Im Kontext des autonomen Fahrens werden diese Fahrermodelle als autonome Fahrfunktionen betrachtet, welche alle Aspekte abdecken, die durch das Simulationsframework selbst nicht berücksichtigt werden.
Ausschließlich Straßen mit einer Spur pro Richtung	Eigene Vorgabe	Jede Straße verfügt in der Simulation über exakt eine Spur in jede Richtung, d.h. Einbahnstraßen und mehrspurige Straßen werden vernachlässigt. Ausnahme bilden die synthetischen Verengungen, die als Einbahnstraßen zu betrachten sind.
Ausschließlich autonomer Individualverkehr	Eigene Vorgabe	In den Untersuchungen wird ein Mischverkehr zwischen nicht-autonomen und autonomen Fahrzeugen vernachlässigt.
Kein multimodaler Verkehr, identischer Fahrzeugtyp für alle Fahrzeuge	Eigene Vorgabe	In der Simulation werden ausschließlich PKW berücksichtigt, die zudem alle die gleichen Eigenschaften aufweisen (z.B. Ausdehnung, Masse, Beschleunigungsvermögen, Fahrzeugfolgemodell).

Ideale Car2X-Kommunikation	Eigene Vorgabe	Sämtliche Kommunikationen aller Hierarchieebenen (Kreuzungsmanager, Agenten des Durchschnitts-Konsensalgorithmus sowie Routenvorgaben) geschehen ideal, d.h. Totzeiten und Fehler bei der Datenübertragung werden nicht berücksichtigt.
Perfektes Folgeverhalten der autonomen Fahrzeuge	Eigene Vorgabe	Sämtliche Fahrzeuge folgen ihren Sollvorgaben ideal (z.B. Trajektorien oder Routen), d.h. Abweichungen oder gar Nichtbefolgen werden nicht berücksichtigt.
Begrenzter Straßennetzsausschnitt	Eigene Vorgabe	Der Ansatz des hierarchischen Verkehrsmanagements wird für ausgewählte, in der Ausdehnung beschränkte Straßennetzstücke simuliert.

Die Gründe für die Wahl der selbst getroffenen Vereinfachungen liegen darin, dass einerseits der Berechnungsaufwand während der Simulation auf diese Weise deutlich verringert wird. Andererseits reduziert sich zudem die Komplexität der Implementierung wesentlich, da nicht unzählige Sonderfälle und deren Behandlung berücksichtigt werden müssen. Mit dem Anspruch eine grundsätzliche Aussage zur Funktionsfähigkeit des Ansatzes des hierarchischen Verkehrsmanagements treffen zu können, sind die Simulationsergebnisse unter Annahme der gezeigten Vereinfachungen als obere Schranke zu verstehen. Werden die Vereinfachungen reduziert und somit die Modellierungstiefe erhöht, sind entsprechend negative Auswirkungen auf die Ergebnisse zu erwarten. Es sei an dieser Stelle jedoch deutlich darauf hingewiesen, dass diese Vereinfachungen nicht zwingend notwendig sind und in zukünftigen Untersuchungen abgeschwächt oder entfernt werden können. Dieser Umstand erlaubt auch eine Untersuchung der einzelnen Einflüsse auf die Funktionsfähigkeit (dies gilt im Übrigen auch für die von SUMO vorgegebenen Vereinfachungen).

Simulationsparameter

Die nachfolgenden resultierenden Simulationskonfigurationen bedürfen noch der Klärung einiger Simulationsparameter, die einerseits den simulierten Verkehr und andererseits das entwickelte Verkehrsmanagement betreffen.

Der in SUMO simulierte Verkehr ist grundsätzlich zufälliger Natur, d.h. je nach Testfall werden hohe Verkehrsnachfragen bzw. Eingangsverkehrsflüsse definiert. Die Eingangsverkehrsflüsse müssen hierbei jedoch nicht notwendigerweise von außen in das Netz fließen, sondern bestehen anteilig aus Durchgangsverkehr und Innerverkehr. Da in den Untersuchungen Straßennetze und keine einzelnen Straßenzüge betrachtet werden, ist der Anteil des Durchgangsverkehrs deutlich geringer gewählt. Die Zusammenstellung besteht, wenn nicht anders angegeben, in allen Testfällen aus 30% Durchgangsverkehr sowie 70% Innerverkehr und definiert die Quelle der Fahrzeuge. Während Fahrzeuge aus

der Gruppe des Durchgangsverkehrs also von außen in das Netz fahren, entspringen Fahrzeuge der zweiten Gruppe im Netz. Die Wahl des Ziels ist jedoch in jedem Fall zufällig und kann entweder innerhalb des Netzes liegen oder eine Ausfahrtsstraße darstellen. Während die Routen zu den zufällig gewählten Zielen im Falle des hierarchischen Verkehrsmanagements stets neu berechnet und den Fahrzeugen vorgegeben werden, so werden diese im Vergleichsszenario auf einfache Weise durch SUMO berechnet (kürzeste Fahrwege) und festgelegt. Damit hierdurch nicht zu viele Fahrzeuge identische Routen wählen, Staus provozieren und somit die Vergleichbarkeit erschweren, wurde in SUMO ein Zufälligkeitwert berücksichtigt, der die zugrundeliegende Berechnung³⁰ beeinflusst.

Durch diese zufälligen Quell- und Zielwahlen sowie der randomisierten Routenberechnung im Vergleichsszenario ergibt sich bei langer Simulationsdauer eine etwa gleichverteilte Verkehrsbelastung, die jedoch auch Fluktuationen aufweisen kann und damit ggf. zu Startpunkten für Stauungen führt. Diese Eigenschaft wird im Folgenden als homogene Verkehrsnachfrage bezeichnet. Zusätzlich wird die Möglichkeit eines gewichteten Zufalls berücksichtigt, um eine inhomogene Verkehrsnachfrage umzusetzen. Hierdurch fällt die zufällige Wahl der Ziele häufiger auf eine bestimmte Straße im Netz.

Für eine vertretbare Simulationsdauer wurde die Simulationsschrittweite in allen Untersuchungen zu einer Sekunde gewählt und alle Simulationsergebnisse basieren auf einer simulierten Zeitspanne von 30 Minuten.

Da das hierarchische Verkehrsmanagement für die nachfolgenden Testfälle eine sehr umfangreiche Parameterliste aufweist, die in der Gesamtheit an dieser Stelle wenig erkenntnisreich ist, werden im Folgenden lediglich ausgewählte einzelne Parameter benannt:

- Für das Kreuzungsmanagement auf Hierarchieebene Eins wurde die Aktivierungsentfernung, die für das jeweilige Fahrzeug die Berechnungen anstößt, auf 90 m gesetzt. Die Seitenlänge der Kollisionsquadrate beträgt 1,50 m.
- Die Berechnungszeitschrittweite ΔT des Durchschnitts-Konsensalgorithmus auf Hierarchieebene Zwei wird abhängig von der Kommunikationstopologie und den Stabilitätsgrenzen automatisch berechnet und auf die Hälfte des maximal möglichen Werts gesetzt (also $1/(2\lambda)$, vgl. Gleichung (4-43)). Die gewählte Kommunikationstopologie entspricht in allen Fällen der Nearest-Neighbor-Kommunikation und gleicht damit der Gestalt der Straßennetze. Der zulässige Geschwindigkeitsbereich für die Berechnung der mittleren Sollgeschwindigkeiten im Durchschnitts-Konsensalgorithmus beträgt 35 - 50 km/h und berücksichtigt damit die in allen Simulationen angenommene maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit

³⁰ Konkret: Der Faktor *weights.random-factor* weist den Wert 5 auf. Alle für die Routenberechnung zur Grundlage gelegten internen Kantengewichte in SUMO werden für jedes Fahrzeug individuell mit einem zufälligen Wert im Bereich [0, 5] multipliziert.

von 50 km/h, die üblicherweise innerorts in deutschen Straßennetzen die Regel ist.

- Das ebenfalls in Hierarchieebene Zwei befindliche Inner-Bilanzraumrouting wird alle 10 s wiederholt und weist eine stärkere Gewichtung für die Berücksichtigung der Verkehrsdichte entlang der Route im Vergleich zur erwarteten Reisezeit auf (s. Gleichung (4-66)). Hierdurch werden vermehrt Fahrzeuge mit relativ kurzen Routen dazu verleitet, Umwege zu nehmen und die Verkehrsbelastung zu reduzieren. Fahrzeuge, die ohnehin bereits eine lange Route aufweisen, müssen auf diese Weise keine wesentlich längere Route durch große Umwege in Kauf nehmen.
- Das Routing des globalen Managements wird alle 20 s wiederholt.

Zuletzt sei angemerkt, dass für die Vergleichbarkeit die zufällig generierten Quellen und Ziele aller Fahrzeuge sowie die Zeitpunkte der Fahrzeugintritte in die Straßennetze gespeichert werden. Diese Informationen dienen während der Simulation als Grundlage für die Fahrzeugeinfügung, sodass in den Vergleichsszenarien stets dasselbe Verkehrsaufkommen mit denselben Quellen und Zielen der Fahrzeuge simuliert wird. Unterschiede in den Ergebnissen resultieren also einzig aus den unterschiedlichen Verhalten der Fahrzeuge zur Simulationszeit.

Resultierende Simulationskonfigurationen

Mit Rücksicht auf die gewählten Straßennetze, die definierten Vergleichsszenarien sowie die getroffenen vereinfachenden Annahmen für die Untersuchungen ergibt sich eine Übersicht aller in dieser Arbeit herangezogenen Testfälle, welche im nächsten Unterkapitel 5.2.3 ausgewertet werden. Die Übersicht dieser Testfälle ist im Folgenden in Tabelle 8 zu sehen.

Die erste Klasse der synthetischen Verengungen wird im Rahmen der Untersuchungen herangezogen, um die Funktionen der zweiten Hierarchieebene (Durchschnitts-Konsensalgorithmus und Inner-Bilanzraumrouting) isoliert zu untersuchen. Die zweite Klasse der symmetrischen und synthetischen Straßennetze hat sich für die Untersuchung ebenfalls als nützlich herausgestellt, da hier besondere Eigenheiten von Straßennetzen ausgeschlossen werden können. Sämtliche Effekte sind alleine auf das Verkehrsaufkommen, die Verkehrsleitsysteme und die Simulation zurückzuführen. Insbesondere lassen sich hier verschiedene Simulationskonfigurationen untersuchen, die alle Hierarchieebenen des entwickelten Verkehrsmanagements oder nur Teile davon berücksichtigen.

Als Übergang zu realen Straßennetzen wurde in der dritten Klasse ein synthetisch organisches Netz generiert, welches die wesentlichen Merkmale von europäischen urbanen Netzen (vgl. Kapitel 4.3.5) aufweist. Das verwendete Netz besitzt daher eine dicht vermaschte und zentrumsbasierte Straßennetzstruktur mit umgebendem Ring sowie einer

weniger eng vermaschten äußeren Struktur. Zuletzt werden in der vierten Klasse zwei reale Straßennetzstücke aus den Städten Bielefeld und Paderborn untersucht, die für die Simulation aufgrund der Komplexitäten teilweise vereinfacht werden mussten. Bei den Untersuchungen können daher auch Effekte auftreten, die aus der individuellen Straßennetzstruktur resultieren.

Tabelle 8: Übersicht der ausgewählten Simulationstestfälle

Netztyp	Netz-konfiguration	# Kreuzungen	# Bilanz-räume	# Kreuzungen pro Bilanzraum	Verkehrskonfiguration	Test.-Nr.
1. Synthetische Verengung (Einspurig)	6 über 3 zu 4	23	1	23	Eine Verkehrsrichtung	1.1
	6 über 3 zu 6	38	1	38	Eine Verkehrsrichtung	1.2
	8 über 3 zu 5	48	1	48	Eine Verkehrsrichtung	1.3
2. Synthetische Blöcke	7x7	49	5	10 / 10 / 10 / 10 / 9	Homogene Nachfrage (nur außen)	2.1
					Inhomogene Nachfrage (innen/außen)	2.2
					Erhöhung der Nachfrage bis Versagen (nur außen)	2.3
	14x14	196	7	28	Homogene Nachfrage (innen/außen)	2.4
					Homogene Nachfrage (innen/außen) + Umschaltung	2.5
	18x18	324	36	9	Homogene Nachfrage (innen/außen)	2.6
3. Synthetisch und organisch	Zufällig mit Ringstruktur (Ring: engmaschig, Außenbereich: grobmaschig)	190	14	9 / 12 / 18 / 17 / 16 / 8 / 9 / 11 / 12 / 11 / 16 / 21 / 13 / 17	Hohe Homogene Nachfrage (innen/außen)	3.1
4. Real	Bielefeld-Ost	185	7	26 / 20 / 38 / 23 / 22 / 24 / 18	Hohe Homogene Nachfrage (innen/außen)	4.1
	Paderborn	297	16	19 / 6 / 19 / 17 / 23 / 23 / 17 / 14 / 16 / 17 / 12 / 8 / 22 / 10 / 9 / 14	Hohe Homogene Nachfrage (innen/außen)	4.2

Die für die Untersuchung getroffenen Bilanzraumeinteilungen der einzelnen Straßennetze können im Detail Abbildung A-7 und Abbildung A-8 des Anhangs entnommen werden. Sie wurden gemäß Kapitel 4.3.5 derart gewählt, dass die Bilanzräume jeweils ausreichende und vergleichbare Größen aufweisen, um für die Zustandsbeschreibung in Form eines makroskopischen Fundamentaldiagramms verwendet werden zu können. Hierbei

wurde jedoch zusätzlich Augenmerk daraufgelegt, dass diese nicht zu weitläufig sind, um den Einflussradius des Durchschnitts-Konsensalgorithmus zu beschränken und die Berechnungen nicht unnötig aufwendig werden zu lassen (Skalierbarkeit).

5.2.3 Untersuchung der Simulationsergebnisse

Nachfolgend werden ausgewählte Simulationsergebnisse der in Tabelle 8 gezeigten Testfälle vorgestellt und interpretiert.

Test 1.x: Synthetische Verengungen

Die synthetischen Verengungen bestehen ausschließlich aus Einbahnstraßen, die sich kreuzen. Von einer definierten Anzahl von Eingangsstraßen führt das Netz über eine Verengung mit reduzierter Kapazität (wenige Straßen mit konfliktfreien Passiermöglichkeiten) zu den Ausgängen. Diese Straßennetze bestehen jeweils nur aus einem einzigen Bilanzraum und sind zusätzlich durch die Einbahnstraßen wesentlich in den Freiheitsgraden beschränkt. Daher können auf diese Weise die Funktionen der zweiten Hierarchieebene, der Durchschnitts-Konsensalgorithmus sowie das Inner-Bilanzraumrouting, isoliert untersucht werden. Hier beschränken sich die Beeinflussungsmöglichkeiten auf die Vorgabe der mittleren Sollflussgeschwindigkeit sowie die fahrzeugindividuellen Inner-Bilanzraumrouten. Außerdem kann eine Verkehrsnachfrage definiert werden, die entweder symmetrisch deterministisch (Fahrzeuge einer bestimmten Eingangsstraße haben alle dieselbe definierte Ausgangsstraße als Ziel, ein Beispiel folgt im nächsten Absatz) oder zufällig ist (jedes Fahrzeug erhält eine zufällig gewählte Ausgangsstraße). Es ist zu erwarten, dass sich die Geschwindigkeiten und Routen der Fahrzeuge während der Simulation durch die Regelung derart verändern, dass das Netz insgesamt homogener ausgelastet ist und sich die in 4.1 genannten Ziele (z.B. erhöhter Durchsatz, verringerte Emissionen) einstellen.

(1.2): Verengung 6 über 3 zu 6

Wird exemplarisch das 6-3-6-Netz (sechs Eingangsstraßen, drei konfliktfreie Straßen in Verengung, sechs Ausgangsstraßen) als Beispiel der synthetischen Verengungen betrachtet (siehe Abbildung 5-14), so kann für eine symmetrisch deterministische Verkehrsnachfrage festgehalten werden, dass hier unterschiedlich viele Routenmöglichkeiten für jede Paarung von Eingangs- und Ausgangsstraße existieren. Dies ist in Abbildung 5-14 beispielhaft für die fünf Möglichkeiten des Eingangs- und Ausgangsstraßenpaars (e_1, a_1) farblich gezeigt und im Detail für alle Paare in Tabelle 9 aufgeführt.

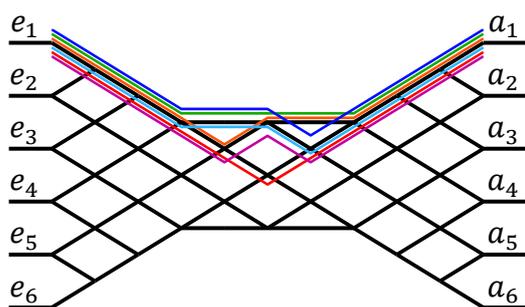


Abbildung 5-14:
Verengung 6-3-6 (1.2) mit allen möglichen Routen von e_1 zu a_1

Tabelle 9:
Anzahl möglicher Routen für alle Eingangs- Ausgangsstraßenpaare im 6-3-6-Netz (2.1) mit symmetrischer Verkehrsnachfrage

Quelle	Ziel	Anzahl möglicher Routen
e_1	a_1	5
e_2	a_2	75
e_3	a_3	206
e_4	a_4	206
e_5	a_5	75
e_6	a_6	5

Es ist also zu erkennen, dass das hierarchische Verkehrsmanagement unterschiedlich viele Routenmöglichkeiten für die verschiedenen Paare besitzt und die äußersten Straßen daher im unregelmäßigen als auch im regulierten Szenario besonders empfindlich für Verkehrsstörungen sind.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 zu sehen. Abbildung 5-15 links zeigt die Agentenzustände (Kreuzungsdichten ρ_K) des Systems ohne und mit hierarchischem Verkehrsmanagementsystem (HVM) über der Zeit mit dem in Rot dargestellten Mittelwert. Rechts davon sind die mittleren Verkehrsdichten entlang der Straßen für den gesamten Simulationszeitraum dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Straßennetz im Fall ohne HVM inhomogen ausgelastet ist, da sich die Agentenzustände deutlich voneinander unterscheiden. Dies resultiert stellenweise in sehr hohen Verkehrsdichten und Stauungen (rote Straßen). Im Fall mit HVM ist zu erkennen, dass alle Agentenzustände in einem engen Bereich um die Sollvorgabe liegen (eine obere und untere Einhüllende ist einfach vorstellbar) und es keine Ausreißer gibt. Im Kontext des Verkehrsmanagements bedeutet dies, dass die Regelung stabil und in der Lage ist, den Verkehrsfluss zu homogenisieren.

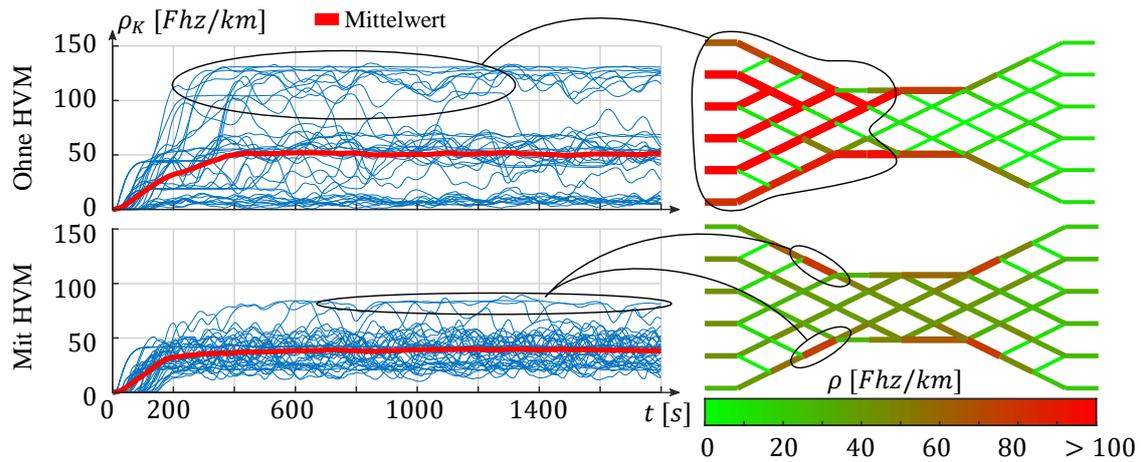


Abbildung 5-15: Vergleich der Ergebnisse (ohne / mit HVM) für die Simulation (1.2) (1800 s \cong 30 min) des 6-3-6-Netzes mit symmetrischer Verkehrsnachfrage

Dasselbe Ergebnis ist auch rechts in Abbildung 5-15 erkennbar, denn hier weisen alle Straßen eine ähnliche mittlere Verkehrsdichte über den Simulationszeitraum auf. Zusätzlich ist ersichtlich, dass die äußeren Straßen auch im Fall mit HVM eine erhöhte Verkehrsdichte aufweisen, da hier reduzierte Stellmöglichkeiten bezüglich der Routen vorliegen, wie dies bereits zuvor erläutert wurde. In Abbildung 5-16 sind zusätzlich Histogramme der mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit aller simulierten Fahrzeuge aufgetragen. Deutlich zu erkennen sind die wesentlich geringeren Varianzen der Messungen im Fall mit HVM. So liegen die mittleren Reisegeschwindigkeiten im Fall mit HVM bei ca. 26 ± 5 km/h während im Fall ohne HVM ein geringerer Mittelwert von ca. 15 km/h vorliegt und zusätzlich die Werte von 0 km/h bis 40 km/h streuen. Dies deckt sich mit den vorherigen Erkenntnissen der homogeneren Verkehrssituation durch das Verkehrsmanagement.

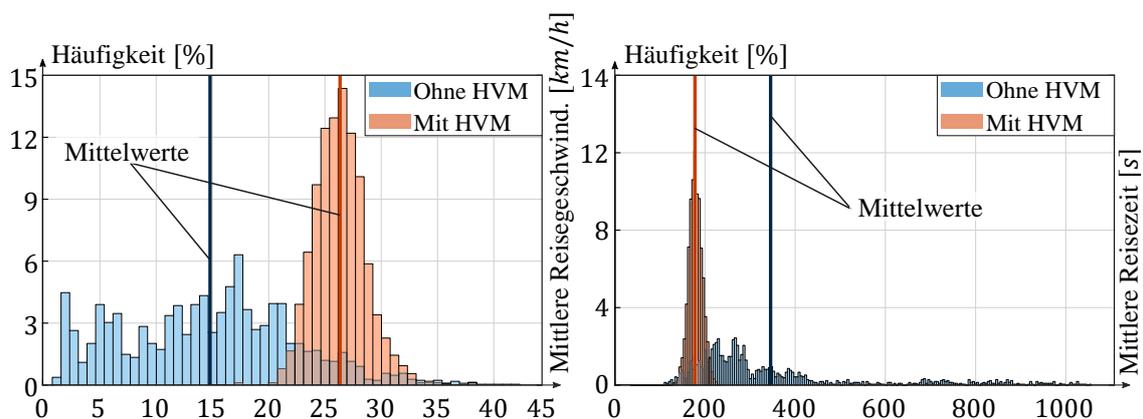


Abbildung 5-16: Vergleichshistogramme der Simulationsergebnisse des 6-3-6-Netzes (1.2) zur mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit, vertikale Striche: Entsprechende Mittelwerte

Werden die mittleren Reisezeiten betrachtet (Abbildung 5-16 rechts), so ergeben sich analoge Ergebnisse. Zusätzlich ist hier zu erkennen, dass einzelne Fahrzeuge ohne HVM durch Stauungen sehr lange benötigt haben, um das Straßennetz zu durchqueren.

Tabelle 10: Ausgewählte Simulationsergebnisse für drei exemplarische Szenarien mit synthetischen Verengungen.

Messgrößen bezogen auf Gesamtflotte					Messgrößen pro Fahrzeug				
Testfälle Verengungen		1.1 6-3-4	1.2 6-3-6	1.3 8-3-5	Testfälle Verengungen		1.1 6-3-4	1.2 6-3-6	1.3 8-3-5
Gesamtdurchsatz [Fhz]	ohne HVM	2431	1665	1489	Mittlere Reisezeit [s]	ohne HVM	181	347	486
	mit HVM	3052	3035	3007		mit HVM	152	178	202
	↑/↓ ?	+26%	+82%	+102%		↑/↓ ?	-16%	-49%	-58%
Maximaler Durchsatz [Fhz/h]	ohne HVM	4892	3339	2988	Mittlere Fahrdistanz [m]	ohne HVM	827	1106	1110
	mit HVM	6129	6087	6021		mit HVM	843	1229	1321
	↑/↓ ?	+25%	+82%	+102%		↑/↓ ?	+2%	+11%	+19%
Mittlere Anzahl Fahrzeuge im System [-]	ohne HVM	292	411	551	Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	ohne HVM	21	15	10
	mit HVM	300	337	425		mit HVM	22	26	25
	↑/↓ ?	+3%	-18%	-29%		↑/↓ ?	+4%	+78%	+42%
Änderung Verbrauch und Emissionen nach HBEFA ³¹ [%]	Treibstoff	-23%	-49%	-60%	Mittlere Wartezeit [s]	ohne HVM	0	0	0
	CO ₂	-16%	-32%	-40%		mit HVM	0	0	0
	NO _x	-21%	-36%	-44%		↑/↓ ?	±0	±0	±0

In Tabelle 10 sind weitere ausgewählte Resultate für die drei exemplarischen synthetischen Verengungen zu sehen. Es fällt auf, dass sich die Simulationsergebnisse ähneln und dieselbe Charakteristik der Verbesserung der Verkehrssituation zeigen. Interessant ist an dieser Stelle, dass neben den zuvor genannten Vorteilen weitere erkennbar sind, so erhöht sich durch das Verkehrsmanagement der Durchsatz an Fahrzeugen, während die mittleren Wartezeiten und Emissionen abnehmen. Diese Vorteile werden jedoch nur erreicht, da die Fahrzeuge teilweise längere Alternativrouten in Kauf nehmen müssen, dies zeigt sich

³¹ Da SUMO ein Emissionsmodell für Fahrzeuge, jedoch aber kein Immissionsmodell für definierte lokale Messstellen besitzt und die HBEFA-Berechnung zudem ein Schätzmodell ist, wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Angabe von Absolutwerten verzichtet und stattdessen relative Änderungen angegeben.

in den mittleren Reisedistanzen, die im geregelten Fall über den Werten des unregulierten Falls liegen. Dies deckt sich jedoch mit den in Kapitel 4.1 beschriebenen Erwartungen, dass zum Erreichen kollektiver Ziele einige individuelle Fahrzeuge Nachteile erdulden müssen. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die mittlere Anzahl von Fahrzeugen im Straßennetz in den Testfällen (1.2) und (1.3) ohne HVM deutlich über den Werten für die Simulation mit HVM liegen. Mit den vorherigen Ergebnissen lässt sich hieraus ableiten, dass im Fall ohne HVM ein stockender Verkehrsfluss mit erhöhter Verkehrsdichte vorherrsche, sodass die Fahrzeuge geringere Abstände zueinander aufwiesen und somit mehr Fahrzeuge zur gleichen Zeit im Netz existierten. Zudem ist den Ergebnissen zu entnehmen, dass in keinem Fall eine Wartezeit gemessen wurde, daher kam der Verkehrsfluss auch ohne HVM und trotz Störungen nicht zum Erliegen. Die Störungen im Verkehrsfluss für den Fall ohne HVM können allerdings u.a. als mögliche Ursache für die erhöhten Emissionen gesehen werden.

Test 2.x: Synthetische Blöcke

Bevor auf die Ergebnisse des Gesamtsystems für die Straßennetze mit synthetischen Blöcken eingegangen wird, soll zunächst noch kurz gesondert auf das Kreuzungsmanagement als Beispielimplementierung für die mikroskopischen Funktionen der ersten Hierarchieebene eingegangen werden. Die Funktionalität des Kreuzungsmanagements wurde anhand des 7x7-Netzes gesondert untersucht und eine Quote von 99,3% erfolgreich generierter kollisionsfreier Trajektorien bei insgesamt 2881 Fahrzeugen festgehalten. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei dieser Untersuchung 0,7% der Fahrzeuge (also ca. 20 Fahrzeuge) keine Trajektorie vom Kreuzungsmanagement erhielten und in der Simulation sich selbst überlassen wurden (d.h. SUMO hat die Kontrolle der Fahrzeuge innerhalb der Kreuzung weiter übernommen). Das Kreuzungsmanagement liegt im Rahmen dieser Arbeit nicht im Hauptfokus und ist lediglich als Beispiel einer mikroskopischen Funktion der ersten Hierarchieebene anzusehen. Aus diesem Grund besteht kein Anspruch auf eine zu jederzeit vollständig erfolgreiche Abhandlung aller Fahrzeuge, daher wird das ermittelte Ergebnis als hinreichend gut für die weiteren Untersuchungen betrachtet.

In Abbildung 5-17 ist ein exemplarischer Screenshot aus der Simulation mit visualisierten Kollisionsquadraten des Kreuzungsmanagements zum aktuellen Zeitschritt zu sehen. Die blauen Quadrate zeigen aktuell unbelegte, rote Quadrate aktuell belegte Kollisionsquadrate an. Während sich die Fahrzeuge durch das Gitter bewegen, kann in der Simulation verfolgt werden, wie sich die Zustände der Kollisionsquadrate dynamisch ändern, jedoch kein Quadrat zu einem Zeitpunkt von zwei Fahrzeugen bedeckt wird. Die Fahrzeuge unterteilen sich gemäß den Beschreibungen in Kapitel 4.2.1 in drei Gruppen: Die erste Gruppe (gelb) besteht aus durch SUMO gesteuerte Fahrzeuge und deckt im Kontext dieser Arbeit jegliche mikroskopischen Fahrfunktionen ab, die nicht durch das Kreuzungsmanagement übernommen werden. Fahrzeuge in grün sind Fahrzeuge, die durch das

Kreuzungsmanagement eine kollisionsfreie Trajektorie erhalten haben, bei der die Fahrzeuge die Kreuzung direkt durchfahren können, ohne anhalten zu müssen. Die letzte Gruppe sind die hellblauen Fahrzeuge. Auch diese haben eine kollisionsfreie Trajektorie vom Kreuzungsmanagement erhalten, jedoch müssen diese Fahrzeuge dafür zwingend an der Kreuzung halten und eine gewisse Zeit warten. Exemplarische Ergebnisse in Form von Trajektorien, die durch das Simulationsframework für eine Kreuzung berechnet wurden, sind bereits in Abbildung 4-9 gezeigt worden.

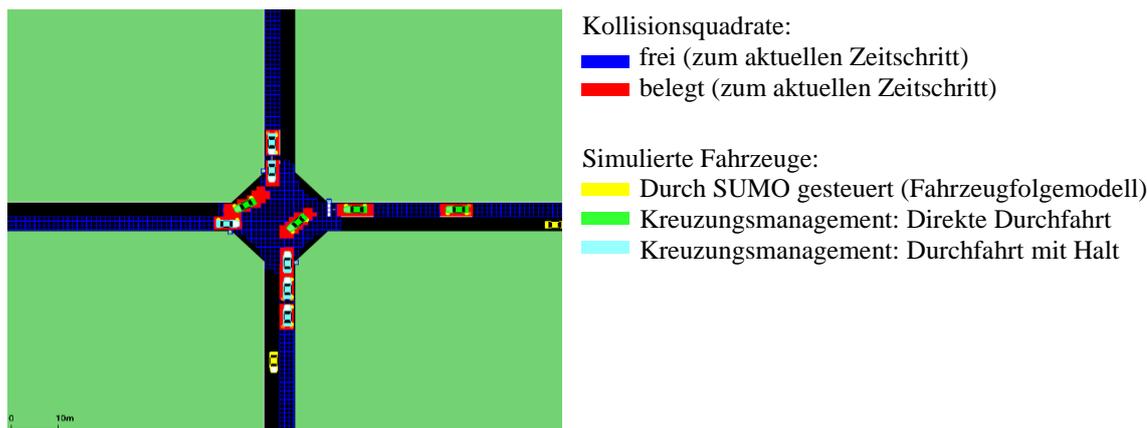


Abbildung 5-17: Screenshot einer Simulation mit Darstellung des Kreuzungsmanagements auf der ersten Hierarchieebene

Die Testfälle der drei ausgewählten Netze (7x7, 14x14 und 18x18) mit synthetischen Blöcken und HVM werden im Folgenden vorgestellt und ausgewertet. Vorausgegriffen kann gesagt werden, dass sich die Ergebnisse in vielen Erkenntnissen den vorigen Resultaten ähneln. Durch die schrittweise Vergrößerung der Netze kann hierbei folglich festgehalten werden, dass der vorgestellte Ansatz zumindest teilweise skaliert, sofern die einzelnen Bilanzräume nicht zu groß werden. Eine vergleichende Übersicht für die Testfälle (2.1), (2.4) und (2.6) ist in Tabelle 11 gegeben.

(2.1) – (2.3): 7x7 Netz (Homogen, Inhomogen, Versagen)

Für das 7x7-Netz werden drei Ergebnisse präsentiert: (2.1) Simulation mit zufällig generierter, homogener Nachfrage, (2.2) Simulation mit zufällig generierter, inhomogener Nachfrage sowie (2.3) Simulation mit schrittweiser Erhöhung der zufälligen homogenen Nachfrage bis zum Versagen des hierarchischen Verkehrsmanagements.

In Abbildung 5-18 ist das Ergebnis für den Testfall (2.1) zu sehen. Es ist deutlich erkennbar, dass sich im Fall ohne HVM viele Stauungen ausbilden und somit eine inhomogene Verkehrsdichteverteilung vorliegt. Mit HVM sind ebenfalls einige Straßen mit erhöhter Verkehrsdichte zu erkennen, jedoch kann hier festgehalten werden, dass das Netz dennoch eine wesentlich homogenere Verkehrsdichteverteilung aufweist. Dass das Netz im

Fall mit HVM hierbei keine perfekt homogene Verteilung aufweist, lässt sich auf die zufällige Zielbestimmung zurückführen.

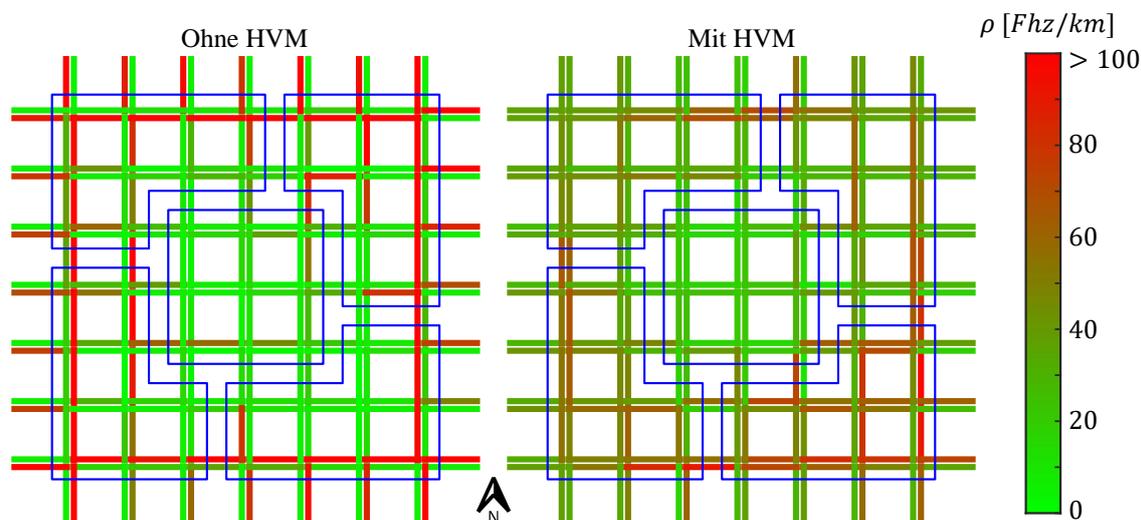


Abbildung 5-18: Vergleich der mittleren Verkehrsdichten des homogenen Szenarios (2.1)

Werden die Vergleichshistogramme für die mittlere Reisegeschwindigkeit sowie -reisezeit betrachtet (vgl. Abbildung 5-19), so lässt sich festhalten, dass hier im Fall mit HVM zwar ein geringerer Mittelwert der mittleren Reisegeschwindigkeit der Fahrzeuge vorliegt, jedoch auch eine deutlich geringere Varianz zu erkennen ist. Außerdem ist im Fall ohne HVM zu sehen, dass ein Teil der Fahrzeuge eine mittlere Reisegeschwindigkeit nahe Null aufweist. Dies begründet sich durch lange Standzeiten von Fahrzeugen, die ihr jeweiliges Ziel zum Ende der Simulation nicht mehr erreicht haben. Die Reisezeiten zeigen in beiden Fällen eine ähnliche Verteilung mit dem Unterschied, dass das System mit HVM hier im Gegensatz zu den synthetischen Verengungen trotz der Regelung eine höhere mittlere Reisezeit aufweist.

Dieser Nachteil wird jedoch durch den wesentlich höheren Fahrzeugdurchsatz von fast 200% aufgewogen, wie in Tabelle 11 gezeigt und beschränkt sich zudem ausschließlich auf das 7x7-Netz. Zusätzlich wird deutlich, dass ein verringerter Verbrauch und geringere Emissionen vorliegen und außerdem keine mittlere Wartezeit im Fall mit HVM vorhanden ist, d.h. Stauungen wurden durch den Ansatz unterdrückt, der Verkehrsfluss blieb über die Simulationsdauer stets erhalten.

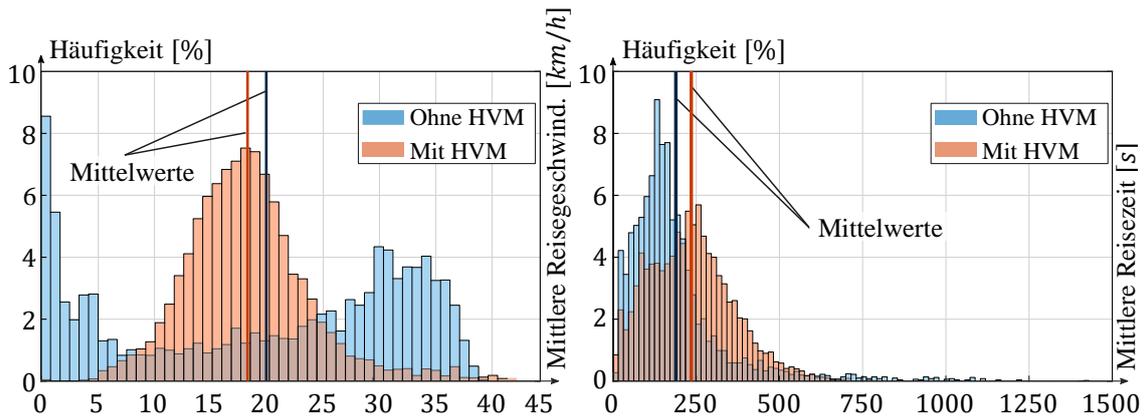


Abbildung 5-19: Vergleichshistogramme der Simulationsergebnisse des 7x7-Netzes (2.1) zur mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit, vertikale Striche: Entsprechende Mittelwerte

Während Testfall (2.1) das Verhalten des Systems für eine homogene Verkehrsnachfrage zeigt, wird im Testfall (2.2) eine inhomogene Nachfrage untersucht. Wie in Abbildung 5-20 dargestellt, wird die nord-östliche Ausgangsstraße e_{out_0} von den Fahrzeugen mit einer dreifach höheren Wahrscheinlichkeit gewählt als die restlichen Ausgangsstraßen. Erwartungsgemäß zeigen die Ergebnisse, dass von der gewählten Ausgangsstraße eine inhomogene Verkehrsdichteverteilung ausstrahlt. In der Simulation ohne HVM sind deutlichere und weitreichendere Auswirkungen erkennbar als dies der Fall mit HVM ist. Hier ist das HVM also in der Lage, das Netz bezüglich des Verkehrsflusses weitestgehend zu homogenisieren, da nur im direkten Umfeld um die Ausgangsstraße erhöhte Verkehrsdichten auftreten.

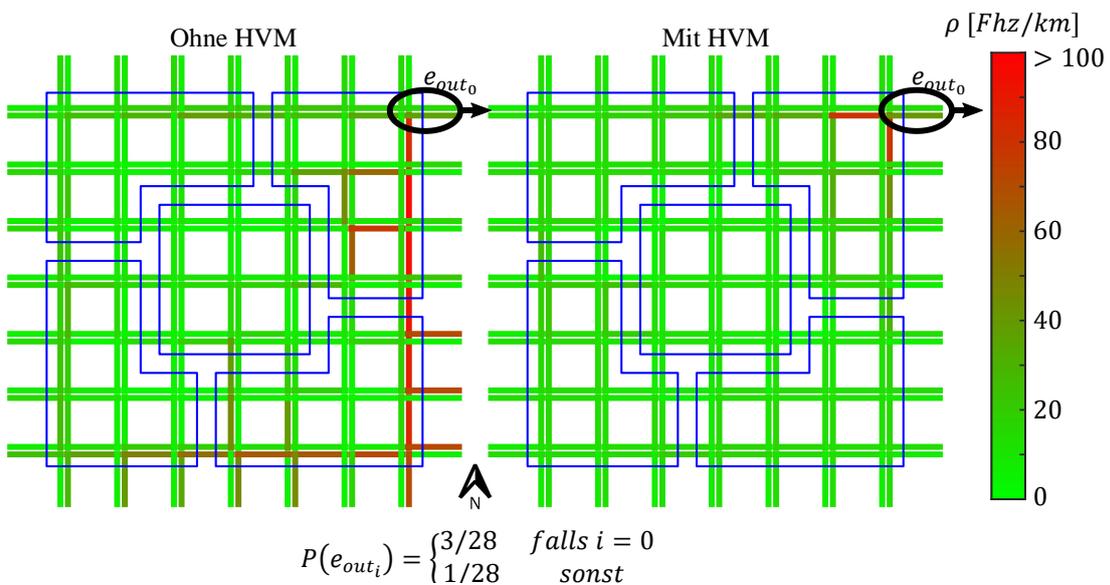


Abbildung 5-20: Vergleich der mittleren Verkehrsdichten des inhomogenen Szenarios (2.2), bei dem Ausgangsstraße e_{out_0} dreimal häufiger zufällig gewählt wird als die restlichen Ausgangsstraßen

Im Test (2.3) wird untersucht, bis zu welcher Verkehrsnachfrage der vorgestellte Ansatz des hierarchischen Verkehrsmanagements in der Lage ist, den Verkehrsfluss zu homogenisieren und zu erhalten und wie sich das Verhalten im Versagensfall gestaltet. In einer 80-minütigen Simulation des 7x7-Netzes mit HVM wird hierzu alle zehn Minuten die homogene Verkehrsnachfrage schrittweise erhöht.

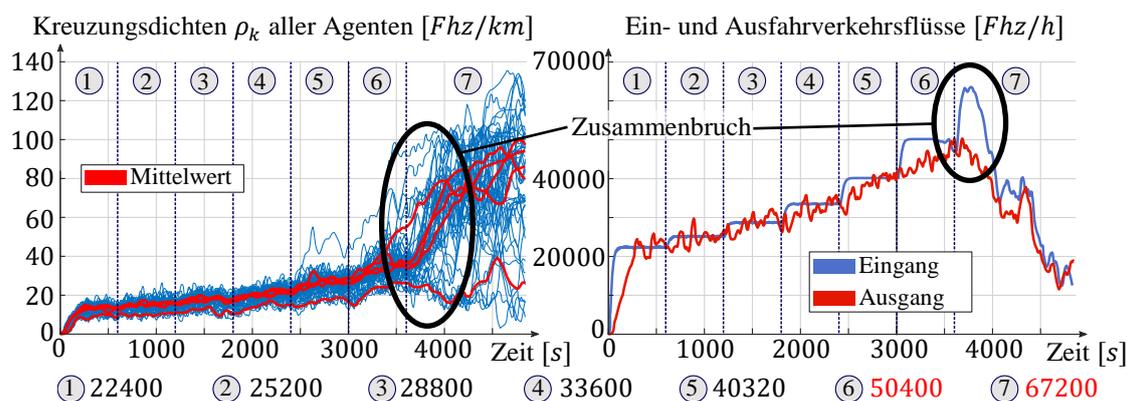


Abbildung 5-21: Untersuchung der Leistungsfähigkeit am 7x7-Netz (2.3): Zusammenbruch des HVM, links: Kreuzungsdichten aller Bilanzräume, rechts: Eingangs- und Ausgangsverkehrsflüsse des Straßennetzes

In Abbildung 5-21 links sind die Kreuzungsdichten aller 49 Agenten sowie die Mittelwerte (Sollverkehrsdichten) als Ergebnis dieser Simulation zu sehen. Abbildung 5-21 rechts zeigt zusätzlich die zugehörigen Einfahrtsverkehrsflüsse, die in den Zeitintervallen 1 bis 7 entsprechend erhöht werden sowie die Ausfahrtsverkehrsflüsse jener Fahrzeuge, die ihr Ziel erreichen. Es ist gut zu erkennen, dass das HVM die Verkehrsdichten in den ersten 3000 Sekunden bis auf einen Ausreißer sehr gut homogenisieren kann und auch die Ein- und Ausfahrtsverkehrsflüsse nahe beieinanderliegen. Es verlassen also in etwa so viele Fahrzeuge das Netz, wie neue Fahrzeuge einfahren. Ab 3000 Sekunden (Intervall 6) ist jedoch ein gänzlich anderes Verhalten zu erkennen, denn hier scheint der Ansatz des HVM an seine Grenzen zu stoßen. Die Verkehrsdichten können nicht weiter homogenisiert werden und driften auseinander. In den Ein- und Ausfahrtsflüssen ist zu erkennen, dass die Eingangsverkehrsflüsse hier für längere Zeit deutlich über den Ausgangsverkehrsflüssen liegen, d.h. das Netz „sammelt“ zu diesem Zeitpunkt Fahrzeuge an, wodurch die steigende Verkehrsdichte erklärt werden kann. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt entstehenden Stauungen im Netz kann die geplante Nachfrage (also die Summe der Eingangsverkehrsflüsse) nicht bedient werden, sodass ab Intervall 7 ein Zusammenbruch in den Verkehrsflüssen zu erkennen ist. Ab diesem Zeitpunkt ist in den Verkehrsflüssen insgesamt eine stark sinkende Tendenz zu erkennen. Es kann folglich festgehalten werden, dass die Funktion der Homogenisierung und Erhaltung der Verkehrsflüsse des vorgestellten hierarchischen Verkehrsmanagements nur bis zu einer vom jeweiligen Netz

abhängigen maximalen Verkehrsnachfrage erfüllt werden kann. Das entsprechende Versagen des Ansatzes bei weiterer Erhöhung der Nachfrage kündigt sich demnach durch auseinanderdriftende Kreuzungsdichten an. Ein Wiederherstellen homogener Verkehrsflüsse ist nach einem solchen Zusammenbruch nur durch eine anhaltende drastisch reduzierte Verkehrsnachfrage möglich.

(2.4), (2.5): 14x14 Netz (Homogen, Homogen + Umschaltung)

Analog wie im Fall des 7x7-Netzes wird im Anschluss ein Simulationsergebnis für das herangezogene 14x14-Netz gezeigt. Zunächst ist in Abbildung 5-22 das Ergebnis der mittleren Verkehrsdichten aller im Netz befindlichen Straßen zu sehen. Deutlich ist im Fall ohne HVM anhand der roten Färbungen zu erkennen, dass sich mehrere andauernde Stauungen ausbilden und der zentral gelegene Bilanzraum stärker ausgelastet ist als die restlichen. Dies kann auf die zufällige Routenwahl zurückgeführt werden, die in dieser Simulation zu einer erhöhten Zahl an Routen durch den zentral gelegenen Bilanzraum geführt hat. Die sich dadurch ausgeprägten Stauungen „strahlen“ danach wieder in umliegende Straßen aus. Im Fall mit HVM ist ebenfalls zu erkennen, dass der zentral gelegene Bilanzraum eine erhöhte mittlere Verkehrsdichte aufweist, jedoch ohne Stauausprägungen. Der Verkehrsfluss bleibt in diesem Fall zu jeder Zeit erhalten. Dieselbe Erkenntnis ist auch in den Vergleichshistogrammen in Abbildung 5-23 zu sehen: Im Fall mit HVM ist die mittlere Reisegeschwindigkeit um einen 19% höher als im Fall ohne HVM und zum anderen ist die Streuung ebenfalls deutlich geringer. Im Fall ohne HVM existieren viele Fahrzeuge mit sehr geringer Reisegeschwindigkeit, was sich auf entsprechende Halte und Wartezeiten durch Stauungen zurückführen lässt. Die mittlere Reisezeit ist im Fall mit HVM ebenfalls verbessert, die Fahrzeuge benötigen durch den aufrechterhaltenen Verkehrsfluss im Mittel 11% weniger Zeit, um an ihr Ziel zu gelangen. Zudem gibt es keine Fahrzeuge, die eine Reisezeit von mehr als 400s benötigen haben.

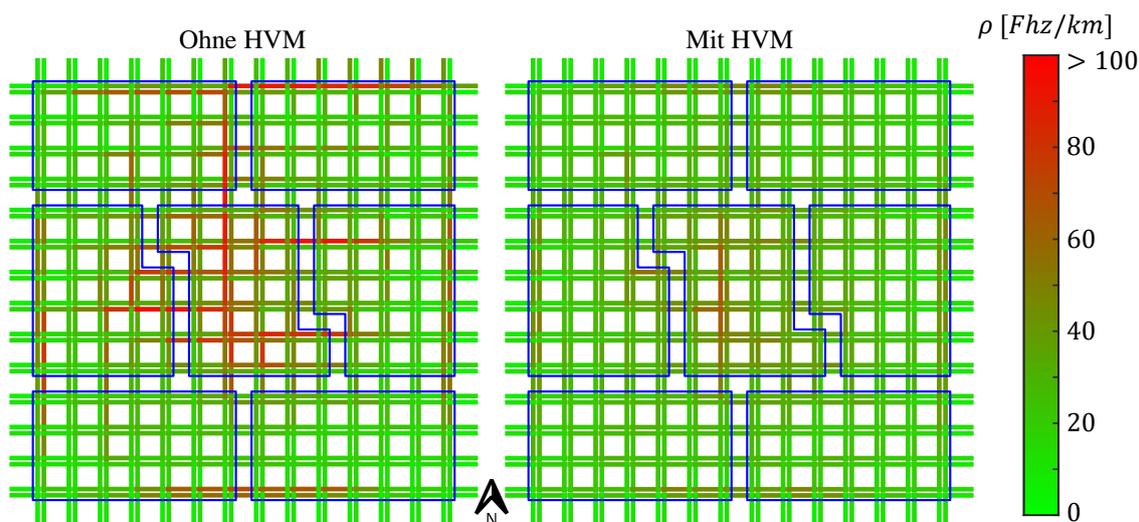


Abbildung 5-22: Vergleich der mittleren Verkehrsdichten für das homogene Szenario des 14x14-Netzes (2.4)

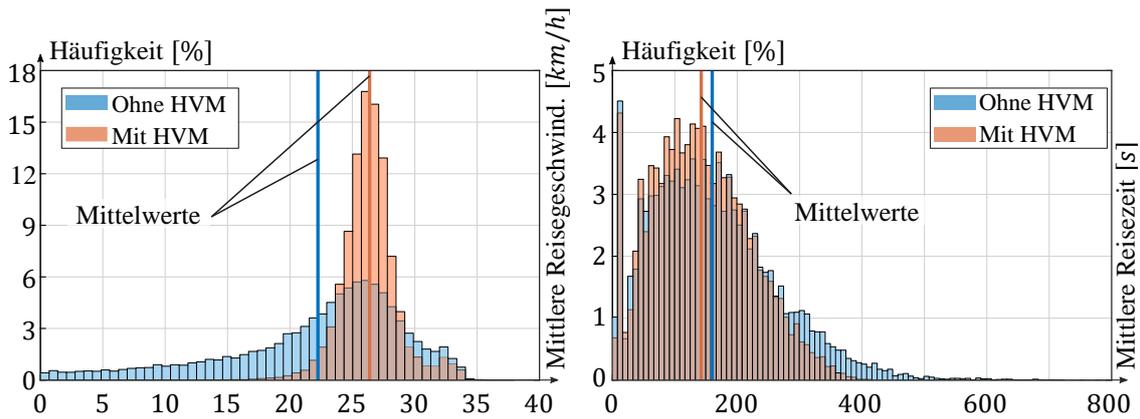


Abbildung 5-23: Vergleichshistogramme der Simulationsergebnisse des 14x14-Netzes (2.4) zur mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit, vertikale Markierungen: Entsprechende Mittelwerte

Im Testfall (2.5) soll nun für dasselbe 14x14-Netz untersucht werden, welche Wirkung das HVM hat, wenn dieses nicht dauerhaften Einfluss auf den Verkehr nimmt, sondern erst in einer sehr stark ausgelasteten Verkehrssituation aktiviert wird. Hierzu wird eine 90-minütige Simulation ausgewertet, die zunächst eine 30-minütige Phase ohne HVM aufweist. Nach 30 Minuten wird das in der Arbeit entwickelte HVM aktiviert und untersucht, ob die Verkehrssituation verbessert werden kann und etwaige Störungen im Verkehrsfluss behoben werden können. Als Ergebnis sind weniger Stauungen, ein erhöhter Durchsatz und eine höhere mittlere Reisegeschwindigkeit ab dem Umschaltzeitpunkt zu erwarten.

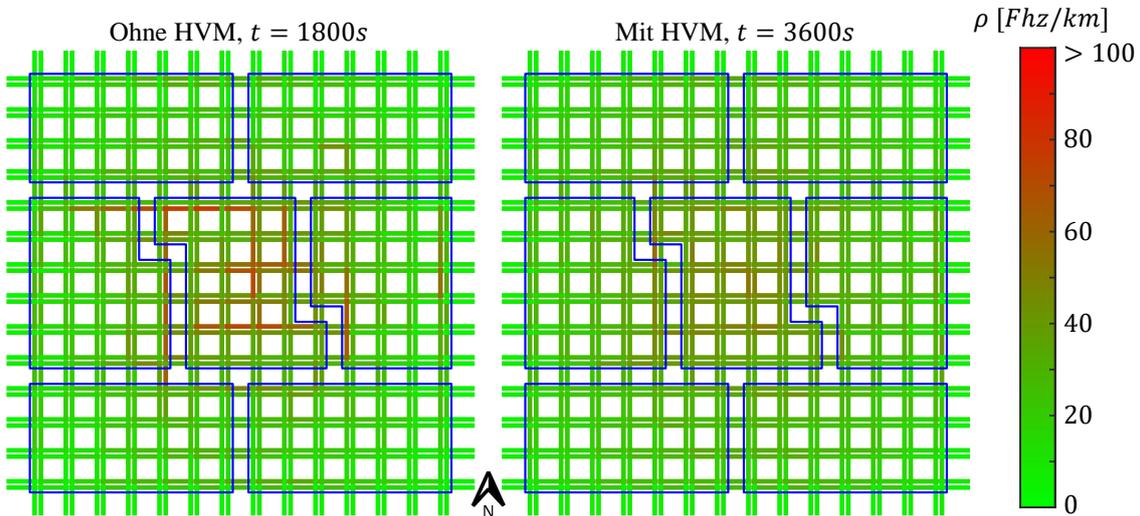


Abbildung 5-24: Vergleich der mittleren Verkehrsdichten bei verzögerter Aktivierung des HVM bei 1800s für das homogene Szenario des 14x14-Netzes (2.4)

Abbildung 5-24 zeigt das Ergebnis der Aktivierung des HVM ab Sekunde 1800 für das 14x14-Netz. Es ist beim Vergleich von der linken zur rechten Darstellung zu erkennen,

dass sich die zuvor ausgeprägte Inhomogenität der Verkehrsdichteverteilung im Zentrum des Netzes entspannt. Das Netz weist somit nach 3600 s einen deutlich homogenen Zustand auf als zum Vergleichszeitpunkt. Dies ist auch in den Kreuzungsdichten zu erkennen, die in Abbildung 5-25 gezeigt werden. Bis zum Umschaltzeitpunkt liegt eine inhomogene Verteilung der Kreuzungsdichten vor. Ab dem Zeitpunkt der Aktivierung ist eine deutliche Änderung in den Verläufen zu erkennen. Das HVM sorgt dafür, dass sich die Zustände angleichen, was ca. innerhalb von 150 s zu einer homogenen Dichteverteilung führt. Ebenfalls lässt sich ein positiver Einfluss auf den Ausfahrverkehrsfluss feststellen. Dieser steigt durch die Aktivierung merklich an, was von einer erhöhten Durchsatzfähigkeit des HVM zeugt.

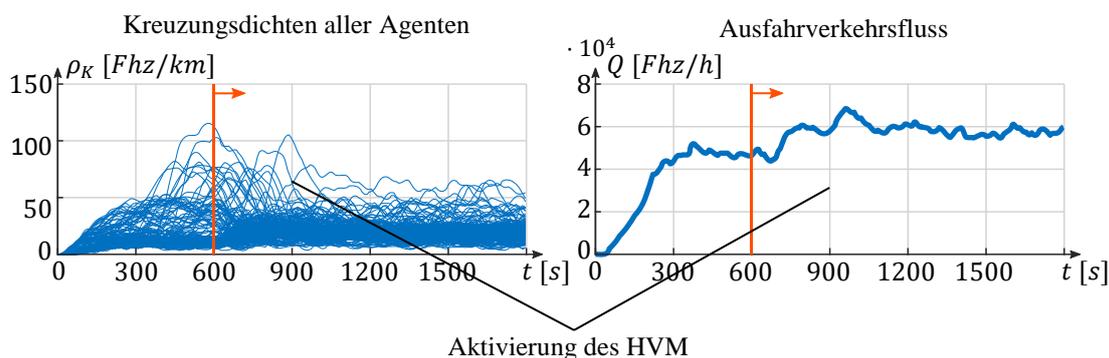


Abbildung 5-25: Einfluss des HVM bei Aktivierung

(2.6): 18x18 Netz (Homogen)

Das letzte zu untersuchende Netz der Gruppe der synthetischen Blöcke ist das 18x18-Netz. Abbildung 5-26 zeigt das Ergebnis der mittleren Verkehrsdichten über den simulierten Zeitraum. Gut erkennbar sind die ausgeprägten Verkehrsstörungen im Inneren des Netzes im Fall ohne HVM. Mit aktiviertem HVM sind lediglich leicht erhöhte Verkehrsdichten im Zentrum zu sehen. Das restliche Netz weist sonst einen sehr homogenen Zustand auf und zeigt, dass die Ziele des Ansatzes erfüllt werden. Da sich die Vergleichshistogramme ähnlich zu den bisherigen Ergebnissen verhalten und daher wenig neue Erkenntnisse bringen, wird darauf verzichtet, diese wiederholt anzuführen.

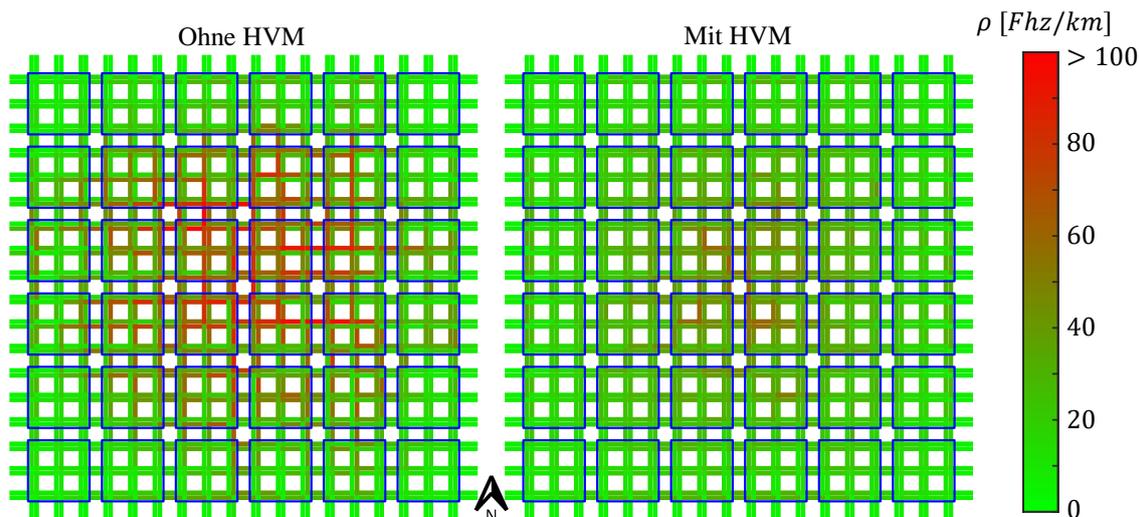


Abbildung 5-26: Vergleich der mittleren Verkehrsdichten für das homogene Szenario des 18x18-Netzes (2.5)

Stattdessen wird in Abbildung 5-27 ein Vergleich der Kreuzungsdichten, der Netzdichten sowie des Fahrzeugdurchsatzes gezeigt. Da das 18x18-Netz 324 Kreuzungen enthält, existieren in der zweiten Hierarchieebene des HVM entsprechend 324 Kreuzungsagenten, die jeweils innerhalb ihres Bilanzraums (36 Stück) mit den anderen Kreuzungsagenten kommunizieren und die Verkehrsdichten homogenisieren. In Abbildung 5-27 oben links können alle 324 Agentenzustände (also die Kreuzungsdichten gemäß Gleichung (4-49)), für den Fall ohne und mit HVM eingesehen werden. Auch wenn die einzelnen Verläufe nicht zu unterscheiden sind, ist ein wesentlicher Unterschied erkennbar: Im Fall ohne HVM ist beobachtbar, dass die Verkehrsdichten ab ca. 1000 s stark voneinander abweichen. Außerdem sind viele sehr hohe Verkehrsdichten zu erkennen. Im Fall des aktiven HVM ist hingegen zu sehen, dass alle Verkehrsdichten näher beieinander liegen. Der vorgestellte Ansatz ist also in der Lage, die Verkehrsdichten zu homogenisieren. Dasselbe Erkenntnis lässt ebenso in Abbildung 5-27 unten links ableiten, wo die Netzdichten aller 36 Bilanzräume dargestellt sind. Während im Fall ohne HVM mehrere Bilanzräume wesentlich stärker ausgelastet sind als andere, ist die Auslastung im Fall mit HVM für alle Bilanzräume vergleichbar.

Der Ausfahrverkehrsfluss ist zunächst ähnlich für beide Fälle, wie dies in Abbildung 5-27 oben rechts zu sehen ist. Jedoch nimmt dieser im Fall ohne HVM aufgrund der Störungen im Verkehrsfluss ab ca. 1000 s derart stark ab, dass hier ein Verkehrszusammenbruch vorliegt. Mit HVM ist dies aufgrund der erfolgreichen Homogenisierung nicht der Fall.

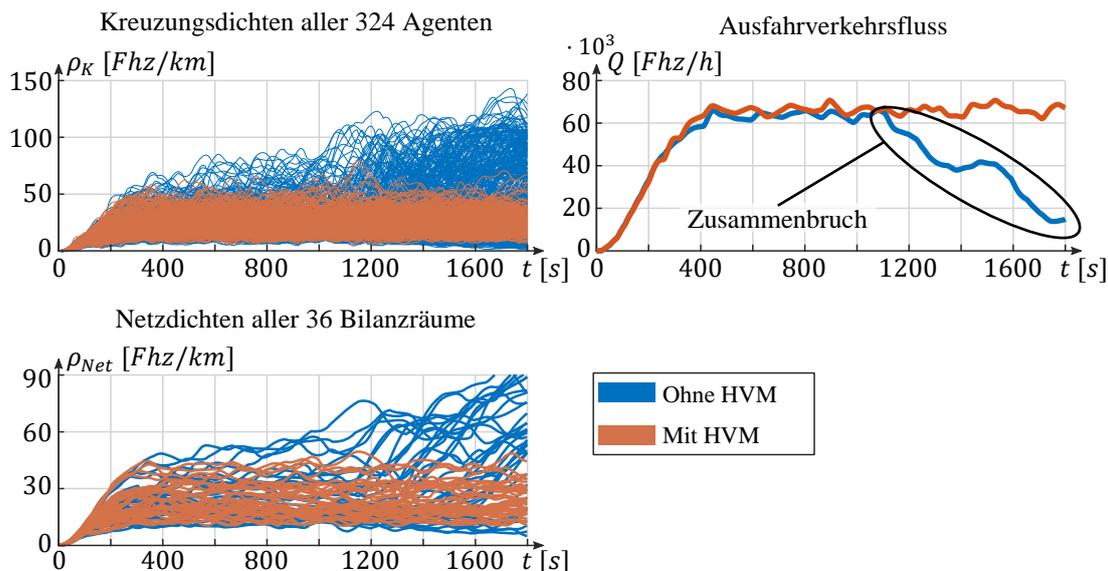


Abbildung 5-27: Verlauf der Kreuzungsdichten aller 324 Agenten Netzverkehrsdichten aller 36 Bilanzräume und des Durchsatzes im 18x18-Netz für Testfall (2.6)

Aufgrund der Größe eignet sich das 18x18-Netz besonders, um den Einfluss des hierarchischen Verkehrsmanagements auf mikroskopischer Ebene darzustellen. In Abbildung 5-28 ist für ein einzelnes Fahrzeug der Simulation dargestellt, wie sich einerseits die dynamische Routenplanung und -zuweisung und andererseits die Vorgabe der Sollgeschwindigkeit ausgewirkt hat. Links in Abbildung 5-28 ist in Rot dargestellt, welche Route das Fahrzeug tatsächlich bei der Durchquerung des Straßennetzes gefahren ist. Die in Orange hervorgehobenen Routenteile stellen die während der Fahrt dynamisch geplanten und dem Fahrzeug zugewiesenen Routen dar, die jedoch letztendlich nicht umgesetzt wurden. Der Grund für die Umplanungen können einerseits aus der zweiten Hierarchieebene resultieren, in welcher die Umplanung innerhalb eines Bilanzraums aufgrund der Verkehrsdichte und zu erwartenden Reisezeit entlang der Route geschieht. Weitere Umplanungen, die sich über mehrere Bilanzräume erstrecken, resultieren andererseits aus der dritten Hierarchieebene, denn hier wird der Zustand jedes Bilanzraums als Grundlage zum Routing herangezogen. Gut zu erkennen ist hier zudem, dass je nachdem, welche der Routen letztendlich umgesetzt wird, die Fahrstrecken in der Länge variieren und der damit einhergehende Nachteil der Umwege erklärt werden kann. Auf der rechten Seite in Abbildung 5-28 ist der Einfluss des Kreuzungsmanagements auf den Durchschnitts-Konsensalgorithmus für dasselbe Fahrzeug zu sehen. Wird eine mittlere Sollgeschwindigkeit durch den Durchschnitts-Konsensalgorithmus an das Fahrzeug vorgegeben (roter Verlauf), so ist das Fahrzeug nicht immer in der Lage, dieser makroskopisch basierten Vorgabe zu folgen. Grund hierfür ist zum Beispiel, dass die mikroskopische Verkehrssituation die Umsetzung nicht zulässt, weil beispielsweise Kreuzungen kollisionsfrei passiert werden müssen. Genau diese wechselnde Zuständigkeit ist in Abbildung 5-28 rechts zu

erkennen. Die Kontrolle über das Fahrzeug liegt abwechselnd beim Kreuzungsmanagement, welches das Fahrzeug kollisionsfrei durch die Kreuzung führt und beim Durchschnitts-Konsensalgorithmus, der eine mittlere Sollgeschwindigkeit vorgibt, die das Fahrzeug einhalten soll. Es ist zu erkennen, dass immer dann, wenn das Kreuzungsmanagement die Kontrolle über das Fahrzeug besitzt (rötliche Flächen), der Vorgabe der mittleren Sollgeschwindigkeit durch den Durchschnitts-Konsensalgorithmus nicht mehr gefolgt werden kann. Sobald eine Kreuzung vom Fahrzeug passiert wurde, ist zu dann allerdings zu beobachten, dass das Fahrzeug wieder der Sollvorgabe zu folgen beginnt (s. z.B. bei 50 s, grüner Bereich). Das Nichtbefolgen der Sollvorgaben für die mittlere Geschwindigkeit kann einen negativen Einfluss auf die Wirksamkeit der Funktion der zweiten Hierarchieebene des Verkehrsmanagements haben. Dieses Phänomen kann den zu Beginn der Arbeit erwähnten Wechselwirkungen zwischen den Abstraktionsebenen des Verkehrs zugeordnet werden. Für die sichere Durchquerung des Straßennetzes für autonome Fahrzeuge ist dies jedoch eine zwingend notwendige Einschränkung.

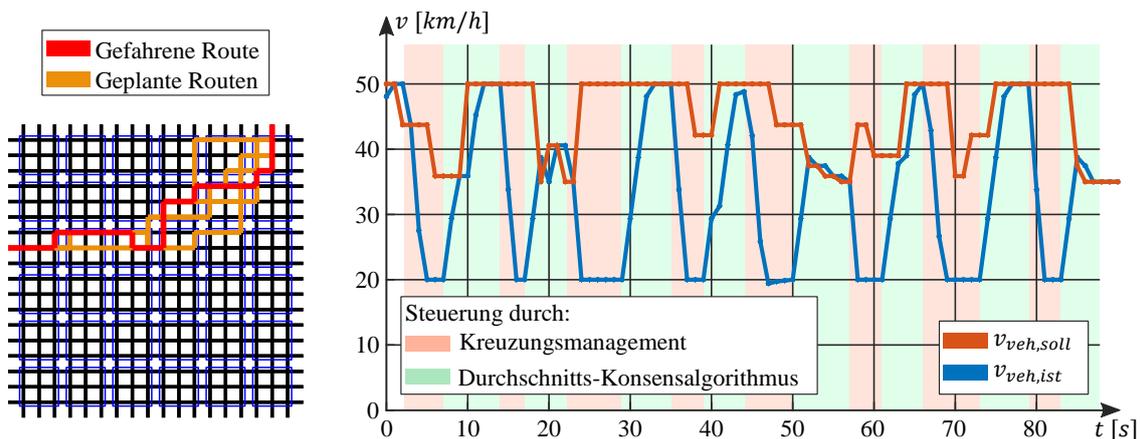


Abbildung 5-28: Beispiel für Einzelfahrzeuginformationen zur Simulation des 18x18-Netzes (2.6)

In Tabelle 11 sind für die Testfälle (2.1), (2.4) und (2.6) detaillierte Simulationsergebnisse zu sehen. Wie bereits beschrieben, hat das HVM durchweg positiven Einfluss in den Vergleichsszenarien. Der Fahrzeugdurchsatz ist in allen Fällen deutlich gesteigert. Auch die mittleren Reisezeiten und die mittleren Geschwindigkeiten haben sich mit Ausnahme des 7x7-Netzes verbessert. Die in der Simulation ermittelten Emissionen haben sich ebenfalls in allen Testfällen deutlich verbessert. Dieses Resultat ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass in den Fällen mit HVM keine Wartezeiten auftreten, während in den Fällen ohne HVM durch Stauungen verursachte Wartezeiten zu bemerken waren.

Tabelle 11: Ausgewählte Simulationsergebnisse für drei exemplarische Szenarien mit synthetischen Blöcken.

Messgrößen bezogen auf Gesamtflotte				Messgrößen pro Fahrzeug					
Testfälle synthetische Blöcke		2.1 7x7	2.4 14x14	2.6 18x18	Testfälle synthetische Blöcke		2.1 7x7	2.4 14x14	2.6 18x18
Gesamtdurchsatz [Fhz]	ohne HVM	5056	21693	22357	Mittlere Reisezeit [s]	ohne HVM	189	162	185
	mit HVM	9814	24167	28912		mit HVM	235	144	167
	↑/↓ ?	+94%	+11%	+29%		↑/↓ ?	+25%	-11%	-10%
Maximaler Durchsatz [$\frac{Fhz}{h}$]	ohne HVM	17428	45292	52413	Mittlere Fahrdistanz [m]	ohne HVM	934	987	1044
	mit HVM	19939	48559	58050		mit HVM	1082	1075	1261
	↑/↓ ?	+14%	+7%	+11%		↑/↓ ?	+16%	+9%	+21%
Mittlere Anzahl Fahrzeuge im System [-]	ohne HVM	1577	3086	8180	Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	ohne HVM	20	24	21
	mit HVM	1068	2135	3018		mit HVM	19	28	28
	↑/↓ ?	-32%	-43%	-63%		↑/↓ ?	-8%	+19%	+34%
Änderung Verbrauch und Emissionen nach HBEFA [%]	Treibstoff	-74%	-31%	-50%	Mittlere Wartezeit [s]	ohne HVM	25	3	11
	CO ₂	-14%	-8%	-11%		mit HVM	0	0	0
	NO _x	-17%	-12%	-16%		↑/↓ ?	-100%	-100%	-100%

Test 3.x: Synthetisch organisches Netz

Als Übergang zu den beiden realen Netzen (4.1) und (4.2) wird im Folgenden zunächst das Simulationsergebnis für ein automatisch generiertes, organisches Netz vorgestellt, das die wesentlichen Merkmale für europäische urbane Straßennetze aufweist: Ein eng vermaschter Innenbereich, der durch eine Ringstruktur vom weniger dichten Außenbereich getrennt ist. Diese Struktur ist in vielen europäischen Städten wiederzufinden, die historische Begründung hierfür wurde bereits in Kapitel 4.3.5 gegeben.

Besonderheit bei der Untersuchung ist, wie dies auch bei den realen Netzen sein wird, dass nun Effekte auftreten können, die sich aus der besonderen bzw. charakteristischen Topologie des betrachteten Straßennetzes ergeben. So sind negative Verkehrseffekte zu erwarten, die durch die Topologie begünstigt werden und somit vom hierarchische Verkehrsmanagement nur begrenzt oder gar nicht verhindert werden können.

Wie in Abbildung 5-29 zu sehen ist, gleichen die Simulationsergebnisse auch hier prinzipiell den vorherigen. Ohne das HVM sind vermehrt überbelastete Straßen im Straßennetz zu erkennen, die vornehmlich zum Ring führen. Ist das HVM aktiv, so findet sich

eine deutlich homogenere Verkehrsdichte im Netz, einzelne Straßen weisen dennoch eine leichte Erhöhung auf.

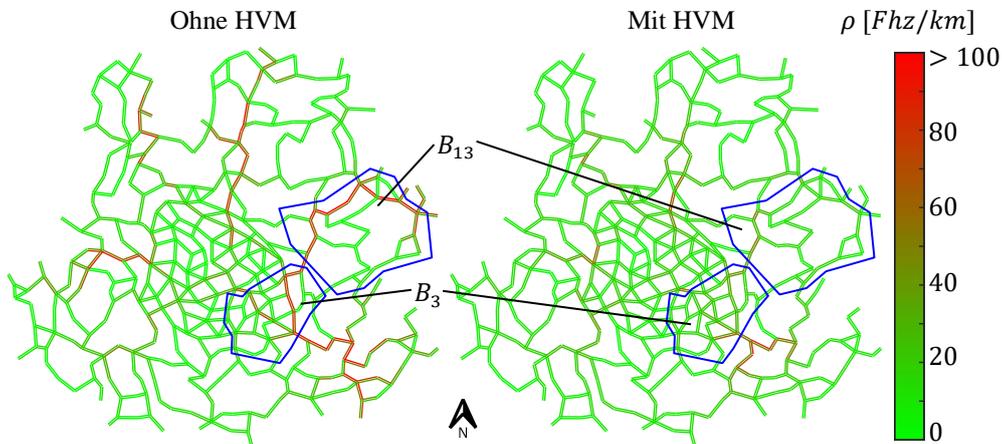


Abbildung 5-29: Exemplarische Simulationsergebnisse der mittleren Verkehrsdichte im synthetisch organischen Straßennetz (3.1)

Werden exemplarisch die beiden Bilanzräume B_3 und B_{13} (siehe Markierungen in Abbildung 5-29) näher betrachtet, so zeigt sich in Abbildung 5-30, dass die Kreuzungsdichten im Fall ohne HVM deutliche Unterschiede aufweisen und vereinzelt Stauungen auftreten. Mit aktiviertem HVM ist die Homogenisierung der Verkehrsdichte erneut möglich, es zeigt sich jedoch ein Ausreißer im Bilanzraum B_3 . Die südöstlich gelegene Zubringerstraße, die auch im Fall ohne HVM überlastet ist, zeigt sich als besonders neuralgische Stelle im Straßennetz. Selbst im Fall des aktiven HVM weist diese Straße eine deutlich höhere mittlere Verkehrsdichte auf, jedoch ist ein „ausstrahlender“ Effekt auf die umgebenden Straßen, wie im Fall ohne HVM, nicht zu erkennen.

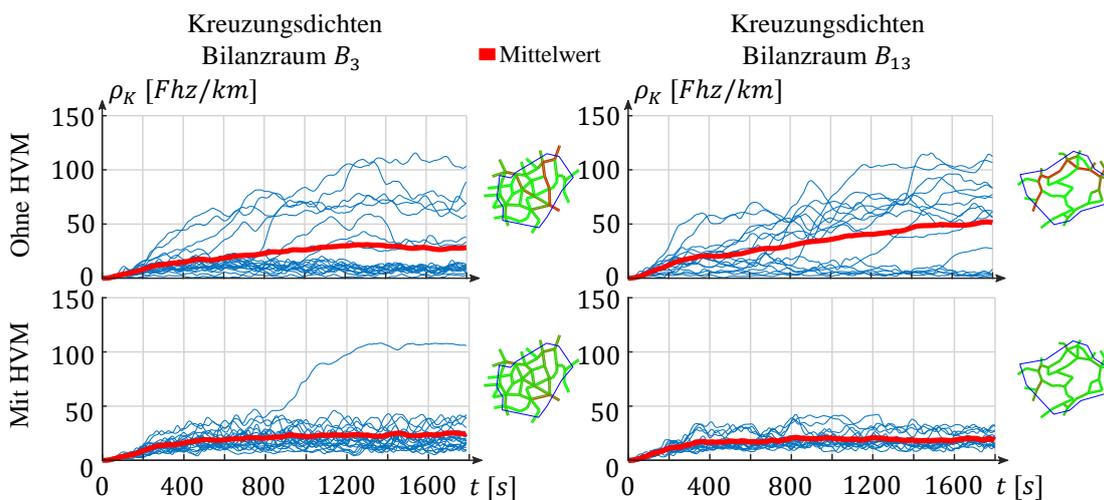


Abbildung 5-30: Vergleich der Kreuzungsdichten in Bilanzräumen B_3 und B_{13} (ohne / mit HVM) des synthetisch organischen Straßennetzes (3.1)

In den vergleichenden Histogrammen (Abbildung 5-31) zur mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit sind ebenfalls große Unterschiede zu verzeichnen. Die mittlere Reisegeschwindigkeit zeigt auch in diesem Fall eine wesentlich geringere Streuung für das aktive HVM, zudem ist der Mittelwert mit 35 km/h um etwa 33% höher als ohne HVM ist. Auch die Reisezeit konnte durch das HVM um 11% reduziert werden und weist weniger Fahrzeuge mit erheblich längerer Reisezeit ($> 600 \text{ s}$) auf. In Tabelle 12 sind abschließend weitere detaillierte Ergebnisse der Simulation des synthetischen organischen Netzes zu entnehmen.

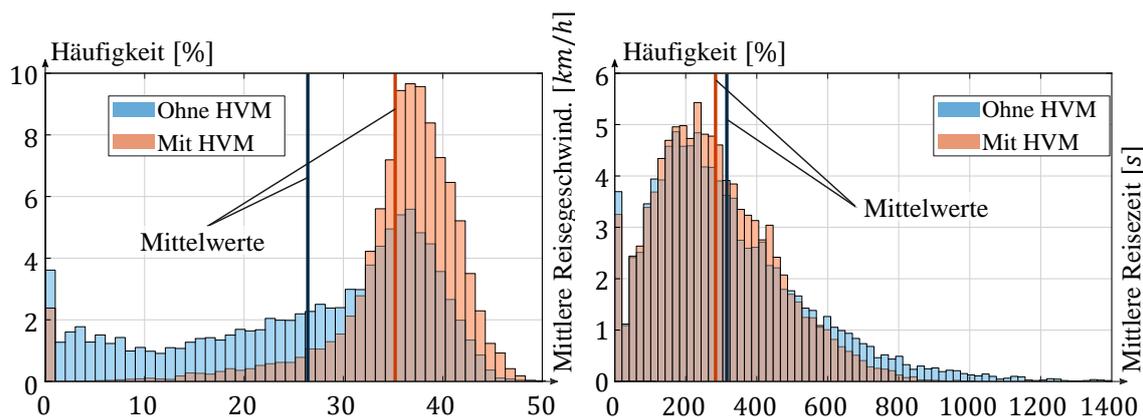


Abbildung 5-31: Vergleichshistogramme der Simulationsergebnisse (3.1) zur mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit

Abbildung 5-32 zeigt die vergleichenden Ergebnisse für alle 190 Kreuzungsagenten sowie für alle 17 Bilanzräume. Die organische Struktur des Straßennetzes weist bezüglich der Ergebnisse Ähnlichkeiten zu denen der synthetischen Blöcke auf, es ist jedoch wie zuvor zu erkennen, dass einzelne Kreuzungen auch im Fall des aktiven HVM deutlich erhöhte Verkehrsdichten aufweisen (Abbildung 5-32 oben links). Dies kann auf charakteristische Eigenschaften des Straßennetzes mit den zufälligen Routenwahlen in der Simulation zurückgeführt werden. Obwohl einzelne Straßen auch im Fall mit HVM Überlastungen aufweisen, so ist kein nachhaltig negativer Effekt auf umliegende Straßen erkennbar und alle Bilanzräume können einen etwa gleichen Zustand erhalten, wie dies in Abbildung 5-32 unten links durch die Netzdichten der Bilanzräume dargestellt ist. Zudem kann festgehalten werden, dass das HVM das System stabilisiert, denn im Unterschied zu den Ergebnissen ohne HVM ist keine Tendenz steigender Verkehrsdichten zu erkennen. Dies lässt sich auch mithilfe des Ausfahrverkehrsflusses belegen, der im Fall ohne HVM über der Zeit abnimmt und mit aktivem HVM um ein gleichbleibendes Niveau schwingt.

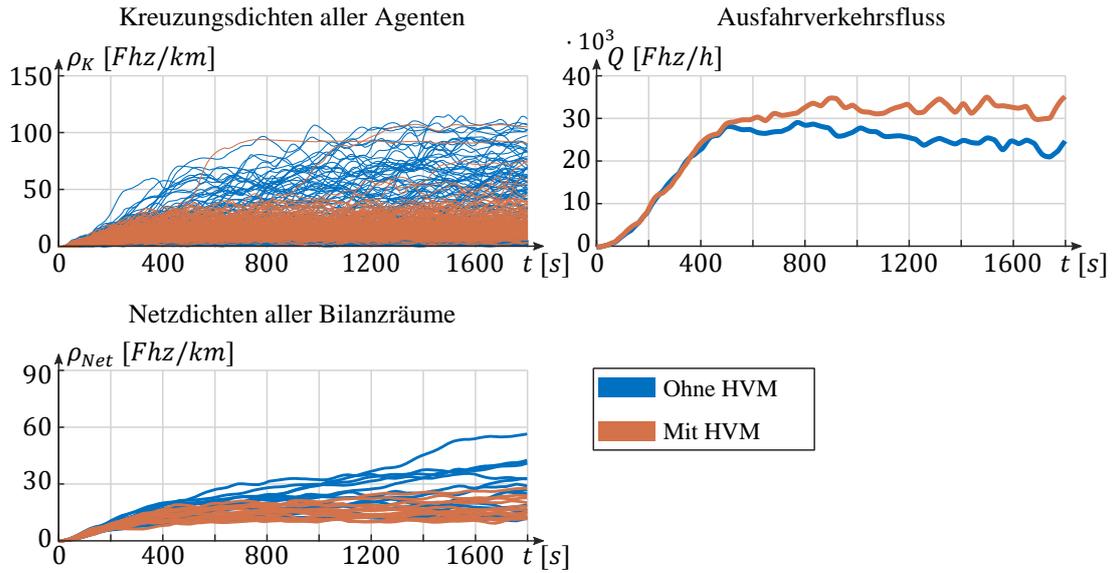


Abbildung 5-32: Vergleich der Ergebnisse 3.1 aller Bilanzräume (ohne / mit HVM) des synthetisch organischen Straßennetzes (pro Bilanzraum eine Kurve)

Tabelle 12: Ausgewählte Simulationsergebnisse für die Simulation des synthetisch organischen Straßennetzes

Messgrößen bezogen auf Gesamtflotte			Messgrößen pro Fahrzeug		
Testfälle synthetisch organisch		3.1 Normal	Testfälle synthetisch organisch		3.1 Normal
Gesamtdurchsatz [Fhz]	ohne HVM	10969	Mittlere Reisezeit [s]	ohne HVM	314
	mit HVM	13292		mit HVM	283
	↑/↓ ?	+21%		↑/↓ ?	-10%
Maximaler Durchsatz $\left[\frac{Fhz}{h}\right]$	ohne HVM	22036	Mittlere Fahrdistanz [m]	ohne HVM	2107
	mit HVM	26703		mit HVM	2625
	↑/↓ ?	+21%		↑/↓ ?	+25%
Mittlere Anzahl Fahrzeuge im System [-]	ohne HVM	4522	Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	ohne HVM	26
	mit HVM	3068		mit HVM	35
	↑/↓ ?	-32%		↑/↓ ?	+33%
Änderung Verbrauch und Emissionen nach HBEFA [%]	Treibstoff	-55%	Mittlere Wartezeit [s]	ohne HVM	3
	CO ₂	±0%		mit HVM	0
	NO _x	-7%		↑/↓ ?	-100%

Test 4.x: Reale Netze

Abschließend werden die Simulationsergebnisse für die beiden realen Straßennetze Bielefeld-Ost und Paderborn präsentiert. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es durch die genannten Vereinfachungen zu ungewöhnlichen Verkehrsflüssen kommen kann, die es in der Realität üblicherweise nicht in derselben Form gibt. Dies ist z.B. darauf zurückzuführen, dass die automatisierte Modellgenerierung der Straßennetze im Simulationsframework dafür sorgt, dass alle Straßen als gleichartig verstanden werden, es wird also für diese Untersuchung nicht zwischen Hauptstraße, Nebenstraße, Spielstraße usw. unterschieden. Üblicherweise höher belastete Hauptstraßen bedürften einer aufwendigen Verkehrszählung, um dies in der Simulation abzubilden, insbesondere in den Randgebieten, in denen das Straßennetz aufgetrennt ist. Aufgrund der vereinfachenden Annahmen und zur besseren Vergleichbarkeit wird wie zuvor von einem hohen zufällig verteilten Verkehr ausgegangen. Dennoch können sich besondere Effekte aufgrund der Straßennetztopologie ergeben. Eine detailliertere Betrachtung der Netzbestandteile könnte in weiterführenden Arbeiten fokussiert werden.

4.1: Bielefeld-Ost

Das Bielefeld-Ost-Szenario ist ein Straßennetausschnitt der Stadt Bielefeld, das den Innenstadtring peripher im Osten schneidet und eine Vielzahl an eng vermaschten Straßen beinhaltet.

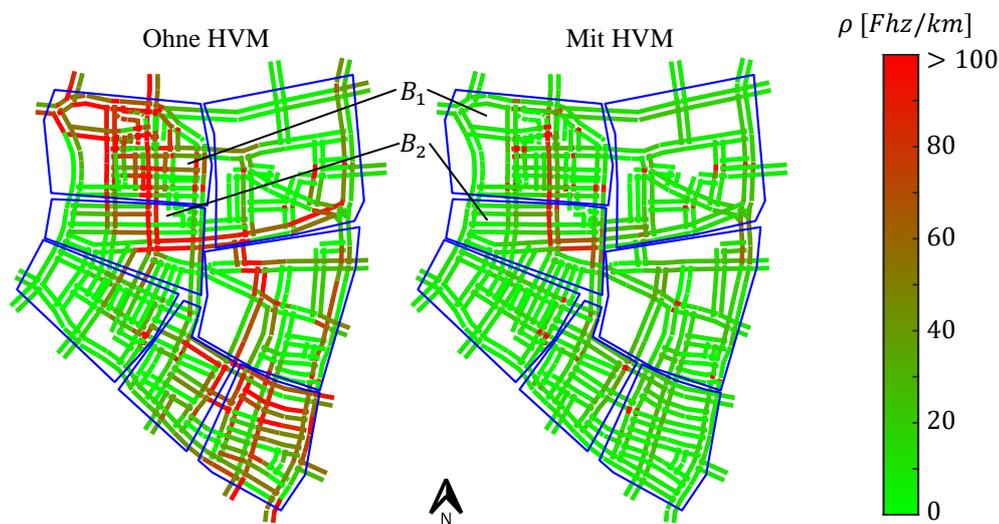


Abbildung 5-33: Vergleich der mittleren Verkehrsdichten für das reale Szenario Bielefeld-Ost (4.1)

Abbildung 5-33 zeigt das Simulationsergebnis der mittleren Verkehrsdichten. Es ist zu erkennen, dass sich einige Stauungen im Fall ohne HVM ausprägen, die sich dann an vielen Stellen auf benachbarte Straßen auswirken. Daher resultieren auch zwei Umge-

bungen (nordwestlich und südöstlich), die bedeutend höhere Verkehrsdichten als das restliche Netz aufweisen. Mit aktivem HVM sind diese Effekte fast vollständig verschwunden und damit dieses verkehrstechnische Problem behoben.

Lediglich in den markierten Bilanzräumen B_1 und B_2 sind ebenfalls mit HVM erhöhte Verkehrsdichten und Stauungen zu sehen. Diese konzentrieren sich jedoch auf wenige einzelne Straßen und haben keinen „ausstrahlenden“ Charakter. Der Verkehrsfluss in den übrigen Straßen bleibt also erhalten.

Werden die zeitlichen Verläufe der Kreuzungsdichten in diesen beiden Bilanzräumen näher betrachtet, so ist ein analoges Ergebnis beobachtbar, siehe Abbildung 5-34. Im Szenario ohne aktives HVM weisen einige Kreuzungen im Bilanzraum B_1 sehr inhomogene und teilweise hohe Verkehrsdichten ($>150 \text{ Fhz/km}$) auf. D.h. viele Fahrzeuge standen dicht gedrängt im Stau, während andere Straßen unausgelastet blieben. Für Bilanzraum B_2 ist ein ähnliches Ergebnis ohne HVM zu sehen, jedoch ohne derart extreme mittlere Verkehrsdichten. In beiden Bilanzräumen ist für den Fall des aktiven HVM zu sehen, dass die mittleren Verkehrsdichten keine extremen Werte annehmen. Der Ansatz ist zwar nicht in der Lage, eine durchgängig homogene Verteilung aller Kreuzungsdichten aufrecht zu erhalten, es ist jedoch erkennbar, dass bei Abweichungen einzelner Kreuzungsdichten stets eine Tendenz hin zum Mittelwert existiert (dies entspricht dem Sollwert des Durchschnitts-Konsensalgorithmus).

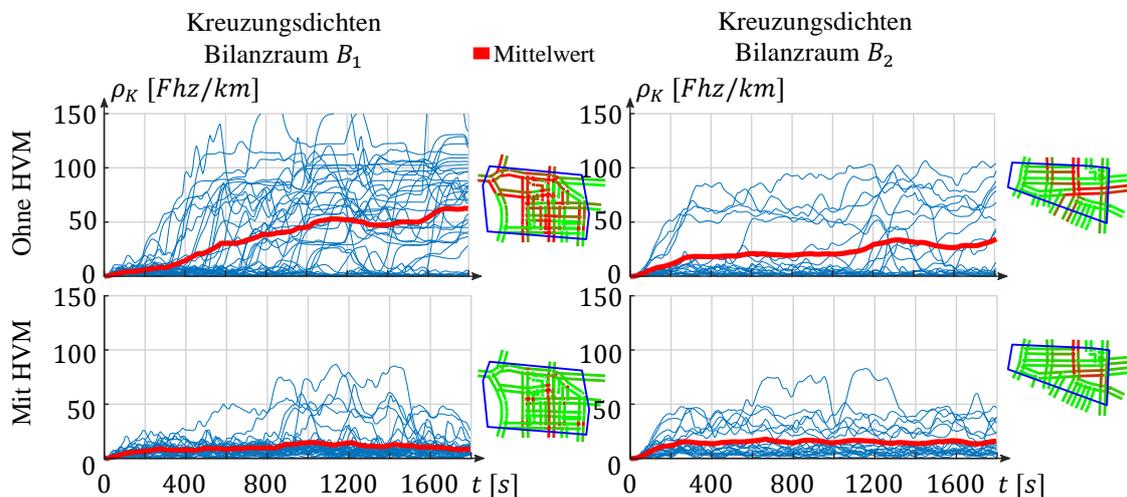


Abbildung 5-34: Vergleich der Ergebnisse für Bilanzraum B_1 und Bilanzraum B_2 (ohne / mit HVM) zu Bielefeld-Ost (4.1)

In Abbildung 5-35 sind alle Kreuzungsdichten, alle Netzverkehrsdichten und die Ausfahrverkehrsflüsse gegenübergestellt. In den Verläufen der Kreuzungsdichten (oben links) ist feststellbar, dass diese im Fall des aktiven HVM, wie schon im Detail für die Bilanzräume B_1 und B_2 gesehen, in jedem Fall deutlich unter den Ergebnissen ohne HVM

liegen. Zusätzlich lassen sich nur wenige Ausreißer für den Fall mit HVM ausmachen, dementsprechend liegt eine wesentlich homogenere Verkehrssituation vor. Die Verläufe der Netzdichten aller Bilanzräume (unten links) bestätigt diese Beobachtung. Zusätzlich ist hier die Tendenz der steigenden Netzdichten im Fall ohne HVM zu sehen. Dies kann erneut derart interpretiert werden, dass mehr Fahrzeuge in das Straßennetzstück einfahren, als gleichzeitig ausfahren. Das Netz „füllt“ sich also mit Fahrzeugen, die weiter für Verkehrsstörungen sorgen. Dies ist auch in den Verläufen der Ausfahrverkehrsflüsse dargestellt: Während das HVM hier in der Lage ist, einen relativ konstanten Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten, ist für den Fall ohne HVM eine sinkende Tendenz erkennbar. Für eine längere Simulationszeitspanne wäre infolgedessen mit einem Verkehrszusammenbruch für das Netz zu rechnen.

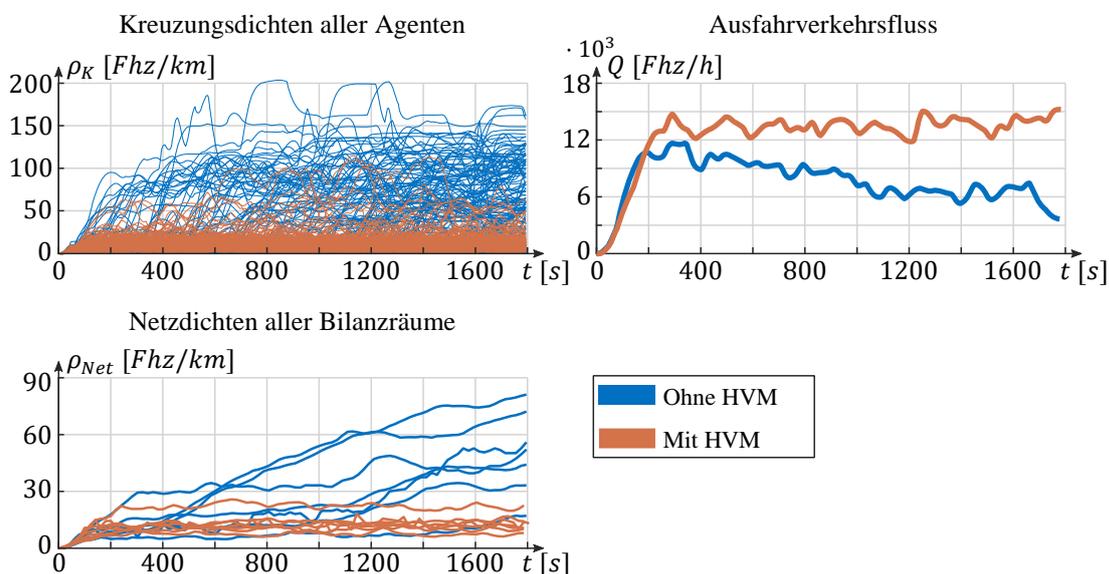


Abbildung 5-35: Vergleich der Ergebnisse aller Kreuzungsagenten, aller Netzdichten sowie des Fahrzeugdurchsatzes (ungeregelt / geregelt) zu Bielefeld-Ost (4.1)

Die Ergebnisse bezüglich der mittleren Reisegeschwindigkeiten und -zeiten zeigen zu erwartende Charakteristiken. Da viele Fahrzeuge im Fall ohne HVM im Stau stehen, existieren viele Vorkommen niedriger Reisegeschwindigkeiten (etwa <15 km/h) und hoher Reisezeiten (etwa >300 s). Gerade das Vorhandensein der Extremwerte um 0 km/h zeigt im Fall ohne HVM deutlich auf, dass Stauungen mit Wartezeiten entstanden sind. Mit aktivem HVM liegt erneut eine ausgewogenere Verteilung vor, außerdem existieren keine vergleichbaren Extremwerte. Der Tabelle 13 sind weitere detaillierte Ergebnisse zu entnehmen. Es ist offensichtlich, dass das hierarchische Verkehrsmanagement in beinahe jeder Hinsicht Vorteile mit sich bringt. Alleinig die mittlere Fahrdistanz ist in diesem Fall deutlich erhöht gegenüber dem Szenario ohne HVM. Dieser Umstand ist jedoch, wie dies

mehrfach erläutert wurde, zu erwarten und als hinnehmbar anzusehen, da die sonstigen kollektiven Vorteile bei weitem überwiegen.

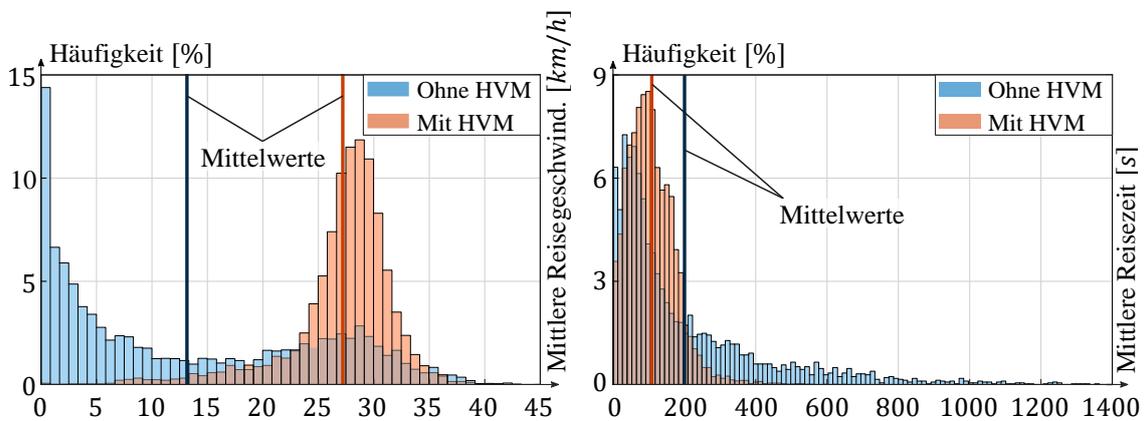


Abbildung 5-36: Vergleichshistogramme der Simulationsergebnisse zu Bielefeld-Ost (4.1) zur mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit, vertikale Markierungen: Entsprechende Mittelwerte

4.2: Paderborn

Das letzte in dieser Arbeit untersuchte Straßennetz ist der Stadtring mit umgebenden Straßen der Stadt Paderborn. Im Gegensatz zum Bielefeld-Ost-Netz ist das nun betrachtete Netz wesentlich größer (siehe Abbildung A-8 für einen Vergleich mit Maßstab). Die Ergebnisse der mittleren Verkehrsdichte in Abbildung 5-37 weisen auch in diesem Fall deutliche Unterschiede auf.

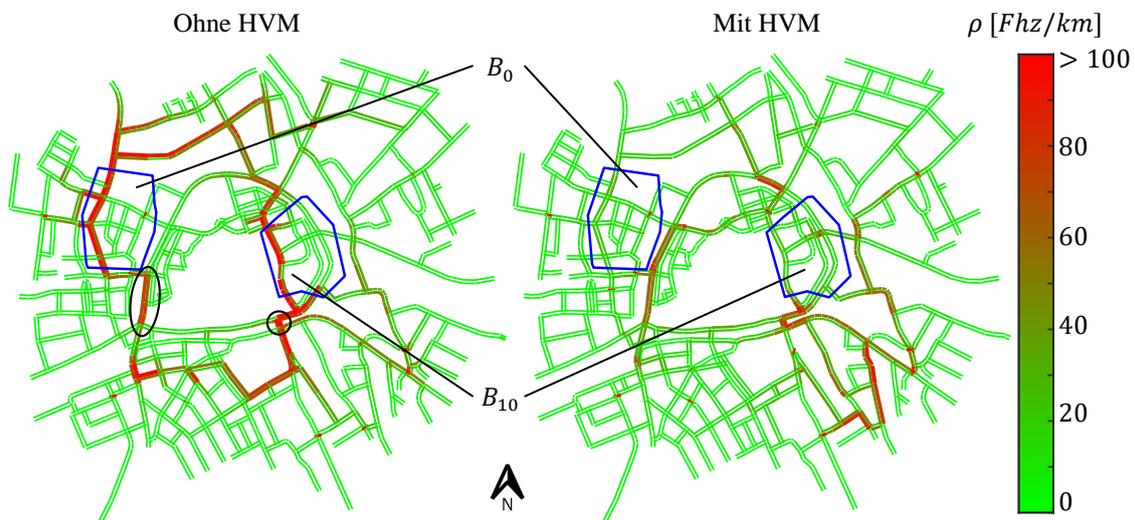


Abbildung 5-37: Exemplarische Simulationsergebnisse der mittleren Verkehrsdichte für Paderborn (4.2), schwarze Markierung: Bereits im gegenwärtigen Verkehr neuralgische Stellen

Ohne HVM sind viele überlastete Straßen mit Stauungen zu erkennen, die sich rund um den Stadtring ausprägen. In diesem Netzausschnitt existieren durch die Vereinfachungen Verkehrsflüsse, die in der Realität üblicherweise nicht vorkommen. Dennoch sind durchaus neuralgische Stellen zu erkennen, die auch im gegenwärtigen realen Straßenverkehr Paderborns kritisch sind (z.B. an der Kasseler-Tor-Brücke oder am Westertor, siehe schwarze Markierung in Abbildung 5-37 links).

Wird wie zuvor der Einfluss des HVM analysiert, so in den Ergebnissen mit aktiviertem HVM wesentlich weniger Stellen mit hohen Verkehrsdichten zu sehen. Interessanterweise sorgt das HVM jedoch dafür, dass an zuvor wenig ausgelasteten Stellen nun Stauungen auftreten können (z.B. im Süd-Osten). Die angesprochenen und markierten neuralgischen Stellen sind auch im Fall des HVM weiterhin stärker belastet als umliegende Straßen, dies resultiert aus der charakteristischen Topologie des Netzes, denn diese Straßen sind im Kontext des Netzes als besonders wichtig anzusehen.

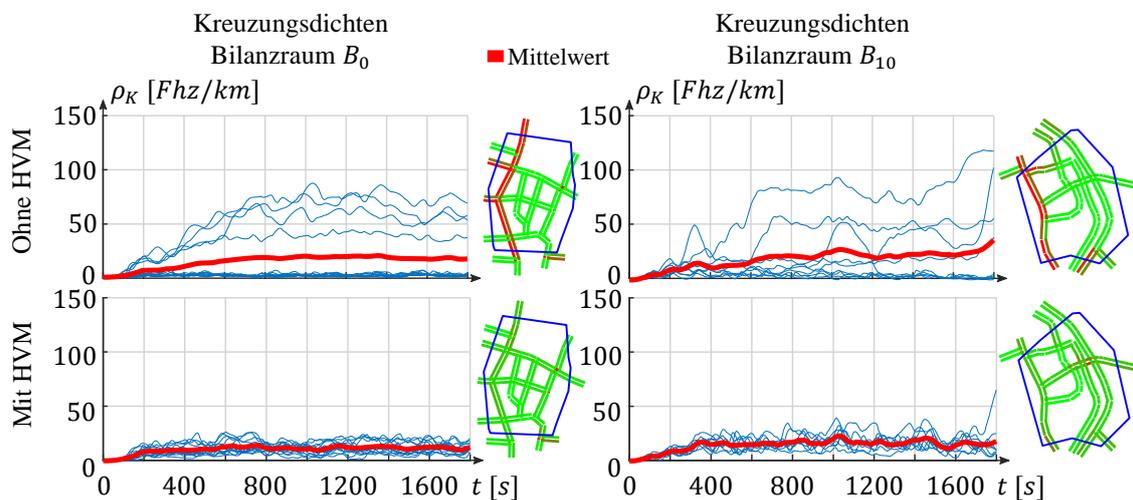


Abbildung 5-38: Vergleich der Ergebnisse für Bilanzraum B_0 und Bilanzraum B_{10} (ohne / mit HVM) für die Simulation 4.2 der Stadt Paderborn

Die Ergebnisse der exemplarisch gewählten Bilanzräume B_1 und B_{10} weisen in Abbildung 5-38 ähnliche zeitliche Verläufe für die Kreuzungsdichten auf, wie dies bereits die vorherigen Simulationen gezeigt haben. Ist kein HVM aktiv, so zeigen die Kreuzungsdichten in beiden Bilanzräumen ein vergleichbares Verhalten. Hierbei sind vereinzelt erhöhte Kreuzungsdichten zu sehen, die zu stockendem Verkehr geführt haben. Mit aktivem HVM ist eine Balancierung der Kreuzungsdichten ersichtlich, die gut erkennbar über die gesamte Simulationsdauer nah beieinander liegen. Das HVM kann also auch in diesem Fall einen homogenen Verkehrsfluss bewirken.

Die Simulation mit aktiven HVM ergibt für die Kreuzungsdichten generell homogenere und geringere Verläufe als für die Fälle ohne HVM, wie dies in Abbildung 5-39 oben links zu erkennen ist. Ebenso ist dies in den Netzdichten der Bilanzräume unten links zu sehen. Im Fall ohne HVM sind hier deutlich steigende Tendenzen mehrerer Bilanzräume

in den Verläufen zu beobachten. Auch die Simulation mit HVM zeigt steigende Tendenzen für einige Bilanzräume in den Verläufen, jedoch deutlich weniger stark ausgeprägt in Qualität und Quantität. Dies deckt sich mit der zuvor gegebenen Erläuterung, dass einige neuralgische Stellen auch mit HVM bestehen bleiben und zu Überlastungen führen können. Aus diesem Grund sind auch in den Ausfahrverkehrsflüssen in Abbildung 5-39 oben rechts in beiden Fällen Tendenzen sinkender Ausfahrverkehrsflüsse sichtbar. In beiden Fällen ist also mit einem „Ansammeln“ der Fahrzeuge zu rechnen. Diese Entwicklung ist jedoch im Fall ohne HVM deutlich stärker zu ausgeprägt, wie dies auch der mittleren Anzahl an Fahrzeugen im System in Tabelle 13 zu entnehmen ist, welche deutlich höher ist als mit HVM.

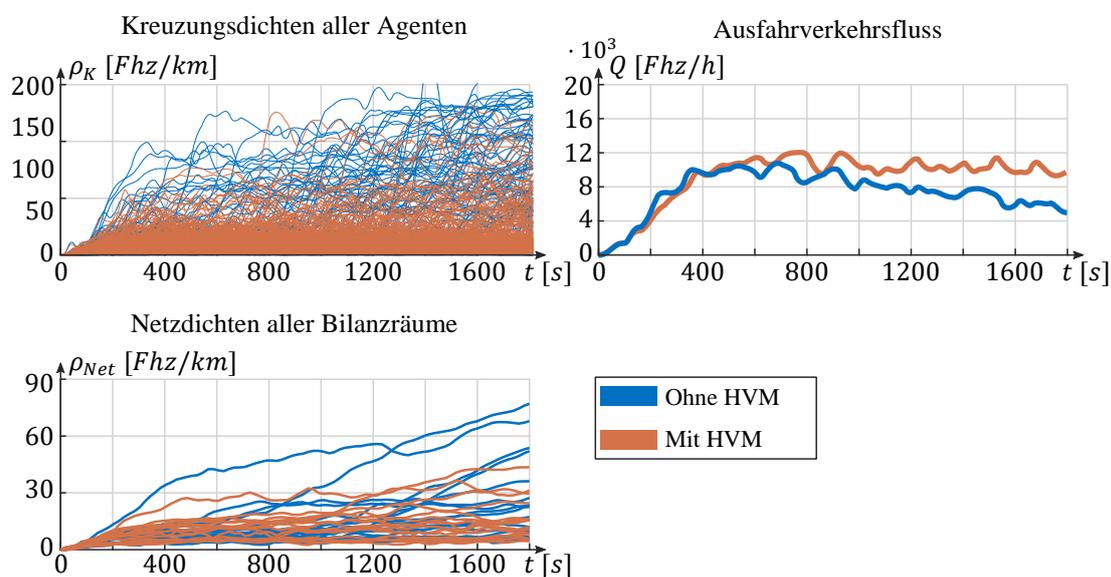


Abbildung 5-39: Vergleich der Ergebnisse aller Kreuzungsagenten, aller Netzdichten sowie des Fahrzeugdurchsatzes (ungeregelt / geregelt) zu Paderborn (4.2)

Die Vergleichshistogramme in Abbildung 5-40 zeigen in diesem Kontext etwas überraschende Ergebnisse, denn während die mittlere Reisegeschwindigkeit mit HVM etwa 57% höher ist als im Fall ohne HVM, so sind die mittleren Reisezeiten in beiden Fällen fast identisch. Interpretiert ergibt dieses Ergebnis mit den zusätzlichen Detailinformationen in Tabelle 13, dass die Fahrzeuge keine wesentliche Zeitersparnis haben und dafür sogar längere Wege in Kauf nehmen müssen. Im Gegenzug ist jedoch zu sehen, dass dafür der Fahrzeugdurchsatz um 37% gestiegen ist und die Emissionen gleichzeitig stark verringert wurden. Durch die Homogenisierung des Verkehrsflusses ist demnach die Beförderung insgesamt effizienter geworden, da mehr Fahrzeuge in derselben Zeit mit weniger Emissionen durch das Netz reisen können. Ein anderer wichtiger Aspekt ist die mittlere Wartezeit, die durch das aktive HVM fast vollständig verhindert werden konnte, denn hier mussten die Fahrzeuge statt 27 s lediglich 2 s im Mittel stehen.

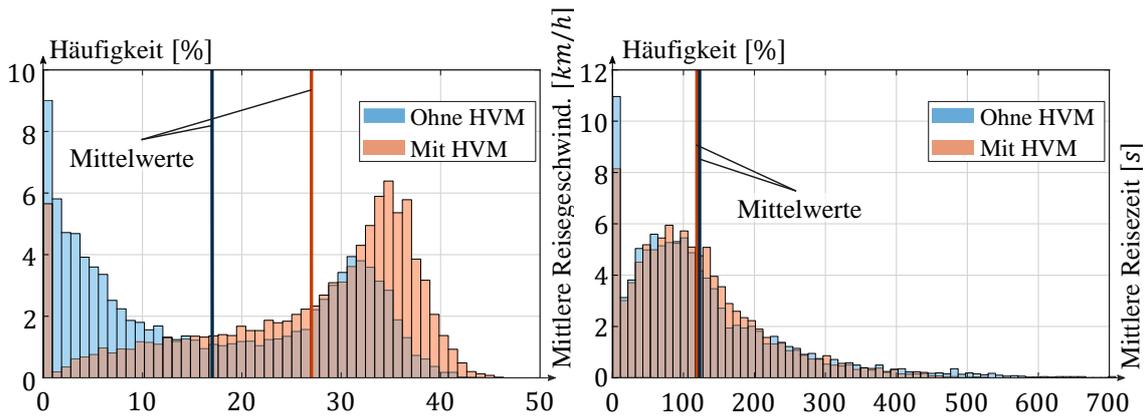


Abbildung 5-40: Vergleichshistogramme der Simulationsergebnisse 4.2 zur mittleren Reisegeschwindigkeit und -zeit der Stadt Paderborn, vertikale Markierungen: Entsprechende Mittelwerte

Tabelle 13: Ausgewählte Simulationsergebnisse für die Simulation der Städte Bielefeld und Paderborn

Messgrößen bezogen auf Gesamtflotte				Messgrößen pro Fahrzeug			
Testfälle reale Straßennetze		4.1 Bielefeld	4.2 Paderborn	Testfälle reale Straßennetze		4.1 Bielefeld	4.2 Paderborn
Gesamtdurchsatz [Fhz]	ohne HVM	3815	5548	Mittlere Reisezeit [s]	ohne HVM	201	253
	mit HVM	6420	7627		mit HVM	108	245
	↑/↓ ?	+68%	+37%		↑/↓ ?	-46%	-3%
Maximaler Durchsatz $\left[\frac{Fhz}{h}\right]$	ohne HVM	9267	12814	Mittlere Fahrdistanz [m]	ohne HVM	483	1289
	mit HVM	12926	15374		mit HVM	775	1919
	↑/↓ ?	+39	+20%		↑/↓ ?	+60%	+49%
Mittlere Anzahl Fahrzeuge im System [-]	ohne HVM	1885	3979	Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	ohne HVM	13	17
	mit HVM	406	2300		mit HVM	27	27
	↑/↓ ?	-78%	-42%		↑/↓ ?	+107%	+57%
Änderung Verbrauch und Emissionen nach HBEFA [%]	Treibstoff	-85%	-77%	Mittlere Wartezeit [s]	ohne HVM	23	27
	CO ₂	-37%	-15%		mit HVM	0	2
	NO _x	-41%	-14%		↑/↓ ?	-100%	-90%

Zusammenfassung

In den vorgestellten exemplarischen Simulationsuntersuchungen konnte festgestellt werden, dass der entwickelte Ansatz des hierarchischen Verkehrsmanagements funktioniert und sich die Ergebnisse mit HVM untereinander qualitativ ähneln. Als Resultat folgt, dass in den meisten Fällen deutliche Verbesserungen durch das hierarchische Verkehrsmanagement erreicht werden konnten. So wurde durch die Homogenisierung der Verkehrsflüsse der Fahrzeugdurchsatz und die mittleren Geschwindigkeiten erhöht sowie zeitgleich die Emissionen und Wartezeiten reduziert. Wie zu Beginn der Arbeit erwähnt, war die Motivation, statt individueller Ziele kollektive Ziele in den Fokus zu rücken und dafür hinzunehmen, dass einzelne Verkehrsteilnehmer zur Erreichung dieser Ziele ggf. Nachteile in Kauf nehmen müssen. Die erzeugten Simulationsergebnisse spiegeln genau diese Erwartung wider, denn während sich z.B. die mittlere Fahrdistanz und die mittlere Reisezeit zum Teil verschlechtert hat, konnten kollektive Vorteile in Form eines erhöhten Fahrzeugdurchsatzes mit gleichzeitig reduzierten Wartezeiten und Emissionen erreicht werden. Anders ausgedrückt mussten demnach einzelne Fahrzeuge teilweise Umwege in Kauf nehmen und waren mit aktiven HVM genauso lange oder länger zum Ziel unterwegs, dafür konnten jedoch die zuvor erwähnten kollektiven Ziele erreicht werden.

5.2.4 Mögliche Modellerweiterungen

Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass der vorgestellte Ansatz des hierarchischen Verkehrsmanagements in der Lage ist, positiv auf eine stark ausgelastete Verkehrssituation zu wirken und sowohl den Verkehrsfluss als auch die Verkehrsdichte in Grenzen zu homogenisieren. Die Ergebnisse wurden jedoch, wie in 5.2.2 beschrieben, auf Grundlage mehrerer Vereinfachungen erzielt. Um eine stärkere Aussagekraft zu erlangen, können in zukünftigen Untersuchungen einige Vereinfachungen ohne größeren Aufwand detaillierter berücksichtigt werden. Zu diesen gehören z.B.:

Fahrzeugtypen und imperfektes Folgeverhalten von Fahrzeugen

Eine der größten Vereinfachungen ist die Annahme gleichartiger Fahrzeuge, welche in der Realität nicht anzutreffen ist. Da SUMO eine Vielzahl verschiedenartiger Fahrzeuggrundtypen bereitstellt, ließe sich diese Vereinfachung ohne großen Aufwand entfernen und ein Verkehr mit LKW, Bussen, Kleinwagen usw. realisieren. Das Kreuzungsmanagement auf niedrigster Ebene müsste um zusätzliche Parametersätze ergänzt werden, damit eine erfolgreiche Trajektoriengenerierung auch für andere Fahrzeuge umgesetzt werden kann. Da außerdem zu erwarten ist, dass sich autonome Fahrzeuge in der Realität aufgrund vielseitiger Einflussfaktoren nicht vollkommen und auch nicht zu jeder Zeit an die vom hierarchischen Verkehrsmanagement vorgegebenen Sollwerte halten können, ist eine entsprechende Auswirkung hierdurch zu erwarten. Durch eine zufällig verteilte, statistische Abweichung von Sollvorgaben durch das hierarchische Verkehrsmanagement könnte dies auch im Simulationsframework untersucht werden. Zusätzlich

könnten gar Fahrzeuge berücksichtigt werden, die ausschließlich durch SUMO gesteuert werden und für das hierarchische Verkehrsmanagement unbeeinflussbar sind. Diese könnten im übertragenden Sinne Fahrzeugen entsprechen, die durch menschliche Fahrer geführt werden. Auf diese Weise wäre es möglich, einen Mischverkehr aus autonomen und nicht autonomen Fahrzeugen zu untersuchen. Zusätzlich könnten Methoden integriert und deren Wirkung analysiert werden, die menschliches Fahrverhalten präzisieren (s. z.B. [LVL14]).

Kommunikationslatenzen und -probleme

Der vorgestellte Ansatz des hierarchischen Verkehrsmanagements basiert wesentlich auf der Annahme einer umfangreichen Kommunikation. Diese wurde in allen Untersuchungen als latenz- und störungsfrei angenommen. In der Realität sind Kommunikationskanäle jedoch immer latenzbehaftet und fehleranfällig. Diese Eigenschaften können im Simulationsframework leicht implementiert und ihre Auswirkungen untersucht werden, indem die Informationen mit Totzeiten beaufschlagt werden und zufällig auftretende Fehler in der Kommunikation integriert werden. Dies erlaubt es, Erkennungen und ggf. Korrekturen selbiger im Simulationsframework zu untersuchen. Mit einem größerem Aufwand ließe sich zudem auch die gesamte Kommunikation mittels der Software Veins simulieren, wie dies in [SRD11] vorgestellt wird. Veins implementiert eine komplexe Car2X-Kommunikation, die sich über mehrere Abstraktionsschichten erstreckt und hierbei eine Schnittstelle zu SUMO bereitstellt. Die Simulation umfasst physikalische Effekte wie z.B. eine Wellenausbreitung, Interferenzen, Antennengeometrien, Abschattungen durch Objekte sowie Leistungsaufnahmen durch Sender und Empfänger. Protokolle der MAC-Ebene (Media Access Control) sowie darauf aufbauende Protokolle wie IEEE 802.11p, Wi-Fi und weitere können ebenfalls berücksichtigt werden und erlauben eine sehr umfangreiche Simulation der gesamten Kommunikation.

Funktionen des hierarchischen Verkehrsmanagements

Das vorgestellte Konzept selbst weist noch einige Optimierungsmöglichkeiten auf. Zum einen könnte die Nutzung von Mehrfachspuren berücksichtigt werden. In der aktuellen Betrachtung werden diese vernachlässigt. Während sich im aktuellen Ansatz die Stellgrößen daher auf mittlere Sollgeschwindigkeiten und Routen beschränken, könnte durch die Berücksichtigung von Mehrfachspuren eine weitere Stellgröße der Spurwahl hinzugefügt werden. Auf diese Weise ließe sich das betrachtete Straßennetz genauer abbilden und entsprechend würden Kapazitäten besser modelliert und genutzt werden. Wird der Ansatz der Homogenisierung konsequent weitergedacht, so führt dies zu der Zielsetzung, alle Spuren möglichst gleichmäßig auszulasten. Eine weitere Idee wäre die dynamische Bilanzraumeinteilung, welche im aktuellen Ansatz als statische Struktur vorliegt. Erweisen sich bestimmte Bilanzräume oder Grenzen zwischen diesen während der Simulation als problematisch und weisen erhöhte Störungen im Verkehrsfluss auf, so könnten die Grenzen der Bilanzräume dynamisch adaptiert werden, um dem entgegenzuwirken. Die Autoren in [SG17] haben sich dieser Problematik bereits angenommen, die in ähnlicher Form

integriert werden könnte. Zuletzt seien die Rerouting-Algorithmen erwähnt, die ebenfalls vielschichtiges Verbesserungspotential aufweisen, so ließe sich das globale Routing beispielsweise in einfacher Weise um zu erwartende Reisezeiten ergänzen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird das Zukunftsszenario eines vollständig autonomen Verkehrs betrachtet, der zudem sowohl eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen als auch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur erlaubt (Car2X). Die Motivation der Arbeit liegt darin begründet, den Verkehr im genannten Szenario durch ein intelligentes übergeordnetes Verkehrsmanagement derart zu organisieren, dass nicht lediglich die individuellen Ziele einzelner Verkehrsteilnehmer, sondern kollektive Ziele verfolgt werden, die allen Verkehrsteilnehmern gleichermaßen von Nutzen sind. Zu diesen Zielen zählen u.a. eine Verringerung der mittleren Reisezeit oder die Verhinderung von Staus, für die jedoch einzelne Verkehrsteilnehmer ggf. kleine Nachteile, z.B. in Form von Umwegen, in Kauf nehmen müssen.

Basierend auf der genannten Motivation wird zunächst der Stand der Wissenschaft und Technik zum Thema des autonomen und vernetzten Fahrens sowie zu gegenwärtigen und möglichen zukünftigen Verkehrsmanagementsystemen aufgearbeitet. Nach der Klärung der Grundlagen zur Verkehrsmodellierung wurde ein dreistufiges Konzept für ein hierarchisches Verkehrsmanagement vorgestellt, das den Verkehr auf verschiedenen Abstraktionsebenen betrachtet. Auf der untersten Ebene, der mikroskopischen Ebene, wird der Verkehr rein mikroskopisch betrachtet und alle Funktionen integriert, die für einen autonomen Verkehr notwendig sind. Im Rahmen der Arbeit wurde eine exemplarische Funktion für diese Ebene entwickelt: Das autonome Kreuzungsmanagement, welches kollisionsfreie Trajektorien für die auf eine Kreuzung zufahrenden Fahrzeuge generiert und eben diesen zuweist. Da das Kreuzungsmanagement grundsätzlich die Funktion einer Lichtsignalanlage ersetzt, sind diese im genannten Szenario obsolet und werden nicht weiter berücksichtigt. Auf der zweiten Hierarchieebene wird der Verkehr in makroskopischen Flussgrößen betrachtet und das Straßennetz in sog. Bilanzräume unterteilt. Ein möglicher Ansatz dafür wurde hierbei ebenfalls angeführt. Für jeden dieser Bilanzräume wird ein automatisch erzeugter Regelkreis eingeführt, der den Verkehr mittels eines Durchschnitts-Konsensalgorithmus regelt. Hierbei wird jede Kreuzung als autonomer Agent in einem Multiagentensystem mit Kommunikation aufgefasst, der ausschließlich die Fahrzeuge in seinem Umfeld beeinflusst. Ziel der Regelung jedes Bilanzraumes ist die Homogenisierung der makroskopischen Flussgrößen. Aus diesem Grund wird als Sollwert eine Sollverkehrsdichte berechnet, die in den Mittelwert aller Bilanzraum-Verkehrsdichten konvergiert. Diese Sollverkehrsdichte muss jedoch in eine geeignete mittlere Sollflussgeschwindigkeit umgerechnet werden, damit diese den Fahrzeugen vorgegeben werden kann. Als weitere Stellgröße wird die Innerbilanzraumroute durch den jeweiligen Bilanzraum für jedes Fahrzeug individuell berechnet. Für die Berechnung werden dynamische Kantengewichte eingesetzt, die zum einen auf der Verkehrsdichte und zum anderen auf der zu erwartenden Reisezeit entlang der Route basieren. Die dritte und oberste Schicht in dieser Arbeit betrachtet die Menge aus Bilanzräumen, berechnet glo-

bale Routen über Bilanzräume und sucht zusätzlich die besten Übergangsstraßen zwischen den Bilanzräumen. Auch wenn sich der hier vorgestellte Ansatz auf drei Hierarchieebenen beschränkt, so ist eine Einführung weiterer Ebenen denkbar.

Der entwickelte Ansatz wurde im Rahmen eines umfangreichen Simulationsframeworks, welches die freie Open-Source-Software SUMO einbindet, implementiert und umfangreich getestet. Eine Auswahl aus vorgestellten synthetischen und realen Straßennetzen wurde mit und ohne dem entwickelten hierarchischen Verkehrsmanagement simuliert und die Ergebnisse wurden verglichen. Es zeigt sich, dass hierbei ein großes Potential besteht, einen vollständig autonomen Verkehr durch die Integration eines übergeordneten intelligenten Verkehrsmanagements zu verbessern. So konnte der Fahrzeugdurchsatz in den meisten Fällen deutlich erhöht, die Verkehrsflüsse homogenisiert und Staus verhindert werden. Hierbei konnte der zu erwartende Effekt festgestellt werden, dass zur Erreichung dieser Vorteile auch teils Nachteile für einzelne Fahrzeuge in Kauf genommen werden müssen. Die mittleren Fahrdistanzen wiesen häufig leichte Erhöhungen auf, wodurch die Fahrzeuge flüssiger und schneller an ihre Ziele kamen, hierfür jedoch Umwege fahren mussten.

Die Simulationsstudie basiert auf einer ganzen Reihe von Vereinfachungen, die zum Teil durch die Auswahl der Verkehrssimulationssoftware SUMO bedingt sind und zum Teil selbst gewählte Vereinfachungen darstellen. Die vereinfachenden Annahmen erleichterten die Entwicklung des Simulationsframeworks wesentlich und könnten in zukünftigen Untersuchungen erneut aufgegriffen werden. Durch Reduktion der Vereinfachungen kann eine realistischere Betrachtung durchgeführt werden und gleichzeitig können entsprechende Gegenmaßnahmen integriert und deren Funktion untersucht werden. Eine interessante zukünftige Fragestellung wäre zudem, ob die Ansätze und Erkenntnisse dieser Arbeit auch in abgewandelter Form auf den heutigen nichtautonomen Verkehr übertragen werden können, damit auch hier eine Verbesserung des Verkehrszustandes bewirkt werden kann.

7 Notation

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
3 Grundlagen der Verkehrsmodellierung		
$\rho(x, t)$	Verkehrsdichtefunktion	Fhz/km
$V(x, t)$	Funktion der mittleren Flussgeschwindigkeit	km/h
$Q(x, t)$	Verkehrsflussfunktion	Fhz/h
$N(t)$	Anzahl Fahrzeuge in einem definierten Streckenabschnitt	–
x	Weg	m
t	Zeit	s
$v_i(t)$	Geschwindigkeit von Fahrzeug i	m/s
$d_i(t)$	Mittlerer Abstand von Fahrzeug i zum vorausfahrenden Fahrzeug	m
$O(x, t)$	Belegungsgradfunktion	%
Δt_{zL}	Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen	s
Q_{in}	Eingangsverkehrsfluss	Fhz/h
Q_{jam}	Verkehrsfluss in Stauung	Fhz/h
Q_{out}	Ausgangsverkehrsfluss	Fhz/h
ω	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Staufront	m/s
$A(x, t)$	Beschleunigungsfunktion	m/s^2
$Q_e(\rho)$	Equilibriumverkehrsflussfunktion (Fundamentaldiagramm)	Fhz/h
t_0	Startzeitpunkt	s
ρ_l	Initialverkehrsdichte links von x_{lr}	Fhz/km
ρ_r	Initialverkehrsdichte rechts von x_{lr}	Fhz/km
x_{lr}	Ort der sprunghaften Änderung der initialen Verkehrsdichte	m
Q_{max}	Maximaler Verkehrsfluss an der Kapazitätsgrenze	Fhz/h
V_{max}	Maximale/Free Flussgeschwindigkeit	m/s
ρ_{max}	Maximale Verkehrsdichte, Stauungsverkehrsdichte	Fhz/km
ρ_{crit}	Verkehrsdichte an der Kapazitätsgrenze	Fhz/km
V_{crit}	Flussgeschwindigkeit an Kapazitätsgrenze	m/s
$V_e(\rho)$	Equilibriumflussgeschwindigkeit (Fundamentaldiagramm)	m/s
V_A, V_B	Mittlere Flussgeschwindigkeiten in den Equilibriumzuständen A und B	m/s
$P(x, t)$	Verkehrsdruck	m/s^2
τ	Relaxationszeit	s
η	Viskosität	m/s
A_{rmp}	Rampenterm, Änderung Beschleunigung an Zu- und Abfahrten	m/s^2
ρ_a	Antizipierte Verkehrsdichte	Fhz/km
x_a	Entfernter Ort als Grundlage der antizipierten Verkehrsdichte	m
Q_{ramp}	Rampenverkehrsfluss	Fhz/h
x_{ramp}	Ort des Rampenbeginns	m
L_{ramp}	Länge des Rampenverkehrsfluss	m

$v(x, t)$	Quellterm	Fhz/h
$I, I(x)$	Anzahl Spuren	–
$\rho_i(x, t)$	Verkehrsdichtefunktion der i -ten Spur	Fhz/km
$\rho_{tot}(x, t)$	(Totale) Verkehrsdichtefunktion aller Spuren	Fhz/km
$Q_{tot}(x, t)$	(Totale) Verkehrsflussfunktion aller Spuren	Fhz/h
$Q_{V,out}$	Gesamtausgangsverkehrsfluss an Verschmelzung	Fhz/h
$Q_{V,in,i}$	i -ter Eingangsverkehrsfluss an Verschmelzung	Fhz/h
$Q_{S,in}$	Eingangsverkehrsfluss an Separation	Fhz/h
$Q_{V,out,i}$	i -ter Ausgangsverkehrsfluss an Separation	Fhz/h
$Q_{S,in}$	Gesamteingangsverkehrsfluss an Separation	Fhz/h
α_i	Aufteilungskoeffizient für i -ten Ausgangsverkehrsfluss an Separation	–
x_{LSA}	Ort der LSA	m
t_r	Startzeit Rotphase an LSA	s
t_g	Startzeit Grünphase an LSA	s
Δx	Diskrete Wegschrittweite	m
Δt	Diskrete Zeitschrittweite	s
t_k	k -ter diskreter Zeitschritt	s
x_i	i -te diskrete Wegstützstelle	m
Q_i^k	Verkehrsfluss an diskreter Wegstützstelle i zum diskreten Zeitpunkt k	Fhz/h
V_i^k	Mittlere Flussgeschwindigkeit an diskreter Wegstützstelle i zum diskreten Zeitpunkt k	m/s
ρ_i^k	Verkehrsdichte an diskreter Wegstützstelle i zum diskreten Zeitpunkt k	Fhz/km
D	Diffusionskonstante	m^2/s
$U(x, t)$	Verallgemeinerte Verkehrsstörung	–
ε	Größe der verallgemeinerten Verkehrsstörung	–
d_{Fhz}	Mittlerer Fahrzeugabstand	m
ε_{NL}	Schwellwert zur nichtlinearen Instabilität	–
$X(t)$	Ausbreitungskordinate der Initialstörung in der Wavefront-Expansion-Methode	m
ε_{cap}	Faktor der dynamischen Kapazitätsreduzierung an einer Engstelle	–
ρ_{cap}	Resultierende Verkehrsdichte an Engstelle mit dynamischer Kapazitätsreduzierung	Fhz/km
C_B^{stat}	Statisch reduzierte Kapazität	Fhz/h
C_B^{dyn}	Dynamisch reduzierte Kapazität	Fhz/h
$\rho_{Net}(t)$	Netzverkehrsdichte eines Straßennetzstücks	Fhz/km
$N_{Net}(t)$	Anzahl Fahrzeuge eines Straßennetzstücks	–
l_i	Länge der Straße i	m
M	Anzahl der Straßen eines Straßennetzstücks	–
4 Hierarchisches autonomes Verkehrsmanagement		
x_k	Diskreter Fahrzeugzustand an k -ter Wegstützstelle	$(m, m/s, m/s^2)$
s_k	k -te diskrete Wegstützstelle	m
$r(s_k)$	Fahrzeugruck an k -ter Wegstützstelle	m/s^3
$a(s_k)$	Fahrzeugbeschleunigung an k -ter Wegstützstelle	m/s^2
$v(s_k)$	Fahrzeuggeschwindigkeit an k -ter Wegstützstelle	m/s

$r_k(t)$	Ruckfunktion des Fahrzeugs	m/s^3
$a(t)$	Beschleunigungsfunktion des Fahrzeugs	m/s^2
$v(t)$	Geschwindigkeitsfunktion des Fahrzeugs	m/s
$s(t)$	Wegfunktion des Fahrzeugs	m
$T_r, T_{x_{(k-1)} \rightarrow x_k}$	Benötigte Zeit zur Erreichung der nächsten Wegstützstelle	s
a_0	Initialbeschleunigung des Fahrzeugs	m/s^2
v_0	Initialgeschwindigkeit des Fahrzeugs	m/s
s_0	Initialweg des Fahrzeugs	m
s_n	Länge der Durchquerungsweges der Kreuzung	m
t_k	Diskreter Zeitpunkt k	s
r	Radius	m
$\kappa, \kappa(s)$	Krümmung, Krümmungsfunktion	$1/m$
a_z	Zentripetalbeschleunigung	m/s^2
a_{max}	Maximal erlaubte Querbeschleunigung in Kurve	m/s^2
v_{max}	Maximal erlaubte Geschwindigkeit in Kurve	m/s
$\underline{c}(s)$	Bézier-Kurve in Vektorschreibweise	(m, m)
$c_x(s)$	x-Komponente der Bézier-Kurve	m
$c_y(s)$	y-Komponente der Bézier-Kurve	m
\underline{P}_i	i -ter Stützpunkt einer Bézier-Kurve	(m, m)
s	Kurvenparameter	—
κ_{max}	Maximale Kurvenkrümmung	$1/m$
x_i	Möglicher Endzustand 0	$(m, m/s, m/s^2)$
$c(x_i)$	Kosten des möglichen Endzustands 0	—
s_E	Halteposition vor Kreuzung	m
d_H	Halteabstand	m
L_i	Länge des i -ten Fahrzeugs	m
N_{Krz}	Anzahl aller an einer Kreuzung wartender Fahrzeuge	—
$s_p(t)$	Position des vorausfahrenden Fahrzeugs	m
$J_F(r)$	Minimierungsfunktion für die Folgefahrt	—
$J_H(r)$	Minimierungsfunktion für das Anhalten	—
T_H	Wartezeit an Kreuzung	s
K	Menge aller Kollisionsquadrate	—
q_i	i -tes Kollisionsquadrat	—
$h(q_i, t_k)$	Hashfunktion zur Bestimmung von Kollisionen	—
$b(q_i, t_k)$	Belegungsfunktion zur Bestimmung von Kollisionen	—
$A_i(s)$	Agentenübertragungsfunktion	—
$G(V, E)$	Graph G	—
V	Menge aller Knoten im Graph	—
E	Menge aller Kanten im Graph	—
$x_i(t)$	Agentenzustand des Führers	—
\underline{A}	Adjazenzmatrix	—
\underline{D}	Gradmatrix	—
\underline{L}	Laplacematrix	—
\underline{P}	Perronmatrix	—
ΔT	Zeitschrittweite im diskreten Durchschnitts-Konsensalgorithmus	s

Λ	Maximaler Grad des Graphen	—
$\bar{\rho}_{rd_i}(t)$	Zeitverlauf der mittleren Verkehrsdichte entlang Straße rd_i	Fhz/km
$\rho_{A_i}(t)$	Zeitverlauf der Verkehrsdichte für Agent A_i	Fhz/km
l_{rd_i}	Länge der Straße rd_i	m
N_{rd_i}	Anzahl aller Fahrzeug, die sich auf Straße rd_i befinden	—
$\rho_{A_i}^k$	Diskreter Zeitverlauf der Verkehrsdichte für Agent A_i	Fhz/km
$\underline{\rho}_A(t)$	Vektor aller zeitlichen Agentenzustandsverläufe	Fhz/km
$\underline{\rho}_A^k$	Vektor aller diskreten zeitlichen Agentenzustandsverläufe	Fhz/km
$\underline{\rho}_{A,soll}^{k+1}$	Vektor aller Sollagentenzustände im nächsten Zeitschritt	Fhz/km
$\underline{r}_{A_1,soll}^{k+1}$	Vektor aller Sollrouten der Fahrzeuge im nächsten Zeitschritt	—
$V_{A_1,soll}^{k+1}$	Vektor aller mittleren Sollgeschwindigkeiten im nächsten Zeitschritt	m/s
$\dot{\underline{\rho}}_{A,soll}(t)$	Vektor aller zeitlichen Agentenzustandsverläufe	$Fhz/(km \cdot s)$
v_i	Knoten i im Graph	—
$w(v_i, v_j)$	Kantengewichtsfunktion von Knoten v_i zu Knoten v_j	—
$r(v_s, v_d)$	Route durch Graph von Knoten v_s zu Knoten v_d	—
$W(r(v_s, v_d))$	Kosten der Route $r(v_s, v_d)$	—
$W^*(v_s, v_d)$	Menge aller Kosten aller Routen $r(v_s, v_d), q$	—
$\delta(v_s, v_d)$	Kosten der günstigsten Route von Knoten v_s Knoten v_d	—
$l(v_i, v_{i+1})$	Länge der Straße zwischen Knoten v_i und v_{i+1}	m
$w_{\bar{\rho}}(v_i, v_{i+1}, t)$	Kostenfunktion der Verkehrsdichte	Fhz/km
$w_{\bar{t}}(v_i, v_{i+1}, t)$	Kostenfunktion der geschätzten Reisezeit	s
$c_{ED}(L, e)$	Edge-Degree-Zentralitätsmetrik für Kante e im Graph G	—
A_L	Adjazenzmatrix des Liniengraphen	—
$c_{EB}(G, e)$	Edge-Betweenness-Zentralitätsmetrik für Kante e im Graph G	—
$\sigma_e(f, g)$	Anzahl aller günstigsten Pfade von f zu g , die e passieren	—
$\sigma(f, g)$	Anzahl aller günstigsten Pfade von f zu g	—
$I_W(G)$	Wiener-Index des Graphen G	—
$c_{CV}(G, e)$	Edge-Closeness-Vitality-Zentralitätsmetrik für Kante e im Graph G	—
$c_{ECC}(G, e)$	Edge-Closeness-Zentralitätsmetrik für Kante e im Graph G	—
B_i	Bilanzraum i	—
$N_{Net}(B_i, t)$	Zeitlicher Verlauf der Anzahl aller Fahrzeuge in Bilanzraum B_i	—
$w_{B_i}, w(B_j, B_i, t)$	Kantengewichtsfunktion von Bilanzraum B_j zu Bilanzraum B_i	—
5 Modellbildung und Simulation		
T_{sim}	Simulationsdauer	s
$\underline{\Theta}_{j_i}$	Flussaufteilungsmatrix für Kreuzung i	—

8 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ACC	Adaptive Cruise Control
AFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
C2X	Car-to-X
CA	Cellular Automata
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DSRC	Dedicated Short Range Communication
ETSI	European Telecommunication Standard Institute
GHR	Gazis-Herman-Rothery
GKT	Gas-kinetic
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
HCT	Homogeneous Congested Traffic
HVM	Hierarchisches Verkehrsmanagement
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPOpt	Interior Point OPTimizer
ITS	Intelligent Transport Systems
IVC	Inter-vehicle communication
JOM	Java Optimization Modeler
LKW	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlage
LWR	Lighthill-Whitham-Richards
MAC	Media Access Control
MFD	Macroscopic Fundamental Diagram
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MLC	Moving Localized Clusters
MPC	Model predictive control
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickoxide
NRW	Nordrhein-Westfalen
OCT	Oscillating Congested Traffic
ÖPNV	Öffentlicher Personen-Nahverkehr
OSM	OpenStreetMap
PKW	Personenkraftwagen
PLC	Pinned Localized Cluster
PW	Payne-Witham
RSU	Roadside Unit
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique
SGW	Stop-and-Go Waves
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping

SO ₂	Schwefeldioxid
SUMO	Simulation of Urban MObility
TCP	Transmission Control Protocol
TraCI	Traffic Control Interface
UDP	User Datagram Protocol
US	United States
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
VANET	Vehicular ad-hoc network

9 Literaturverzeichnis

- [AHB+16] Abdelgawad, K.; Henning, S.; Biemelt, P.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Advanced Traffic Simulation Framework for Networked Driving Simulators. In IFAC-PapersOnLine, 2016, 49; S. 101–108.
- [AHB+17] Abdelgawad, K.; Henning, S.; Biemelt, P.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Networked Driving Simulation for Future Autonomous and Cooperative Vehicle Systems: 8. VDI/VDE Fachtagung „AUTOREG 2017 - Automatisiertes Fahren und vernetzte Mobilität“, 2017.
- [ALU+10] Arel, I.; Liu, C.; Urbanik, T.; Kohls, A. G.: Reinforcement learning-based multi-agent system for network traffic signal control. In IET Intelligent Transport Systems, 2010, 4; S. 128–135.
- [ASY15] Aghabayk, K.; Sarvi, M.; Young, W.: A State-of-the-Art Review of Car-Following Models with Particular Considerations of Heavy Vehicles. In Transport Reviews, 2015, 35; S. 82–105.
- [BD10] Bretagnolle, A.; Delisle, F.: Formes de villes en Europe et aux Etats-Unis. In Mappemonde, 2010.
- [BE05] Brandes, U.; Erlebach, T. Hrsg.: Network analysis. Methodological foundations. Springer, Berlin, 2005.
- [BHR+18] Biemelt, P.; Henning, S.; Rüdtenklau, N.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: A Model Predictive Motion Cueing Strategy for a 5-Degree-of-Freedom Driving Simulator with Hybrid Kinematics. In (Driving Simulation Association Hrsg.): Proceedings of the DSC 2018 Europe VR. Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition. New trends in Human in the Loop simulation and testing. Driving simulation and VR. Driving Simulation Association, 2018; S. 79–85.
- [BM99] Brackstone, M.; McDonald, M.: Car-following: a historical review. In Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 1999, 2; S. 181–196.
- [BS07] Becker, U.; Schnieder, E.: Verkehrsleittechnik. Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs ; mit 45 Tabellen. Springer, Berlin [u.a.], 2007.
- [BTY07] Buslaev, A. P.; Tatashev, A. G.; Yashina, M. V.: Stability of Flows on Networks. Traffic and Granular Flow'05. In (Schadschneider, A. Hrsg.): Traffic and granular flow '05. With 15 tables. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [Bun09] Bungartz, H.-J.: Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer, Berlin, 2009.
- [Bun18] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehr in Zahlen 2018/2019. DVV Media Group, Hamburg, 2018.

- [Car05] Carnegie Mellon University: Sandstorm at DARPA Grand Challenge. <http://www.cs.cmu.edu/~curmson/urmsonRobots.html>, 09.04.2019.
- [Cen56] Central Power and Light Company: Newsweek magazine, 1956.
- [CJR14] Croson, C.; Joslyn, L.; Reed, S.: Determining critical locations in a road network. In (Society for Industrial and Applied Mathematics Hrsg.): SIAM Undergraduate Research Online (SIURO). Volume 7, Philadelphia, USA, 2014; S. 106–121.
- [CL12] Costeseque, G.; Lebacque, J.P.: Intersection Modeling using a Convergent Scheme based on Hamilton-Jacobi Equation. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012; S. 736–748.
- [DDM+15] Djahel, S.; Doolan, R.; Muntean, G.-M.; Murphy, J.: A Communications-Oriented Perspective on Traffic Management Systems for Smart Cities. Challenges and Innovative Approaches. In *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17; S. 125–151.
- [Deh11] Dehmer, M.: Structural analysis of complex networks. Birkhäuser, Dordrecht, New York, 2011.
- [DG08] Daganzo, C. F.; Geroliminis, N.: An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic, 2008.
- [Dic07] Dickmanns, E. D.: Dynamic vision for perception and control of motion. Springer, Berlin [etc.], 2007.
- [DMD14] Dezani, H.; Marranghello, N.; Damiani, F.: Genetic algorithm-based traffic lights timing optimization and routes definition using Petri net model of urban traffic flow. In *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47; S. 11326–11331.
- [DSV08] Demsar, U.; Spatenková, O.; Virrantaus, K.: Identifying Critical Locations in a Spatial Network with Graph Theory. In *Transactions in GIS*, 2008, 12; S. 61–82.
- [EGJ+12] Espinosa, F.; Gordillo, C.; Jiménez, R.; Avilés, O. Hrsg.: Dynamic traffic light controller using machine vision and optimization algorithms. 2012 Workshop on Engineering Applications, 2012.
- [EMB01] Eppell, V. A.T.; McClurg, B. A.; Bunker, J. M.: A four level road hierarchy for network planning and management, 2001.
- [Eva10] Evans, L. C.: Partial differential equations. American Mathematical Society, Providence, R.I., 2010.
- [Fri16] Friedrich, B.: The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic. In (Maurer, M. et al. Hrsg.): *Autonomous driving. Technical, legal and social aspects*; S. 317–334.
- [FSS18] Ferrara, A.; Sacone, S.; Siri, S.: Freeway traffic modelling and control. Springer, Cham, Switzerland, 2018.

- [GBC+35] Greenshields, B. D.; Bibbins, J. R.; Channing, W. S.; Miller, H. H.: A STUDY OF TRAFFIC CAPACITY: Highway Research Board Proceedings, 1935.
- [GCL+09] Gonzales, E. J.; Chavis, C.; Li, Y.; Daganzo, C. F.: Multimodal Transport Modeling for Nairobi, Kenya: Insights and Recommendations with an Evidence-Based Model: Center for Future Urban Transport Working Paper, 2009.
- [GCR16] Gaddam, H. K.; Chinthireddy, A.; Rao, K. R.: Comparison of Numerical Schemes for LWR Model under Heterogeneous Traffic Conditions. In *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2016, 44; S. 132–140.
- [GD07] Geroliminis, N.; Daganzo, C. F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams. Some experimental findings [Permalink](#), 2007.
- [GHR13] Geroliminis, N.; Haddad, J.; Ramezani, M.: Optimal Perimeter Control for Two Urban Regions With Macroscopic Fundamental Diagrams: A Model Predictive Approach. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14; S. 348–359.
- [GLP+14] Gerla, M.; Lee, E.-K.; Pau, G.; Lee, U.: Internet of vehicles. From intelligent grid to autonomous cars and vehicular clouds: 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT); S. 241–246.
- [GR17] Gámez Serna, C.; Ruichek, Y.: Dynamic Speed Adaptation for Path Tracking Based on Curvature Information and Speed Limits. In *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17.
- [GS10] Gupta, A. K.; Sharma, S.: Nonlinear analysis of traffic jams in an anisotropic continuum model. In *Chinese Physics B*, 2010; S. 110503.
- [GTD+34] Greenshields, B. D.; Thompson, J. T.; Dickinson, H. C.; Swinton, R. S.: THE PHOTOGRAPHIC METHOD OF STUDYING TRAFFIC BEHAVIOR: Highway Research Board Proceedings, 1934.
- [Had17] Haddad, J.: Optimal coupled and decoupled perimeter control in one-region cities. In *Control Engineering Practice*, 2017, 61; S. 134–148.
- [HBA+17a] Henning, S.; Biemelt, P.; Abdelgawad, K.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Methodology for Determining Critical Locations in Road Networks based on Graph Theory: IFAC World Congress 2017. IFAC, 2017.
- [HBA+17b] Henning, S.; Biemelt, P.; Abdelgawad, K.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Modellbasierte Untersuchung der Zuverlässigkeit algorithmisch bestimmter kritischer Stellen in Straßennetzen: VDI/VDE (AUTOREG 2017). VDI-Verlag, Düsseldorf, Berlin, Deutschland, 2017.
- [HBR+18] Henning, S.; Biemelt, P.; Rüdtenklau, N.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: A Simulation Framework for Testing a Conceptual Hierarchical Autonomous Traffic Management System including an Intelligent External Traffic Simulation. In *(Driving Simulation Association*

- tion Hrsg.): Proceedings of the DSC 2018 Europe VR. Driving Simulation & Virtual Reality Conference & Exhibition. New trends in Human in the Loop simulation and testing. Driving simulation and VR. Driving Simulation Association, 2018; S. 91–98.
- [Hei19] Heise, S.: Graphmasters - No more traffic jams ! <https://www.nunav.net/de/>, 19.03.2019.
- [Hel97] Helbing, D.: Verkehrsdynamik. Neue physikalische Modellierungskonzepte. Springer, Berlin, 1997.
- [HM17] Haddad Jack; Mirkin, B.: Coordinated distributed adaptive perimeter control for large-scale urban road networks. In Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 77; S. 495–515.
- [HRG13] Haddad, J.; Ramezani, M.; Geroliminis, N.: Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway. In Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 54; S. 17–36.
- [HT81] HUNT, P. B.; Transport and Road Research Laboratory.: SCOOT, a traffic responsive method of coordinating signals. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne Berkshire, 1981.
- [HT99] Helbing, D.; Treiber, M.: Numerical simulation of macroscopic traffic equations. In Computing in Science & Engineering, 1999, 1; S. 89–98.
- [HTK+09] Helbing, D.; Treiber, M.; Kesting, A.; Schönhof, M.: Theoretical vs. empirical classification and prediction of congested traffic states. In The European Physical Journal B, 2009, 69; S. 583–598.
- [HZ18] Haddad, J.; Zheng, Z.: Adaptive perimeter control for multi-region accumulation-based models with state delays. In Transportation Research Part B: Methodological, 2018.
- [IRP+14] Iordanidou, G.-R.; Roncoli, C.; Papamichail, I.; Papageorgiou, M.: Feedback-Based Mainstream Traffic Flow Control for Multiple Bottlenecks on Motorways. In IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014; S. 1–12.
- [Jau10] Barceló, J. Hrsg.: Fundamentals of Traffic Simulation. Springer New York, New York, NY, 2010.
- [JC04] Jiang, B.; Claramunt, C.: A structural approach to the model generalization of an urban street network. In GeoInformatica, 2004, 8; S. 157–171.
- [Jin10] Jin, W.-L.: Continuous kinematic wave models of merging traffic flow. In Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44; S. 1084–1103.
- [JNK15] Jabbarpour, M. R.; Noor, R. M.; Khokhar, R. H.: Green vehicle traffic routing system using ant-based algorithm. In Journal of Network and Computer Applications, 2015, 58; S. 294–308.

- [JSA+15] Jalili, M.; Salehzadeh-Yazdi, A.; Asgari, Y.; Arab, S. S.; Yaghmaie, M.; Ghavamzadeh, A.; Alimoghaddam, K.: CentiServer: A Comprehensive Resource, Web-Based Application and R Package for Centrality Analysis. In *PloS one*, 2015, 10; e0143111.
- [JZ03] Jin, W. L.; Zhang, H. M.: On the distribution schemes for determining flows through a merge. In *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003, 37; S. 521–540.
- [KA14] Kim, B. Y.; Ahn, H. S.: Distributed Coordination and Control for a Freeway Traffic Network Using Consensus Algorithms. In *Systems Journal, IEEE*, 2014, PP; S. 1–7.
- [KAW+08] Kachroo, P.; Al-nasur, S. J.; Wadoo, S. A.; Shende, A.: *Pedestrian dynamics. Feedback control of crowd evacuation*. Springer, Berlin, 2008.
- [KDH+12] Kritzing, S.; Doerner, K. F.; Hartl, R. F.; Kiechle, G. Ě.; Stadler, H.; Manohar, S. S.: Using Traffic Information for Time-Dependent Vehicle Routing. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, 39; S. 217–229.
- [Kes19] Kessels, F.: *Traffic flow modeling. Introduction to traffic flow theory through a genealogy of models*. Springer, Cham, Switzerland, 2019.
- [KHv12] Knoop, V. L.; Hoogendoorn, S.; van Lint, J.: Routing Strategies Based on Macroscopic Fundamental Diagram. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012, 2315; S. 1–10.
- [KHW+14] Krajzewicz, D.; Hausberger, S.; Wagner, P.; Behrisch, M.; Krumnow, M.: Second Generation of Pollutant Emission Models for SUMO: SUMO2014 - Second SUMO User Conference, 2014.
- [KK93] Kerner, B. S.; Konhäuser, P.: Cluster effect in initially homogeneous traffic flow. In *Physical Review E*, 1993, 48; R2335.
- [KLd19] Ketcheson, D.; LeVeque, R.; del Razo Sarmina, M.: *Riemann Problems and Jupyter Solutions. An interactive book about the Riemann problem for hyperbolic PDEs, using Jupyter notebooks*. Work in progress. http://www.clawpack.org/riemann_book/html/Index.html, 16.07.2019.
- [KM10] Kuhne, r.; Michalopoulos, P.: *Continuum Flow Models*, 2010.
- [KÖ18] Kachroo, P.; Özbay, K.: *Feedback Control Theory for Dynamic Traffic Assignment*. Springer Science and Business Media; Springer, Cham, Switzerland, 2018.
- [Kri17] Krimmling, J.: *Ampelsteuerung. Warum die grüne Welle nicht immer funktioniert*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [KTG18] Kouvelas, A.; Triantafyllos, D.; Geroliminis, N.: Hierarchical control design for large-scale urban road traffic networks: 2018 TRB Annual Meeting Online. *Transportation Research Board*, 2018; S. 18–4080.

- [Läm16] Lämmer, S.: Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest: Straßenverkehrstechnik, 2016.
- [LB14] Louf, R.; Barthelemy, M.: A typology of street patterns. In *Journal of The Royal Society Interface*, 2014, 11.
- [LBB+18] Lopez, P. A.; Behrisch, M.; Bieker-Walz, L.; Erdmann, J.; Flötteröd, Y.-P.; Hilbrich, R.; Lücken, L.; Rummel, J.; Wagner, P.; Wießner, E.: Microscopic Traffic Simulation using SUMO: The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2018.
- [LD14] Li, Z.; Duan, Z.: Cooperative Control of Multi-Agent Systems. A Consensus Region Approach. Taylor and Francis, Hoboken, 2014.
- [Leb05] Lebacque, J. P.: Intersection Modeling, Application to Macroscopic Network Traffic Flow Models and Traffic Management. In (Hoogendoorn, S. P. et al. Hrsg.): *Traffic and Granular Flow '03*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005; S. 261–278.
- [Lun14] Lunze, J.: Control theory of digitally networked dynamic systems. Springer, Cham, New York, 2014.
- [LVL14] Lefèvre, S.; Vasquez, D.; Laugier, C.: A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles. In *ROBOMECH Journal*, 2014, 1; S. 658.
- [LW55] Lighthill, M. J.; Whitham, G. B.: On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. In *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1955, 229; S. 317–345.
- [Mar18] Mariño, P. P.: Java Optimization Modeler. Technical University of Cartagena, 2018.
- [MBT+19] Mertin, S.; Buse, D.; Trächtler, A.; Gausemeier, S.; Dressler, F.: Proof-of-Concept einer komplexen Co-Simulationsumgebung für einen Fahrsimulator zur Untersuchung von Car2X-Kommunikations-Szenarien: VDI/VDE AUTOREG 2019. VDI Verlag Düsseldorf, Mannheim, Deutschland, 2019; S. 159–170.
- [MDC+11] Mazaré, P.-E.; Dehwah, A. H.; Claudel, C. G.; Bayen, A. M.: Analytical and grid-free solutions to the Lighthill–Whitham–Richards traffic flow model. In *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, 45; S. 1727–1748.
- [MGC+16] Maurer, M.; Gerdes, J.C.; Lenz, B.; Winner, H. Hrsg.: *Autonomous driving. Technical, legal and social aspects*.
- [Mor04] Moreau, L.: *Stability of continuous-time distributed consensus algorithms*, 2004.
- [MRA15] Misro, M. Y.; Ramli, A.; Ali, J. M.: Approximating maximum speed on road from curvature information of Bézier curve. In *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering*, 2015, 9; S. 728–735.

- [MV14] Méndez, A. R.; Velasco, R. M.: The Stability Analysis of a Macroscopic Traffic Flow Model with Two-Classes of Drivers. In (Schadschneider, A. et al. Hrsg.): Traffic and Granular Flow '13. Springer International Publishing, Cham, 2014; S. 525–531.
- [NL05] Ni, D.; Leonard, J. D.: A simplified kinematic wave model at a merge bottleneck. In Applied Mathematical Modelling, 2005, 29; S. 1054–1072.
- [OFM07] Olfati Saber, R.; Fax, J. A.; Murray, R. M.: Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems. In Proceedings of the IEEE, 2007, 95; S. 215–233.
- [PAO92] PAO, C.-V.: Nonlinear parabolic and elliptic equations. J. Wiley, New York, 1992.
- [Pay71] Payne, H. J.: Models of freeway traffic and control. In (Bekey, G. A. Hrsg.): Mathematical Models of Public Systems. Simulation Council Proceedings Series, La Jolla, 1971.
- [PKD+03] Papageorgiou, M.; Kiakaki, C.; Dinopoulou, V.; Kotsialos, A.; Wang, Y.: Review of road traffic control strategies. In Proceedings of the IEEE, 2003, 91; S. 2043–2067.
- [PPZ+13] Pan, J.; Popa, I. S.; Zeitouni, K.; Borcea, C.: Proactive Vehicular Traffic Rerouting for Lower Travel Time. In Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2013, 62; S. 3551–3568.
- [RAB+15] Rupi, F.; Angelini, S.; Bernardi, S.; Danesi, A.; Rossi, G.: Ranking Links in a Road Transport Network: A Practical Method for the Calculation of Link Importance. In Transportation Research Procedia, 2015; S. 221–232.
- [RBH+18] Rüdtenklau, N.; Biemelt, P.; Henning, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Shader-Based Realtime Simulation of High-Definition Automotive Headlamps. In (Ramezani, A. Hrsg.): SIMUL 2018. The Tenth International Conference on Advances in System Simulation October 14-18, 2018, Nice, France. IARIA, Wilmington, DE, USA, 2018.
- [RHG15] Ramezani, M.; Haddad, J.; Geroliminis, N.: Dynamics of heterogeneity in urban networks. Aggregated traffic modeling and hierarchical control. In Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 74; S. 1–19.
- [RiLSA10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement: Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA ; Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. FGSV-Verl, Köln, 2010.
- [Roal8] Roads and Maritime Services, NSW government agency: SCATS - Sydney Coordinated Adaptive Traffic System. The benchmark in urban traffic control. <https://www.scats.com.au/>.
- [Ros13] Rosini, M. D.: Macroscopic Models for Vehicular Flows and Crowd Dynamics: Theory and Applications. Classical and Non-Classical Advanced Mathematics for Real Life Applications. Springer International Publishing, Cham, 2013.

- [RS18] Riegelhuth, G.; Sandrock, M.: Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen. Aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [SD15] Sommer, C.; Dressler, F.: Vehicular Networking. Cambridge University Press, Cambridge, 2015.
- [SEE16] Saidallah, M.; El Fergougui, A.; Elalaoui, A. E.: A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators. In MATEC Web of Conferences, 2016, 81; S. 5002.
- [SFK+08] Sugiyama, Y.; Fukui, M.; Kikuchi, M.; Hasebe, K.; Nakayama, A.; Nishinari, K.; Tadaki, S.-i.; Yukawa, S.: Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. In New Journal of Physics, 2008, 10; S. 33001.
- [SG16] Saeedmanesh, M.; Geroliminis, N.: Clustering of heterogeneous networks with directional flows based on “Snake” similarities. In Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 91; S. 250–269.
- [SG17] Saeedmanesh, M.; Geroliminis, N.: Dynamic clustering and propagation of congestion in heterogeneously congested urban traffic networks. In Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 105; S. 193–211.
- [SRD11] Sommer, C.; German, R.; Dressler, F.: Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. In IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), 2011, 10; S. 3–15.
- [Sta18] State of California: Autonomous Vehicle Disengagement Reports 2018. https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/detail/vr/autonomous/disengagement_report_2018, 12.04.2019.
- [TA09] Torsten Bruns; Ansgar Trächtler: Kreuzungsmanagement: Trajektorienplanung mittels Dynamischer Programmierung (Intersection Management: Trajectory Planning by Means of Dynamic Programming). In Automatisierungstechnik, 2009; S. 253–261.
- [Tay11] Taylor, M. E.: Partial differential equations. Springer, New York, 2011-.
- [Tho11] Thorsten Bruns: Trajektorienplanung mittels Diskretisierung und kombinatorischer Optimierung am Beispiel des autonomen Kreuzungsmanagements für Kraftfahrzeuge. Dissertation, Paderborn, 2011.
- [Tim25] Science: Radio Auto. In Time Magazine, 1925, 1925.
- [TK10] Treiber, M.; Kesting, A.: Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [TK13] Treiber, M.; Kesting, A.: Traffic flow dynamics. Data, models and simulation. Springer, Heidelberg, New York, 2013.

- [TK17] Teoh, E. R.; Kidd, D. G.: Rage against the machine? Google's self-driving cars versus human drivers. In *Journal of Safety Research*, 2017, 63; S. 57–60.
- [TYH+79] Tsugawa, S.; Yatabe, T.; Hirose, T.; Matsumoto, S.: *An automobile with artificial intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1979.
- [UI+20] Umweltbundesamt, INFRAS: *Das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA)*. <https://www.hbefa.net>, 29.01.2020.
- [VDA15] Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) Hrsg.: *Automatisierung. Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren*.
- [vvV+15] van Wageningen-Kessels, F.; van Lint, H.; Vuik, K.; Hoogendoorn, S.: Genealogy of traffic flow models. In *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2015, 4; S. 445–473.
- [Way17] Waymo: Fiat Chrysler Pacifica. <https://waymo.com/>, 09.04.2019.
- [Way18] Waymo: Waymo Celebrates 10 Million Miles of Self-Driving. <https://www.youtube.com/watch?v=ROAwXEqDk7k>, 12.04.2019.
- [WB06] Wächter, A.; Biegler, L. T.: On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. In *Mathematical Programming*, 2006, 106; S. 25–57.
- [Wei08] Wei Ren: *Distributed Consensus in Multivehicle Cooperative Control: Theory and Applications*, 2008.
- [WH17] Watzenig, D.; Horn, M. Hrsg.: *Automated Driving. Safer and More Efficient Future Driving*. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [Whi74] Whitham, G. B.: *Linear and nonlinear waves*. Wiley, New York, 1974.
- [WLL+13] Wang, L.; Li, D.; Liu, X. m.; Li, Z. x.: Regional traffic state consensus optimization based on computational experiments: Intelligent Transportation Systems - (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on, 2013; S. 1547–1552.
- [WPR+08] Wegener, A.; Piórkowski, M.; Raya, M.; Hellbrück, H.; Fischer, S.; Hubaux, J.-P.: TraCI. In (Ahmad, A.; Bragg, A. Hrsg.): *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium on - CNS '08*. ACM Press, New York, New York, USA, 2008; S. 155.
- [WT13a] Wuthishuwong, C.; Traechtler, A.: Coordination of multiple autonomous intersections by using local neighborhood information: Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on, 2013; S. 48–53.
- [WT13b] Wuthishuwong, C.; Traechtler, A.: Vehicle to infrastructure based safe trajectory planning for Autonomous Intersection Management: ITS Telecommunications (ITST), 2013 13th International Conference on, 2013; S. 175–180.

- [WT14] Wuthishuwong, C.; Traechtler, A.: Consensus coordination in the network of Autonomous Intersection Management: Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2014 11th International Conference on, 2014; S. 794–801.
- [WW11] Ward, J. A.; Wilson, R. E.: Criteria for convective versus absolute string instability in car-following models. In Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011, 467; S. 2185–2208.
- [YB14] Younes, M. B.; Boukerche, A.: An Intelligent Traffic Light scheduling algorithm through VANETs. In undefined, 2014.
- [YLA+02] Yi, J.; Lin, H.; Alvarez, L.; Horowitz, R.: Stability of macroscopic traffic flow modeling through wavefront expansion: ACC. Proceedings of the 2002 American Control Conference May 8-10, 2002, Hilton Anchorage and Egan Convention Center, Anchorage, Alaska, USA. IEEE, Piscataway, N.J, 2002; 1484-1490 vol.2.
- [YRG15] Yildirimoglu, M.; Ramezani, M.; Geroliminis, N.: Equilibrium analysis and route guidance in large-scale networks with MFD dynamics. In Transportation Research: Part C, 2015, 59; S. 404–420.
- [ZBS+14] Ziegler, J.; Bender, P.; Schreiber, M.; Lategahn, H.; Strauss, T.; Stiller, C.; Dang, T.; Franke, U.; Appenrodt, N.; Keller, C. G.; Kaus, E.; Herrtwich, R. G.; Rabe, C.; Pfeiffer, D.; Lindner, F.; Stein, F.; Erbs, F.; Enzweiler, M.; Knoppel, C.; Hipp, J.; Haueis, M.; Trepte, M.; Brenk, C.; Tamke, A.; Ghanaat, M.; Braun, M.; Joos, A.; Fritz, H.; Mock, H.; Hein, M.; Zeeb, E.: Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route. In IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2014, 6; S. 8–20.
- [ZGG+16] Zhang, X.; Gao, H.; Guo, M.; Li, G.; Liu, Y.; Li, D.: A study on key technologies of unmanned driving. In CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2016, 1; S. 4–13.

Studentische Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Kontext der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik der Universität Paderborn angefertigt. Die Definition der Zielsetzung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung des Betreuenden Sven Mertin. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in die Dissertation eingeflossen.

- [Eve15] Evers, H. H. (Betreuer Sven Mertin): Entwicklung einer Methodik zum Auffinden kritischer Stellen in Straßennetzwerk-Graphen, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2015

- [Col15] Simon, C. (Betreuer Sven Mertin): Untersuchung des Einflusses von Bilanzraumgrößen und Rerouting-Strategien in realen, konsensgeregelten Verkehrsnetzmodellen, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, unveröffentlichte Studienarbeit, 2017

- [Dow19] Dowidar, F. (Betreuer Sven Mertin): Advanced Stability Analysis of Macroscopic, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, unveröffentlichte Studienarbeit, 2019

A Anhang

A.1 Simulationsframework

Im Folgenden werden einige Teilaspekte des entwickelten Simulationsframeworks beschrieben. Aufgrund des Umfangs sind diese jedoch in vereinfachter Weise und nicht in vollem Umfang dargestellt.

A.1.1 Klassendiagramme

Die Klassen des Simulationsframeworks gliedern sich hauptsächlich neben der Simulation als Kern in integrierte Helfer- und Statistikfunktionen sowie wichtige Parameterwerte auf der einen Seite und dem Straßennetzmodell auf der anderen Seite. Auf Grundlage dieser Funktionen sind die Unterpakete der mikroskopischen und makroskopischen Verkehrssteuerungen integriert (s. Abbildung A-1).

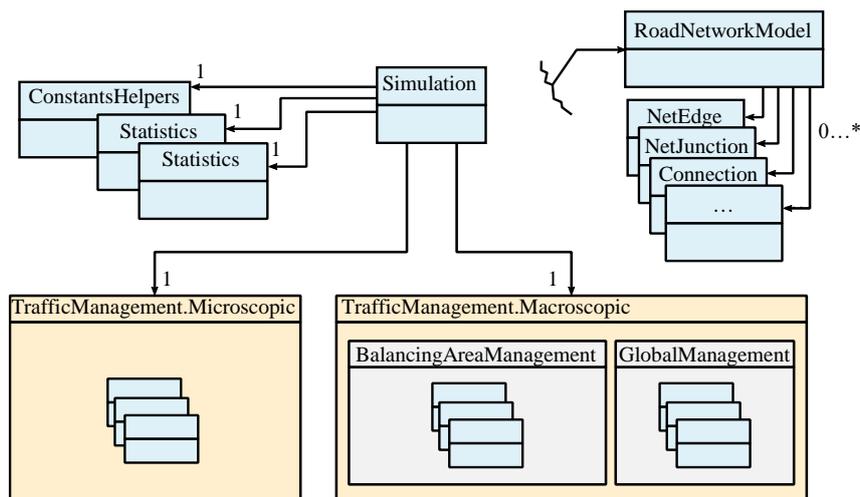


Abbildung A-1: Vereinfachtes Klassendiagramm mit den Unterpaketen der mikro- und makroskopischen Funktionen

Mikroskopisches Management

Das Unterpaket des mikroskopischen Managements umfasst das autonome kollisionsfreie Kreuzungsmanagement und ist in Abbildung A-2 dargestellt. Jede Kreuzung erhält einen *SingleIntersectionManager* für die Berechnungen, die Gesamtheit all dieser Manager wird durch die Klasse *IntersectionManagement* verwaltet. Jeder *SingleIntersectionManager* hat Zugriff auf einen eigenen Trajektorien-Generator (*TrajectoryGenerator*), der für die auf die Kreuzung einfahrenden Fahrzeuge (*IncomingVehicle*) Trajektorien (mit oder ohne notwendigen Halt) berechnet. Jede mögliche Trajektorie (*TrajectoryCandidate*) enthält hierbei eine Menge von Stützstellen (*PointOnTrajectoryCandidate*). Das Kollisionsraster (*CollisionGrid*) besteht aus Kollisionsknoten (*CollisionBlockingNode*), also der Kombination von geometrischen Flächenquadraten der Kreuzung (*CollisionRectangle*) und der entsprechenden diskreten Zeit. Die für ein Fahrzeug ausgewählte Trajektorie (*PlannedVehicleTrajectory*) wird für die Simulation diskretisiert und gespeichert (*IncomingLaneTrajectoryDiscretized*).

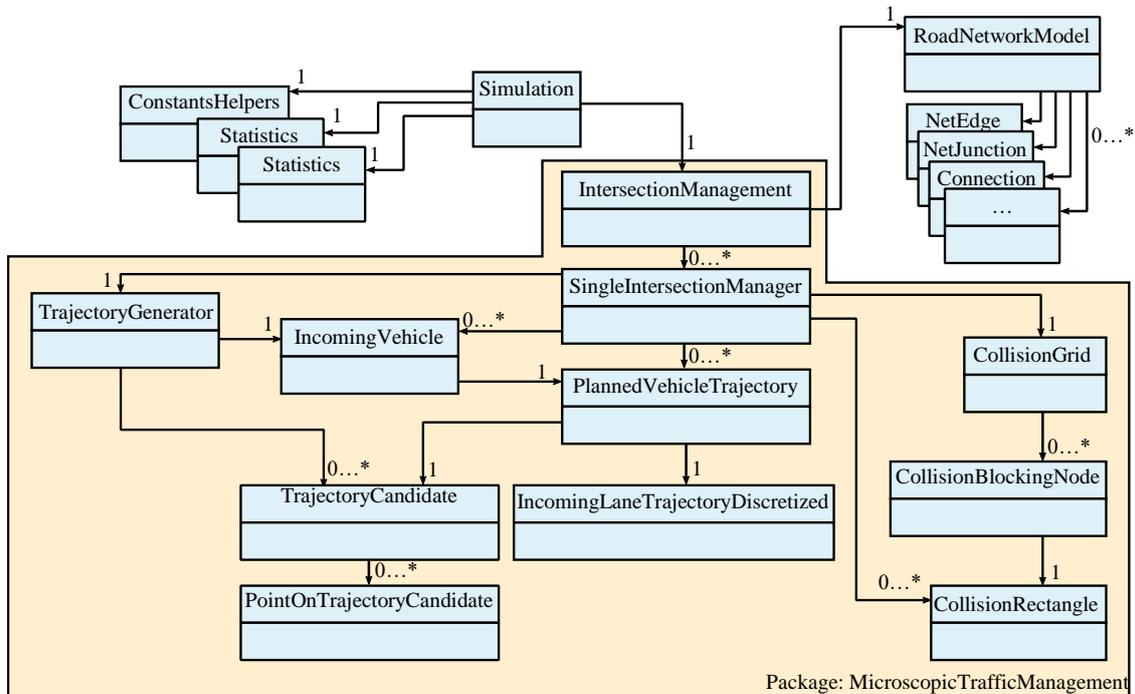


Abbildung A-2: Vereinfachtes Klassendiagramm mit den Klassen des mikroskopischen autonomen Kreuzungsmanagements (Hierarchieebene 1)

Makroskopisches Management

Das Unterpaket des makroskopischen Managements umfasst die Verkehrsdichteregulierung mit dem Durchschnitts-Konsensalgorithmus und dem Inner-Bilanzraumrouting für jeden Bilanzraum und ist in Abbildung A-3 dargestellt. Alle definierten Bilanzräume (*BalancingArea*) werden durch die Klasse *BalancingAreaManagement* verwaltet und enthalten den Durchschnitts-Konsensalgorithmus (*ConsensusController*) und die Logik für das Inner-Bilanzraumrouting (*ReroutingController*). Der *ConsensusController* ist für die Berechnung auf ein Fundamentaldiagramm angewiesen (*FundamentalDiagram*) sowie den aktuellen Verkehrszustand aller im Bilanzraum befindlichen Straßen (*NetEdgeTrafficState*). Der *ReroutingController* umfasst eine Menge von Routing-Verbindungen (*RoutingConnection*), die ihrerseits ebenfalls von den zuvor erwähnten Verkehrszuständen abhängen.

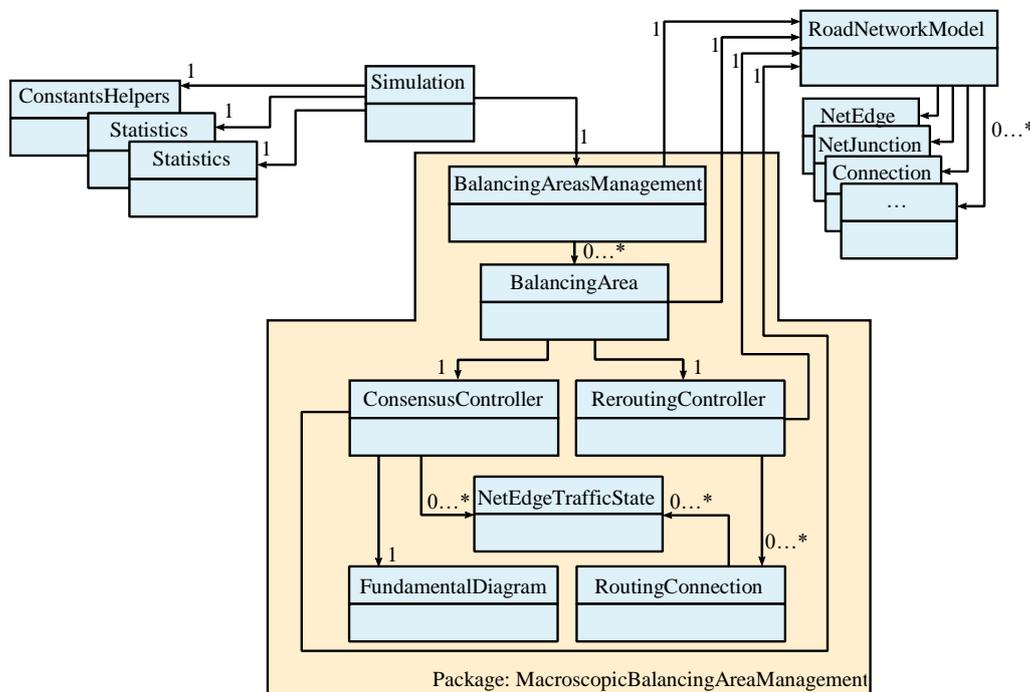


Abbildung A-3: Vereinfachtes Klassendiagramm mit den Klassen des makroskopischen Bilanzraummanagements (Hierarchieebene 2)

Globales makroskopisches Management

Das Unterpaket des globalen makroskopischen Managements besteht aus dem globalen Routing und ist in Abbildung A-4 zu sehen. Zwischen den Bilanzräumen besteht eine Vielzahl möglicher Routing-Verbindungen (*TopLevelRoutingConnection*), die von der Logik des globalen Routings (*TopLevelRoutingManagement*) verwaltet werden.

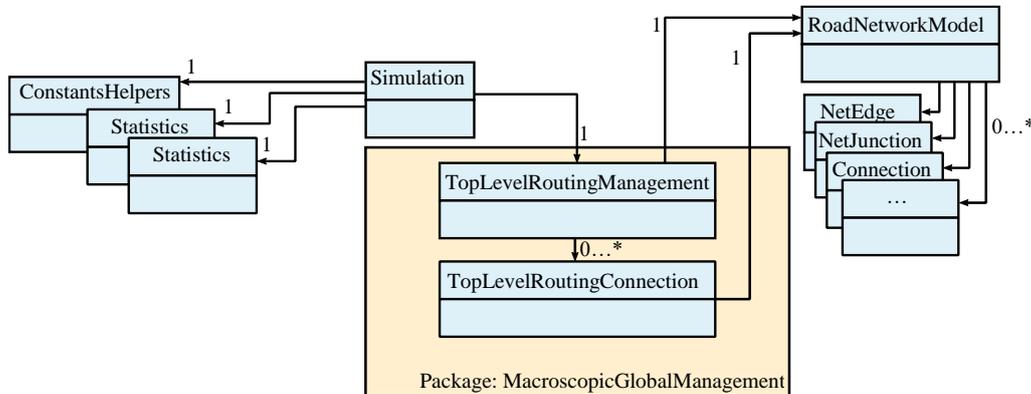


Abbildung A-4: Vereinfachtes Klassendiagramm mit den Klassen des makroskopischen globalen Managements (Hierarchieebene 3)

Grafische Benutzeroberfläche (GUI) des Simulationsframeworks

Das entwickelte Simulationsframework verfügt über eine grafische Benutzeroberfläche, mit der Straßennetze eingelesen und simuliert werden können. Außerdem ist es möglich, sämtliche Einstellungen für die entsprechende Simulation zu setzen und statistische Auswertungen für eine Weiterverarbeitung abzuspeichern.

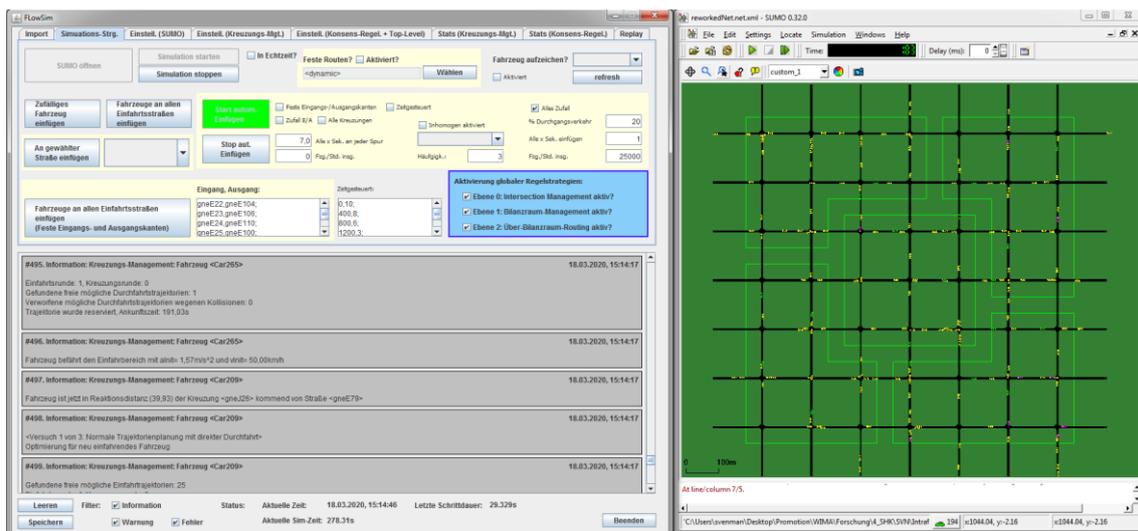


Abbildung A-5: Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) des entwickelten Simulationsframeworks

A.1.2 Kopplung mit 3D-Visualisierung und Echtzeitsystemen

Das vorgestellte Simulationsframework umfasst die Funktionalität, eine selbstentwickelte 3D-Visualisierung anzukoppeln, die automatisiert 3D-Umgebungen auf Grundlage von Straßennetzmodellen erzeugen kann. In Abbildung A-6 ist ein Screenshot der 3D-Visualisierung zu sehen. Zusätzlich können Ego-Fahrzeuge integriert werden, die vom Fremdverkehr erkannt und berücksichtigt (jeweils rotes Fahrzeug – links und rechts) werden. Die Ego-Fahrzeug-Informationen können z.B. mit Hilfe eines einfachen USB-Lenkrads am PC oder von einem komplexen Fahrzeugmodell, welches auf einer Echtzeithardware berechnet wird, generiert werden. Auf diese Weise können auch Fahr simulatoren eingebunden werden, allerdings ist bisher keine Beeinflussung der Ego-Fahrzeuge durch das autonome hierarchische Verkehrsmanagement vorgesehen.



Abbildung A-6: Screenshot einer exemplarischen Simulation mit 3D-Visualisierung

A.1.3 Bilanzraumeinteilungen der Simulationskonfigurationen

Für die simulative Untersuchung der Straßennetze (vgl. Abbildung 5-13) wurden diese in Bilanzräume eingeteilt. In Abbildung A-7 und Abbildung A-8 können die Einteilungen eingesehen werden. Während die synthetischen Verengungen jeweils aus einem einzigen Bilanzraum bestehen, sind die restlichen Straßennetze in mehrere Bilanzräume unterteilt.

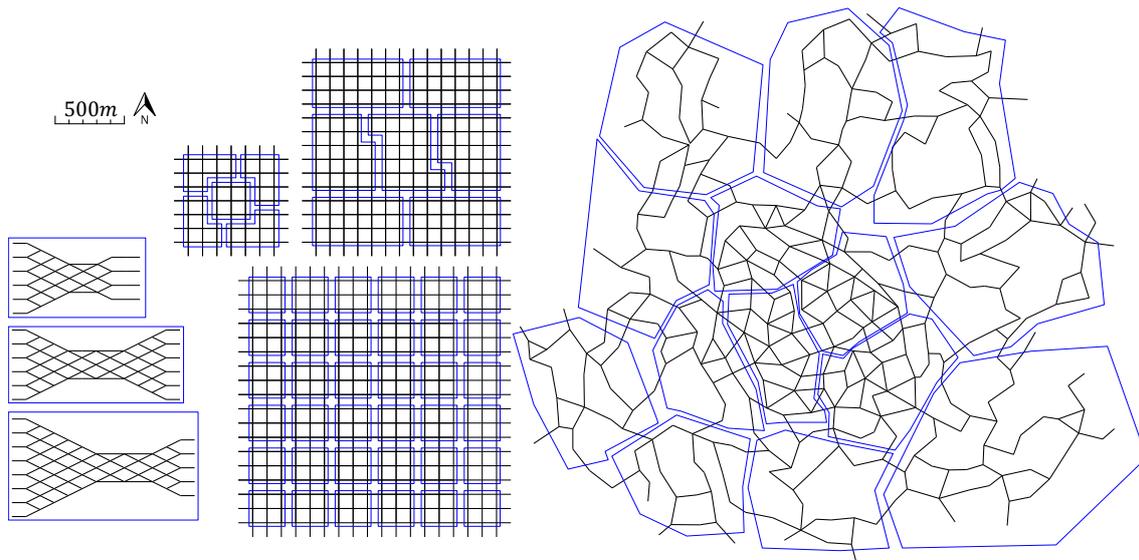


Abbildung A-7: Bilanzraumeinteilungen aller synthetisch erzeugten Straßennetze im selben Maßstab (links: synthetische Verengungen und synthetisch symmetrische Netze, rechts: synthetisches organisches Netz)



Abbildung A-8: Bilanzraumeinteilungen beider realen Straßennetze im selben Maßstab (links: Bielefeld Ost, rechts: Paderborn Zentrum)

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Bad Salzuflen, 07.04.2022: