

Verkehrsmanagement für Einsatzfahrzeuge

vorgelegt von
Dipl. Inf. Laura Bieker-Walz
an der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme

der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Doktor rer. nat.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Prof. Dr. Thomas Richter (Vorsitzender)
Prof. Dr. Peter Wagner (Gutachter)
Prof. Dr. Kai Nagel (Gutachter)
Prof. Dr. Peter Vortisch (Gutachter)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13.01.2021

Berlin 2021



Danksagung

Bei der Fertigstellung dieser Doktorarbeit wurde ich von vielen netten Menschen selbstlos unterstützt, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Ich möchte mich vor allem bei meiner Familie bedanken, die an mich geglaubt, auf mich verzichtet und mich unterstützt hat. Ich danke meinen Eltern für ihre liebevolle und unterstützende Erziehung, meinem Mann Simon für seine Erfahrungen als Rettungswagenfahrer und seinen unermüdlichen Glauben an mich und meinen Kindern Mira und Fabio dafür, dass sie stets für positive Ablenkung gesorgt haben.

Ein besonderer Dank geht an das DLR und die TU Berlin, die mir die Möglichkeit, Betreuung und Finanzierung meines Forschungsvorhabens gegeben haben. Mein Gruppenleiter Robert Hilbrich hat sich sehr für mich eingesetzt, um mir die nötigen Rahmenbedingungen zu schaffen. Ohne seinen Einfallsreichtum und Pragmatismus wäre ich sehr wahrscheinlich nicht in der Lage gewesen diese Arbeit abzuschließen, dafür kann ich mich kaum genug bei ihm bedanken.

Meinem Doktorvater Peter Wagner danke ich für sein konstruktives und schnelles Feedback, seine kreativen und hilfreichen Ideen sowie seine freundliche und unterstützende Art. Meinem Betreuer Michael Behrisch bin insbesondere dafür dankbar, dass er stets Zeit für mich hatte und mein Thema durch neue Ideen und Fragen vorangetrieben hat.

Für die Korrektur und Verbesserungsvorschläge der Doktorarbeit bedanke ich mich zusätzlich zu den bereits genannten bei meinen Schwiegereltern Liane und Friedrich Walz, meinen Kollegen Ronald Nippold und Yun-Pang Flötteröd.

Zudem ein herzliches Danke an meine Interviewpartner, die mir wertvolle Einblicke in ihre Arbeit gegeben haben und meine Fragen klären konnten: Willi Schmidt, Thorsten Müller, Frederick, Theresa Thuning, dem Support-Team von AIMSUN, CORSIM und VISSIM. Und natürlich danke ich allen, die mit mir über meine Doktorarbeit gesprochen, mir Mut gemacht haben und mich auf neue Ideen gebracht haben.

Vielen Dank an die Projekte SIRENE und HALI, durch die ich an meinem Thema forschen konnte und gleichzeitig viele wertvolle Daten und Informationen der Feuerwehr bekommen konnte.

Zu guter Letzt danke ich mir selber, dass ich durchgehalten und die Hilfe dieser wunderbaren Leuten in Anspruch genommen habe.

Kurzfassung der Dissertation

Bei einem Notfall ist es wichtig, dass Rettungsdienst, Feuerwehr und Polizei die Einsatzstelle so schnell wie möglich erreichen, um eine geeignete Notfallversorgung zu gewährleisten. Jedoch wird dies durch das wachsende Verkehrsaufkommen erschwert. Als Resultat ist es häufig für die Einsatzkräfte nicht möglich die vorgegebene Hilfsfrist einzuhalten. Um Einsatzkräfte eine schnelle Durchfahrt zu ermöglichen, sind Einsatzfahrten mit Blaulicht und Martinshorn dazu berechtigt die Vorschriften der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) unter gewissen Voraussetzungen zu missachten. Dies führt jedoch dazu, dass das Führen eines Einsatzfahrzeuges eine komplexe und anstrengende Tätigkeit ist, da die Reaktionen des Umgebungsverkehrs mitberücksichtigt werden müssen, um Konflikte zu vermeiden. Zusätzlich kommt erschwerend hinzu, dass Einsatzfahrten eine erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit haben. Daraus ergeben sich viele Fragen: Wodurch kommt es zu der erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit von Einsatzfahrzeugen? Welche Verkehrsprobleme treten bei Einsatzfahrten auf? Und wie können Einsatzfahrzeuge unterstützt werden? Ausgehend von diesen Fragestellungen wurden in dieser Dissertation die Fahrten von Einsatzfahrzeugen ausgewertet, um darauf aufbauend ein Simulationsmodell von Einsatzfahrzeugen und eine Verkehrsmanagementstrategie für Einsatzfahrzeuge zu erstellen.

Der erste wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit besteht, darin, dass ein Simulationsmodell speziell für Einsatzfahrzeuge erstellt und in der Verkehrssimulation Simulation of Urban MObility (SUMO) umgesetzt wurde. Auf diese Weise ist es möglich ein realistisches Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen und dem Umgebungsverkehr zu simulieren. Bestandteil des Einsatzfahrzeugmodells ist, dass der Umgebungsverkehr eine Rettungsgasse bilden und nur das Einsatzfahrzeug die Rettungsgasse passieren kann. Zudem kann das Einsatzfahrzeug einen Rotlichtverstoß begehen und die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten. Für das Modell wurden Verkehrsdaten von Einsatzfahrten in Braunschweig analysiert und verwendet.

Der zweite wissenschaftliche Beitrag dieser Dissertation besteht in einem Konzept zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen. Hierbei wird bei den Lichtsignalanlagen auf der Route eines Einsatzfahrzeug eine Grüne Welle geschaltet. Um die Benachteiligung des Umgebungsverkehrs so gering wie möglich zu halten, ist die Länge der Grünzeit der Lichtsignalanlagen dynamisch und abhängig von der aktuellen Verkehrslage. Ziel ist es, dass die Grünzeit so lange wie nötig und so kurz wie möglich ist. Der größte Unterschied zu bestehenden Bevorrechtigungssystem besteht bei diesem Konzept darin, dass nicht nur eine einzelne Kreuzung sondern mehrere Kreuzungen koordiniert betrachtet werden. Der Algorithmus funktioniert vollständig selbstorganisierend. Die Evaluation mittels synthetischen und realen Simulationsszenarien zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Thesis Outline

In case of an emergency it is crucial for a working health system that emergency service reaches every incident location as fast as possible. It is getting more and more challenging to reach this goal because of the growing traffic demand. As a result, the legal help period of emergency vehicles are exceeded in many cases. That is why, emergency vehicles are authorized to use special privileges while using siren and blue flashing light. Driving an emergency vehicle is a physical and psychological complicated task. The emergency vehicle driver has to precisely predict the reactions of the other traffic participants to avoid critical situations while aiming to arrive the appointed destination within the legal help period. Accordingly, emergency vehicles are having a higher risk being involved in a car crash than other traffic participants. This leads to several research questions which are addressed in this research study: Why is the likelihood of being involved in a traffic accident higher with an emergency vehicle? Which traffic problems do emergency vehicle drivers face? How can emergency vehicle driver be supported during an emergency drive? Based on these questions, this thesis evaluates the emergency vehicle drives to develop a microscopic simulation model for emergency vehicles and a traffic support strategie to assist emergency vehicle drivers to reach their destinations at the earliest opportunity.

The first contribution of this research is to develop a simulation model for emergency vehicles and implement it in the traffic simulation package SUMO. Real traffic data from emergency vehicle drives in Brunswick were analysed to develop this model. With this model it is possible to simulate the driving behaviours of emergency vehicles and the respective reactions of the other traffic participants. Part of the emergency vehicle model is the simulation of a virtual rescue lane which can only be used by emergency vehicles. In addition, emergency vehicles are able to violate red traffic lights and drive faster than the given speed limit.

The second contribution of this thesis is to develop a concept for supporting emergency vehicle drivers. As a result, the traffic light systems along the route of an emergency vehicle will be switched to green for the lane of the emergency vehicle. To minimize the negative impact on the surrounding traffic, the lengths of the green phases are set dynamically and depend on the current traffic situation. The goal is to make the green phases as long as necessary and as short as possible for emergency vehicles. The main difference to the existing preemption systems is that this concept coordinates more than just one single intersection. The algorithm works in a self-organising way through the interactions between emergency vehicles and other traffic participants. The respective analysis with use of synthetic and real world scenarios shows a promising result. At the end, the related topics and issues for future research and model development are pointed out in this thesis as well.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.1.1	Hilfsfristen	1
1.1.2	Verkehrssicherheit	2
1.2	Forschungsziel	4
1.3	Aufbau der Arbeit	4
1.3.1	Anmerkungen	6
2	Grundlagen	7
2.1	Sondereinsatzfahrzeuge	7
2.1.1	Sonderrechte	8
2.1.2	Wegerecht	9
2.2	Verkehrsoptimierung	10
2.2.1	Kreuzungsoptimierung	11
2.2.2	Strecken- und Netzsteuerung	13
2.2.3	Verkehrsmanagementstrategien für Einsatzfahrzeuge	15
2.2.4	Zusammenfassung	19
2.3	Modellierung und Simulation von Verkehr	21
2.3.1	Verkehrssimulationssysteme	23
2.3.2	Zusammenfassung der Simulationssysteme	27
3	Verkehrsdatenauswertung von Einsatzfahrzeugen	31
3.1	Unfalldatenauswertung	31
3.2	Verkehrsdaten	35
3.2.1	Verkehrskameras	35
3.2.2	Trajektorien von Einsatzfahrzeugen	36
3.2.3	Experteninterviews	37
3.2.4	Videoauswertung	37
3.3	Geschwindigkeitsauswertung	39
3.3.1	Knotenpunkte	39
3.3.2	Streckenabschnitte	41
3.4	Routenauswertung	44
3.5	Zusammenfassung	46
4	Modellierung von Einsatzfahrzeugen	49
4.1	Anforderungen an ein Einsatzfahrzeugmodell	49
4.2	Bestehende Modelle von Einsatzfahrzeugen	50
4.3	Einsatzfahrzeugmodell in SUMO	51

4.3.1	Rettungsgassenbildung	52
4.3.2	Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit	55
4.3.3	Bevorrechtigung an Knotenpunkten	56
4.3.4	Überholen über die Fahrbahn des Gegenverkehrs	56
4.3.5	Benutzung restriktierter Straßen	56
4.3.6	Benutzung und Darstellung in SUMO	56
4.4	Simulationsauswertung	57
4.5	Zusammenfassung	58
5	Konzept zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen	61
5.1	Basis-Konzept	61
5.2	Walabi-Konzept	62
5.2.1	Systemkoordinierung	64
5.2.2	Behandlung von Konflikten	69
5.3	Zusammenfassung	69
6	Simulationsszenarien	71
6.1	Rahmenbedingungen	71
6.1.1	FAST	72
6.1.2	Stream	73
6.1.3	Ohne Vorfahrt	74
6.2	Szenario 1: Einfacher Knotenpunkt	74
6.3	Szenario 2: Korridor	76
6.4	Szenario 3: Manhattan-Grid	76
6.5	Szenario 4: Braunschweig	77
6.5.1	Forschungskreuzung	77
6.5.2	Braunschweiger Korridor	78
6.5.3	Stadt Braunschweig	78
7	Simulationsergebnisse	81
7.1	Szenario 1: Einfacher Knotenpunkt	81
7.1.1	Knotenpunkt mit einem Fahrstreifen pro Straßen	81
7.1.2	Ohne abbiegenden Verkehr	82
7.1.3	Mit abbiegenden Verkehr	83
7.1.4	Knotenpunkt mit zwei Fahrstreifen pro Straße	86
7.2	Szenario 2: Korridor	88
7.2.1	100 Meter	88
7.2.2	200 Meter	90
7.2.3	500 Meter	90
7.3	Szenario 3: Manhattan-Grid	93
7.4	Szenario 4: Braunschweig	95
7.4.1	Forschungskreuzung in Braunschweig	95
7.4.2	Braunschweiger Korridor	97
7.4.3	Stadt Braunschweig	99
7.5	Zusammenfassung	101

8 Zusammenfassung und Ausblick	103
8.1 Zusammenfassung	103
8.1.1 Verkehrssicherheit	103
8.1.2 Verkehrsunterstützung	104
8.1.3 Verkehrssimulation	105
8.2 Ausblick	107
Literatur	110
Unfallberichte mit Einsatzfahrzeugen	110
Abbildungsverzeichnis	113
Tabellenverzeichnis	115
Abkürzungsverzeichnis	117
A Anhang	119
A.1 StVO	119
A.2 Leitfaden des Experteninterviews	120
A.3 Vereinfachte Transkripte der Experteninterviews	120
A.3.1 1. Experte: Freiwillige Feuerwehr	120
A.3.2 2. Experte: Freiwillige Feuerwehr	121
A.3.3 3. Experte: Rettungsassistent	122

INHALTSVERZEICHNIS

1

Einleitung

In diesem Kapitel wird eine allgemeine Einführung in das Thema dieser Forschungsarbeit gegeben. Nach einer kurzen Motivation werden Forschungsfragen aufgestellt, die im weiteren Verlauf beantwortet werden. Zum Überblick wird eine kurze Struktur der Arbeit erläutert.

1.1 Motivation

Für ein effektives und effizientes Gesundheitssystem ist es notwendig, dass Einsatzkräfte bei einem Notfall so schnell wie möglich die Einsatzstelle erreichen. Jedoch ist das Führen eines Einsatzfahrzeuges eine psychisch sowie physisch sehr anspruchsvolle Tätigkeit. Während der Einsatzwagenfahrer sich mental bereits auf die Notfallsituation am Einsatzort vorbereitet, muss gleichzeitig sicher gegangen werden das Fahrzeug sicher und schnell an das Ziel zu befördern. Dabei treten bei einer Einsatzfahrt hauptsächlich zwei große Probleme auf: zum einen können die Hilfsfristen nicht eingehalten werden, d.h. die Einsatzkräfte können den Einsatzort nicht schnell genug erreichen und zum anderen muss mit erhöhter Unfallwahrscheinlichkeit gerechnet werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf diese beiden Problemfelder eingegangen.

1.1.1 Hilfsfristen

Die Hilfsfrist umfasst die Zeit ab dem Eingang eines Notrufes bis zum Eintreffen der Einsatzkräfte am Unfallort. Im Normalfall liegen die Hilfsfristen im Bereich von 10 bis 15 Minuten für Rettungswagen. Bei der Feuerwehr wird die Gesprächszeit für den Notruf mit 90 Sekunden berechnet und zusätzlich 8 Minuten Ausrück- bzw. Anfahrtszeit [1]. Die Hilfsfristen bis wann ein Einsatzfahrzeug nach einem Notruf am Einsatzort eingetroffen sein soll, werden von den Bundesländern festgelegt [1].

Bei der Feuerwehr ist es üblich, z.B. bei einem Großbrand, mehrere Feuerwehrewachen gleichzeitig zu alarmieren, damit sichergestellt wird, dass nach kurzer Zeit Hilfe vor Ort sein kann [1].

Die Hilfsfrist ist nur als zeitliche Richtlinie zu verstehen, da im Falle eines Notfalls jede Reisezeitverkürzung wünschenswert ist. Aus medizinischer Sicht macht es einen erheblichen Unterschied, ob ein Patient nach einer Minute reanimiert werden kann (mit einer Überlebenschance von ca. 80 %) oder erst nach 8 Minuten (erfolgreiche Wiederbelebung nur in Ausnahmefällen möglich) [1].

Auf nationaler Ebene wird in Deutschland angestrebt, dass in 95 % der Fälle die Hilfsfrist eingehalten werden kann [1]. Die Vorgaben in anderen Ländern sehen hier vergleichbar aus: z.B. in Tucson (Arizona) sollen ebenfalls 95 % der Notfälle innerhalb von 8 Minuten bedient werden [2]. In der Studie von Schmiedel [3] wurde untersucht, ob die Hilfsfristen in Deutschland eingehalten werden konnten. Im Schnitt lagen die Hilfsfristen bei 8,7 Minuten. In 95 % der Fälle konnte der Einsatzort innerhalb von 16,7 Minuten erreicht werden. Die Alarmierungszeit beträgt bei einem Notfall im Mittel 2,1 Minuten. In Abschnitt 3.4 wird am Beispiel von Braunschweig die Einhaltung der Hilfsfristen ebenfalls untersucht.

Untersuchungen stellten heraus, dass bei einer Einsatzfahrt das Überfahren eines roten Signalgebers eine Verlustzeit von 15 bis 30 Sekunden erzeugt. In einer Videoauswertung von Buchenscheit et. al. [4] kam es bei der Hälfte aller untersuchten Einsatzfahrten zu mindestens einer Situation, bei der es mehr als 30 Sekunden dauerte, eine Rettungsgasse für den Einsatzwagen zu bilden. Dazu kommen noch Zeitverluste, die sich durch falsche Reaktionen von anderen Verkehrsteilnehmern ergeben. So verloren die Einsatzwagen im Schnitt eine Minute pro Einsatzfahrt, da sich durchschnittlich 2,5 Fahrer falsch verhielten. Zudem wurden pro Einsatzfahrt im Mittel zwei kritische Situationen beobachtet, die fast zu einer Unfallsituation führten [4]. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt auf die Verkehrssicherheit von Einsatzfahrzeugen eingegangen.

1.1.2 Verkehrssicherheit

Insgesamt gibt es in Deutschland jährlich ca. 2,5 Millionen Verkehrsunfälle, davon ca. 300.000 mit Personenschaden und insgesamt ca. 3.200 Menschen verunglücken dabei tödlich [5]. Das Risiko in einen Verkehrsunfall zu geraten, ist für Einsatzfahrzeuge signifikant höher als für andere Verkehrsteilnehmer [6]. Verschiedene Verkehrssicherheitsstudien haben das erhöhte Risiko, dessen Auswirkung sowie die Gründe hierfür untersucht (siehe [7], [8], [6], [9]). In diesen Studien wird häufig für die erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit das besondere Fahrverhalten bei Einsatzfahrten genannt:

„Die bei Sondereinsatzfahrten in der Regel gebotene Eile führt zwangsläufig zu einem riskanteren Fahrstil. Hinzu kommt, dass übrige Verkehrsteilnehmer durch unkontrollierte Reaktionen in derartigen Verkehrssituationen einen weiteren Unsicherheitsfaktor darstellen.“ ([7], S. 1)

In einer Sicherheitsanalyse der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) [7] wurden Unfälle mit Einsatzfahrzeugen untersucht, das Einsatzpersonal befragt und Videoanalysen durchgeführt, um an Hand der Ergebnisse dieser Studien Ansätze zur

Verbesserung für Einsatzfahrten abzuleiten. Zur Zeit der Analyse kam es jährlich zu ca. 3.500 Verkehrsunfällen mit Einsatzfahrzeugen während eines Einsatzes, davon wurden bei ca. 200 Unfällen Personenschäden verzeichnet, bei 50 Unfällen mit Schwerverletzten und bei 14 Unfällen kam es zu Todesfällen. Statistisch kommt es demnach zu einem Unfall mit Todesfällen innerhalb von 272.000 Einsatzfahrten mit Sonderrechten in Deutschland, während es bei einem Einsatzfahrzeug ohne Sondersignale rechnerisch erst nach 609.000 Einsätzen zu einem Unfall mit Todesfolge kommt. Im Durchschnitt gibt es einen Verkehrsunfall mit einem Einsatzfahrzeug in 2.000 Einsätzen. Laut der Studie ergibt sich, dass das Risiko bei einer Einsatzfahrt mit Sondersignalen in einen Unfall mit Schwerverletzten zu geraten, achtmal höher ist als während eines Einsatzes ohne Sondersignale [7].

In anderen Ländern sieht die Unfallstatistik ähnlich aus. So werden in den USA jährlich ca. 12.000 Verkehrsunfälle mit Einsatzfahrzeugen verzeichnet. Daraus resultiert laut Burns [10] eine um 50 % höhere Unfallwahrscheinlichkeit für Einsatzwagenfahrer, in den USA, während eines Einsatzes verglichen mit der durchschnittlichen Unfallwahrscheinlichkeit in einem Pkw. Dieses um 50 % erhöhte Unfallrisiko in den USA lässt sich jedoch nicht direkt vergleichen mit dem achtfach erhöhten Risiko in Deutschland. Während bei der Studie von Burns die generelle Unfallwahrscheinlichkeit von Pkws mit dem von Einsatzfahrzeugen verglichen wurde, wurden bei der Studie der BASt nur die Einsatzfahrzeuge mit und ohne Sondersignale untersucht.

Diese Ergebnisse sind in zweifacher Hinsicht gravierend. So sollten Einsatzfahrten dazu dienen, Menschen schnellstmöglich zu helfen und dadurch ggf. Menschenleben zu retten. Kommt es auf der Fahrt zu Unfällen, verlängert sich dadurch die Fahrzeit erheblich, wodurch erste Hilfe eventuell nicht rechtzeitig oder gar nicht geleistet werden kann. Außerdem entstehen durch die Einsatzfahrt u.U. mehr Verkehrsunfälle, bei denen es zu zusätzlichen Verletzten und Toten kommen kann. Des Weiteren setzen sich die Einsatzfahrer selbst einem erhöhten Unfallrisiko aus, um anderen Menschen zu helfen.

Es gibt Untersuchungen darüber, dass in den USA die Verletzungsgefahr für Einsatzkräfte, während der Arbeitszeit, mehr als doppelt so hoch ist, verglichen mit anderen Berufsgruppen [11]. Dabei sind Verkehrsunfälle der Hauptgrund für die erhöhte Verletzungsgefahr. Es wird insbesondere hervorgehoben, dass im Falle eines Unfalles Rettungskräfte noch stärker von dem Unfall betroffen sind, da sie sich während der Fahrt um die Patienten kümmern müssen und deshalb selten angeschnallt sind [12] [13].

Andere Studien untersuchten die Beschaffenheit von Einsatzwagen, die zu mehr Sicherheit führen, z.B. auffällige Farben, eine erhöhte Sitzposition des Fahrers [1] oder das Anbringen von zusätzlichen Blinklichtern an den Fahrzeugseiten [14]. Diese Aspekte werden in dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht, da sie den Rahmen sprengen würden. In Abschnitt 3.1 wird die hier beschriebene Literaturrecherche durch eine Unfallanalyse von Einsatzfahrten ergänzt.

1.2 Forschungsziel

Der Fokus dieser Forschungsarbeit ist es eine Verkehrsmanagementstrategie zu entwickeln, die Einsatzfahrten von Einsatzfahrzeugen unterstützt und gleichzeitig die Benachteiligung von anderen Verkehrsteilnehmern so gering wie möglich hält.

In diesem Rahmen sollen folgende Forschungsbereiche und dazugehörige Forschungsfragen untersucht werden:

1. Verkehrssicherheit
 - Wodurch kommt es zu der erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit von Einsatzfahrzeugen?
 - Welche Bereiche sind für Einsatzfahrzeuge besonders riskant?
2. Verkehrsunterstützung
 - Welche Verkehrsprobleme treten bei Einsatzfahrten auf?
 - Wie können Einsatzfahrzeuge unterstützt werden?
3. Verkehrssimulation
 - Wie unterscheidet sich das Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen von dem normaler Pkws?
 - Wie lässt sich das Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen in einer Simulation abbilden?

Aus diesen Fragen soll ein Konzept für eine selbststeuernde Verkehrsmanagementstrategie abgeleitet werden, um die Routen von Einsatzfahrzeugen schneller und sicherer zu gestalten, während gleichzeitig andere Verkehrsteilnehmer nicht unnötig langen Verzögerungen im Verkehrsablauf ausgesetzt werden.

Des Weiteren soll ein Konzept zur Simulation und Modellierung von Einsatzfahrzeugen innerhalb einer Verkehrssimulation erstellt und implementiert werden, um das Verhalten von Einsatzfahrzeugen möglichst realistisch abbilden zu können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der thematische Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Die verschiedenen Themenblöcke werden im folgenden beschrieben und verweisen auf die entsprechenden Kapitel.

Motivation: Als Motivation für diese Arbeit dienen zwei Problembereiche von Einsatzfahrzeugen. Zum einen haben Einsatzfahrzeuge während einer Einsatzfahrt mit Blaulicht und Martinshorn ein höheres Risiko in einen Unfall verwickelt zu werden und zum anderen ist das schnelle Erreichen des Einsatzortes für Einsatzfahrzeuge häufig problematisch. Zunächst wird eine detaillierte Beschreibung von der Verkehrssituation von Einsatzfahrzeugen gegeben. Das umfasst die Definition von verschiedenen Begriffen, wie z.B. Einsatzfahrzeug oder Sonderrechte, sowie eine Verkehrsanalyse, um zu ermitteln, welchen Problemen Einsatzfahrzeuge ausgesetzt sind (Kapitel 2). Daraus wurden anschließend Hilfsmöglichkeiten abgeleitet.

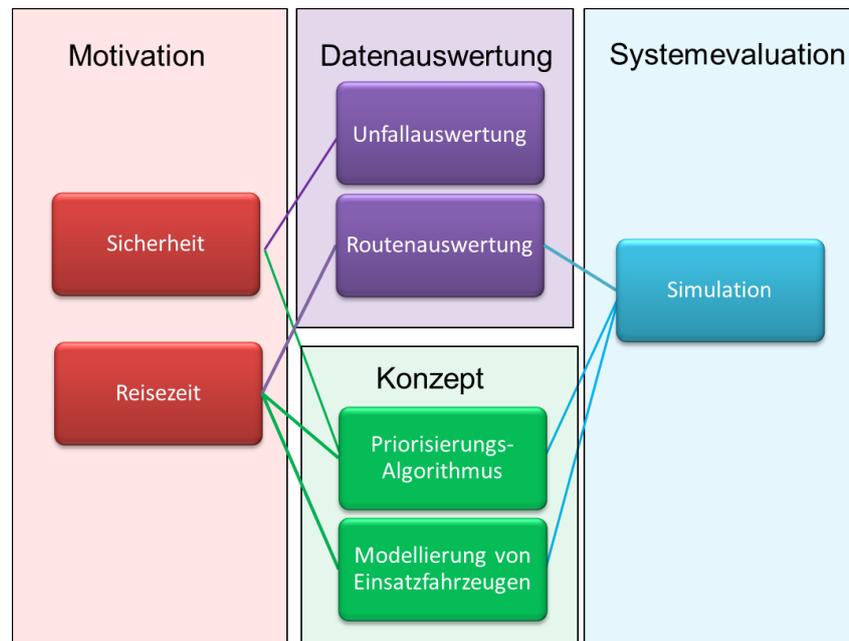


Abbildung 1.1: Themenfelder und Zusammenhänge dieser Forschungsarbeit

Hierfür wird zunächst der Stand der Technik vorgestellt im Bereich von Verkehrsoptimierung im Allgemeinen und im Speziellen für Einsatzfahrzeuge (Kapitel 2). In diesem Kapitel stellt sich heraus, welche Unterstützungsmöglichkeiten es bereits für Einsatzfahrzeuge gibt und welche Lücken bestehen, um die Probleme, die in den vorherigen Abschnitten aufgeführt wurden, zu lösen. Des Weiteren werden hier die Grundlagen für Algorithmen geschaffen, die im weiteren Verlauf zum Vergleich oder zum Aufbau verwendet werden. Als nächstes werden die Grundlagen der Verkehrsmodellierung beschrieben. Dies umfasst die Beschreibung der Modellierung des Verkehrs und gängiger Software-Lösungen.

Datenauswertung: Zur Ergänzung der Literatur-Recherche wurden in dieser Arbeit weitere Datenauswertungen vorgenommen. Es wurde untersucht, wie die Verkehrssicherheitslage für Einsatzfahrzeuge aussieht und aus welchen Gründen es zu Unfällen kommt. Um einen Einblick zu erhalten, wie die Reisezeiten der Einsatzfahrten sind, wurde im Kapitel 3 eine Routenauswertung durchgeführt. Hieraus geht hervor, an welchen Stellen Handlungsbedarf zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen besteht.

Konzept: Die Ergebnisse dieser beiden Analysen fließen anschließend in ein Konzept für die Unterstützung von Einsatzfahrzeugen ein (Kapitel 5). Das Fahrverhalten, welches in Kapitel 3 untersucht wurde, dient ebenfalls dazu in Kapitel 4 ein neues Fahrermodell für Einsatzfahrzeuge vorzustellen. Damit in späteren Simulationen das Verhalten von Einsatzfahrzeugen besser abgebildet werden kann. Zudem wird das entwickelte Modell von Einsatzfahrzeugen in der Simulationsumgebung Simulation of Urban MObility (SUMO) vorgestellt. Dieses Modell wurde im Rahmen dieser Arbeit beschrieben, implementiert und angewendet.

Systemevaluation: Das beschriebene Konzept zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen wird in einer Simulationsstudie evaluiert (Kapitel 7). Hierfür wurden verschiedene Simulationsszenarien aufgebaut und in Kapitel 6 beschrieben. Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben (Kapitel 8).

1.3.1 Anmerkungen

Teile dieser Arbeit wurden bereits auf internationalen Konferenzen vorgestellt und publiziert. Aus diesem Grund folgt an dieser Stelle eine Auflistung darüber welche Kapitel inhaltlich auf welchen Veröffentlichungen aufbauen:

- Die Ergebnisse aus dem Kapitel 3 basieren auf Beiträgen bei dem Young Researchers Seminar [15], der European Simulation and Modelling Conference [16], der European Transportation Conference [17] und der International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems [18].
- Im Kapitel 4 wurden Inhalte beschrieben, die bereits publiziert wurden bei der SUMO User Conference [19].
- Zudem wurden Inhalte und Ideen aus Kapitel 5 teilweise veröffentlicht beim Young Researchers Seminar [20], International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications [21], SUMO User Conference [22] und [23].

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit und um den Lesefluss nicht negativ zu beeinflussen wird in dieser Arbeit hauptsächlich die männliche Form verwendet. Weibliche Personen sowie Personen mit anderen Geschlechteridentitäten werden ausdrücklich dabei mitgemeint.

2

Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die Grundlagen vor, die für diese Arbeit als Basis verwendet werden. Zuerst wird die rechtliche Lage des Rettungsdienstes, insbesondere bezogen auf Sonderrechte und Pflichten, beschrieben. Aus den hier beschriebenen Sonderrechten wird in Kapitel 4 ein Simulationsmodell hergeleitet. Anschließend werden die Grundlagen der Verkehrsoptimierung sowie bestehende Verkehrsoptimierungsverfahren vorgestellt. Hierbei wird insbesondere ein Fokus auf die Unterstützungssysteme für Einsatzfahrzeuge gelegt. Abschließend wird in diesem Kapitel ein Einblick in die Verkehrsmodellierung und -simulation gegeben.

2.1 Sondereinsatzfahrzeuge

Unter Sondereinsatzfahrzeugen werden in dieser Arbeit Fahrzeuge zusammengefasst, die laut Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) §52, Absatz 3 ¹ dazu berechtigt sind blaues Blinklicht zu verwenden. Zusammengefasst sind dieses Kraftfahrzeuge:

1. der (Bundes-)Polizei und des Militärs
2. der Feuerwehr und des Katastrophenschutzes
3. öffentlicher Verkehrsbetriebe, die als Unfallhilfswagen klassifiziert sind
4. des Rettungsdienstes für Krankentransport oder Notfallrettung

Im Rettungsdienst werden Einsatzfahrten in zwei Klassen unterteilt [3]:

1. Notfall:
Die Anfahrt erfolgt mit Sonderrechten.

¹Die relevanten Abschnitte der StVZO sind im Anhang aufgeführt A.1

2. Krankentransport:

Die Anfahrt erfolgt ohne Sonderrechte. Alle Einsätze, die nicht als Notfall eingestuft werden, zählen in diese Kategorie, z.B. Einsätze mit verletzten oder kranken Personen bei denen keine vitale Bedrohung besteht.

Bundesweit gibt es im Rettungsdienst jährlich 14,2 Millionen Einsatzfahrten, davon sind 51 % Krankentransporte, 49 % werden als Notfall bzw. Notfalltransport eingestuft [24]. Je nach Einsatzfall und Organisation werden für die Einsatzfahrten unterschiedliche Fahrzeugtypen verwendet. Eine Auswahl der gängigsten Fahrzeugtypen im Rettungsdienst wird hier beschrieben [25]:

- Krankentransportwagen (KTW):
wird in der Regel für Krankentransporte verwendet, z.B. für die Verlegung zwischen zwei Krankenhäusern. Ein KTW eignet sich für Patienten die kein Notfall sind aber trotzdem eine medizinisch-fachliche Betreuung oder Ausstattung benötigen.
- Rettungswagen (RTW):
wird für die Notfallrettung verwendet.
- Notarzteinsetzfahrzeug (NEF):
dient nur zum Transport des Notarztes zum Einsatzort, um notärztliche Hilfeleistung durchzuführen.

Zudem stellt die Feuerwehr verschiedene Arten von Löschfahrzeugen zur Verfügung mit unterschiedlichen Ausstattungen z.B. Kleinlöschfahrzeug oder Tanklöschfahrzeug. Je nach Fahrzeugtyp hat das Fahrzeug eine andere Fahrdynamik. Während die Streifenwagen oder Polizeiwagen überwiegend Kombifahrzeuge oder Limousinen sind und demnach die Fahrdynamik von normalen Pkws haben, sind die Löschfahrzeuge der Feuerwehr größer, schwerer und sind damit nicht so wendig und flexibel im Stadtverkehr [26].

Die Pflicht von Einsatzkräften ist es, so schnell wie möglich Hilfe zu leisten. Um dies zu gewährleisten, gelten für sie unter gewissen Voraussetzungen besondere Rechte: die Sonder- und Wegerechte. Die beiden Begriffe werden häufig gemeinsam verwendet und verwechselt [1]. Zur Übersicht und Unterscheidung sind die wesentlichen Aspekte von Sonder- und Wegerechten in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Grundsätzlich ist mit Sonderrechten gemeint, dass ein Einsatzfahrzeug von den Vorschriften der StVO befreit ist und mit Wegerechten, dass andere Verkehrsteilnehmer dem Einsatzfahrzeug eine freie Fahrt schaffen sollen. In den folgenden Abschnitten werden die Sonder- und Wegerechte von Einsatzfahrzeugen näher erläutert.

2.1.1 Sonderrechte

Einsatzwagen haben die Möglichkeit, besondere Rechte im Straßenverkehr zu beanspruchen. In der StVO ist festgelegt, wie sich Verkehrsteilnehmer im Straßenverkehr verhalten müssen. Ebenfalls wird hier eine Ausnahme für Einsatzfahrzeuge im §35 bestimmt:

„Von den Vorschriften dieser Verordnung sind die Bundeswehr, die Bundespolizei, die Feuerwehr, der Katastrophenschutz, die Polizei und

Tabelle 2.1: Zusammenfassung Sonder- und Wegerechte [27]

	Sonderrechte	Wegerechte
Kennzeichnungspflicht	keine	Blaulicht und Martinshorn
Bedeutung	Fahrzeug ist von den Vorschriften der StVO befreit	Verkehrsteilnehmer sollen dem Fahrzeug eine freie Fahrt schaffen
gesetzliche Regelung	§35 StVO	§38 StVO

der Zolldienst befreit, soweit das zur Erfüllung hoheitlicher Aufgaben dringend geboten ist“ (StVO §35, Abs. 1).

So dürfen Einsatzfahrzeuge zum Beispiel bei einem roten Signal einer Lichtsignalanlage (LSA) den dazugehörige Knotenpunkt überqueren oder schneller als die maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit fahren. Jedoch dürfen Einsatzfahrzeuge dies nur, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Das bedeutet, dass die Sonderrechte nur in Anspruch genommen werden dürfen, „wenn höchste Eile geboten ist, um Menschenleben zu retten oder schwere gesundheitliche Schäden abzuwenden“ (StVO §35, Abs. 5a), mit der Einschränkung, dass keine anderen Verkehrsteilnehmer gefährdet werden dürfen [6] (StVO §35, Abs. 5a und Abs. 8).

Sonderrechte sind im Rettungsdienst ein sehr gängiges Mittel, um eine schnelle Hilfskette zu gewährleisten. Bei Sonderrechten sind die Einsatzfahrzeuge nur von den Vorschriften der StVO befreit, so darf ein Einsatzfahrzeug auch nur jemand fahren, der einen gültigen Führerschein für diese Fahrzeugklasse besitzt [1].

2.1.2 Wegerecht

Das Wegerecht bestimmt, dass spezielle Fahrzeuge im Straßenverkehr das Recht haben eine freie Bahn zu erhalten, d.h. dass ein Einsatzfahrzeug das Recht hat zu verlangen, dass andere Verkehrsteilnehmer Platz machen. Das Wegerecht gegenüber anderen gilt allerdings nur dann, wenn Blaulicht und Einsatzhorn gemeinsam verwendet werden. Auch wenn häufig bereits Blaulicht ausreicht, damit andere Verkehrsteilnehmer Rücksicht auf das herannahende Einsatzfahrzeug nehmen. Ebenfalls ist die Verwendung des blaue Blinklicht mit dem Einsatzhorn rechtlich geregelt:

„Blaues Blinklicht zusammen mit dem Einsatzhorn darf nur verwendet werden, wenn höchste Eile geboten ist, um Menschenleben zu retten oder schwere gesundheitliche Schäden abzuwenden, eine Gefahr für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung abzuwenden, flüchtige Personen zu verfolgen oder bedeutende Sachwerte zu erhalten. Es ordnet an: 'Alle übrigen Verkehrsteilnehmer haben sofort freie Bahn zu schaffen'“ (StVO §38, Abs. 1).

Allerdings kann eine freie Fahrt von dem Einsatzwagenfahrer nicht erzwungen oder vorausgesetzt werden. Die Pflicht der übrigen Verkehrsteilnehmer besteht lediglich darin, die Einsatzkräfte nicht zu behindern und entsprechend ihrer Möglichkeiten eine freie Bahn zu schaffen [6]. Der Einsatzwagenfahrer hat also kein Recht

erwarten zu können, dass die Bahn frei ist. Das Wegerecht entbindet den Fahrer nicht von der Sorgfaltspflicht. Aus diesem Grund müssen auch Einsatzwagenfahrer ihre Geschwindigkeit reduzieren und wenn es erforderlich ist auch anhalten. Zum Beispiel: ein Einsatzfahrzeug möchte entgegen der Fahrtrichtung eine Kreuzung befahren, da dadurch ein Zeitgewinn erzielt werden kann. Blaulicht und Martinshorn sind im Betrieb. Unter diesen Voraussetzungen erlaubt die StVO ausnahmsweise das Vorhaben. Das Einsatzfahrzeug fährt an die Kreuzung und vergewissert sich, dass alle Verkehrsteilnehmer es bemerken und Vorrang geben. In keinem Fall dürfen andere gefährdet oder gar Schaden zugefügt werden. Wenn es trotzdem zu einem Unfall kommt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Gefährdung anderer nicht ausgeschlossen war. Der Fahrzeugführer, der dem Einsatzwagen keine Vorfahrt gewährt hat, hat zwar eine Ordnungswidrigkeit begangen, trotzdem bekommt in der Regel der Einsatzwagenfahrer mindestens eine Teilschuld. In einer Evaluation von Bocking [1] wurde ermittelt, dass der Fahrer des Einsatzfahrzeuges in 65 % der Fällen als Unfallverursacher bestimmt wurde.

Aus der rechtlichen Situation wird deutlich, dass das Fahren eines Einsatzfahrzeuges eine psychisch wie auch physisch sehr herausfordernde und konfliktträchtige Tätigkeit ist [1]. Zudem sind viele Rettungskräfte auf dem Weg zum Einsatzort bereits mental mit dem bevorstehenden Einsatz beschäftigt, während sie sich eigentlich voll auf die Einsatzfahrt konzentrieren müssten. Hieraus ergibt sich, dass es wünschenswert wäre Einsatzfahrzeuge bei einer Einsatzfahrt zu unterstützen. Um zu untersuchen, wie eine solche Unterstützung aussehen könnte, wird im nächsten Abschnitt beschrieben welche Verkehrsoptimierung und -unterstützungsstrategien es im Allgemeinen und im Speziellen für Einsatzfahrzeuge bereits gibt.

2.2 Verkehrsoptimierung

Um den Verkehr optimal zu steuern, gibt es verschiedene Optimierungsverfahren. Im Folgenden werden klassische Verkehrsoptimierungsansätze vorgestellt, angefangen bei der Optimierung eines einzelnen Verkehrsknotens, bis hin zu einer weitergehenden Verkehrsflussoptimierung von komplexen Städten. Anschließend werden Verkehrsmanagementstrategien speziell auf die Anforderungen von Einsatzfahrzeugen vorgestellt. Da es in dieser Arbeit um die Optimierung des Verkehrs im Hinblick auf Einsatzwagen gehen soll, wird hier zunächst beschrieben, was im Normalfall unter der Optimierung des Verkehrs verstanden wird, um anschließend auf den Spezialfall von Einsatzfahrzeugen einzugehen.

Viele Problemstellungen im Verkehrsbereich können als Optimierungsprobleme verstanden werden, z.B. die Verkehrsnetzplanung oder die Koordinierung von LSAs [28]. Für die Optimierung können verschiedene Zielkriterien festgelegt werden, die sich unter Umständen auch widersprechen können. So kann ein Ziel bei der Planung eines Verkehrsnetzes sein, Staus zu vermeiden und geringe Kosten zu verursachen. Die Staus können dadurch reduziert werden, wenn viele Straßen mit vielen Fahrstreifen geplant werden, dies würde jedoch zu Lasten der Baukosten gehen.

Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [29] beschreibt, dass die Kriterien, die für die Qualität des Verkehrsablaufes ausgewählt werden, zunächst die Bewegungsfreiheit der einzelnen Elemente (z.B. Beförderungs-

geschwindigkeit) beschreibt oder den Grad ihrer Behinderung (z.B. mittlere Wartezeit).

Typische Kennzahlen hierfür im Verkehr sind: die aktuelle Geschwindigkeit oder Durchschnittsgeschwindigkeit, die Anzahl der Halte pro Fahrt sowie die durchschnittliche Wartezeit an einer Kreuzung [30]. Zur Beeinflussung dieser Faktoren sind folgende Bereiche gängig:

- Kreuzungsoptimierung
- Koordinierung von Streckenabschnitten
- Optimierung von Einzelfahrzeugen

Die folgenden Abschnitte gehen auf diese Bereiche ein und es werden bestehende Methoden präsentiert.

2.2.1 Kreuzungsoptimierung

Bei der Optimierung einer einzelnen Kreuzung geht es meistens darum den Signalzeitenplanen einer LSA zu optimieren.

„Lichtsignalanlagen bilden das Grundgerüst für die Verkehrsorganisation in Städten. Sie bestimmen maßgebend die Verkehrsabwicklung im gesamten innerörtlichen Hauptverkehrsstraßennetz“ [29].

Generell dienen LSAs der Verkehrssicherheitserhöhung und der Verbesserung des Verkehrsflussablaufs [29]. Wenn der Signalzeitenplan einer LSA optimiert werden soll, müssen rechtliche Vorgaben berücksichtigt werden. So gibt zum Beispiel die RiLSA [31] an, wie lang unter anderem die Mindestfreigabezeiten sein sollen.

Auch bei der Optimierung eines einzelnen Knotenpunktes oder einer LSA-Steuerung gibt es verschiedene Steuerungsarten. Zum einen gibt es die statische Festzeitsteuerung, die häufig auf deutschen Straßen verbaut ist, auf Grund ihrer geringen Kosten und Einfachheit [32]. Zum anderen gibt es dynamische oder auch adaptive Verfahren. Beide Verfahren werde im Folgenden vorgestellt.

Festzeitsteuerung

Die Festzeitsteuerung ist die einfachste und älteste Form einer LSA-Steuerung [33]. Bei der Festzeitsteuerung sind die Umlaufzeit und die Freigabezeit in jedem Umlauf unverändert [29]. Die Festzeitsteuerung wird offline geplant und hat keine Kenntnis darüber, wie die aktuelle Verkehrslage ist. Es findet stattdessen eine Optimierung des Signalzeitenplan mit einer durchschnittlichen oder geschätzten Verkehrsstärke statt. Im besten Fall können verschiedene Festzeitprogramme abhängig zur aktuellen Tageszeit oder Verkehrsstärke ausgewählt werden [34].

TRANSYT Das Programm Traffic Network Study Tool (TRANSYT) wird seit 1969 kontinuierlich weiterentwickelt und stammt von Robertson [35]. Bei diesem Programm wird eine Optimierung der Schaltprogramme für Festzeitsteuerungen dadurch erzielt, dass die Gesamtwartezeit und die Anzahl der Stopps in die Bewertung

als Gütekriterien einfließen. Die Schaltung wird mit verschiedenen Eingaben simuliert und der Simulationslauf mit den besten Ergebnissen wird für das Schaltprogramm übernommen. Die Optimierung findet offline statt und dient zur Planung einer Festzeitsteuerung. Jedoch ändert sich das tatsächliche Verkehrsaufkommen über die Zeit, wodurch Ende der 70er Jahre die Schaltprogramme inkrementell mit Messdaten nachjustiert wurden. Als Ergebnis entstand die Methode der verkehrsadaptiven Verfahren [36].

Verkehrshängige Steuerung

Im Gegensatz zur Festzeitsteuerung passen verkehrshängige oder verkehrsadaptive Verfahren kontinuierlich ihren Versatz sowie Umlauf- und Freigabezeit an und reagieren dadurch kurzfristig darauf, wenn sich die Verkehrssituation ändert [34]. Wichtige Verfahren hierfür sind [29]:

- Freigabezeitanpassung
- Phasentausch
- Bedarfsanforderung
- Signalprogrammabbildung

Es gibt viele verschiedene verkehrsadaptive Steuerungssysteme, eine Auswahl wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

SCOOT: Split, Cycle, and Offset Optimisation Technique (SCOOT) basiert auf TRANSYT und optimiert die gleiche Gütefunktion und stellt damit die verkehrsadaptive Variante von TRANSYT dar [37]. Die wesentliche Erweiterung ist, dass in jeder Sekunde die Messdaten von allen Sensoren des Netzwerkes zentral auf einem Server gespeichert werden. Die Anpassung der Parameter wird nur in kleinen Schritten inkrementell durchgeführt. Abhängig von der Kreuzung mit der größten Auslastung wird die Umlaufzeit bestimmt, die konstant und für alle Knotenpunkte im Netzwerk gleich ist [36].

UTOPIA: Eins der ersten verkehrsadaptiven Verfahren war Urban Traffic Optimization by Integrated Automation (UTOPIA). Die Optimierung findet hier auf zwei verschiedenen Ebenen statt, dem „Area Level“ und dem „Intersection Level“ [38]. Das „Area Level“ ist für die Prognose über die mittel- und langfristige Verkehrsentwicklung des gesamten Verkehrsgebiets verantwortlich. Beim „Intersection Level lokale Controller“ hingegen werden nur einzelne Kreuzungen koordiniert [39]. Das System ist zudem darauf ausgelegt, den ÖPNV zu priorisieren und wird bereits seit 1984 in Turin eingesetzt [40].

RHODES: Bei Real Time Hierarchical Optimized Distributed Effective System (RHODES) wird zur Kurzzeitprognose ein Vorhersagemodell mit dem Namen PREDICT verwendet, welches auf einem Bayessches Netz basiert [36]. Sensordaten werden für die Prognose verwendet, um Verkehrsflüsse zu berechnen. Für die verschiedenen Nachfragemuster wurden vorab die Freigabezeiten für die Kreuzung berechnet, auf deren Basis bestimmt wird, wie oft ein Phasenwechsel stattfinden soll [41].

Die Phasenwechsel werden über einen sogenannten Controlled Optimization of Phases (COP)-Algorithmus berechnet.

BALANCE: Bei dem Verfahren Balancing Adaptive Network Control Method (BALANCE) werden die Parameter Phaseneinteilung, Umlaufzeit, Freigabezeit und Versatz auf drei Hierarchieebenen optimiert [42]:

1. Strategische Ebene: Hier werden die Zielvorstellung und räumliche Bedingungen festgelegt.
2. Taktische Ebene: Mittels Verkehrsdatenermittlung und Generierung der Zielfunktion wird ein Rahmenplan zur Netzsteuerung generiert, so wird z.B. eine gemeinsame Umlaufzeit gewählt, die abhängig ist von der Belastung des kritischsten Knoten im betrachteten Netz [42].
3. Lokale Ebene: der Rahmenplan wird für die einzelnen Knoten an kurzfristige Verkehrsschwankungen angepasst.

Für die Optimierung werden die Wartezeit, die Anzahl der Halte und die Menge der Schadstoffemissionen für jede Verkehrsart berücksichtigt [36].

2.2.2 Strecken- und Netzsteuerung

Die Strecken- und Netzsteuerung hat das Ziel Streckenabschnitte zu koordinieren und dadurch die Reisezeit bzw. die Anzahl der Halte insgesamt innerhalb eines Abschnittes zu reduzieren. Unter der Koordinierung von Streckenabschnitten wird mitunter die sogenannte „Grüne Welle“ verstanden. Bei einer Grünen Welle soll ein Fahrzeug eine Hauptstraße über mehrere Kreuzungen ohne Fahrtunterbrechung durchfahren können [36]. Dieses Prinzip wurde von Dr.-Ing. Johannes Adolph 1925 zum Patent angemeldet [36]. Wesentlich später (1964) wurde das Erstellen der Linienkoordination systematisch untersucht von Morgan und Little [36]. In der Arbeit von Morgan und Little wurde eine grafische Berechnungsvorschrift namens „MAX-BAND“ entwickelt, um optimale Schaltprogramme an den Kreuzungen einer Hauptstraße zu erzeugen. Hierbei sollen die Verkehrsströme eine maximale Freigabezeit zur Verfügung haben.

Little [36] formulierte darauf hin dieses Optimierungsproblem als ein gemischt-ganzzahliges lineares Problem. Durch die technische Entwicklung der Rechner konnten Optimierungsprobleme schneller berechnet werden und gewannen in der Forschung so an Popularität.

Eine weitere Methode für eine Streckenkoordinieren ist das Verfahren Method for the Optimization of Traffic Signals in Online Controlled Networks (MOTION). Die Grundidee bei MOTION besteht darin, die Vorteile einer Grünen Welle mit dem Wissen über die aktuelle Verkehrslage zu kombinieren [43]. Hierbei werden die Verkehrsdaten an den Haupteingangs- und -ausgangspunkten benötigt. Den Signalzeitenplan der Grünen Welle werden nur dann geändert, wenn abhängig von der aktuellen Verkehrslage eine Verbesserung für den gesamten Bereich der Grünen Welle erwartet werden kann. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Änderungen nicht bei nur sehr kleinen lokalen Verbesserungen stattfinden.

Eine Besonderheit von MOTION ist, dass Störungen auf einzelnen Streckenabschnitten erkannt werden und mit vordefinierten Schaltplänen darauf reagiert werden kann [36]. Zudem erkennt ein weiteres Modul, dass gewisse Phasen vertauscht oder ausgelassen werden können. MOTION ist zudem Bestandteil des Verkehrsmanagementsystems Sitraffic Concert der Siemens AG [44].

Eine weitere Variante der Koordination ist es, das Verkehrssystem sich selbst steuern zu lassen, dies wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Selbstorganisierende Verkehrssysteme

Unter einem selbstorganisierendem Verkehrssystem werden adaptive verteilte LSAs verstanden, die z.B. sich durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug und Fahrzeug-zu-Infrastruktur (V2X)-Kommunikation oder durch Induktionsschleifendaten miteinander synchronisieren [45]. Die einzelnen Elemente (hier LSAs) interagieren miteinander, um ein Gesamtziel, wie z.B. Minimierung der Anzahl der Halte, zu erreichen. Bei einem Praxistest in Dresden [34] konnte gezeigt werden, dass der Ansatz der Selbststeuerung dafür genutzt werden kann, die Wartezeiten aller Verkehrsarten zu verringern, während der öffentliche Verkehr priorisiert wird.

In der Veröffentlichung von Gershenson [45] wurden drei verschiedene Methoden zu selbstorganisierenden LSAs vorgestellt. Das Grundprinzip besteht darin, dass die LSA sich die Anzahl an Zeitschritten merkt, während sich ein Auto einer LSA annähert die rot zeigt. Die aktuelle Geschwindigkeit der Fahrzeuge wird in diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Je mehr Fahrzeuge sich einer LSA nähern die rot zeigt, umso schneller wird sie auf grün umschalten. Das Verfahren wurde noch um die Einschränkung erweitert, dass eine Mindestrotzeit nicht unterschritten werden darf, um sehr schnelle Phasenwechsel zu verhindern. Bei einer dritten Methode werden die Verkehrsströme in Fahrzeuggruppen eingeteilt, die durch einen Phasenwechsel nicht unterbrochen werden sollen. Als eine interessante Feststellung wurde hierbei beobachtet, dass es sich bei der Verkehrsoptimierung im klassischen Sinne eher um ein Adaptierungsproblem als um ein Optimierungsproblem handelt. Da sich der Verkehr kontinuierlich ändert, ist es daher nicht möglich, eine allgemeingültige optimale Lösung zu finden. Des Weiteren kam bei der simulativen Auswertung heraus, dass durch diese selbststeuernden Methoden die Wartezeiten der Verkehrsteilnehmer reduziert werden konnte und in vielen Fällen sogar das Anhalten von Fahrzeuggruppen ganz vermieden wurde.

In der Dissertation von Rausch [46] wurde ein selbstorganisierendes Störfallmanagement entwickelt und untersucht. Hierbei wird ein selbstorganisierendes Störfallmanagement anfangs isoliert bei einem Knotenpunkt angewendet und kann anschließend rekursiv auf weitere Knotenpunkte erweitert werden. Dadurch wird keine vorherige Planung von einer Verkehrsleitzentrale benötigt. Die einzelnen Knotenpunkte prüfen, ob die Fahrzeugschlangen einen kritischen Wert überschritten haben und schalten entsprechend die LSA. Wenn z.B. durch einen Verkehrsunfall der Verkehr auf einer Straße gestaut ist, dann würde die LSA bei dem Knotenpunkt vor der Straße den Signalzeitenplan so adaptieren, dass weniger Verkehr in diese Straße einbiegen kann. Hierdurch wäre der restliche Verkehr dazu animiert ihre Routenwahl anzupassen und den gestauten Bereich zu umfahren. In der Arbeit von Rausch wurde in einer Simulationsstudie die Machbarkeit des selbstorganisierenden Stör-

fallmanagements gezeigt und die Dauer der Störfälle des Verkehrs konnten teilweise signifikant reduziert werden, verglichen mit der Störfalldauer bei dem Einsatz einer Festzeitsteuerung.

2.2.3 Verkehrsmanagementstrategien für Einsatzfahrzeuge

Während bei klassischen Verkehrsoptimierungsverfahren meistens der gesamte Verkehr optimiert werden soll, stellt das Verkehrsmanagement für Einsatzfahrzeuge einen Sonderfall dar. Einsatzfahrzeuge werden hierbei bevorrechtigt, wodurch eine Benachteiligung für den Gesamtverkehr entstehen kann. Interessant zu untersuchen ist hierbei, wie groß die möglichen entstehenden Nachteile sind und bis zu welchem Maß sie toleriert werden. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über bestehende Strategien zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen. Es beginnt damit Verkehrsteilnehmer über Einsatzfahrzeuge zu informieren oder spezielle Routenempfehlungen für Einsatzwagenfahrer zu geben.

Informationssysteme

Ein rudimentärer Ansatz, um Unfälle von Einsatzfahrzeugen zu reduzieren, ist es, den Umgebungsverkehr entsprechend zu informieren. Mittels Blaulicht und Sirene sollen Einsatzfahrzeuge auf sich aufmerksam machen und andere Verkehrsteilnehmer dazu auffordern, ihnen eine Bevorrechtigung zu gewähren. Leider werden oft sowohl Blaulicht als auch Einsatzhorn von einigen Verkehrsteilnehmern nicht wahrgenommen [47]. Gründe hierfür sind mitunter die gute Schallisierung der Fahrzeugkarosserie, laute Geräusche im Innenraum (z.B. Musik) oder eingeschränkte Sicht (z.B. durch Gebäude). Daher werden auch häufiger Unfälle von Einsatzfahrzeugen mit anderen Kraftfahrzeugen verzeichnet als mit Fußgängern oder Fahrradfahrern [48].

V2X-Kommunikation kann in solchen Fällen dazu beitragen, dass Einsatzfahrzeuge besser von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden können. Eine Unterstützungsmöglichkeit, um z.B. andere Verkehrsteilnehmer auf das Einsatzfahrzeug aufmerksam zu machen, wäre eine Benachrichtigung bzw. Warnung mittels Kommunikationstechnologien zu senden. Ein Ansatz ist es, dass Einsatzfahrzeuge eine Warnung senden mit der Information, dass sie sich nähern („Emergency vehicle approaching warning“) [49]. Es ist geplant, diesen Benachrichtigungstyp als eine der ersten Applikationen im Bereich der Fahrzeug-Kommunikation umzusetzen. Wenn flächendeckend Einsatzfahrzeuge mit dieser Technologie ausgestattet wären, würde jeder Fahrer eines Fahrzeugs, welches V2X-Kommunikation beherrscht, gewarnt werden und somit direkt durch die Applikation profitieren. Bei vielen anderen Applikationen im Bereich der Fahrzeug-Kommunikation werden höhere Ausstattungsraten (meistens mindestens 10%) benötigt, damit der einzelne Fahrer davon profitieren kann z.B. Kollisions-Warnungen [4].

Als einen weiteren Kommunikationskanal kann Radio-Data-System (RDS) genutzt werden, um via Autoradio eine gezielte Warnung über ein Einsatzfahrzeug zu geben [1]. Der Vorteil hierbei ist es, dass RDS schon weit verbreitet ist und nur wenig Aufwand betrieben werden muss, um die Technologie zu nutzen. Zudem erhalten nur Fahrzeuge in unmittelbarer Umgebung die Warnung.

Ein häufiges Problem ist jedoch, dass eine Warnung alleine nicht immer ausreicht, da einige Verkehrsteilnehmer nicht wissen, wie sie sich verhalten sollen bzw. nicht

wissen, aus welcher Richtung der Einsatzwagen kommt. Es kann auch sein, dass die Warnung zu spät ankommen und dadurch keine Reaktion mehr möglich ist bzw. durch die erzeugte Stresssituation falsch reagiert wird [4].

In der Arbeit von Buchenscheit et. al. [4] wurde ein Prototyp entwickelt, bei dem Verkehrsteilnehmer eine gezielte Warnung über ein sich näherndes Einsatzfahrzeug erhalten haben. Hier wurden die Fahrer nicht nur gewarnt, sondern bekamen auch eine aktive Empfehlung, wie sie sich verhalten sollen und aus welcher Richtung das Einsatzfahrzeug kam. Bei der Befragung der Untersuchungsteilnehmer ergab sich, dass normalerweise das Einsatzfahrzeug von anderen Verkehrsteilnehmern zu spät wahrgenommen wird (56 %). Für die Einsatzwagenfahrer ist es nicht einfach die Reaktion des Umgebungsverkehrs hervorzusagen (84 %), wodurch es häufig zu kritischen Situationen beim Überholvorgang auf gerader Strecke kommt (61 %). Nach der Demonstration des Prototyps schätzten 78 % der Teilnehmer, die zusätzliche Warnungen als sinnvoll ein, da Blaulicht und Martinshorn nicht ausreichend sind, um auf ein Einsatzfahrzeug aufmerksam zu machen.

Routing für Einsatzfahrzeuge

Eine andere Möglichkeit Einsatzfahrzeuge zu unterstützen ist es, ein individuelles Verkehrsrouting anzubieten. Durch die Benutzung von Sonderrechten ist nicht zwingend die schnellste Route für normale Pkw auch für Einsatzfahrzeuge die Beste. In der Studie von Haghani et. al. [50] wurde untersucht, wo Einsatzfahrzeuge in einer Stadt ideal stationiert werden können, um den Einsatzkräften ein optimiertes Routing bereitzustellen. Die Besonderheit des Optimierungsverfahrens ist, dass auch die Verteilung von unterschiedlichen Fahrzeugtypen mit spezieller Ausrüstung berücksichtigt wird. Es wurde gezeigt, dass der Algorithmus ein optimales Ergebnis produziert und verschiedene Einsatzszenarien abgebildet werden konnten unter Einhaltung der Hilfsfristen.

Die Studie von Woelki et. al. [51] befasste sich mit der Untersuchung von speziellen Routings von Einsatzfahrzeugen. Als Optimierungskriterien für das Routing werden hier die Fahrzeit und die Länge der Route gewählt, weil längere Strecken auch ein höheres Risiko für unvorhergesehene Ereignisse mit sich bringen, die die Fahrzeit eventuell stark verzögern.

In der Forschung von Pai [52] wurde ein spezielles Navigationssystem entwickelt, welches V2X-Kommunikation nutzt, um eine ideale Navigation von Einsatzfahrzeugen entsprechend der aktuellen Verkehrslage zu ermöglichen. Der Ansatz wurde in einer Simulation getestet. Mit dem Ergebnis, dass der Ansatz zu einer Reisezeitverbesserung des Einsatzes führt.

In der Arbeit von Wang et. al. [53] wird ein Routing kombiniert mit einer LSA-Priorisierung für Einsatzfahrzeuge vorgestellt. Die Routen werden anhand von zwei Parametern optimiert:

1. schnellste Routen für Einsatzfahrzeuge
2. die minimale Störung der restlichen Verkehrsteilnehmer

Abhängig von der Route und deren geschätzter Verlustzeit wird die LSA entsprechend manipuliert. In einer Verkehrssimulation von dem Distrikt Xicheng in

Peking konnte gezeigt werden, dass durch dieses kombinierte Routing die Wartezeit von Einsatzfahrzeugen um ca. vier Sekunden verkürzt werden konnte (bei einer Gesamtreisezeit von ca. zwei Minuten), ohne andere Verkehrsteilnehmer zu sehr zu behindern. Jedoch war die gesamte Reisezeit der Einsatzwagen durch die geänderte Route nicht zwangsläufig auch schneller in dem gewählten Szenario.

Ebenso ist die optimale Verteilung von Rettungswachen Bestandteil der aktuellen Forschung, um eine möglichst schnelle und flächendeckende Erreichbarkeit von Rettungskräften zu gewährleisten [54].

Bevorrechtigung von Einsatzfahrzeugen

Eine weitere Strategie ist es, Einsatzfahrzeugen eine Grüne Welle zu ermöglichen bzw. sie an LSAs zu priorisieren, um dadurch schneller und sicherer an das Ziel zu gelangen. In der Studie von Nelson et. al. [55] wurde evaluiert, welchen Einfluss ein Priorisierungssystem für Einsatzfahrzeuge haben kann. Hierbei steuert ein Traffic-Controller händisch die LSA, um eine Grüne Welle für Einsatzfahrzeuge zu erzeugen. Hier ist der Ansatz, die Grünzeiten für die Fahrstreifen des Einsatzfahrzeuges bis zu dessen Eintreffen an der Kreuzung entsprechend zu verlängern. Es ging insbesondere darum zu untersuchen, ob durch dieses Verfahren der Verkehr ungewöhnlich stark gestört wird. Wenn das Priorisierungssystem bei einer einzelnen Einsatzfahrt eingesetzt wurde, waren die Effekte auf das Gesamtsystem minimal. Jedoch bei einer gehäuften Anfrage wurden durchschnittliche Reisezeiterhöhungen von 20 bis 30 Sekunden für den Umgebungsverkehr gemessen.

Ebenfalls wurde V2X-Kommunikation in der Arbeit von Younes et. al. [56] dazu verwendet, um die LSA-Pläne so zu adaptieren, dass Einsatzfahrzeugen freie Fahrt gewährt werden kann. Der untersuchte Algorithmus wurde in einer Simulation getestet, mit dem Ergebnis, dass die Verlustzeit der Einsatzfahrzeuge reduziert werden konnte, jedoch die Kreuzung ebenfalls einen geringeren Durchsatz hatte.

In einer Simulationsstudie von Kang et. al. [57] wurde für einen Korridor mit acht LSAs in China eine Grüne Welle erzeugt, wodurch die Reisezeit der Einsatzfahrzeuge um knapp 27% verringert werden konnte. Des Weiteren wurde bei dem Ansatz der Grünen Welle für Einsatzfahrzeuge darauf Wert gelegt, die Signalzeitenplänen so wenig wie möglich zu stören, damit der restliche Verkehr nicht zu stark negativ beeinflusst wird.

Zudem gibt es bereits Länder, die ein Verkehrssystem im Einsatz haben, das eine Bevorrechtigung von Einsatzfahrzeugen unterstützt. So ist in Japan das System namens Fast Emergency Vehicle Preemption Systems (FAST) in Betrieb [58]. Bei FAST wird die Position von Einsatzfahrzeugen und deren Fahrzeug-ID über Infrarot Sensoren erkannt und an eine Verkehrskontrollzentrale der Polizei weitergeleitet. Durch die Fahrzeug-ID ist der Polizei bereits der Zielort des Einsatzfahrzeuges bekannt und auf der entsprechenden Route werden die Grünzeiten der LSAs verlängert bzw. die Rotzeiten verkürzt. Die Länge der Rotzeitverkürzung bzw. Grünzeitverlängerung hängt von der Entfernung der angebrachten Sensoren zu der LSA ab.

Toy et. al. [59] hat Gruppierungs-Strategien simulativ untersucht. Dabei lag der Fokus darauf, wie Einsatzfahrzeuge auf einer Autobahn freie Fahrt gewährt werden kann. Hierbei gruppieren sich die Fahrzeuge so zusammen, dass die Einsatzfahrzeuge genug Platz bekommen, um sich an den Gruppen vorbei zu schlängeln. Die Auswer-

ung ergab, dass die Reisezeit der Einsatzfahrzeuge beschleunigt werden kann, jedoch eignet sich der Ansatz aus Sicherheitsgründen nur für automatisches Fahren.

In einer weiteren Simulationsstudie mit der Verkehrssimulation VISSIM (siehe Abschnitt 2.3.1) wurde ausgewertet, wie Einsatzfahrzeuge durch V2X-Kommunikation darin unterstützt werden können, bei einem Stau die Fahrstreifen zu wechseln [60] [61]. Der Grundgedanke hierbei ist, dass bei der Warteschlange ermittelt wird, zwischen welchen Fahrzeugen am sinnvollsten der Fahrstreifen gewechselt werden kann. Die Fahrzeuge an diesen Stellen werden dann darüber informiert zu warten, bis das Einsatzfahrzeug den Fahrstreifen gewechselt hat. Bei diesem kooperativen Ansatz konnte eine Zeitersparnis von einer bis 21 Sekunden an einem einzelnen Knotenpunkt erzielt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Priorisierung von einzelnen Verkehrsteilnehmer besteht in Deutschland in Form von der ÖPNV Beschleunigung [62]. Die Grundidee hierbei ist, dass ein Fahrzeug des ÖPNVs mehr Menschen befördert im Vergleich zu einem Fahrzeug des motorisierten Individualverkehrs und daher es sinnvoll ist den ÖPNV zu priorisieren. Zusätzlich soll dadurch erreicht werden, dass die Zeiten der Fahrpläne eingehalten werden und dadurch die Attraktivität des ÖPNV-Angebots zu erhöhen. Die Beschleunigung des ÖPNVs kann durch unterschiedliche Maßnahmen erzeugt werden [63]:

- Freigabezeitverlängerung: Die Grünzeit der LSA wird für das Fahrzeug des ÖPNVs so lange verlängert bis das Fahrzeug wieder abgemeldet wird oder die maximale Freigabezeit erreicht wurde.
- Sperrzeitverkürzung: Die Rotzeit aus der Richtung eines ÖPNV-Fahrzeuges wird verkürzt wodurch es vorzeitig eine LSA-Freigabe bekommen kann.
- Phasentausch: Die Umlaufzeit und die Phasenzahl wird beibehalten, es wird jedoch eine Phase die nicht verträglich ist mit der Fahrtrichtung des ÖPNV-Fahrzeuges getauscht mit einer verträglichen.
- Bedarfsphasenanforderung: Nach Bedarf wird eine Phase eingeschoben die verträglich ist mit der Richtung des ÖPNV-Fahrzeuges.

Dieser Mechanismus der ÖPNV Beschleunigung kann ebenfalls für die Beschleunigung von Einsatzfahrzeugen verwendet werden. So gibt es z.B. die aktuell laufenden Forschungsprojekte HALI [64] und Secure and Intelligent Road Emergency Network (SIRENE) [65], die sich mit der Bevorrechtigung von Einsatzfahrzeugen beschäftigen. Bei dem Forschungsprojekt HALI werden die Positionen der Feuerwehreinsatzfahrzeuge in Berlin mittels GALILEO-Public Regulated Service (PRS)-Signale lokalisiert. In einem Testgebiet in der Nähe der Feuerwache Berlin-Moabit werden die LSAs für die Fahrstreifen der Feuerwehrfahrzeuge auf grün gesetzt.

Bei dem Forschungsprojekt SIRENE wird das Testfeld Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) [66] in Braunschweig für die Erprobung eines Priorisierungs-Algorithmus für Einsatzfahrzeuge verwendet. Die Kommunikation zur LSA soll über eine Handy-App funktionieren. Die Erfassung der Einsatzfahrzeuge soll mittels Empfänger für Satellitennavigation (GNSS) in On-Board-Units (OBUs) erfolgen.



Abbildung 2.1: Beispiel für eine LSA-Beeinflussung in einer Feuerwache in Berlin [23] und Lage der Feuerwache in OpenStreetMap (OSM) [69]

Des Weiteren wird die Software Sittraffic Stream von Siemens in der Stadt Böblingen eingesetzt [67]. Hierbei werden Einsatzfahrzeuge mittels GPS lokalisiert und sobald sie vordefinierte virtuelle Meldepunkte überquert haben, werden die entsprechenden LSAs in einen sogenannten Notfallmodus geschaltet. In diesem Modus hat die Richtung des Einsatzfahrzeugs freie Fahrt und es wird erst wieder in den Normalbetrieb zurück geschaltet, wenn das Einsatzfahrzeug einen erneuten virtuellen Meldepunkt überquert hat. Nach einem ähnlichen Prinzip funktioniert das System von der SMEV AG [68]. Hierbei wird ein Programm auf dem Smartphone genutzt, um die LSAs auf der Route des Einsatzfahrzeuges grün für die Fahrstreifen des Einsatzfahrzeug und rot für alle anderen Richtungen anzeigen zu lassen.

In einigen Rettungswachen befinden sich manuelle Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Durch Druckknöpfe können die Einsatzwagenfahrer die LSA im direkten Umfeld der Rettungswache für eine festgelegte Zeit rot anzuzeigen. In Abbildung 2.1 ist ein Foto einer solchen Anlage in einer Feuerwache in Berlin zu sehen. Je nach Richtung in die ausgerückt werden soll, drücken die Feuerwehrmänner bzw. -frauen einen der Druckknöpfe. Bei dem entsprechenden Knotenpunkt bekommt der Verkehr aus der Richtung der Feuerwache für zwei Minuten grün, während die Hauptstraße rot angezeigt bekommt.

2.2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden theoretische Forschungsarbeiten für die Bevorrechtigung von Einsatzfahrzeugen vorgestellt, aber auch Systeme bzw. Prototypen die bereits in ausgewählten Regionen im Einsatz sind. Zur Übersicht sind in Tabelle 2.2 Beispiel-Systeme aus verschiedenen Ländern aufgelistet, die bereits im Straßenverkehr eingesetzt werden.

Tabelle 2.2: Auswahl von eingesetzten Bevorrechtigungssystemen für Einsatzfahrzeuge

Name	Einsatzort	Kurzbeschreibung	Referenz
FAST	Tokyo (Japan)	FAST steht für Fast Emergency Vehicle Preemption System. Rotzeiten werden verkürzt bzw. Grünzeiten verlängert für die Richtung des Einsatzfahrzeugs	[70]
Sittraffic Stream	Böblingen (Deutschland)	Es werden virtuelle Meldepunkte vor und hinter der Kreuzung gesetzt. Mittels GPS wird die Position des Einsatzfahrzeuges ermittelt und entsprechend eine Bevorrechtigung für das Einsatzfahrzeug geschaltet. Nachdem das Einsatzfahrzeug den Knotenpunkt passiert hat, wird auf den normalen Signalzeitenplan zurück geschaltet.	[67]
Manueller Druckknopf	z.B. in Berlin, Friedberg etc. (Deutschland)	Manuelles Betätigen eines Knopfes für festgelegte Kreuzungen	[71]
OPTICOM	Brookhaven, Liberty Township, Bellevue, Savannah, Broward Country (USA)	Bis zu 500 Einsatzfahrzeuge pro Einsatzort wurde mit GPS-Sensoren bzw. Infrarot-Sensoren ausgestattet und eine Verkehrsmanagement-Software (Central Management Software) schaltet entsprechend eine freie Fahrt für Einsatzfahrzeuge	[72] [73] [74], [75]
Traffic Green	Frankfurt an der Oder, Ingolstadt (Deutschland)	Über Bluetooth meldet die Feuerwehrwache eine Einsatzfahrt an. Das Bluetooth-Gerät übermittelt an die LSA-Steuerung und schaltet eine Bevorrechtigung für das Einsatzfahrzeug	[76]

Für die weitere Arbeit sollen zwei Verfahren, die im Straßenverkehr bereits umgesetzt und realisiert wurden, zum Vergleich des erarbeiteten Ansatzes verwendet werden. Hierfür wurden der Ansatz FAST und Sitraffic Stream ausgewählt. FAST wurde ausgesucht, weil der Algorithmus als einer der ersten umgesetzt wurde und durch die Verlängerung bzw. Verkürzung der Rot- bzw. Grünzeiten im Signalzeitenplan eine sehr einfache Art der Umsetzung darstellen. Sitraffic Stream wurde ausgewählt, weil der Algorithmus die GPS Koordinaten der Einsatzfahrzeuge verwendet und durch die virtuellen Meldepunkte keine zusätzlich Hardware am Straßenrand für die Detektion der Einsatzfahrzeuge benötigt wird. Zudem ähneln viele der existierenden Algorithmen von der generellen Funktion diesem Ansatz.

2.3 Modellierung und Simulation von Verkehr

Dieser Abschnitt gibt eine Einführung in die Verkehrsmodellierung und einen Überblick über gängige Fahrzeugmodelle sowie Verkehrssimulationssystemen. Auf Grund dieser Basis wird eine Verkehrssimulationssoftware ausgewählt, die in der weiteren Arbeit verwendet wird, um Einsatzfahrzeuge zu modellieren und zu simulieren. Bei Eingriffen in das Verkehrssystem ist es oft schwierig, deren gesamten Folgen abzuschätzen oder theoretisch zu errechnen. Verkehrsstrategien direkt im Straßenverkehr umzusetzen, um deren Auswirkungen zu ermitteln, ist jedoch sehr zeit- und kostenintensiv und unter Umständen nicht erlaubt, da eine Zulassung der zuständigen Verkehrsbehörde benötigt wird. Selbst der Aufbau von speziellen Testfeldern ist mit hohem Arbeitsaufwand verbunden und spiegelt den realen Verkehrsablauf nur bedingt wieder. Daher ist es sinnvoll, bevor Verkehrsmanagementstrategien umgesetzt werden, diese ausgiebig theoretisch zu evaluieren und auszuwerten. Die Modellierung und die Simulation des Verkehrsgeschehens ist hierbei hilfreich, um diese komplexen Vorgänge untersuchen zu können.

Für die Verkehrsmodellierung und Simulation stehen bereits eine große Vielzahl an Konzepten und Programmen zur Verfügung. Diese Modelle können in drei verschiedene Arten unterteilt werden [77] [78]:

1. Makroskopisch:

Bei einem makroskopischen Verkehrsmodell wird die durchschnittliche Fahrzeugdynamik simuliert z.B. die Fahrzeugdichte oder die durchschnittliche Geschwindigkeit. Es werden keine Einzelfahrzeuge abgebildet und es werden in der Regel aggregierte Verkehrskenngrößen ermittelt. Die makroskopischen Verkehrsmodelle besitzen häufig Ähnlichkeiten zu der Modellierung von Flüssigkeitsdynamik [79]. Der Vorteil bei diesen Modellen ist, dass sie meistens effizient große Verkehrsnetze und Verkehrsaufkommen abbilden können.

2. Mikroskopisch:

Bei der mikroskopischen Verkehrsmodellierung wird die Fahrzeugdynamik jedes einzelnen Fahrzeuges individuell beschrieben. Normalerweise wird das Fahrverhalten durch verschiedene Modelle beschrieben z.B. ein Modell für die Längs- und ein anderes für die Querbewegung [79]. Bei einer mikroskopischen Simulation können die Kenngrößen für jedes einzelne Fahrzeug und die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern ausgewertet werden. Der Vorteil einer

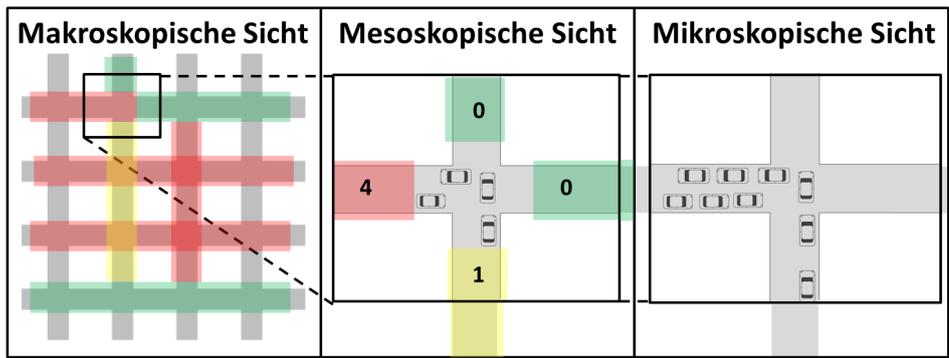


Abbildung 2.2: Darstellung der Modellierungsarten von Verkehr

mikroskopischen Modellierung ist es, dass detailliertere und genauere Analysen möglich sind, z.B. kann simuliert werden wie häufig ein Fahrzeug andere überholt hat oder wie lange es an einer LSA warten musste.

3. Mesoskopisch:

Die mesoskopische Verkehrsmodellierung ist eine Mischform von makroskopischen und mikroskopischen Verkehrsmodellen. Bei mesoskopischen Modellen sollen die Vorteile der makroskopischen Verkehrsmodelle (schnelle Simulation von großen Verkehrsnetzen) und der mikroskopischen Verkehrsmodelle (detaillierte Simulation von Fahrzeuginteraktionen) kombiniert werden. Ein Beispiel für eine solche Mischform ist die Verkehrssimulation DYNEMO [80], bei der die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt wird durch die mittlere Dichte eines Straßensegmentes. Eine weitere Möglichkeit der mesoskopischen Verkehrsmodellierung wird durch Warteschlangen realisiert. Hierbei wird ein einzelnes Fahrzeug auf einer Straße oder einem Straßensegment nicht individuell simuliert, sondern durch eine Warteschlange repräsentiert [81]. Wenn ein Fahrzeug ein solches Straßensegment erreicht, so muss es mindestens die Zeit in der Warteschlange verweilen, wie es bei einer freien Fahrbahn zum Durchfahren der Strecke benötigen würde.

Zur Verdeutlichung wurde in Abbildung 2.2 dargestellt wie sich die Sichtweise bei der makroskopischen zur mikroskopischen Modellierung von Verkehr unterscheidet.

Da es bei der Unterstützung von Einsatzfahrzeugen stark auf die Betrachtung von mehreren einzelnen Fahrzeugen (eines Einsatzfahrzeugs und der Reaktion des Umgebungsverkehrs) ankommt, wird im Folgenden der Fokus auf die mikroskopische Verkehrsmodellierung gelegt.

Die meisten mikroskopischen Verkehrssimulationssysteme basieren auf Fahrzeugfolgemodellen. Eine detaillierte Analyse kann in der Studie von Brackstone et. al. [82] nachgelesen werden. Die Grundidee hinter Fahrzeugfolgemodellen besteht darin, dass die Geschwindigkeit v eines Fahrzeugs i hauptsächlich von einem voraus fahrenden Fahrzeug $i + 1$ sowie dem Abstand der Fahrzeuge und der Reaktionszeit τ abhängt [77].

Es werden zwei verschiedene Bewegungstypen unterschieden:

1. Freie Fahrt:

Bei der freien Fahrt ist in unmittelbarer Entfernung kein führendes Fahrzeug vorhanden. In diesem Fall ist die Geschwindigkeit nicht durch ein anderes Fahrzeug beschränkt und es kann mit der maximal erlaubten Geschwindigkeit bzw. der vom Fahrer gewünschten Geschwindigkeit gefahren werden:

$$v \leq v_{\max} \quad (2.1)$$

2. Interaktionsmodus:

Hier interagieren die Fahrzeuge miteinander und ein vorausfahrendes Fahrzeug ist vorhanden. Die Fahrzeuge sollen nicht miteinander kollidieren. Aus diesem Grund wird das folgende Fahrzeug die Geschwindigkeit so reduzieren, dass sich ein sicherer, kollisionsfreier Zustand einstellt. Daraus ergibt sich, dass mit einer maximalen sicheren Geschwindigkeit v_{safe} gefahren wird:

$$v \leq v_{\text{safe}} \quad (2.2)$$

Neben der Modellierung von der Fahrzeugfolge müssen bei der Implementierung in Verkehrssimulationen noch viele verschiedene andere Ansätze mit berücksichtigt und modelliert werden, wie z.B. das Anhalten an Haltelinien sowie das Fahrstreifenwechsel- oder Kreuzungsverhalten.

2.3.1 Verkehrssimulationssysteme

Es gibt eine Vielzahl an verschiedenen Simulationsprogrammen, die viele verschiedene Funktionen zur Verfügung stellen. Im Folgenden wird eine Auswahl der gängigsten mikroskopischen Verkehrssimulationen vorgestellt. Die beschriebenen Systeme sind alle dynamisch und beinhalten stochastische Komponenten. Die stochastische Komponente wird benötigt, um die Simulation realitätsnäher zu gestalten. In der Realität unterliegen menschliche Fahrer zufälligen Schwankungen, die nicht vorhergesagt werden können und auch der Verkehr auf den Straßen unterliegt täglichen Schwankungen. Indem mehrere Simulationsläufe durchgeführt werden mit unterschiedlichen Zufallswerten, ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass die Simulationsläufe im Mittel ein realitätsnahes Ergebnis liefern. Aus diesem Grund wird empfohlen mehrere Simulationsdurchläufe durchzuführen [83] [78] [84].

PTV Vissim

Verkehr In Städten - SIMulationsModell (Vissim) gehört zur PTV Group, die ihren Hauptsitz in Karlsruhe hat [79]. Die PTV Group wurde 2017 von Porsche Automobil Holding S übernommen [85]. Vissim wird im kommerziellen Bereich vielfach verwendet. Es gehört in diesem Bereich zu den bekanntesten Programmen. Insbesondere in Verkehrsplanungsbüros wird es viel genutzt. Vissim ist bekannt für eine bedienungsfreundliche grafische Oberfläche und bietet einen umfangreichen Support an. Die Simulation ist spezialisiert auf den innerstädtischen Verkehr und kann verschiedene Verkehrsmodi abbilden wie z.B. Fußgänger und Fahrräder. Als Fahrzeugfolgemodell wurde das Modell von Wiedemann erweitert [86]. Das PTV Vissim API package bietet eine Schnittstelle, um selbst geschriebene Programme an die Simulation zu integrieren oder die Simulation zur Laufzeit zu beeinflussen [87]. In Abbildung 2.3 ist ein Beispielszenario in Vissim dargestellt.

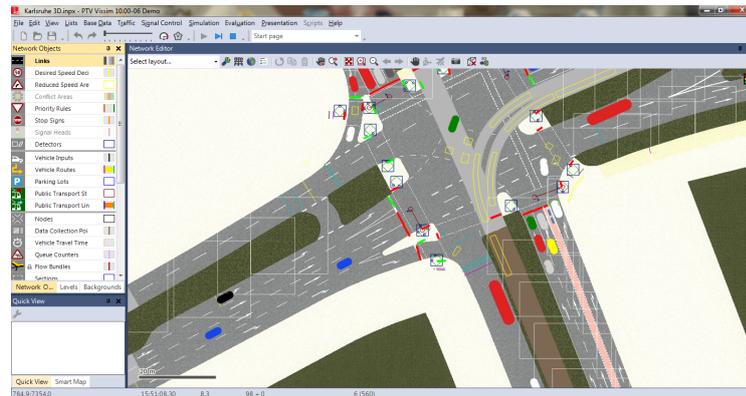


Abbildung 2.3: Beispiel für eine Simulation in Vissim

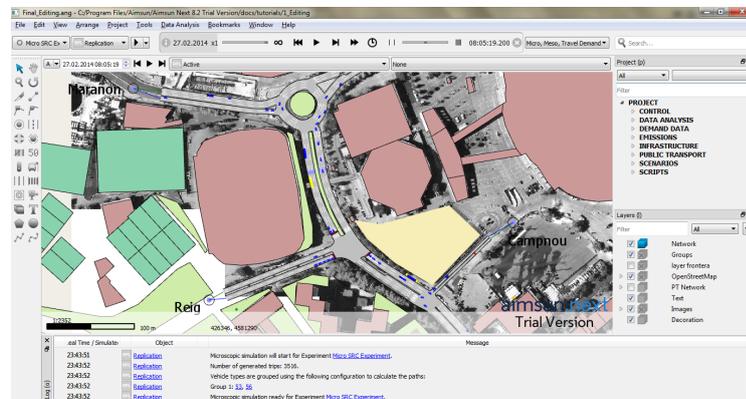


Abbildung 2.4: Beispiel für eine Simulation in AIMSUN

AIMSUN

Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks (AIMSUN) ist eine Entwicklung von der Firma Transportation Simulation System (TSS) und gehört seit 2018 dem Siemens Konzern an. Neben der reinen Verkehrssimulation ist AIMSUN ebenfalls in der Lage, den Gesamtkraftstoffverbrauch sowie Schadstoffemissionen zu ermitteln [79].

Es ist möglich, zur Laufzeit in die Simulation einzugreifen mittels einem ergänzenden „Application Interface“. Hierdurch können eigene Verkehrsmanagementstrategien umgesetzt und ausgewertet werden. Des Weiteren ist es möglich, mit dem AIMSUN Software Development Kit Fahrzeugfolge und Fahrstreifenwechselmodell in C++ auszutauschen [79]. AIMSUN verwendet ursprünglich eine Variante des Gipps Modells als Fahrzeugfolgemodell [88]. Ein Beispielszenario mit AIMSUN ist in Abbildung 2.4 zusehen.

MATSim

Multi-Agent Transport Simulation (MATSim) ist eine Open Source Verkehrssimulation, die von Prof. Dr. Kai Nagel an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich initiiert wurde. Durch seinen Wechsel an die Technischen Universi-

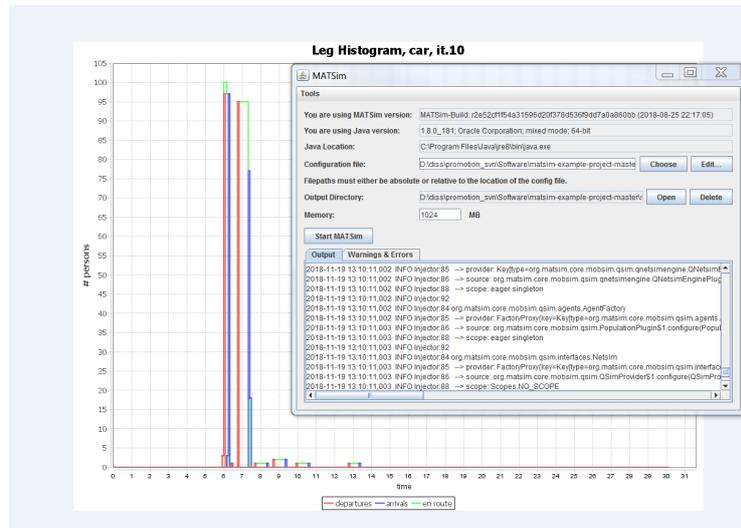


Abbildung 2.5: Beispiel für eine Simulation in MATSim

tät (TU) in Berlin wurde ein großer Teil der Entwicklung von seiner Arbeitsgruppe dort und an der ETH Zürich von Prof. Kay W. Axhausen und sein Team weitergeführt. MATSim ist in Java implementiert und wurde konzipiert für die effiziente Simulation von großen Verkehrsszenarien und verwendet dafür ein Warteschlangenmodell (queue-based approach) [89] [90]. MATSim ist Open Source und eine weit verbreitete Verkehrssimulation, die kontinuierlich weiterentwickelt wird. Wenn ein Fahrzeug (Agent) in ein Straßensegment hineinfährt wird es an das Ende einer Warteschlange hinzugefügt [89]. Durch das Warteschlangenmodell kann eine hohe Effizienz bezüglich der Rechenlaufzeit erreicht werden, jedoch wird die Fahrzeugbewegung nur stark vereinfacht simuliert z.B. werden keine Fahrstreifenwechsel oder Überholvorgänge abgebildet [83]. In Abbildung 2.5 wurde die Simulationsoberfläche von MATSim abgebildet.

Quadstone Paramics

Quadstone Parallel Microscopic Simulation (Paramics) wird von der Firma Quadstone entwickelt und vertrieben. Die Software wurde in den frühen 1990er Jahren an der Universität Edinburgh entwickelt und von den Entwicklern kommerziell vertrieben. Hieraus wurde die Firma Quadstone gegründet, die 2010 von Pitney Bowes Software übernommen wurde [91]. In Abbildung 2.6 ist beispielhaft ein Szenario von Paramics dargestellt. Paramics Fahrzeugfolgemodell basiert auf dem Model von Fritsche [92]

TSIS-CORSIM

Traffic Software Integrated System (TSIS)-Corridor Simulation (CORSIM) ist eine mikroskopische Verkehrssimulation, die 1989 aus den Simulatoren NETwork SIMulation (NETSIM) und FREeway SIMulation (FRESIM) entstanden ist und wird über McTrans in Florida über eine Schutzgebühr vertrieben. NETSIM wurde Anfang der 1970er Jahre von der Federal Highway Administration (FHWA) entwickelt, damals

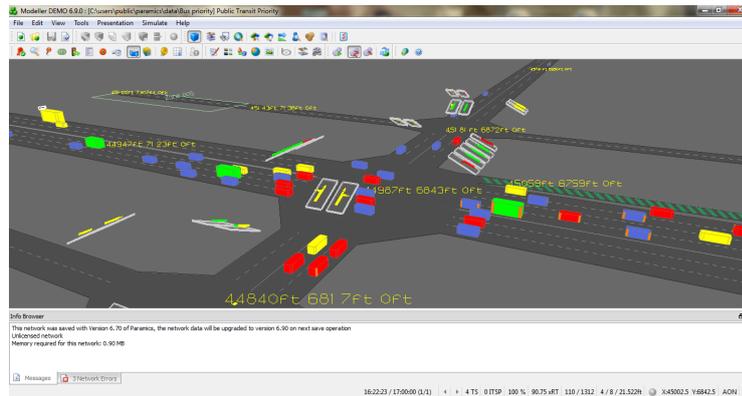


Abbildung 2.6: Beispiel für eine Simulation in Paramics



Abbildung 2.7: Beispiel für eine Simulation in CORSIM

noch unter den Namen Urban Traffic Control System (UTCS-I), und stellt damit die älteste Verkehrssimulation dar, die hier beschrieben wird [93].

CORSIM verwendet als Abstandsmodell in FRESIM das PITT Modell sowie in NETSIM das Pipes Modell [94].

Eclipse SUMO

Eclipse Simulation of Urban MObility (SUMO) ist ein Softwarepaket, welches viele verschiedene Programme zur Mobilitätssimulation bereitstellt [95]. SUMO ist Open Source. Insbesondere im Forschungsumfeld erfreut sich SUMO daher großer Beliebtheit. SUMO wird seit 2001 kontinuierlich weiter entwickelt und stellt eine breite Funktionspalette an Hilfswerkzeugen zur Verfügung u.a. für das Routing, Evaluation, Emissionsberechnung und vieles mehr. In SUMO werden diverse Verkehrsmodi angeboten, wie z.B. Fahrrad, Auto, Bus, Schiffe. Hierüber können ebenfalls intermodale Reiseketten abgebildet werden. Das Modell von Krauß ist in angepasster Version das Standardmodell in SUMO [96, 77].

SUMO kann verschiedene Verkehrsnetze einlesen z.B. OSM, VISUM, Vissim und Navteq. Mittels eines Interface namens Traffic Control Interface (TraCI) kann online mit der Simulation interagiert werden. SUMO wurde bereits in vielen verschiedenen nationalen und internationalen Projekten verwendet, z.B. COLOMBO [97], VABENE [98]. Ein Szenario in SUMO ist in Abbildung 2.8 zu sehen.

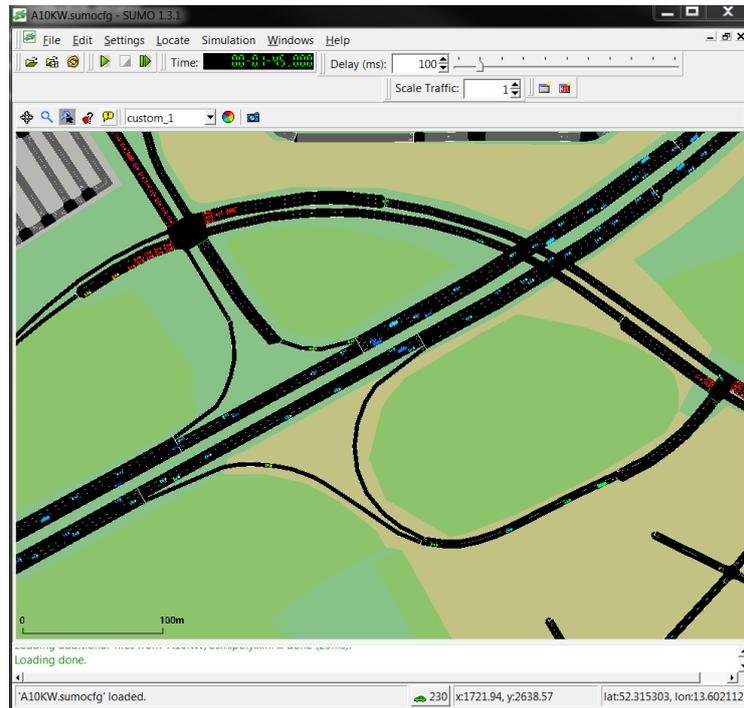


Abbildung 2.8: Beispiel für eine Simulation in SUMO

2.3.2 Zusammenfassung der Simulationssysteme

Dieser Abschnitt gibt eine Zusammenfassung der vorgestellten Simulationssysteme und verwendeten Modelle. In Tabelle 2.3 werden die Simulationswerkzeuge, die in den letzten Abschnitten beschrieben wurden, aufgeführt. Die Simulationstools werden stetig erweitert und verbessert, die Beschreibung bezieht sich daher auf den Stand vom 19. November 2018 und die angegebene Versionsnummer der Programme. Im weiteren Verlauf wird in dieser Arbeit ein Verkehrssimulationssystem um ein Modell für Einsatzfahrzeuge ergänzt (siehe Kapitel 4)

Um besser verstehen zu können, wie das Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen sich von dem von anderen Fahrzeugen unterscheidet, wird im nächsten Kapitel eine Verkehrsdatenanalyse durchgeführt. Zudem werden die Verkehrsdaten analysiert, um daraus einen Einblick, zu gewinnen, wie sich Einsatzfahrzeuge im Verkehr verhalten und in welchen Bereichen sie bei ihrer Einsatzfahrt unterstützt werden können.

Tabelle 2.3: Zusammenfassung der Simulationswerkzeuge (Stand 19.11.2018)

Simulation	aktuelle Version	Bewegungsmodell							Lizenz		Betriebssystem		
		Krauß	IDM	Wiedemann	Fritsche	Gipps	Pitt	Warteschlange	Kommerziell	Open Source	Windows	Linux	Mac OS
VISSIM	10			✓					✓		✓		
AIMSUN	8					✓			✓		✓	✓	✓
MATSim	10.1						✓			✓	✓	✓	✓
Paramics	6				✓				✓		✓		
CORSIM	6.3										✓	✓	
SUMO	1.0.1	✓	✓	✓						✓	✓	✓	✓

3

Verkehrsdatenauswertung von Einsatzfahrzeugen

In diesem Kapitel werden verschiedene Datenquellen von Einsatzfahrten mit Sonder- und Wegerechten zusammen getragen und ausgewertet. Die Auswertung dieser Daten dient zur Problemdefinition und der Erkennung von Bereichen mit Handlungsbedarf sowie zur Modellierung eines Einsatzfahrzeugmodells. Zunächst werden Unfallreports von Einsatzfahrzeugen untersucht, um Gefahrenbereiche und Risiken von Einsatzfahrten herauszuarbeiten. Anschließend werden Kameradaten und Positionsdaten ausgewertet, um einen Einblick in das Verkehrsverhalten und die Routenwahl zu bekommen. An Hand dieser Daten und von Experteninterviews wird abgeleitet, an welchen Stellen ein Unterstützungsbedarf vorliegt.

3.1 Unfalldatenauswertung

Zur Untersuchung, wie Einsatzfahrten sicherer gestaltet werden können, wurde eine Verkehrssicherheitsanalyse durchgeführt. Hierfür wurden stichprobenhaft 189 Verkehrsunfälle von Einsatzfahrzeugen in Deutschland während einer Einsatzfahrt mit Blaulicht untersucht. Die Quellen der Unfallberichte sind separat im Anhang aufgeführt. Der Untersuchungszeitraum umfasst die Jahre von 2009 bis 2015. Insgesamt wurden bei den untersuchten Verkehrsunfällen 118 Personen verletzt und 9 Verkehrsteilnehmer getötet. Es muss jedoch beachtet werden, dass dies nur eine kleine Stichprobe der gesamten Verkehrsunfälle darstellt, da nicht alle Verkehrsunfälle in dieser Untersuchung erfasst werden konnten auf Grund fehlender Informationen. Bei den Unfallberichten musste auf Zeitungsartikel zurückgegriffen werden, weil keine anderen Unfalldaten zur Verfügung standen, bei denen Einsatzfahrten separat aufgeführt werden. So werden selbst in den detaillierten Berliner Unfalldaten kein Hinweis darauf gegeben, dass Einsatzfahrzeuge in den Unfall verwickelt waren. Da insbesondere über große schwere Unfälle in Zeitungsartikeln eher berichtet wird und eine größere Aufmerksamkeit erfahren als kleine leichte Unfälle, sind schwere Un-

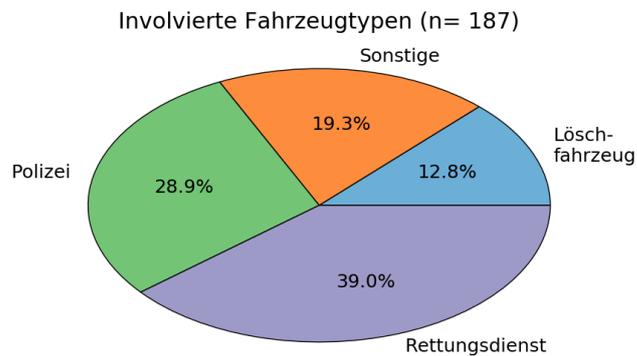


Abbildung 3.1: Fahrzeugtypen von Einsatzfahrzeugen, die in einen Unfall verwickelt wurden (Anzahl der ausgewerteten Datensätze n=187).

fälle in dieser Studie wahrscheinlich überrepräsentiert. In der Abbildung 3.1 ist zu sehen, dass Fahrzeuge des Rettungsdienstes mit 39 % am häufigsten in Verkehrsunfällen verwickelt waren, gefolgt von Polizeiwagen mit 29 %. Am seltensten kam es zu Unfällen mit Löschfahrzeugen der Feuerwehr mit 13 %. Ein Grund dafür könnte sein, dass diese meistens größer und länger sind, dadurch in der Regel nicht so schnell übersehen werden und folglich seltener in Unfällen verwickelt sind. Eine weitere Erklärung hierfür kann sein, dass Löschfahrzeuge seltener ausrücken müssen und eine viel geringere Kilometerleistung haben als andere Einsatzfahrzeuge und dadurch auch eine geringere Wahrscheinlichkeit haben in einen Unfall verwickelt zu werden. In 19 % der Unfallberichte kam es zu Verkehrsunfällen mit anderen Sondereinsatzfahrzeugen, z.B. Organtransporten. Es kann sich hierbei auch um normale Pkws handeln, die mit einer optionalen Sondersignalanlage ausgestattet sind. Solche Fahrzeuge werden vom Umgebungsverkehr meist schlechter als z.B. gängige Rettungswagen wahrgenommen.

Zudem stellte sich heraus, dass 50 % der Unfälle speziell im innerstädtischen Bereich stattfanden (siehe Abbildung 3.2). In nur 10 % der Unfalldaten kam es zu einem Unfall auf der Autobahn. Dies deckt sich mit der allgemeinen Unfallstatistik nach der in Deutschland die meisten Unfälle innerorts und auf Landstraßen die meisten Unfälle mit tödlichen Ausgang passieren [99].

Die Unfälle der Einsatzfahrzeuge waren relativ gleich über den Tag verteilt (siehe Abbildung 3.3), nur abends zwischen 18 und 23 Uhr kam es zu einer besonderen Häufung von Unfällen (32 %). Zu beachten ist allerdings, dass die Zeitintervalle nicht gleich groß sind und zwischen einer Zeitspanne von 4 bis 6 Stunden variieren. Obwohl nachts 6 Stunden des Tages zusammengefasst werden, kam es hier zu den wenigsten Unfällen. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass nachts wesentlich weniger Verkehrsteilnehmer unterwegs sind als am Tag. In Abbildung 3.4 ist dargestellt, welche anderen Verkehrsteilnehmer bei den Unfällen mit Einsatzfahrzeugen involviert waren. Mit 75 % Pkws waren mit Abstand am häufigsten bei den Unfällen mitbetroffen. In der Regel bekommen Fußgänger und Radfahrer schneller mit, dass sich ein Einsatzfahrzeug nähert, wodurch es seltener zu Konflikten im Verkehrsgeschehen kommt

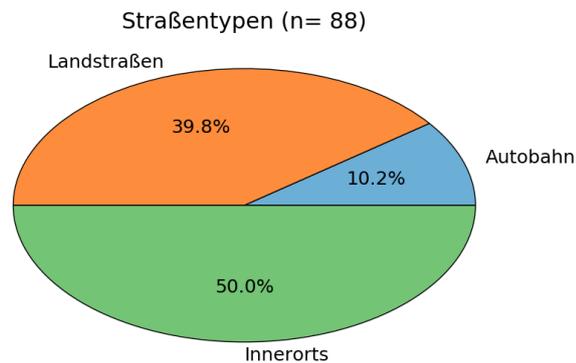


Abbildung 3.2: Straßentypen auf denen die Unfälle passierten (n= 88)

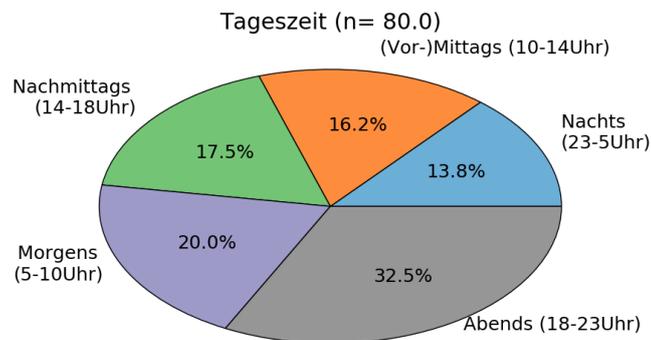


Abbildung 3.3: Tageszeit der Unfälle mit Einsatzfahrzeugen

(5 %). Dies kann mitunter daran liegen, dass sie nicht durch eine Fahrzeugkarosserie abgeschirmt werden und so früher das Martinshorn wahrnehmen. Ein anderer Grund, weshalb Radfahrer und Fußgänger nicht so häufig in Verkehrsunfällen mit Einsatzfahrzeugen verwickelt sind, kann sein, dass sich diese seltener die Fahrwege mit den Einsatzwagen teilen.

Aus den Unfallberichten lässt sich ableiten, welches die häufigsten Unfallursachen sind (siehe Abbildung 3.5). Hierbei wurde jedoch nicht bewertet, wer rechtlich gesehen die Schuld an dem Unfall trägt. In der Hälfte aller untersuchten Unfälle fand der Unfall an einem Knotenpunkt statt (50,7%). Gerade in diesen Bereichen kommt es zu einer großen Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern und bietet dadurch ein großes Konfliktpotential. In knapp einem Drittel (31,7%) der Unfälle wurde das Überqueren eines Knotenpunktes, während die LSA rot gezeigt hat, als Hauptunfallursache genannt.

Viele weitere Unfallursachen hängen stark mit den Sonder- und Wegerechten von Einsatzfahrzeugen zusammen, z.B. das Überholen (12,2%), starkes Bremsen (3,7%), das Benutzen von Einbahnstraßen in der falschen Richtung (0,5%) oder

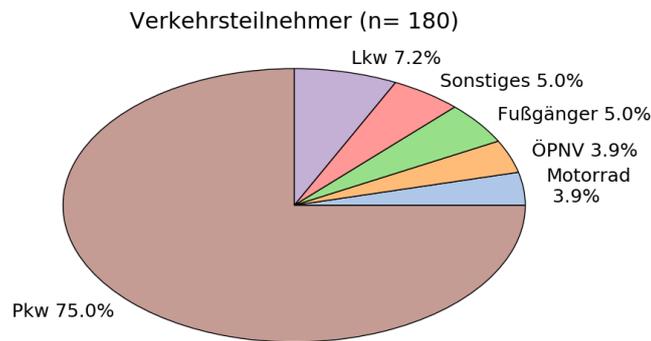


Abbildung 3.4: Involvierte Verkehrsteilnehmer bei Unfällen mit Einsatzfahrzeugen

das Überfahren eines Stoppschildes (0,5 %). Andere Unfallursachen haben nicht direkt mit den besonderen Rechten und Eigenschaften von Einsatzfahrzeugen zu tun, wie z.B. Witterungsbedingungen (5,8 %) oder der Einfluss von Alkohol bei anderen Verkehrsteilnehmern (2,6 %).

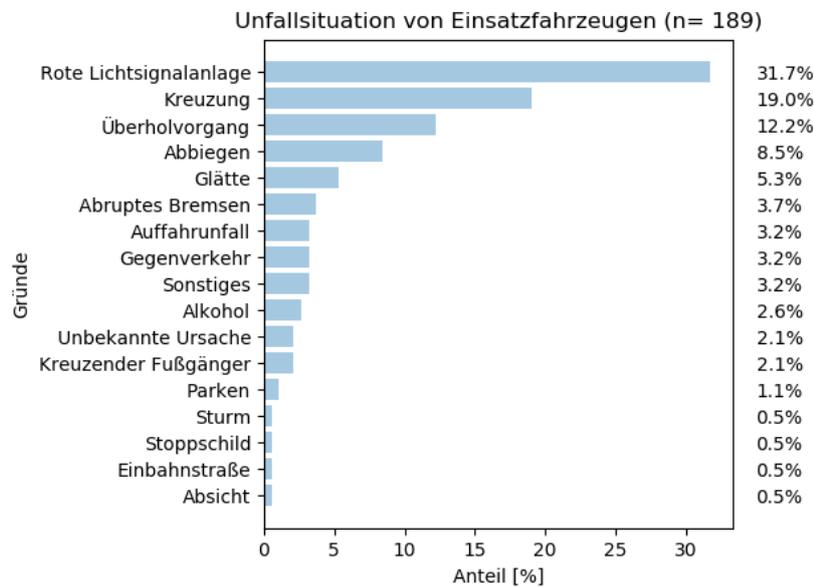


Abbildung 3.5: Gründe für die Unfälle mit Einsatzfahrzeugen

Die Verkehrssicherheitsanalyse legt nahe, dass es sinnvoll ist, Einsatzfahrzeuge speziell bei Knotenpunkten zu unterstützen, um die Unfallgefahr zu reduzieren. Insbesondere das Überqueren eines Knotenpunktes, während die LSA rot zeigt, stellt ein großes Risiko dar. Andere Studien kamen zu vergleichbaren Ergebnissen. So wurden in der Studie von Bockting [1] Einsatzwagenfahrer dazu befragt, wann und in welchen Situationen es mit Einsatzwagen zu Unfällen gekommen ist. Der einzige Un-

terschied ist hierbei, dass von den Einsatzwagenfahrern als häufigste Unfallsituation das Berühren beim Vorbeifahren genannt wurde. Solche Unfallsituationen werden von den Einsatzwagenfahrern selber nicht als sicherheitskritisch erachtet und werden daher in vielen anderen Studien vernachlässigt. Bei einer Unfalluntersuchung in New York waren ebenfalls Knotenpunkte die Bereiche, in denen es am häufigsten zu Unfällen kam [13].

3.2 Verkehrsdaten

Um das selbststeuernde Verkehrsmanagementkonzept für Einsatzfahrzeuge evaluieren zu können, wird ein Simulationsmodell für Einsatzfahrzeuge erstellt und in der Simulation SUMO implementiert. Hierfür werden reale Verkehrsdaten benötigt, um das Modell entsprechend kalibrieren und validieren zu können. Im Folgenden werden die Daten beschrieben, die für diese Arbeit zur Verfügung stehen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Datenquellen in mehreren Bereichen verwendet. Zum einen wurden Daten von Verkehrskameras verwendet, die an einem Knotenpunkt die Verkehrsdaten von allen Verkehrsteilnehmern sammelt, um so das Fahrverhalten von normalen Pkws mit dem von Einsatzfahrzeugen vergleichen zu können. In einem weiteren Abschnitt wurden die Verkehrstrajektorien von Einsatzfahrzeugen analysiert, um Informationen über die Durchschnittsgeschwindigkeit und Dauer der Einsatzfahrten zu erhalten. Videoauswertungen von Einsatzfahrten dienen dazu, bei der Auswertung zusätzlich noch Informationen über die Reaktionen des Umgebungsverkehrs zu erhalten. Durch Experteninterviews mit Einsatzwagenfahrern wird noch weiteres Hintergrund- und Expertenwissen beschrieben.

3.2.1 Verkehrskameras

Für die realen Verkehrsdaten wurde ein Knotenpunkt in Braunschweig ausgewählt, die ausgestattet ist mit Verkehrskameras und weiteren Sensoren. Der Knotenpunkt in Braunschweig ist Bestandteil des Forschungsprojekts AIM [100]. Der ausgewählte Knotenpunkt umfasst zwei Hauptstraßen von Braunschweig (die Brucknerstraße und den Rebenring bzw. die Hans-Sommer-Straße). Der Knotenpunkt ist mit mehr als 20.000 Verkehrsteilnehmern pro Tag stark befahren. Für die Evaluation wurden die Fahrzeugtrajektorien von einer Stunde des 23. Januars 2017 genutzt. Für die Verkehrserkennung wurden an dem Knotenpunkt verschiedene Mono-Kameras sowie Radarsensoren installiert. Die Verkehrsteilnehmer werden über diese Sensoren und Kameras beim Überqueren des Knotenpunktes als Objekt erkannt und verfolgt. Die daraus generierten Trajektorien beinhalten die Informationen über den Typ des Objektes (Pkw, Motorrad, Lkw, Fahrrad oder Fußgänger), die Größe, den Abstand zum Vorderfahrzeug und Mobilitätsinformationen (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung).

In Abbildung 3.6 ist ein Foto von der Forschungskreuzung zu sehen mit eingezeichneten Linien zur Visualisierung der detektierten Trajektorien. Mehr Informationen können in den Veröffentlichungen von Knacke-Langhorst und Gimm [100] sowie von Schnieder und Lemmer [66] nachgelesen werden.

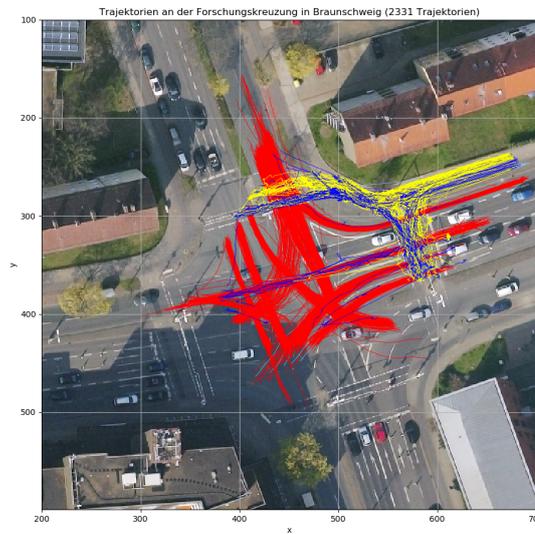


Abbildung 3.6: Foto der Forschungskreuzung in Braunschweig (Die Linien repräsentieren die detektierten Trajektorien rot: Autos, blau: Fahrräder, gelb: Fußgänger). In Anlehnung an [16]



(a) Bei der Forschungskreuzung



(b) In Braunschweig

Abbildung 3.7: Positionen der Einsatzfahrzeuge in QGIS [101]

3.2.2 Trajektorien von Einsatzfahrzeugen

Zusätzlich zu den Kameradaten von allen Verkehrsteilnehmern an dem Knotenpunkt sind noch die Mobilitätsdaten der Einsatzfahrzeuge der Stadt Braunschweig in einer Datenbank gesammelt. Für die Auswertung der Trajektorien der Einsatzfahrzeuge wurde der Evaluationszeitraum von Oktober 2013 bis Ende 2018 gesetzt. In diesem Zeitraum wurden an dem Knotenpunkt mehr als 7.000 Fahrten protokolliert. Insgesamt wurden die Daten von 24 Fahrzeugen gespeichert. Hierbei wurden die Positionsdaten der Fahrzeuge alle 5 Sekunden übermittelt und gespeichert. Zusätzlich sind noch Informationen über die Fahrzeuge vorhanden ob z.B. Blaulicht und Martinshorn angeschaltet sind. Ein Beispiel für eine Visualisierung der Positionsdaten der Einsatzfahrzeuge an der Forschungskreuzung ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

3.2.3 Experteninterviews

Es wurden zwei Feuerwehrmänner und ein ehemaliger Mitarbeiter des Rettungsdienstes mittels leitfadengestützten Experteninterview befragt, um eine qualitative Einschätzung des Fahrverhaltens von Einsatzwagenfahrern zu erhalten (für eine Methodenbeschreibung siehe [102])¹. Als Ergebnis kam heraus, dass die interviewten Experten selber keine Verkehrsunfälle während einer Einsatzfahrt hatten. Ein Experte berichtete jedoch von einem tödlichen Unfall eines Kollegen während einer Einsatzfahrt. Kleinere Unfälle wie ein abgefahrener Spiegel oder Kratzer im Autolack, treten dagegen gelegentlich auf.

Auch zu gefährlichen Situationen kam es immer wieder, insbesondere weil sich viele Verkehrsteilnehmer falsch verhielten oder zu spät reagierten. Ein besonderes Problem stellen hierbei auch wieder rot zeigende LSA dar. Viele Pkw-Fahrer trauen sich nicht, bei einer roten zeigenden LSA den Knotenpunkt zu befahren, um dem Einsatzfahrzeug den Weg freizuräumen. Andere Verkehrsteilnehmer machen Platz, aber schätzen insbesondere die Breite von Feuerwehrwagen falsch ein. Ebenfalls kommt es häufig dazu, dass der Querverkehr dem Einsatzfahrzeug keine Vorfahrt gewährt.

Innerorts gelingt es in der Regel nicht, eine sogenannte Rettungsgasse zu bilden, um Platz zu schaffen. Auf der Autobahn funktioniert das Bilden einer Rettungsgasse besser, aber auch nicht immer. Rettungsgassen können innerorts nur mit einer sehr reduzierten Geschwindigkeit von schätzungsweise Schrittgeschwindigkeit bis maximal 20km/h befahren werden. Wenn das Einsatzfahrzeug auf den Gegenfahrstreifen ausweichen muss, dann reagiert der Gegenverkehr im Normalfall gut.

Innerorts wird bei Einsatzfahrten in der Regel nicht schneller als 70km/h gefahren. Auf der Autobahn hängt die maximale Geschwindigkeit meisten von dem Fahrzeug ab. Bei geeigneter Verkehrslage und Dringlichkeit werden gelegentlich noch höhere Geschwindigkeiten gefahren, jedoch seltener, da das Überschreiten der Höchstgeschwindigkeit nur einen geringen Zeitvorteil mit sich bringt. Die größte zeitliche Ersparnis wird in der Regel durch das Überqueren von rot signalisierten LSAs erzielt.

Bei der freiwilligen Feuerwehr wird meistens eine gute Ortskenntnis erwartet, es sollen Straßen auch ohne Navigationsgerät gefunden werden können. Bei der Routenwahl werden Hauptstraßen vor Nebenstraßen bevorzugt, da auf Hauptstraßen höhere Geschwindigkeiten gefahren werden können und die Straßenbeschaffenheit besser ist. Gewisse Straßen werden zu bestimmten Zeiten komplett vermieden, da dort gerade große Feuerwehrfahrzeuge bei viel Verkehr keine Möglichkeit haben durch gelassen zu werden (z.B. durch enge Fahrbahn oder Tunnel). Welche Straßen das sind hängt sehr stark von dem Fahrer und seiner Ortskenntnis ab.

3.2.4 Videoauswertung

Es wurden zusätzlich Videos aus der Fahrerkabine von Einsatzfahrten in Berlin ausgewertet, um eine Einschätzung darüber zu erhalten, wie der Umgebungsverkehr auf die Einsatzfahrzeuge reagiert. Hierfür wurden 17 Videos gesammelt, die insgesamt 41 Minuten Videoaufnahmen von Einsatzfahrten mit Blaulicht zeigen. Die Videos decken leider oft nicht die gesamte Einsatzfahrt ab. Bei der Auswertung des Videomaterials kam heraus, dass viele Fahrzeuge gar nicht oder sehr spät (bei weniger

¹Der verwendete Leitfaden befindet sich im Anhang A.2.

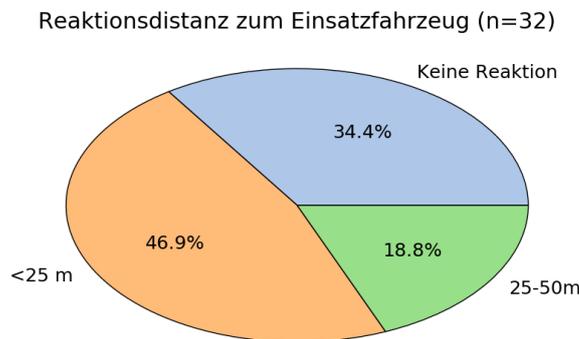


Abbildung 3.8: Reaktionsdistanz der Verkehrsteilnehmer auf das sich nähernde Einsatzfahrzeug (32 ausgewertete Situationen)



(a) Bildung einer Rettungsgasse auf der Autobahn für ein Einsatzfahrzeug

(b) Durch eine Baustelle muss die Gegenfahrbahn genutzt werden

Abbildung 3.9: Beispiele aus den Videoaufnahmen von Einsatzfahrten in Berlin

als 25 Meter Entfernung) auf das sich nähernde Einsatzfahrzeug reagieren. Genauere Abschätzungen sind durch die kurzen Momentaufnahmen und die unzureichende Videoqualität nicht möglich. Eine ungefähre Abschätzung der Entfernung, bei der andere Verkehrsteilnehmer auf das Einsatzfahrzeug reagieren, indem sie eine freie Bahn versuchen zu schaffen, ist in Abbildung 3.8 aufgezeigt.

Innerorts konnte in keiner Situation erfolgreich eine Rettungsgasse gebildet werden, dadurch musste das Einsatzfahrzeug entweder auf die Gegenfahrstreifen ausweichen oder lange warten, bis sich gestaute Bereiche aufgelöst hatten. Auf der Autobahn hingegen funktionierte das Bilden der Rettungsgasse durchweg gut. Beispielsituationen aus den Videoaufzeichnungen sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

Insgesamt wurden während der Videoaufnahmen 69 Knotenpunkte überquert, wobei 41 bei einer roten Phase überfahren wurden. In 19 Fällen kam es bei einer rot zeigenden LSA zu einer Verzögerung oder Fehlverhalten des Umgebungsverkehrs. In drei Fällen hat der Querverkehr das nähernde Einsatzfahrzeug an der rot signalisierten LSA nicht oder zu spät wahrgenommen, wodurch es zu potenziell kritischen Situationen gekommen ist. Bei weiteren drei Situationen an einer rot zeigenden LSA



(a) Knotenpunkt ist durch den Quer-



(b) Verkehrsteilnehmer bleibt in einer Kurve stehen

Abbildung 3.10: Beispiele für Blockierung der Einsatzfahrt

wurde das Einsatzfahrzeug durch überquerende Fußgänger aufgehalten. In den restlichen 13 Situationen haben die wartenden Fahrzeuge dem Einsatzfahrzeug keinen Platz gemacht, wodurch es auf die Gegenfahrbahn wechseln oder anhalten musste. Zusätzlich kam es bei acht grünen signalisierten LSA sowie zwei Situationen mitten auf der Straße dazu, dass das Einsatzfahrzeug vom Umgebungsverkehr blockiert oder an der Weiterfahrt gehindert wurde. Beispielsituationen, bei denen die Einsatzfahrten vom Umgebungsverkehr blockiert wurden, sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Manche Verkehrsteilnehmer scheinen dem Einsatzfahrzeug Platz machen zu wollen und bleiben daher mitten auf der Straße stehen. Die Einsatzwagenfahrer müssen dann dem plötzlich haltenden Fahrzeug ausweichen und auf den Fahrstreifen des Gegenverkehrs wechseln, welches insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten zu kritischen Situationen führen kann.

3.3 Geschwindigkeitsauswertung

Um das Mobilitätsverhalten des Einsatzfahrzeugmodells an reale Daten anzupassen, wird in diesem Abschnitt untersucht mit welchen Durchschnittsgeschwindigkeiten die Einsatzfahrzeuge in Braunschweig fahren. Hierfür wird zunächst einem einzelnen Knotenpunkt untersucht und im weiteren Verlauf verschiedene Streckenabschnitte.

3.3.1 Knotenpunkte

Nachdem die vorherigen Auswertungen ergeben haben, dass Kreuzungen bei einer Einsatzfahrt die Bereiche sind, bei denen es häufig zu kritischen Situationen kommt, wurde ein Knotenpunkt in Braunschweig detaillierter untersucht. Hierfür wurden die Trajektorien und die Kameradaten der Forschungskreuz verwendet die bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben wurde. Zudem wurden die Daten der Einsatzfahrten in Braunschweig verwendet, die in Abschnitt 3.2.2 aufgeführt wurden. Um die Daten mit einander vergleichen zu können, wurden die Trajektorien so abgeschnitten, dass sie alle den gleichen Abschnitt untersuchen. Hierfür wurden optische Schleifen eingeführt (siehe Abbildung 3.11) und an diesen Stellen die Trajektorien abgeschnitten. Durch den Blickwinkel der Verkehrskamera ist die Länge der Trajektorien leider

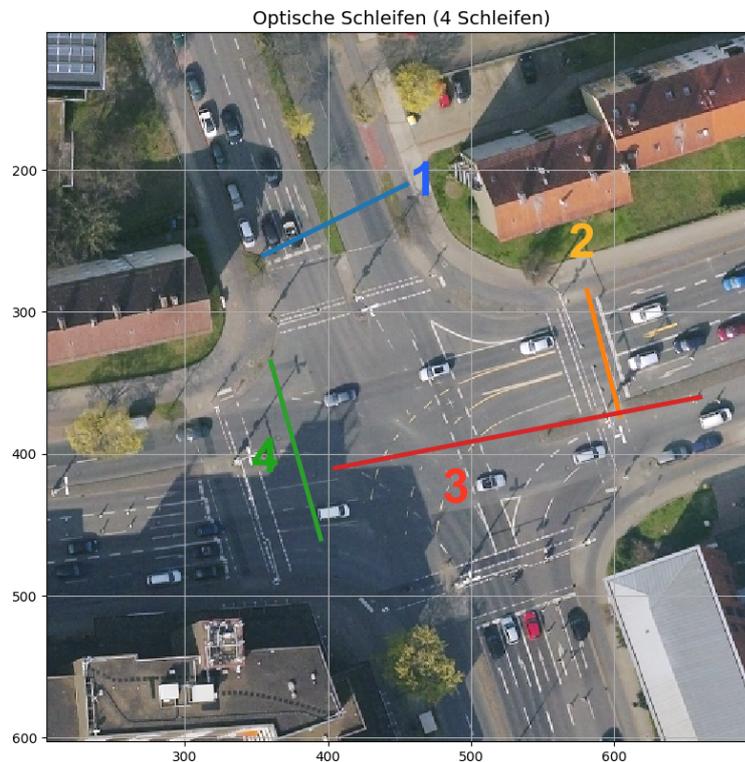


Abbildung 3.11: Lage der optischen Schleifen

beschränkt. Für die Rechtsabbieger wurden alle Trajektorien verwendet, die über die optische Schleife Nummer 2 und Nummer 1 fahren. Die Geradeausfahrer sind von der Schleife 2 bis 4 gefahren und die Linksabbieger von 2 nach 3. Die optischen Schleifen umfassen auch einen Teil der Fahrstreifen des Gegenverkehrs mit, da die Einsatzfahrzeuge ebenfalls dort gefahren sind. Die Schleife 2 wurde bewusst bei der Haltelinie platziert, damit bei den Pkws nicht die Wartezeit vor der LSA mitgemessen wird.

Bei den Trajektorien der Einsatzfahrzeuge wurden nur die Fahrten mit Blaulicht berücksichtigt. Das Martinshorn wird während der Einsatzfahrt nach Bedarf an- und ausgeschaltet, während Blaulicht in der Regel während der gesamten Einsatzfahrt bei einem Notfall eingesetzt wird. Ohne Blaulicht handelt es sich nicht um eine Notfalleinsatzfahrt. Rechtlich gesehen müssten die Einsatzfahrzeuge auch die gesamte Zeit das Martinshorn angeschaltet haben. Im Interesse der Anwohner und deren Lärmbelästigung wird häufig auf das Martinshorn verzichtet und nur an kritischen Stellen, wie z.B. Knotenpunkte, für eine kurze Zeit angeschaltet. Insbesondere nachts wird das Martinshorn oft auf der restlichen Fahrt ausgestellt, um schlafende Anwohner nicht zu stark zu belästigen. Zudem merkte ein Feuerwehrmann beim Experteninterview (Abschnitt 3.2.3) an, dass viele Verkehrsteilnehmer nervös werden, wenn sie die Sirene hören und sich dann aus Panik falsch verhalten.

Die Zeit und Durchschnittsgeschwindigkeit, die die Fahrzeuge zum Überqueren des Knotenpunktes bei einer Geradeausfahrt benötigen ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Während normalen Pkws innerhalb von 5,5 Sekunden und mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 8,5 m/s überqueren, so brauchen Einsatzfahrzeuge hier-

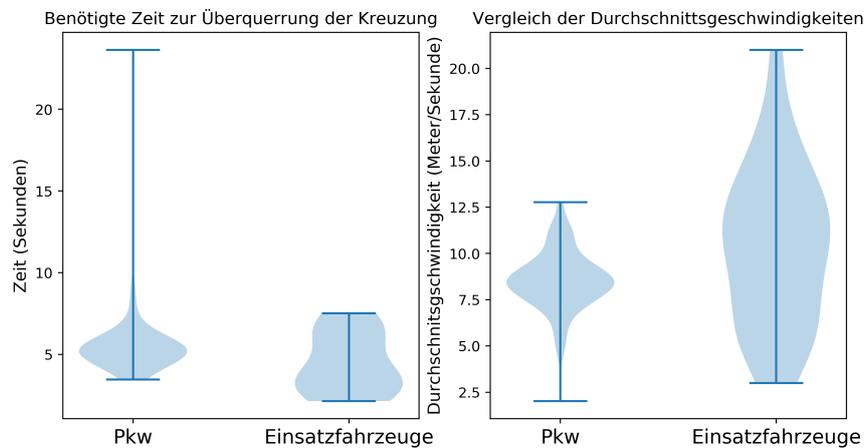


Abbildung 3.12: Benötigte Zeit und Durchschnittsgeschwindigkeit beim Überquerung des Knotenpunktes bei einer Geradeausfahrt (n=153)

für 4,5 Sekunden und fahren mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 10,4 m/s. Anders formuliert Einsatzfahrzeuge sparen eine Sekunde verglichen mit anderen Verkehrsteilnehmern bei einem Knotenpunkt beim Geradeausfahren.

In Abbildung 3.13 ist die benötigte Zeit und Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge beim Linksabbiegen dargestellt. Pkws benötigen hierbei 2,8 Sekunden und fahren mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 6,3 m/s. Einsatzfahrzeuge benötigen beim Linksabbiegen nur 1,6 Sekunden und fahren mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 10,6 m/s. Damit ist die Zeitersparnis von Einsatzfahrzeugen beim Linksabbiegen mit 1,2 Sekunden etwas höher als beim Geradeausfahren. Zu beachten ist dabei allerdings, dass beim Linksabbiegen nur ein sehr kleiner Bereich von der Verkehrskamera erfasst wird und bei der Analyse bewertet werden konnte. An dem Knotenpunkt wurden keine Einsatzfahrten mit Blaulicht von rechtsabbiegenden Einsatzfahrzeugen protokolliert wodurch keine Auswertung hierfür vorliegt.

3.3.2 Streckenabschnitte

Die Auswertung der Forschungskreuzung in Braunschweig gibt einen Eindruck, wie schnell die Einsatzfahrzeuge verglichen mit anderen Verkehrsteilnehmer bei einem Knotenpunkt fahren können. Um allgemeinere Bewertung vornehmen zu können, wurden in diesem Abschnitt weitere Strecken und Knotenpunkte untersucht. Dafür wurden auch die Einsatzfahrzeugdaten aus Braunschweig verwendet (siehe Abschnitt 3.2.2).

In Abbildung 3.14 ist ein Ausschnitt aus Braunschweig dargestellt. Für die markierten Bereiche wurden die Geschwindigkeiten der Einsatzfahrzeuge ausgewertet. Dabei wurde unterschieden zwischen Fahrten mit Blaulicht und Martinshorn sowie Fahrten ohne beides zum Vergleich herangezogen. Da sich Einsatzfahrzeuge ohne Blaulicht und Martinshorn wie normale Verkehrsteilnehmer verhalten sollten.

Abbildung 3.15a zeigt die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Einsatzfahrzeuge sowie deren Standardabweichung für die Straßentypen Hauptstraßen, Nebenstraßen

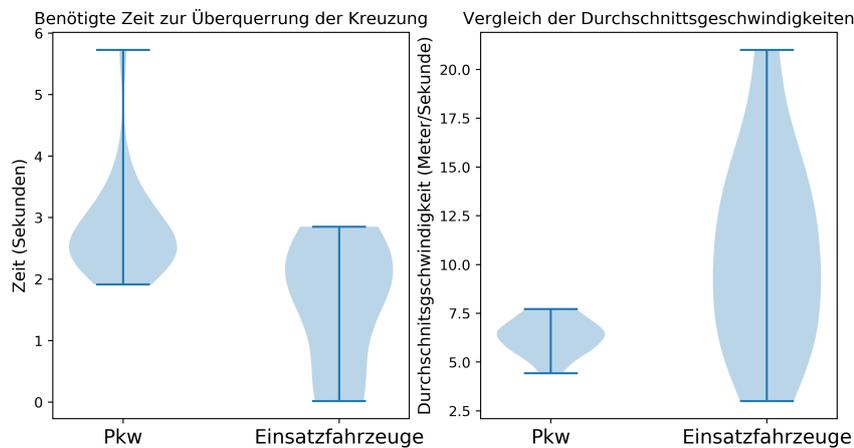


Abbildung 3.13: Benötigte Zeit und Durchschnittsgeschwindigkeit beim Überquerung des Knotenpunktes beim Linksabbiegen (Anzahl ausgewertete Fahrten: 51)

und Autobahn. Wie zu erwarten war, ist die Durchschnittsgeschwindigkeit bei allen Streckenabschnitten für die Einsatzfahrzeuge mit Blaulicht und Martinshorn höher als für Fahrten ohne. Während sich die Geschwindigkeit bei einer Einsatzfahrt ohne Blaulicht nach der maximal erlaubten Höchstgeschwindigkeit der Straßen richtet, hängt die Geschwindigkeit bei Blaulicht stark von dem Umgebungsverkehr ab. Das könnte auch eine Erklärung dafür sein, weshalb die Geschwindigkeiten zum Teil sehr stark schwanken. Es ist zu erwarten, dass z.B. nachts und bei wenig Verkehr die Einsatzfahrzeuge sehr schnell fahren können, aber zur Hauptverkehrszeit dazu nicht in der Lage sind. Im Durchschnitt können Einsatzfahrzeuge mit Blaulicht auf Nebenstraßen 10,6 km/h, bei Hauptstraßen sogar 18,6 km/h schneller und auf der Autobahn ca. 13,3 km/h schneller fahren. Da die Einsatzfahrzeuge auf der Autobahn selbst ohne Blaulicht bereits relativ schnell fahren können, ist der Geschwindigkeitsvorteil vergleichsweise gering. Dazu kommt, dass es Einsatzfahrzeuge häufig durch ihren Fahrzeugtyp und Ausstattung nicht zulassen schneller als 140 km/h zu fahren.

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Einsatzfahrzeuge an Bereichen mit Knotenpunkten sind in Abbildung 3.15b dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden auch die Breiche der Knotenpunkte in drei Gruppen unterteilt: Knotenpunkte, die sich in der Nähe von Autobahnauffahrten befinden, Knotenpunkte mit Neben- und Hauptstraßen. Die Geschwindigkeitsschwankungen sind hier ebenfalls recht groß. Insbesondere bei Einsatzfahrten ohne Blaulicht ist zu berücksichtigen, dass die Einsatzfahrzeuge vor dem Knotenpunkt mit einer rot signalisierten LSA warten müssen. In den Abschnitten eines Knotenpunktes bringt eine Fahrt mit Blaulicht einen durchschnittlichen Geschwindigkeitsvorteil von 29,9 km/h bei Nebenstraßen, 22,2 km/h bei Hauptstraßen und 23,5 km/h bei Autobahnauffahrten.

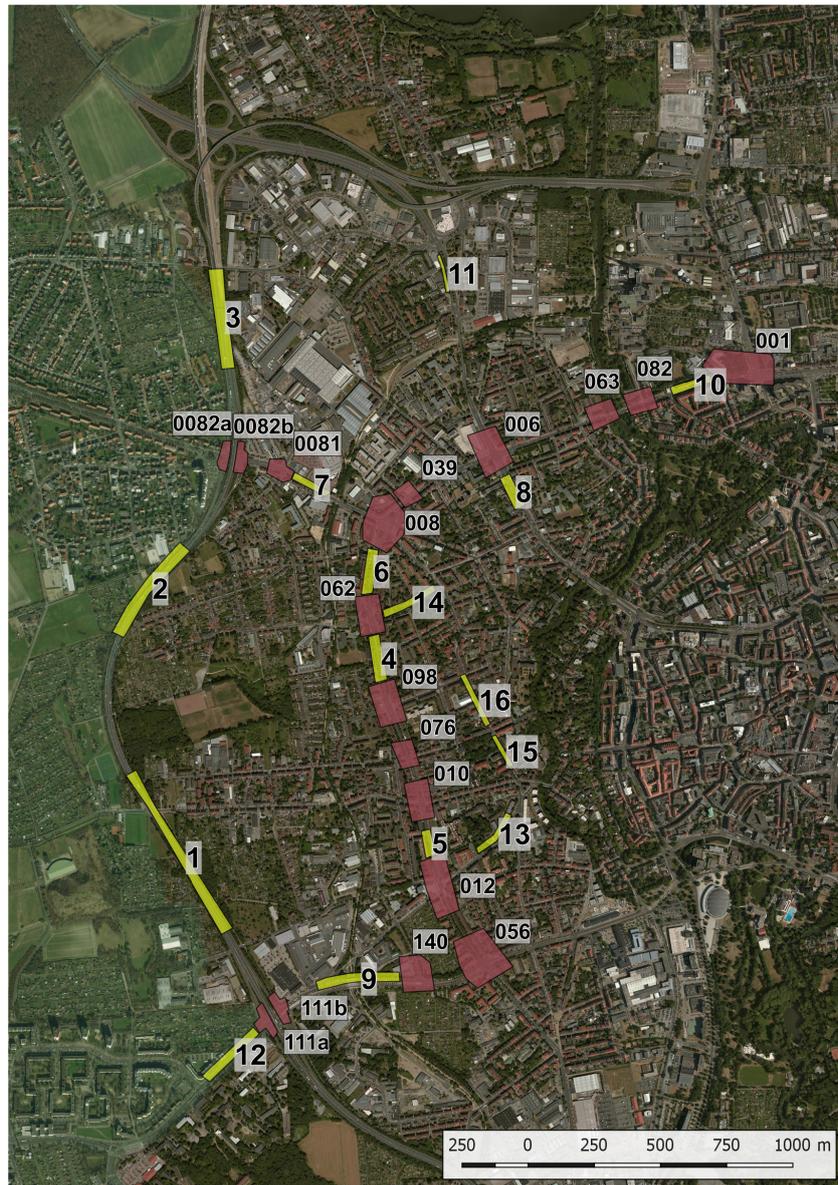


Abbildung 3.14: Ausschnitt aus Braunschweig mit den evaluierten Streckenabschnitten (Kartenmaterial basiert auf einer Karte von Bing [103] in Qgis [101])

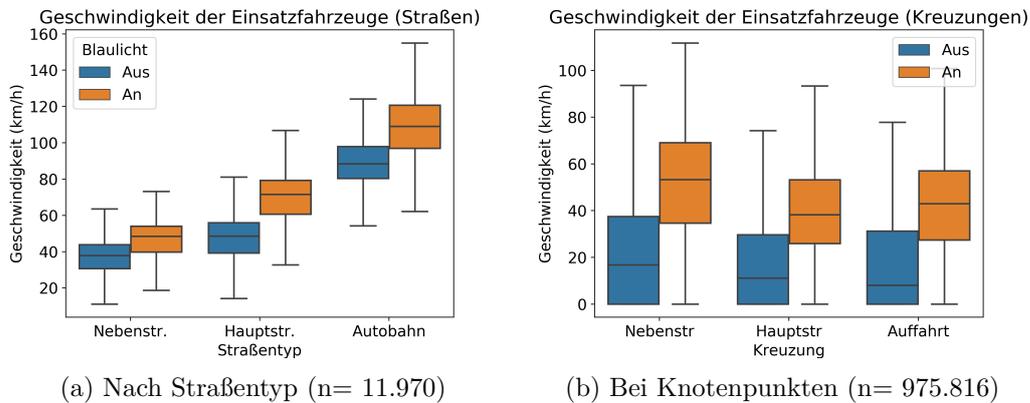


Abbildung 3.15: Durchschnittsgeschwindigkeiten der Einsatzfahrzeuge

3.4 Routenauswertung

In den vorherigen Abschnitten wurden lokale Bereiche ausgewertet. Um zu untersuchen welchen Effekt dies auf die gesamte Einsatzfahrt hat, werden in diesem Abschnitt die gesamten Routen der Einsatzfahrzeuge analysiert. Hierfür wurden die Trajektorien der Einsatzfahrzeuge 3.2.2 verwendet.

Zuerst wurden die Positionen der Einsatzfahrzeuge so gefiltert, dass nur die Einsatzfahrten verwendet wurden, bei denen das Blaulicht auch durchgehend angeschaltet war. Da aus Experteninterviews von Einsatzfahrzeugen hervor geht, dass das Martinshorn oft nur dann eingeschaltet wurde, wenn gezielt eine Berechtigung in Anspruch genommen werden soll (siehe Abschnitt 3.2.3).

In Abbildung 3.16 ist die Wahrscheinlichkeit davon dargestellt, dass die Einsatzfahrt innerhalb einer bestimmten Zeitspanne beendet wurde. Diese Auswertung bestätigt die Studie von Schmiedel und Behrendt [3], dass ein Großteil der Einsatzfahrten innerhalb der Hilfsfristen bedient werden können. In 62 % der Fälle dauert die Einsatzfahrt nicht länger als 8 Minuten und in 86 % der Fälle konnte die Einsatzfahrt innerhalb von 13 Minuten beendet werden. Das zeigt, dass die Hilfsfristen häufig, jedoch nicht immer eingehalten werden können. Das Ziel, das 95 % der Einsatzfahrten die Hilfsfrist einhalten, kann bei den ausgewerteten Einsatzfahrten nicht erreicht werden.

Nachts ist zu erwarten, dass die Hilfsfristen besser eingehalten werden können, da weniger Verkehr unterwegs ist, der die Einsatzfahrzeuge blockieren könnte. In Abbildung 3.17 sind daher zum Vergleich die Einsatzfahrten nachts zwischen 1 und 2 Uhr morgens aufgeführt. Die Hilfsfristen können hier in 89 % der Fälle in unter 13 Minuten bedient werden. Es wäre jedoch zu erwarten gewesen, dass die Hilfsfristen hier deutlich besser eingehalten werden könnten. Die Einsatzfahrten waren nachts zwar im Durchschnitt kürzer (7,7 Minuten verglichen mit 8,2 Minuten Tagsüber), aber nicht so stark wie erwartet. Warum die Einsatzfahrten nachts zeitlich länger sind als erwartet, kann mitunter daran liegen, dass das Einsatzgebiet nachts erweitert ist und somit längere Strecken gefahren werden müssen (10 km verglichen mit 9,7 km am Tag). Es fällt auch auf, dass Ausreißer in den Daten bei den Nachtfahrten stärker ins Gewicht fallen als bei den Einsatzfahrten am Tag. So finden z.B. Silvester und

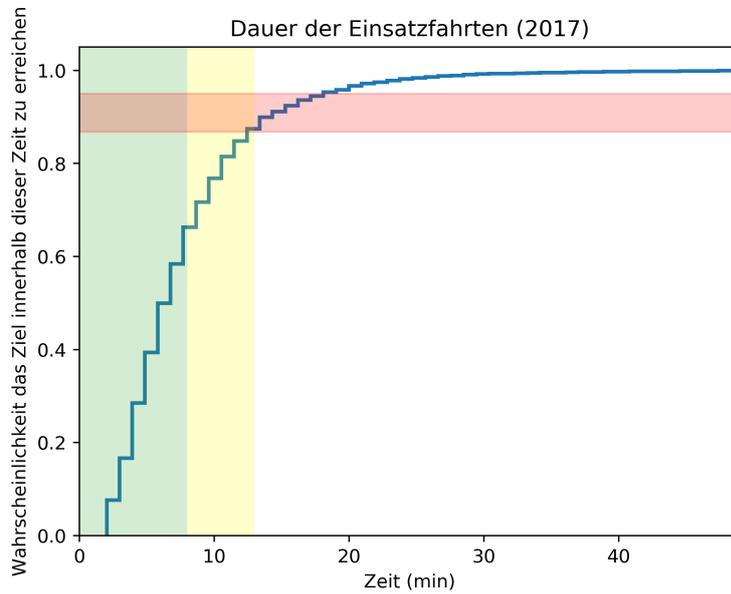


Abbildung 3.16: Anteil der Einsatzfahrten die innerhalb einer bestimmten Zeit das Ziel erreichen (2017, 24.505 Einsatzfahrten)

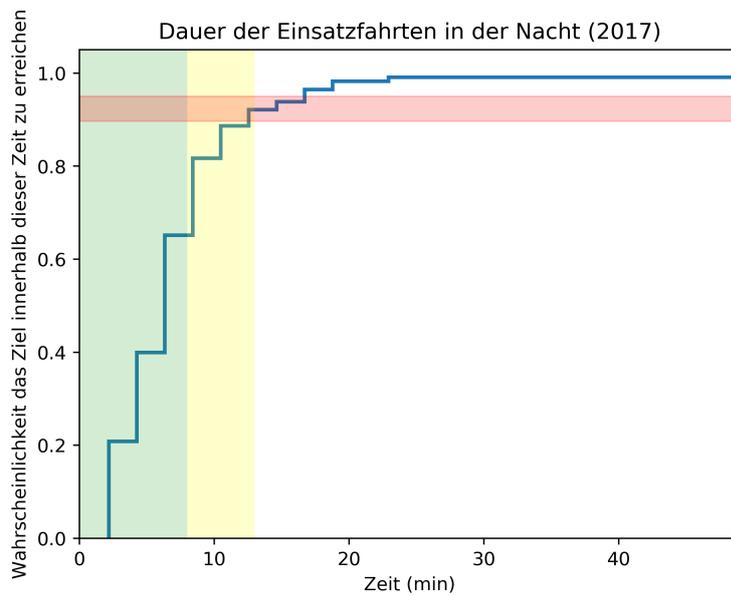


Abbildung 3.17: Anteil der Einsatzfahrten die innerhalb einer bestimmten Zeit das Ziel erreichen (2017 nachts, 574 Einsatzfahrten)

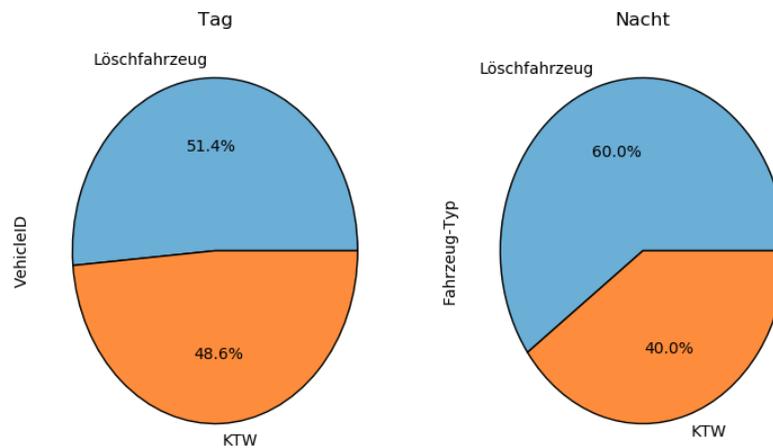


Abbildung 3.18: Vergleich von der eingesetzten Fahrzeugtypen am Tag und in der Nacht (n= 4.785)

Neujahr besonders viele Einsatzfahrten in der Nacht statt, jedoch kann an diesen Tagen nicht so schnell gefahren werden, da durch die Feuerwerkskörper und den vielen Menschen auf der Straße besonders vorsichtig gefahren werden muss. Zudem kommt es in der Nacht vor, dass die richtige Hausnummer, auf Grund fehlender Beleuchtung, nicht so schnell gefunden werden könne. Das führt häufiger dazu, dass die Einsatzfahrzeuge die Straße langsamer befahren oder an dem Einsatzort vorbei fahren und wenden müssen.

Ein Weiterer Aspekt ist, dass die gefahrene Geschwindigkeiten stark von dem Fahrzeugtyp abhängt. Kleinere Einsatzfahrzeuge z.B. sind schneller und wendiger als große Löschfahrzeuge. Hinzu kam, dass die langsameren Löschfahrzeuge prozentual häufiger nachts eingesetzt wurden als am Tage (siehe Abbildung 3.18). Das könnte sich darauf zurückführen lassen, dass die meisten Wohnungsbrände Abends bzw. nachts stattfinden, dagegen kommt es morgens bis mittags kaum zu Wohnungsbränden [104].

In Abbildung 3.19 ist die Beziehung zwischen Distanz der Einsatzfahrten und deren Dauer zu sehen. Die rote Linie repräsentiert hierbei eine durchschnittlichen Geschwindigkeit von 50 km/h. Bei den meisten der Einsatzfahrten ist die Triplänge kürzer als 8 km (89 %) und durchschnittlich dauert eine Einsatzfahrt 7,8 Minuten.

3.5 Zusammenfassung

Die Datenanalyse von Einsatzfahrzeugen hat gezeigt, dass zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen noch Potential vorhanden ist. Zum einen kann die Verkehrssicherheit verbessert und Maßnahmen konzipiert werden, die Unfallhäufigkeit von Einsatzwagen zu verringern. Zum anderen können die Reisezeiten von Einsatzfahrzeugen ebenfalls reduziert werden, um einen effizienten und effektiven Rettungsdienst zu gewährleisten.

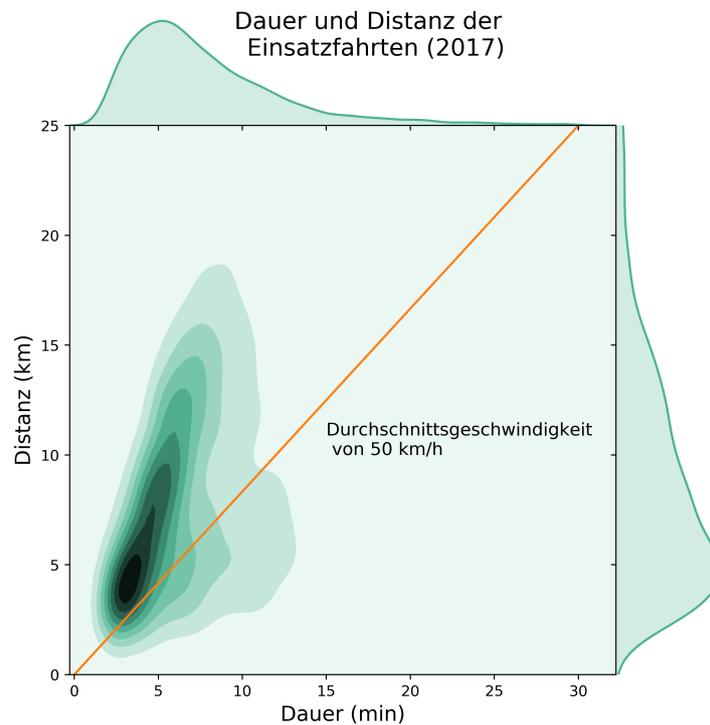


Abbildung 3.19: Dauer und Distanz der Einsatzfahrten (2017, 23.900 Einsatzfahrten)

Die Datenauswertung in diesem Kapitel dient hauptsächlich dazu, Problemstellen in den Routen von Einsatzfahrzeugen zu erkennen. Hierbei haben sich die Knotenpunkte, insbesondere wenn rote Phasen von LSAs missachtet werden, als besondere Risikobereiche für Unfälle herausgestellt. Ebenfalls sind das auch die Bereiche in denen Einsatzfahrzeuge ihre Geschwindigkeit stark reduzieren müssen sowie von anderen Verkehrsteilnehmern blockiert werden. Des Weiteren dienen die Verkehrsdaten dazu, ein realistisches Verkehrsmodell von Einsatzfahrzeugen zu erstellen. Dies wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4

Modellierung von Einsatzfahrzeugen

Um das Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen zu analysieren, sollen vorher Einsatzfahrzeuge modelliert und simuliert werden können. Zurzeit gibt es nur wenige bestehende Modelle, die in einer Verkehrssimulation umgesetzt sind. Im nächsten Abschnitt werden die Anforderungen an ein solches Modell beschrieben. Des Weiteren wird ein Überblick über den Stand der Forschung von der Modellierung und Simulation von Einsatzfahrzeugen gegeben. Anschließend wird das Einsatzfahrzeugmodell beschrieben, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und in der Verkehrssimulation SUMO umgesetzt wurde.

4.1 Anforderungen an ein Einsatzfahrzeugmodell

Um das besondere Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen während einer Einsatzfahrt simulieren zu können, müssen verschiedene Fahreigenschaften abgebildet werden. Hierzu gehören zum einen das Verhalten des Einsatzfahrzeugs selber, hierunter zählen:

- Geschwindigkeitsüberschreitung
- Rotlichtverstöße
- Vorfahrt an Knotenpunkten: An Knotenpunkten haben Einsatzfahrzeuge Priorität, obwohl nach StVO andere Fahrzeuge Vorfahrt hätten.
- Benutzung einer Rettungsgasse
- Benutzung von Einbahnstraßen in der falschen Richtung
- Überholen über den Fahrstreifen des Gegenverkehrs
- Verwendung von gesperrten oder restriktierten Straßen
- Missachten von Park- und Halteverbot

Zum anderen gehört dazu noch das Verhalten des Umgebungsverkehrs:

- Bevorrechtigung an Knotenpunkten
- Bilden einer Rettungsgasse
- Freie Fahrt gewähren

4.2 Bestehende Modelle von Einsatzfahrzeugen

Wenn Sondereinsatzfahrzeuge ohne Blaulicht und Martinshorn fahren, dann kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass ihr Fahrverhalten dem von normalen Verkehrsteilnehmern gleicht. Dadurch, dass das Blaulicht und Martinshorn eingeschaltet werden, zeigt das Einsatzfahrzeug an, dass höchste Eile geboten ist und es hiermit Sonder- und Wegrechte beansprucht. Während die bestehenden Verkehrssimulationen eine gute Abbildung des normalen Personenverkehrs bereitstellen, so gibt es auch hierbei einige Beschränkungen. Zum Beispiel wird in der Regel nur der normale durchschnittliche Verkehr abgebildet, das bedeutet, dass normalerweise auch keine Verkehrsunfälle oder das Fehlverhalten von Verkehrsteilnehmern explizit abgebildet werden. Im übertragenen Sinne stellen die implementierten Modelle mehr oder weniger autonome Fahrzeuge in einer Simulation dar. Durch zusätzliche Parameter wie Reaktionszeiten oder Ungenauigkeiten wird versucht, die Modelle an das reale Verkehrsverhalten von menschlichen Fahrern anzugleichen. So halten sich simulierte Fahrer in der Regel an alle Verkehrsregeln und Restriktionen, auch wenn im realen Verkehr menschliche Fahrer sich dynamisch in unsicheren Verkehrssituationen verhalten würden. Aus diesem Grund wird auch ein geeignetes Verkehrsmodell von Einsatzfahrzeugen in der Simulation benötigt, um das Sonderverhalten abbilden zu können. Im Folgenden wird beschrieben, welche Einsatzfahrzeugmodelle bereits in der Literatur beschrieben wurden.

Eine Implementierung eines Einsatzfahrzeugs in CORSIM wurde in der Arbeit von Zhang et. al [105] präsentiert. Bei diesem Modell wurde das spezielle Kreuzungsverhalten von Einsatzfahrzeugen umgesetzt, so können Einsatzfahrzeuge die Kreuzung selbst während einer roten Phase der LSA überqueren, so fern andere Verkehrsteilnehmer mit dem Einsatzfahrzeug kooperieren. Die Kooperation hängt von einem Zufallswert ab, ob die Verkehrsteilnehmer das Einsatzfahrzeug bemerken und einen Parameter des Fahrers, der bestimmt wie aggressiv dieser fährt. Zusätzlich ist das Einsatzfahrzeug in der Lage in jede Richtung abzubiegen unabhängig von der Fahrbahnmarkierung. Des Weiteren wurde das Überholen von Einsatzfahrzeugen über den Gegenfahrstreifen dadurch realisiert, dass eine quasi nicht real existierende virtuelle linken Fahrstreifen an dem Fahrbahnrand eingeführt wurde, über die nur das Einsatzfahrzeug fahren darf.

Ein weiteres Modell wurde von Weinert und Düring in [106] erstellt und ausgewertet. Das Modell wurde mittels einer V2X-Kommunikations-Applikation an SUMO angebunden. Die Applikation beinhaltet ebenfalls die Funktion rote Phasen einer LSA zu missachten sowie dem kooperativen Verhalten, dass der Umgebungsverkehr ihre Fahrstreifen wechselt, um dem Einsatzfahrzeug den Weg freizumachen.

In den Simulationsumgebungen sind keine Standardmodelle von Einsatzfahrzeugen vorhanden, allerdings können einzelne Eigenschaften von den Einsatzfahrzeugen

dort ebenfalls abgebildet werden, zum Beispiel in der Simulation AIMSUN. Dort gibt es nicht direkt die Möglichkeit, dass der Umgebungsverkehr eine Rettungsgasse bildet, allerdings kann ein ähnliches Verhalten erzeugt werden, indem auf einer Fahrbahn mit drei Fahrstreifen ein Detektor gesetzt wird der beim Überqueren eines Einsatzfahrzeug alle Fahrzeuge veranlasst, den Weg frei zu machen. Hierfür weichen die Fahrzeuge auf den ganz rechte sowie ganz linken Fahrstreifen der Straße aus, wodurch der gesamte mittlere Fahrstreifen frei gehalten wird für das Einsatzfahrzeug [107]. Auf eine ähnliche Weise wird auch in einer Simulationsstudie mit Vissim der Weg für Einsatzfahrzeuge freigeräumt [108]. Hierbei wechseln alle Fahrer auf den ganz rechten Fahrstreifen einer Straße mit zwei Fahrstreifen, um dem Einsatzfahrzeug eine freie Bahn zu schaffen. Zudem steht in Vissim ein LSA-Programm zur Verfügung, welches Einsatzfahrzeuge priorisiert [109]. Zur Übersicht sind die beschriebenen Funktionen in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tabelle 4.1: Modellierung von Einsatzfahrzeuge

Simulation	Funktion	Referenz
CORSIM	Missachtung einer roten LSA Überholen über den Fahrstreifen des Gegenverkehrs	[105]
SUMO	Missachtung einer roten LSA	[106]
AIMSUN	Freiräumen eines Fahrstreifens	[107]
VISSIM	Freiräumen eines Fahrstreifens	[108]
	LSA-Plan zur Priorisierung von Einsatzfahrzeugen	[109]

Da in dieser Arbeit das Verhalten von Einsatzfahrzeugen simuliert werden soll, wurde bei der Auswahl eines Simulationsprogramms für diese Forschung Wert darauf gelegt, dass der Quellcode frei zugänglich und erweiterbar ist. Zu Beginn der Forschung hatte keins der vorgestellten Programme ein Modell von Einsatzfahrzeugen implementiert. Aus diesem Grund wurde die Verkehrssimulation SUMO ausgewählt, damit die Verkehrssimulation um ein Einsatzfahrzeug-Modell erweitert wird. Die umgesetzten Funktionen und ihre Benutzung in SUMO sind im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.3 Einsatzfahrzeugmodell in SUMO

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Sonderrechte von Einsatzfahrzeugen in die Kernfunktionalität von SUMO mit aufgenommen und implementiert. Das Modell von Einsatzfahrzeugen wurde in SUMO implementiert, da die Software Open Source ist und dadurch einfach Änderungen an dem Quellcode vorgenommen werden können und bereits eine breite Funktionspalette bereitgestellt wird (siehe Abschnitt 2.3.1).

Die Modellierung von Einsatzfahrzeugen sieht wie folgt aus: in SUMO gibt es das Konstrukt eines „Devices“. Ein Device ist eine besondere Funktion, die ein Fahrzeug haben kann, z.B. ein Elektrofahrzeug oder ein Bluetooth-Gerät oder ähnliches. Mit diesem Gerät können zusätzliche Funktionen innerhalb von SUMO realisiert werden, die nur für bestimmte Fahrzeuge gelten sollen.

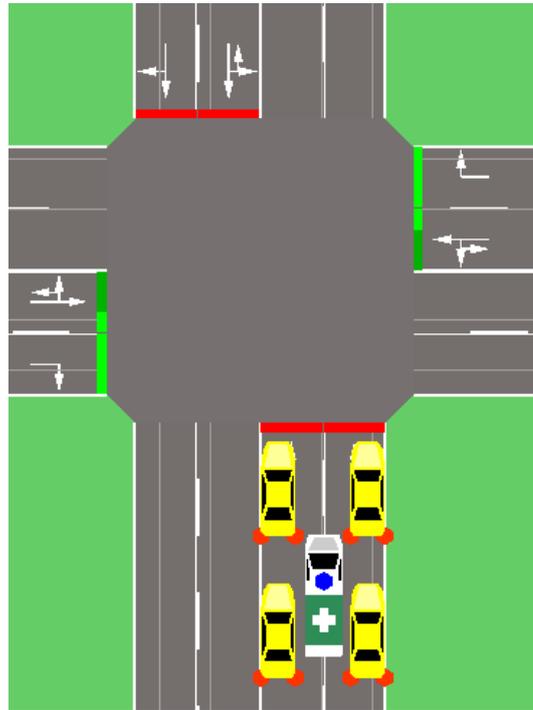


Abbildung 4.1: Beispiel für das Bilden einer Rettungsgasse in der Simulation SUMO

Die Sonderrechte von Einsatzwagen werden mit so einem Device umgesetzt. Während ein Einsatzwagen im Normalfall wie ein ganz normales Fahrzeug fährt, bekommt es Sonderrechte, wenn es Blaulicht und Martinshorn anschaltet. Das selbe Verhalten wird umgesetzt über so ein Device mit dem Namen: „Bluelight Device“. Ein Bluelight Device kann einem einzelnen Fahrzeug explizit oder mit einer Verteilung (mittels Wahrscheinlichkeiten) zugewiesen werden. Dadurch wird den Verkehrsteilnehmern angezeigt, dass das Fahrzeug Bevorrechtigung beansprucht und somit Wegerecht fahren kann (siehe Abschnitt 2.1). Das Blaulicht und die Sirene können über das Bluelight Device aus- und angeschaltet werden, so wie es auch in der realen Welt geschehen würde. Die Sonder- und Wegerechte können nur mit eingeschalteten Blaulicht und Martinshorn in Anspruch genommen werden, ohne sie ist das Fahrverhalten des Einsatzfahrzeug das Gleiche wie das von normalen Pkws.

Im Folgenden werden die einzelnen Modellfunktionen der Einsatzfahrzeuge beschrieben.

4.3.1 Rettungsgassenbildung

In der Simulation reagieren alle Fahrzeuge auf ein sich näherndes Einsatzfahrzeug indem sie im Sub-Fahrstreifen-Modell den Sub-Fahrstreifen wechseln. Fahrzeuge, die sich auf dem Fahrstreifen ganz links befinden, wechseln nach links und Fahrzeuge von allen anderen Fahrstreifen fahren rechts ran. Ein Beispiel für das Verhalten in der Simulation ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Nachdem das Einsatzfahrzeug den entsprechenden Knotenpunkt verlassen hat, verhält sich der Umgebungsverkehr wieder normal.

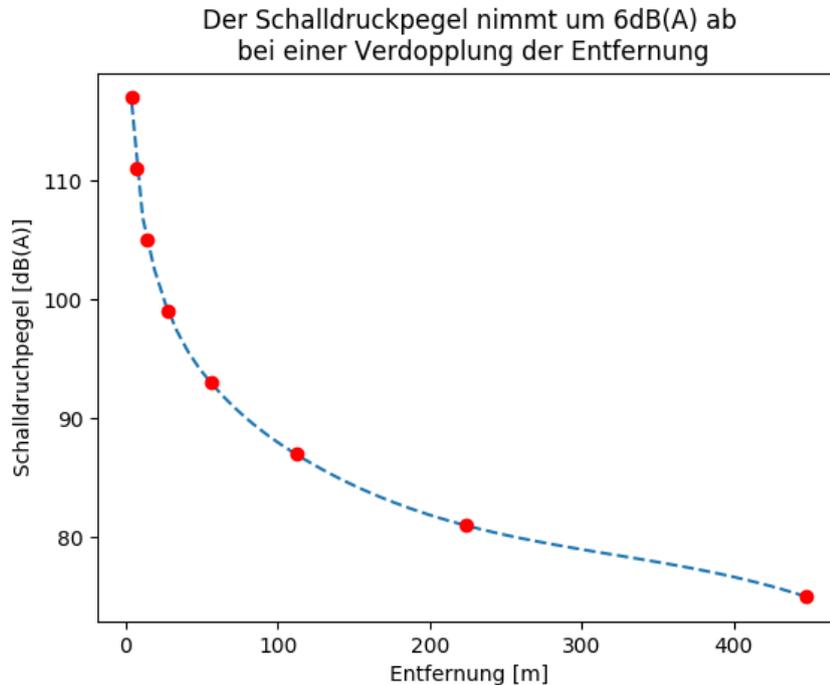


Abbildung 4.2: Veränderung des Schalldruckpegels in Abhängigkeit zur Entfernung

Die Implementierung des Verhaltens von Einsatzfahrzeugen und dem Umgebungsverkehr sieht wie folgt aus: Alle Fahrzeuge, die sich vor dem Einsatzfahrzeug befinden, werden in einem Umkreis von 25 Metern benachrichtigt. Der Wert von 25 Metern resultiert aus einer Untersuchung von Golder [48]. In dieser Publikation wird aufgeschlüsselt bei welcher Entfernung und unter welchen Bedingungen die Sirene von Einsatzfahrzeugen wahrgenommen werden kann. Hierzu gehört der Schalldruckpegel von dem Einsatzfahrzeug im Zusammenhang mit der Entfernung. Während bei einer direkten Entfernung von 3,5 Metern laut [48] ein Schalldruckpegel von 117 dB(A) gemessen wird, so reduziert sich der Druck um je 6 dB(A) bei einer Verdopplung der Entfernung. Zur Verdeutlichung kann der Schalldruckpegel in Abhängigkeit zur Entfernung in Abbildung 4.2 betrachtet werden.

Hinzu kommt, dass die Schallisolierung von Fahrzeugen immer besser wird, so dass von einer Schalldämmung von ca. 30 dB(A) ausgegangen werden kann. Zusätzlich kommen noch die Motor- und Außengeräusche sowie ggf. ein eingeschaltetes Radio, sodass hier ebenfalls eine zusätzliche Geräuschquelle von ca. 70 dB(A) realistisch ist. Dadurch ergibt sich, dass der gemessene Schalldruck außerhalb des Fahrzeugs mindestens 100 dB(A) betragen muss, damit dieser in der Regel wahrgenommen wird. Daraus ergibt sich für die Simulation der Richtwert von 25 Metern Entfernung zum Einsatzfahrzeug, um entsprechend zu reagieren. Alle Fahrzeuge versuchen daraufhin eine Rettungsgasse zu bilden bzw. Platz zu schaffen.

Das Blaulicht wird nur bei direkten Sichtkontakt wahrgenommen und spielt dadurch bei der Abschätzung, wann das Einsatzfahrzeug wahrgenommen wird, eine eher untergeordnete Rolle und wird daher nicht in der Berechnung berücksichtigt [48].

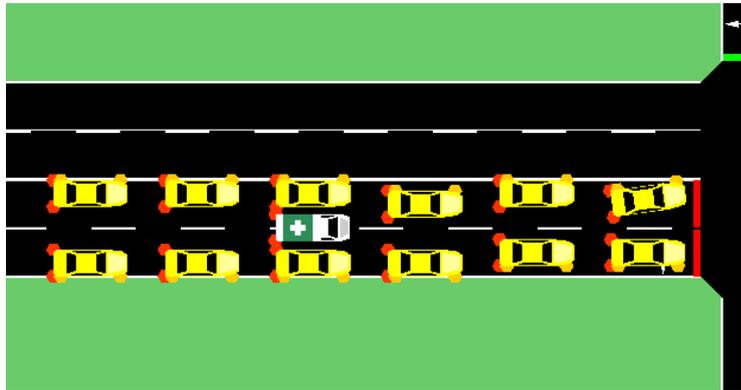


Abbildung 4.3: Verspätete Reaktion beim Bilden einer Rettungsgasse

Aus den Experteninterviews aus Abschnitt 3.2.3 ging hervor, dass eine Rettungsgasse in der Regel mit reduzierter Geschwindigkeit befahren werden kann. Aus diesem Grund wurde die Geschwindigkeit des Einsatzfahrzeuges beim Befahren einer stehenden Rettungsgasse auf 20 km/h beschränkt.

Das hier beschriebene Modell beschreibt mehr oder weniger eine perfekte Welt, bei der alle Verkehrsteilnehmer richtig auf das Einsatzfahrzeug reagieren. Um das Modell realistischer zu gestalten wurde ein Zufallswert eingeführt der bestimmt, ob und wann die anderen Autos auf das Einsatzfahrzeug reagieren. Aus den Videoaufnahmen aus Abschnitt 3.2.4 ist bekannt, dass viele Verkehrsteilnehmer erst spät oder gar nicht eine Rettungsgasse bilden. Aus diesem Grund wurde ein Parameter eingeführt, der die Wahrscheinlichkeit bestimmt, ob ein Autofahrer auf das Einsatzfahrzeug reagiert. Standardmäßig liegt der Wert bei 34,4% der Fälle reagiert ein Fahrzeug nicht auf das Einsatzfahrzeug (abgeleitet aus den Videoaufnahmen von Einsatzfahrten siehe Abbildung 3.8). Je näher das Einsatzfahrzeug ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass der Umgebungsverkehr reagiert. Dadurch können auch Situationen simuliert werden, bei dem ein Einsatzfahrzeug in eine Rettungsgasse hineinfährt und von einem Fahrzeug bei der Durchfahrt kurz gehindert wird, bis das Fahrzeug ebenfalls die Rettungsgasse bildet (siehe Abbildung 4.3).

Noch komplexere Fehlverhalten des Umgebungsverkehrs wurde nicht im Modell umgesetzt, z.B. dass Fahrzeuge plötzlich mitten auf der Straße stehen bleiben. Zudem wurde auch nicht umgesetzt, dass die Fahrer selber einen Rotlicht-Verstoß begehen oder auf dem Gehweg ausweichen, um dem Einsatzfahrzeug eine freie Bahn zu schaffen.

4.3.2 Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit

Während Pkws sich an die lokalen Höchstgeschwindigkeitsvorgaben halten müssen, so können Einsatzfahrzeuge mit einer höheren Geschwindigkeit fahren, solange sie andere Verkehrsteilnehmer nicht einer Gefahr aussetzen. Dies bedeutet, dass zwar rechtlich gesehen Einsatzfahrzeuge innerorts mit beispielsweise 120 km/h während der Hauptverkehrszeit fahren dürften, jedoch würde die Verkehrslage dies nicht zulassen weshalb die Einsatzwagen diese Geschwindigkeit nicht fahren würden bzw. dann andere Verkehrsteilnehmer gefährdet würden. Aus diesem Grund macht es

Sinn, dass Einsatzwagen nicht so modelliert werden, dass sie stets mit physikalisch möglicher Höchstgeschwindigkeit fahren. Stattdessen wurde eine Geschwindigkeitsverteilung gewählt, um eine Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit generell zu ermöglichen. Dies ist möglich, indem dem Fahrzeugtyp (vType) ein „speedFactor“ mitgegeben wird. Mit beispielsweise einem Wert von 1,5 sind Fahrzeuge in der Lage mit 150 % der erlaubten Höchstgeschwindigkeit zu fahren.

Durch die Datenauswertung in Kapitel 3 wurde untersucht, mit welchen Geschwindigkeiten die Einsatzfahrzeuge während einer Einsatzfahrt fahren. Dabei konnten im Abschnitt 3.3.2 Durchschnittswerte für die Streckenabschnitte Autobahn, Haupt- und Nebenstraße in Braunschweig ermittelt werden. In SUMO kann für das Überschreiten der Höchstgeschwindigkeit die Standardabweichung (speedDev) und die durchschnittliche Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit (speedFactor) angegeben werden. Die entsprechenden Werte hierfür aus Abschnitt 3.3.2 sind in der Tabelle 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Geschwindigkeitsauswertung bei Einsatzfahrten

Straßentyp	Geschwindigkeit ohne Blaulicht (km/h)	Geschwindigkeit mit Blaulicht (km/h)	Speed- Factor	Standard- abweichung
Nebenstr.	35,8	46,4	1,3	40,6
Hauptstr.	45,6	64,0	1,4	25,2
Autobahn	88,7	102,0	1,15	33,5

Für das Einsatzfahrzeugmodell in SUMO können zum jetzigen Stand nicht unterschiedliche Parameter für verschiedene Straßentypen verwendet werden. Aus diesem Grund wurde ein Durchschnittswert angegeben mit einem speedFactor von 1,28 und speedDev von 0,33. Um unterschiedliche Geschwindigkeits-Parameter für verschiedene Straßentypen zu setzen müsste im Straßennetz für jede Straße ein separater Wert angegeben werden, um die Einsatzfahrzeugklasse mit einer anderen Höchstgeschwindigkeit als andere Fahrzeuge zu berechtigen. Dies würde eine genauere Unterscheidung möglich machen, jedoch einen erheblichen Anpassungsaufwand der Netzdateien erfordern.

4.3.3 Bevorrechtigung an Knotenpunkten

Das normale Reaktionsverhalten von Fahrzeugen in SUMO bei einem Knotenpunkt ist, dass sie die Vorfahrtsregeln befolgen bzw. bei einer roten LSA halten. Mittels dem „Speed mode“ Befehl in TraCI (dem Interface zur Online-Interaktion mit SUMO) können die dafür benötigten Sicherheitschecks ausgestellt werden, wodurch ein Brechen dieser Vorfahrtsregel möglich ist. Dieses Verhalten wurde standardmäßig für Einsatzfahrzeuge in SUMO eingestellt. In diesem Fall ist die Benutzung von TraCI nicht nötig, sondern wird über das Bluelight-Device automatisch für alle Knotenpunkte durchgeführt.

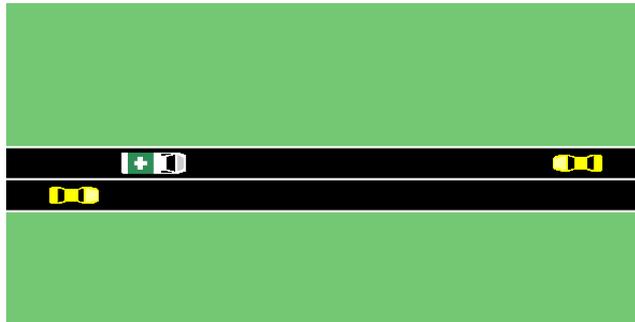


Abbildung 4.4: Überholen eines Einsatzfahrzeug auf dem Fahrstreifen des Gegenverkehrs in SUMO

4.3.4 Überholen über die Fahrbahn des Gegenverkehrs

Das Überholen über dem Fahrstreifen des Gegenverkehrs ist in SUMO möglich, wenn hierfür ein entsprechendes Straßennetz generiert wurde. Hier ist es für Einsatzfahrzeuge jederzeit möglich andere Fahrzeuge über dem Gegenfahrstreifen zu überholen, jedoch ist dieses Modell zurzeit nicht in Kombination mit dem Sub-Fahrstreifen-Modell, welches für die Bildung der Rettungsgasse notwendig ist, verwendbar. Ein Hauptgrund hierfür ist, dass das Sub-Fahrstreifen-Modell bereits sehr komplex und rechenintensiv ist. In Abbildung 4.4 ist ein Beispielsituation dargestellt, wenn ein Einsatzfahrzeug in der Simulation über die Gegenfahrstreifen überholt.

4.3.5 Benutzung restriktierter Straßen

In der Simulation existieren auch Straßen, die nur von bestimmten Verkehrsteilnehmern verwendet werden dürfen. Um Einsatzfahrzeuge von Einschränkung von bestimmten Straßen zu befreien, wurde die Fahrzeugklasse `vClass= „emergency“` verwendet. Hierüber wird festgelegt, dass die Einsatzfahrzeuge Restriktionen der Fahrstreifen missachten dürfen und können z.B. Busfahrstreifen nutzen.

4.3.6 Benutzung und Darstellung in SUMO

Zusätzlich wurde eine grafische Visualisierung der Einsatzfahrzeuge in SUMO implementiert. Mittels des `vType`-Attribut „guiShape“ kann das Aussehen von Fahrzeugen in SUMO im „Real World“ Modus bestimmt werden. Wenn der Wert auf „emergency“ gesetzt wird, wird ein weißer Rettungswagen mit dem grünen internationalen Symbol für erste Hilfe dargestellt. Des Weiteren kann ein Polizeiwagen (mit dem Wert „police“) und eine Feuerwehr (mit dem Wert „firebrigade“) dargestellt werden. Ein Beispiel für die Darstellung der Einsatzfahrzeuge in SUMO ist in Abbildung 4.5 oder 4.4 zu sehen.

4.4 Simulationsauswertung

Nachdem das Simulationsmodell von Einsatzfahrzeugen in SUMO vorgestellt wurde, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, um zu zeigen welchen Einfluss das

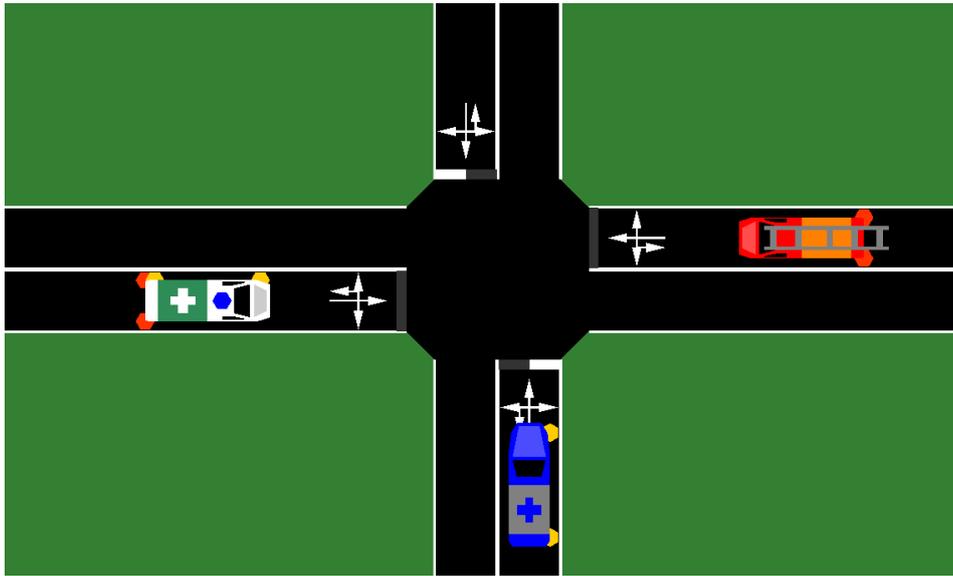


Abbildung 4.5: Darstellung von drei verschiedenen Einsatzfahrzeugklassen in SUMO: Rettungs-, Polizei- und Feuerwehrwagen (von links nach rechts)

Einsatzfahrzeugmodell hat. Zunächst wurde ein Simulationsszenario in SUMO aufgesetzt. Hierbei wurde ein Knotenpunkt mit einer LSA erstellt. Jede Straße hat je zwei Fahrstreifen und ist 500 Meter lang. Die Simulation wurde mit dem Sub-Fahrstreifen-Modell durchgeführt, damit bei dem Einsatzfahrzeugmodell eine Rettungsgassenbildung möglich ist. Zum Vergleich wurde die Simulation mit dem entwickelten Einsatzfahrzeugmodell durchgeführt und mit einem normalen Pkw. Das Szenario wurde 100 mal simuliert. Bei jedem Simulationdurchlauf starten das Einsatzfahrzeug zehn Sekunden später als beim vorherigen Durchlauf, damit der Zeitpunkt variiert, wenn das Fahrzeug die LSAs erreicht. Das Szenario wurde mit verschiedenen Verkehrsnachfragen simuliert.

Die Ergebnisse der simulierten Reisezeit sind in Abbildung 4.6 zu sehen, es wird der Mittelwert und das 95 % Konfidenzintervall dargestellt. Insbesondere bei einer geringen Verkehrsstärke sind die Unterschiede zwischen dem Einsatzfahrzeug (durchschnittliche Reisezeit ohne Umgebungsverkehr 67,6 Sekunden) und einem normalen Pkw (durchschnittliche Reisezeit ohne Umgebungsverkehr 83,7 Sekunden) in der Simulation sehr stark deutlich. Dies kommt hauptsächlich dadurch, dass das Einsatzfahrzeug bei rot den Knotenpunkt überqueren kann und dadurch die Wartezeit an der LSA spart. Je höher die Verkehrsstärke in der Simulation, um so mehr nähert sich die Reisezeit des Einsatzfahrzeug der eines normalen Pkws an. Bei einer Verkehrsstärke von 300 Fahrzeugen pro Stunde gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Reisezeiten (Einsatzfahrzeug: 110,9 Sekunden, Pkw: 108,4 Sekunden). Der Effekt kommt dadurch zustande, dass das Einsatzfahrzeug darauf warten muss, dass alle Verkehrsteilnehmer eine Rettungsgasse gebildet haben und die Rettungsgasse nur mit einer reduzierten Geschwindigkeit befahren werden kann. Je mehr Umgebungsverkehr vorhanden ist, umso länger dauert u.U. auch das Bilden der Rettungsgasse.

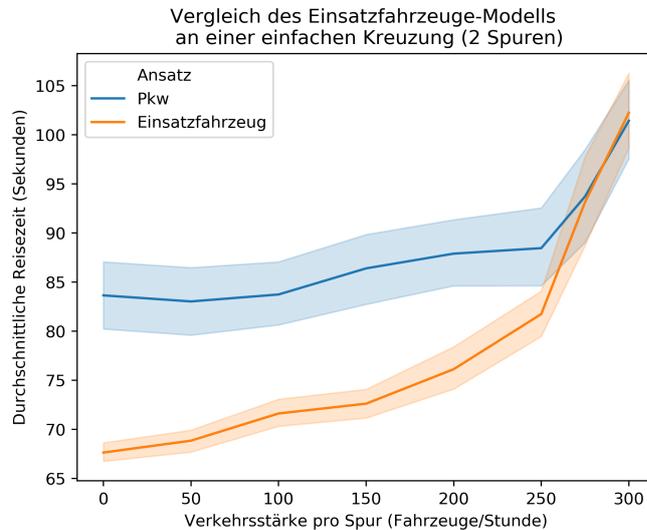


Abbildung 4.6: Durchschnittliche Reisezeit für das Einsatzfahrzeugmodell in SUMO

In Abbildung 4.7 sind die Verteilung der Wartezeiten zu sehen. Bei dem Einsatzfahrzeugmodell kann das Fahrzeug in 32,8 % der Fälle ohne anhalten zu müssen das Szenario durchfahren, bei dem Pkw ist dies in nur 21,2 % der Fälle möglich.

4.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Überblick darüber gegeben, welche bestehenden mikroskopischen Simulationsmodelle von Einsatzfahrzeugen es gibt. Des Weiteren wurde das entwickelte Einsatzfahrzeugmodell sowie die Anwendung innerhalb der Verkehrssimulation SUMO dargestellt. Für das Modell wurden die Daten aus dem Kapitel 3 verwendet. In Tabelle 4.3 sind die Konfigurationsparameter in SUMO und ihre Bedeutung zusammengefasst. Die Implementierung von SUMO ermöglicht bereits, dass viele Sonderrechte von Einsatzfahrzeugen in der Simulation in Anspruch genommen werden können. Allerdings ist die Kombination noch nicht in allen Fällen umgesetzt, so ist es zurzeit noch nicht möglich, dass gleichzeitig eine Rettungsgasse für das Einsatzfahrzeug gebildet wird, welches sich umentscheidet und auf die Gegenfahrstreifen ausweicht.

Zudem ist das Fehlverhalten von anderen Verkehrsteilnehmern auch nur sehr eingeschränkt modelliert, indem durch Zufall bestimmt wird, ob der Verkehrsteilnehmer eine Rettungsgasse bildet oder nicht. Weiteres Fehlverhalten wurde nicht umgesetzt und ist häufig auch sehr individuell und kann schwierig vorhergesagt werden.

Zur Übersicht wird in Tabelle 4.4 eine Zusammenfassung gegeben welches Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen in welcher Verkehrssimulation umgesetzt ist.

Das Einsatzfahrzeugmodell kann für die Simulation genutzt werden, um Einsatzfahrten realistischer darstellen zu können und Auswertungen durchzuführen wie Einsatzfahrten unterstützt werden können. Hierfür wird im nächsten Kapitel ein Konzept zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen erläutert.

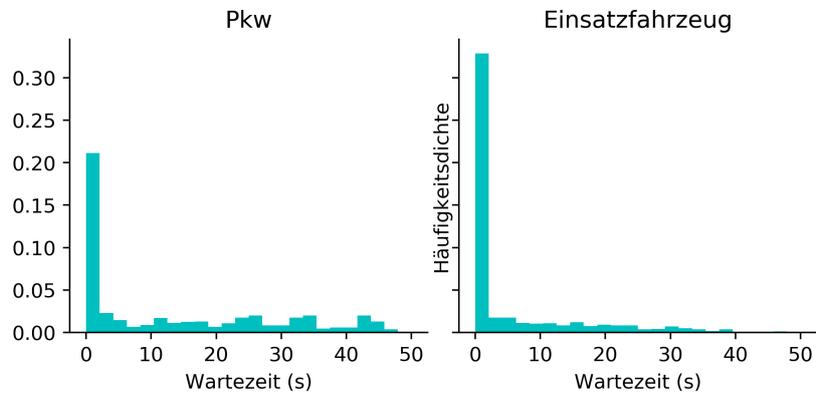


Abbildung 4.7: Verteilung der Wartezeiten für das Einsatzfahrzeug bei einem einfachen Knotenpunkt (2 Fahrstreifen)

Tabelle 4.3: Zusammenfassung der Konfiguration von Einsatzfahrzeugen

Konfigurationsdatei	Attribut	Wert	Beschreibung
vType	guiShape	emergency police firebrigade	Visualisierung: eines Rettungswagens eines Polizeiwagens einer Feuerwehr
vType	vClass	emergency	Blaulicht und Sonderrecht restriktierte Fahrstreifen benutzen zu können
vType	speedFactor	1,28	Ermöglicht es schneller zu fahren als die maximale Höchstgeschwindigkeit
vType	speedDev	0,33	Ermöglicht es schneller zu fahren als die maximale Höchstgeschwindigkeit
SUMO config	device. bluelight. explicit	vehicleID	Rettungsgassen Benutzung und andere Sonderrechte

Tabelle 4.4: Zusammenfassung der Einsatzfahrzeugfunktionen (Stand 19.11.2018)

Funktionalität	VISSIM	AIMSUN	MATSim	Paramics	CORSIM	SUMO
Geschwindigkeitsüberschreitung	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Rotlichtverstöße	○	✗	✗	✗	✗	✓
Vorfahrt an Knotenpunkten	✓	○	✗	✗	✗	✓
Rettungsgasse	○	○	✗	✗	✗	✓
Einbahnstraßen	○	✗	✓	✗	✗	✗
Überholen über den Fahrstreifen des Gegenverkehrs	○	○	✗	✗	○	✓
Verwendung von gesperrten oder restriktierten Straßen	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Missachten von Halteverboten	✗	✗	✗	✗	✗	✗
LSA Priorisierung von Einsatz- fahrzeugen/ÖPNV	✓	✗	✓	✓	✗	✓

5

Konzept zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen

In diesem Kapitel wird ein Algorithmus, zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen, vorgestellt. Dies wird über eine Priorisierung an LSAs umgesetzt. Die bisherigen Algorithmen beschränken sich jedoch darauf, statisch die LSAs für eine gewisse Zeit zu modifizieren ohne den aktuellen Verkehr zu berücksichtigen. Zudem liegt der Fokus meistens auf einen einzelnen Knotenpunkt und nicht auf dem gesamten Verkehrsnetz. Um diese Aspekte zu berücksichtigen, wurde der Ansatz: Wartezeitreduzierung durch Lichtsignalanlagen-Bevorrechtigung im Einsatzfall (Walabi) entwickelt, der in diesem Kapitel beschrieben wird. Das Kapitel baut auf die bisherigen Algorithmen zur Unterstützung von Einsatzfahrzeugen, die in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wurden, auf.

5.1 Basis-Konzept

In den vorherigen Kapiteln wurde beschrieben, wie die Einsatzfahrzeuge in der Simulation SUMO implementiert wurden. Die Verkehrssicherheitsanalyse aus Abschnitt 3.1 ergab, dass insbesondere das Überfahren von rot signalisierten LSAs eine Hauptunfallursache für Einsatzfahrzeuge ist. Ebenso ergab sich aus der Geschwindigkeitsanalyse von Einsatzfahrzeugen in Abschnitt 3.3, dass es im Bereich von Knotenpunkten häufig zu Geschwindigkeitsreduzierung und damit einhergehend zu einer Verlängerung der Reisedauer kommt. Um diese beiden Probleme zu verringern wird hier ein Konzept vorgestellt, um Einsatzfahrzeuge eine freie Fahrt bzw. Priorisierung an allen LSAs der Route zu gewährleisten.

Als Basis-Idee dient hier ein selbstorganisierendes Verkehrsmanagement umzusetzen. Besonders vielversprechend ist hierbei der Ansatz von Rausch, der in seiner Dissertation ein selbstorganisierendes Verkehrsmanagement-System beschreibt [46]. Der Ansatz von Rausch soll hier um die Bedürfnisse von Einsatzwagen erweitert werden. Der Unterschied hierbei besteht darin, dass bei einem allgemeinen Ver-

kehrmanagement der Verkehr anhand von einer oder mehreren Faktoren optimiert werden soll. In diesem Fall soll aber der Verkehr so optimiert werden, dass ein einzelnes Fahrzeug ein optimales Ergebnis erzielt und die Beeinträchtigung des restlichen Verkehrs so klein wie möglich bleibt.

Als Frage stellt sich hier, wie viel Beeinträchtigung ist für den Gesamtverkehr hinnehmbar im Vergleich zu einem zeitlichen Gewinn von ein paar Sekunden. Insgesamt soll ausgewertet werden, wie groß die Auswirkungen auf den allgemeinen Verkehr sind.

Der Grundgedanke ist es, dass zum einen der Einsatzwagen Vorrang an jeder LSA bekommt. Um die Beeinträchtigung jedoch so gering wie möglich zu halten, soll ausgerechnet werden wann der ideale Umschaltzeitpunkt für die LSA ist. Wenn sich ein Einsatzfahrzeug auf dem Weg zu einem Notfall befindet, dann sendet es aktuelle Positions- und Routendaten an eine sogenannte Road Side Unit (RSU). Wenn die RSU so eine Nachricht erhält, dann wird das Traffic Management Center (TMC) darüber informiert, welches automatisch die LSA auf dem Weg von dem Einsatzfahrzeug auf grün setzt und auf rot für alle anderen Verkehrsteilnehmer. Sobald das Einsatzfahrzeug den Knotenpunkt passiert hat, setzt die LSAs mit dem normalen Signalzeitenplan fort.

5.2 Walabi-Konzept

In diesem Abschnitt wird das Konzept mit dem Namen: Wartezeitreduzierung durch Lichtsignalanlagen-Bevorrechtigung im Einsatzfall (Walabi) vorgestellt. Der Ansatz beruht auf dem Basis-Konzept und versucht die zwei hauptsächlichen Probleme auszugleichen. Erstens, die Fahrzeuge müssen unter Umständen sehr lange an einer LSA warten, ohne dass sie den Grund hierfür kennen. Es sei denn die Fahrzeuge sind ebenfalls mit V2X-Kommunikation ausgestattet und haben eine Warnung darüber erhalten, dass sich ein Einsatzfahrzeug nähert. Andernfalls kann es sein, dass sie unruhig werden und annehmen, dass die LSA defekt ist. Prinzipiell, darf frühestens ab einer Rotzeit von fünf Minuten davon ausgegangen werden, dass die LSA nicht richtig funktioniert [110], trotzdem sollte eine unnötig lange Wartezeit vermieden werden. Außerdem entstehen durch eine lange rote Phase auch längere Staus, die unter Umständen nicht gut ausgeglichen werden können. Das zweite Problem ist, wie mehrere Einsatzfahrzeuge in einem größeren Netz behandelt werden, damit es zu keinen Unfällen miteinander kommt.

Aus diesen Gründen wurde der Ansatz wie folgt erweitert: Die Rot-Zeit soll minimiert werden, so kurz wie möglich, aber so lang wie nötig, damit das Einsatzfahrzeug den Knotenpunkt ideal passieren kann. Hierfür wurde berechnet, welches der ideale Umschaltzeitpunkt für die LSA ist. In Abbildung 5.1 ist schematisch die Funktionsweise des erweiterten Konzeptes dargestellt.

Wenn zusätzliche Verkehrsinformationen z.B. Induktionsschleifendaten oder V2X-Kommunikation vorhanden sind, so kann diese Information dafür genutzt werden, den Signalzeitenplan individuell anzupassen. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge miteinander vernetzt sind und dadurch die Informationen vorhanden sind, wie viele Fahrzeuge aktuell an einer LSA warten müssen. Wenn keine vollständigen Verkehrsdaten vorhanden sind, können alternative Verfahren zur

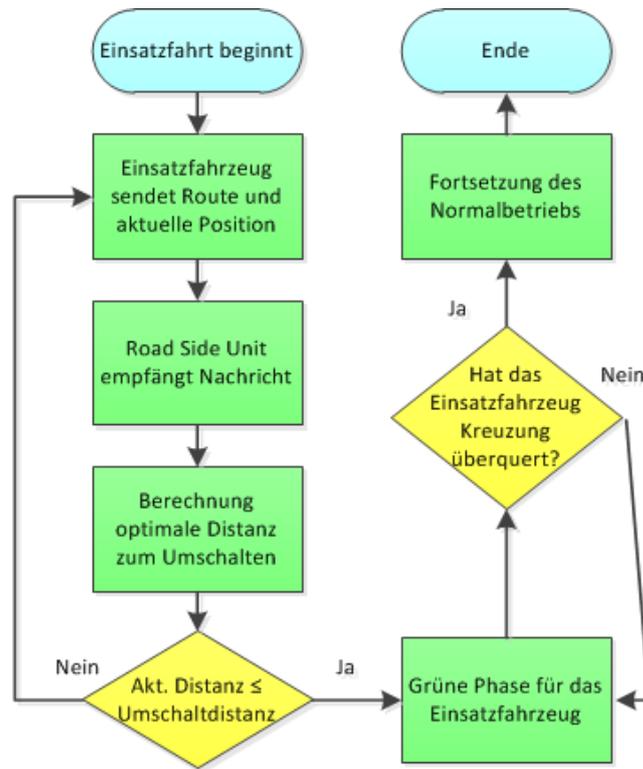


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Konzeptes

Schätzung der Verkehrslage verwendet werden. Dies wurde in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt, da sie in anderen Arbeiten bereits untersucht wurde und den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Zum Beispiel Neumann setzt sich in seiner Dissertation [111] ebenfalls intensiv damit auseinander, wie die Rückstaulänge geschätzt werden kann. Diese Daten könnten dafür genutzt werden zu berechnen, wie lange die Grünzeit sein muss, damit der Verkehr an der LSA abfließen kann, bevor das Einsatzfahrzeug den Knotenpunkt erreicht. Wenn keine aktuelle oder nur eine historische Verkehrslage an einem Knotenpunkt besteht, dann funktioniert der Ansatz so, dass die LSA adaptiert wird, sobald sich ein Einsatzfahrzeug im Kommunikationsradius befindet, dadurch wird der Umgebungsverkehr unter Umständen länger als nötig warten müssen.

In Abbildung 5.2 ist eine Beispielknotenpunkt für das Walabi-Konzept dargestellt. Der Zeitbedarfswert t_B gibt einen Richtwert darüber, wie viel Zeit dafür einkalkuliert werden sollte, damit ein Fahrzeug den Knotenpunkt passieren kann. In dem HBS [29] wird bei einer Freigabezeit von länger als 10 Sekunden und einer Sättigungsverkehrsstärke q_S von 2.000 Pkw/h von einem Zeitbedarfswert $t_B = 1,8$ s ausgegangen. In anderen Forschungsarbeiten wird daher im Mittel von $t_B \approx 2$ s ausgegangen [112], [46], [113]. Aus diesem Grund wird auch in dieser Arbeit für den Zeitbedarfswert $t_B = 2$ s pro Fahrzeug (inklusive Einsatzfahrzeug) angenommen. Zusätzlich wird noch eine Reaktions- und Sicherheitszeit bestimmt:

$$T_{\text{free}} = (\#\text{waiting} + 1) \cdot t_B + t_{\text{safe}} \quad (5.1)$$

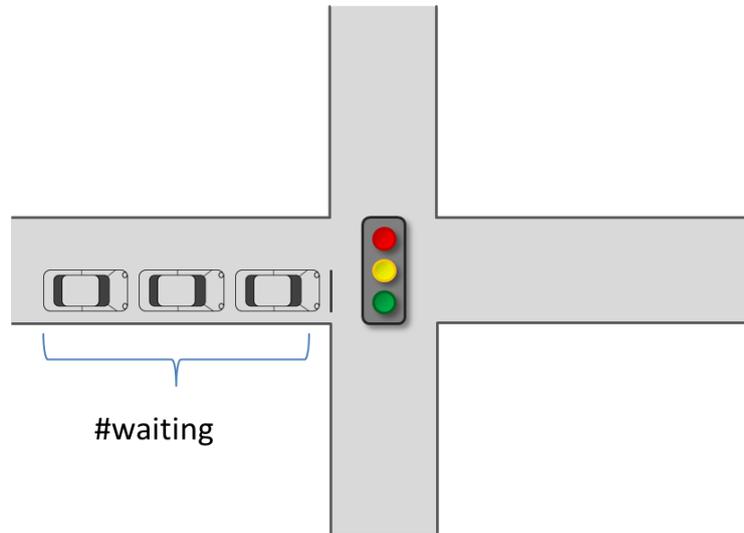


Abbildung 5.2: Beispielknotenpunkt für das Walabi-Konzept

Für die Sicherheitszeit t_{safe} werden zwei Sekunden gewählt, dies ergibt sich aus einer Reaktionszeit von einer Sekunde für die wartenden Fahrzeuge plus einer Sekunde als Reaktionszeit für das Einsatzfahrzeug. Das erste Fahrzeug, das vor einer roten LSA wartet, braucht ebenfalls noch eine Sekunde zur Beschleunigung, da der Zeitbedarfswert von 1,8 Sekunden erst ab dem zehnten Fahrzeug zählt.

Die Distanz d vom Einsatzfahrzeug zur LSA bis wann der Signalzeitenplan adaptiert werden soll lässt sich aus T_{free} und der Geschwindigkeit des Einsatzfahrzeuges leicht errechnen:

$$d = T_{\text{free}} \cdot v_{ev} \quad (5.2)$$

v_{ev} Geschwindigkeit des Einsatzfahrzeuges (m/s)

In Abbildung 5.3 ist in einem Diagramm dargestellt, in welcher Distanz zum Knotenpunkt das Einsatzfahrzeug sich optimal befindet, wenn die LSA umgeschaltet werden soll. Dies ist abhängig von der Anzahl der Fahrzeuge, die vor dem Einsatzfahrzeug den Knotenpunkt passieren sollen. Die Geschwindigkeit, die das Einsatzfahrzeug fahren kann, beeinflusst ebenfalls die Distanz, wie bereits in der Formel beschrieben wurde. Das Diagramm verdeutlicht, dass insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten des Einsatzfahrzeuges und bei gestauten Bereichen mit vielen Fahrzeugen, der Wert für die optimale Umschaltdistanz sehr schnell anwächst.

Bei der Systemkoordinierung soll nicht nur ein einzelner Knotenpunkt berücksichtigt werden, sondern das Gesamtsystem und damit auch koordinierte Streckenzüge. Die Umsetzung der Systemkoordinierung wird im Folgenden beschrieben.

5.2.1 Systemkoordinierung

Zu verkehrsstarken Zeiten kann es dazu kommen, dass die Priorisierung eines Einsatzfahrzeuges an einem einzelnen Knotenpunkt nicht ausreicht. Wenn der Verkehr des ersten Knotenpunktes nicht rechtzeitig auf die nachfolgenden Straßen abfließen kann, wird der Knotenpunkt trotz grüner Phase nicht frei geräumt. Aus diesem

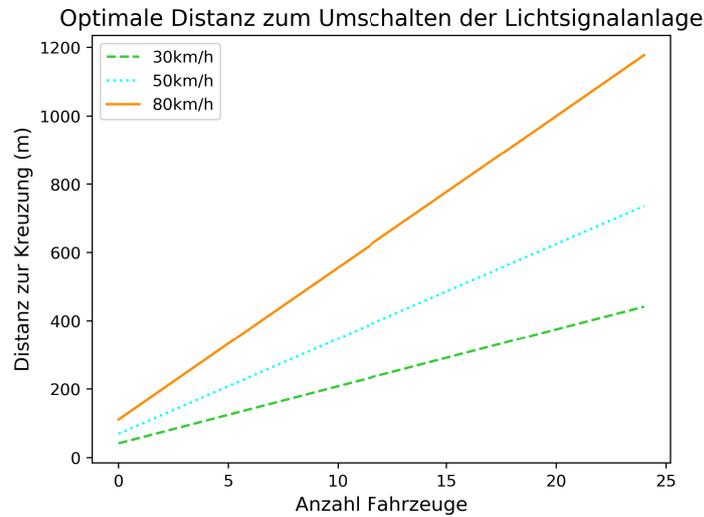


Abbildung 5.3: Optimale Distanz zur LSA für den Signalzeitenplanwechsel [23]

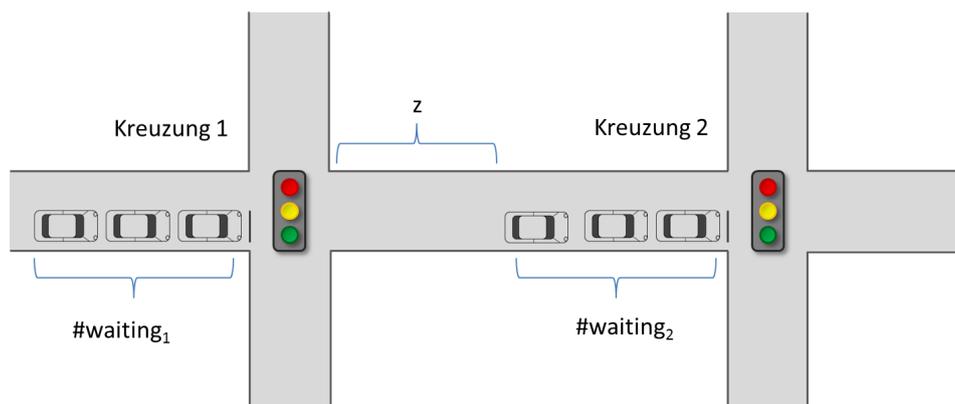


Abbildung 5.4: Koordinierter Walabi-Ansatz

Grund muss der Walabi-Ansatz noch erweitert werden. Zur Verbildlichung wird ein Beispiel in Abbildung 5.4 dargestellt.

Wenn die Kapazität der Straße stromabwärts des Knotenpunktes nicht mehr ausreicht, um den abfließenden Verkehr aufzunehmen, muss schon frühzeitig die LSA des stromabwärtigen Knotenpunktes den Verkehr abfließen lassen. Es wird geprüft, ob die Anzahl der Fahrzeuge, die auf der Straße gleichzeitig Platz haben ($\#capacity$), kleiner gleich der Summe ist von den Fahrzeugen, die aktuell sich auf der Straße befinden ($\#vehicle$) und der Anzahl der Fahrzeugen, die noch auf den Knotenpunkt fahren werden ($\#inflow$):

$$\#vehicles + \#inflow \geq \#capacity \quad (5.3)$$

Wenn das der Fall ist, muss der stromabwärtige Knotenpunkt schon frei geräumt werden bevor das Einsatzfahrzeug den ersten Knotenpunkt passiert hat. Dabei wird

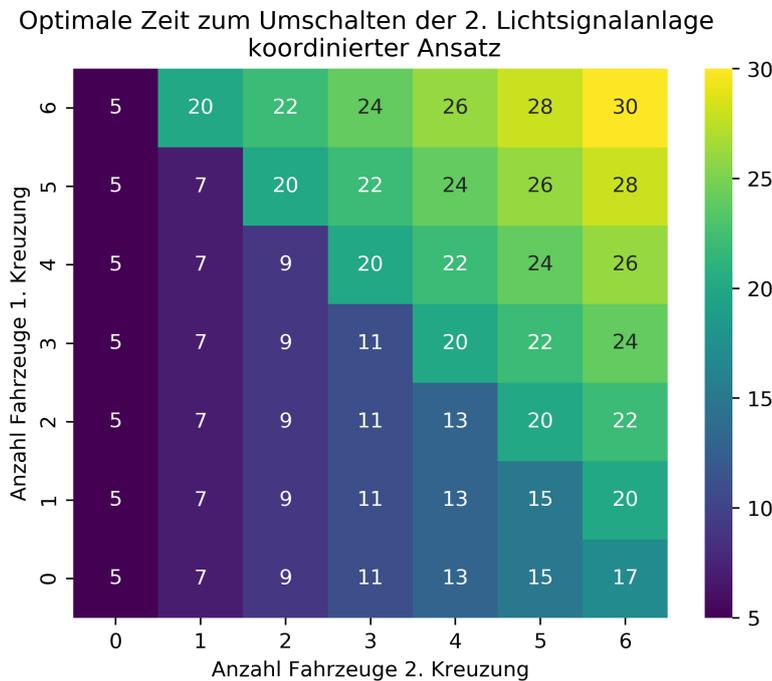


Abbildung 5.5: Maximale Grünzeitverlängerung der 2. LSA beim koordinierten Ansatz

berechnet, wie lange es dauern würde alle Fahrzeuge (vor Knotenpunkt 1 und Knotenpunkt 2) abfließen zu lassen:

$$T_{\text{free}2} = (\#\text{waiting}_1 + \#\text{waiting}_2 + 1) \cdot t_B + t_{\text{safe}} \quad (5.4)$$

Daraus wird wie bei dem einfachen Knotenpunkt die Distanz berechnet. Hinzu wird noch die Zeit $t(z)$ addiert, die die anderen Verkehrsteilnehmer benötigen, um die Freifläche zwischen den beiden Knotenpunkten zu überqueren, da die Fläche zwar nicht freigeräumt werden, aber dennoch überquert werden muss.

$$d = (T_{\text{free}2} + t(z)) \cdot v_{ev} \quad (5.5)$$

Zur Verdeutlichung wurden in der Abbildung 5.5 der optimale Abstand zum 2. Knotenpunkt zum Schalten der LSA für ein Minimalbeispiel aufgeführt. Das Beispiel besteht aus einem Korridor mit zwei kontrollierten Knotenpunkten (siehe Abbildung 5.4). Die Straße zwischen den beiden Knotenpunkten ist 50 Meter lang. Für ein Fahrzeug wurde ein durchschnittlicher Platzverbrauch von 7,5 m angenommen, wodurch sich eine Kapazität von sechs Fahrzeugen auf der Straße zwischen den beiden Knotenpunkten ergibt. Es wird von einem Szenario innerorts ausgegangen mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h.

Unter der Voraussetzung, dass die Kapazität der Straße von den Fahrzeugen, die auf beiden Straßen warten ($\#\text{waiting}_1$ und $\#\text{waiting}_2$), nicht überschritten wird, ist aus Abbildung 5.5 folgendes ersichtlich: Es werden für Knotenpunkt 2 nur die Fahrzeuge berücksichtigt, die vor der 2. Knotenpunkt warten müssen. Es kann sein,

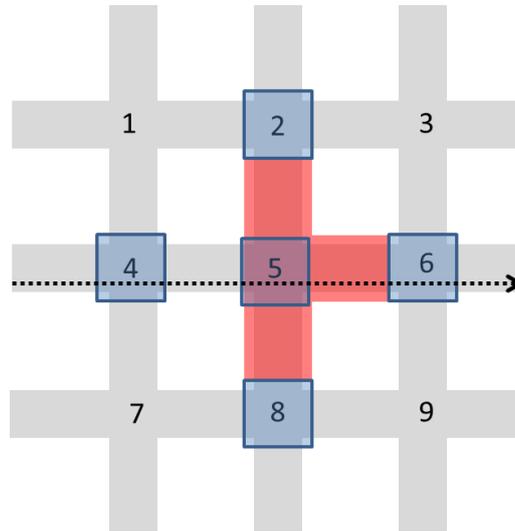


Abbildung 5.6: Beispielszenario mit einem gestauten Straßennetz (in rot)

dass je näher das Einsatzfahrzeug an den 1. Knotenpunkt heranfährt, dass dann immer mehr Fahrzeuge, die bei dem 1. Knotenpunkt warten, auf die Straße des 2. Knotenpunktes fahren und dadurch der Umschaltzeitpunkt sich dynamisch ändern wird. Es kann aber ebenfalls sein, dass alle Fahrzeuge abbiegen wollen, wodurch die Zeit für den 2. Knotenpunkt sich nicht ändern würde. Da bei dem Algorithmus immer wieder die aktuelle Situation in regelmäßigen Abständen erneut überprüft wird, ist es hier nicht nötig eine Annahme darüber zu treffen, wie viele Fahrzeuge schätzungsweise geradeaus weiter fahren und so bei der Berechnung des Signalzeitenplans für Knotenpunkt 2 mit einkalkuliert werden müssen.

Bei einem Szenario bei dem alle Fahrzeuge autonom und vernetzt fahren würden, könnte die Information, wie viele Fahrzeuge wo genau lang fahren werden mit in die Berechnung berücksichtigt werden und so die Abschätzung frühzeitig genauer planen. Da autonome vernetzte Fahrzeuge allerdings nicht in dieser Arbeit als Ausgangsszenario betrachtet werden, wird dieser Fall nicht berücksichtigt und bedarf weiterer Untersuchungen in späteren Forschungsarbeiten.

Hierdurch ist es möglich die Grünphase des Signalzeitenplans der LSA so lange wie nötig und so kurz wie möglich zu gestalten. Der Umgebungsverkehr hat so auch genug Zeit auf das Einsatzfahrzeug entsprechend zu reagieren, zu einem Zeitpunkt wenn sie in der Regel ein Einsatzfahrzeug noch nicht bemerken. Normalerweise können Fahrer ein Einsatzfahrzeug in ca. 25 Meter Entfernung wahrnehmen [114]. Durch die Applikation wird die Distanz auf den Kommunikationsradius der Fahrzeuge erhöht.

Zur Übersicht wurde ein Beispielszenario konstruiert und in Abbildung 5.6 illustriert. Mit einer gestrichelten Linie ist die Route des Einsatzfahrzeugs gekennzeichnet. Die roten Bereiche markieren die gestauten Straßenabschnitte bzw. die Abschnitte, deren Kapazität es nicht mehr zulässt, dass noch mehr Fahrzeuge auf die Straße fahren können. Das Einsatzfahrzeug fährt an den Knotenpunkt 4 heran und der Walabi-Algorithmus schaltet für diesen Knotenpunkt eine grüne Phase für die Richtung aus der das Einsatzfahrzeug kommt. Bei dem Basis-Konzept ohne Sys-

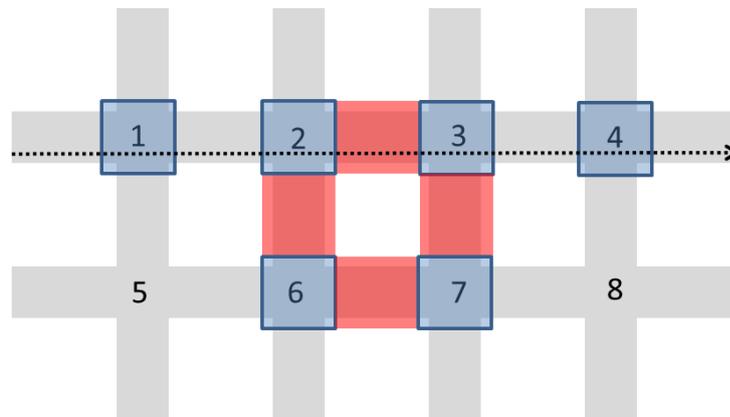


Abbildung 5.7: Beispielszenario für ein Grid-Lock-Szenario

temkoordination würden nur die Signalzeitenpläne der LSAs 4, 5 und 6 modifiziert werden. Da der Bereich hinter dem Knotenpunkt 5 auf allen Straßen gestaut ist und so der Verkehr, der vor dem Knotenpunkt 5 wartet, nicht abfließen kann, müssen die LSAs der Knotenpunkte 2, 6 und 8 schon früher umgeschaltet werden.

Aus einem Minimalbeispiel wird deutlich, dass die Voraussicht des Algorithmus nicht mehr als zwei Knotenpunkt kombiniert betrachten kann, da dadurch unter Umständen Konflikte bzw. sogenannte Grid-Locks auftreten könnten, weil eine LSA unterschiedlich modifiziert werden soll. Hierzu wird ein Beispiel in Abbildung 5.7 dargestellt. In dem Szenario möchte ein Einsatzfahrzeug über die Knotenpunkte 1-4 fahren. Die Straßen vor den Knotenpunkten 3 und 6 haben keine Kapazität mehr frei, um die Fahrzeuge vor dem Knotenpunkt 2 aufzunehmen. Aus diesem Grund werden die Knotenpunkt 3 und 6 vorher bereits freigeräumt.

Bei dem Freiräumen des Knotenpunktes 6 fällt auf, dass der Bereich vor Knotenpunkt 7 ebenfalls keine Kapazität für den abfließenden Verkehr bereit hält und daher vorher modifiziert werden muss (siehe Abbildung 5.7). Gleichzeitig wird versucht Knotenpunkt 3 freizuräumen und dabei fällt auf, dass ebenfalls die Kapazität vor dem Knotenpunkt 7 nicht ausreicht, um den Verkehr abfließen zu lassen. Dadurch müsste bei Knotenpunkt 7 gleichzeitig der Verkehrsstrom aus dem Norden eine grüne Phase erhalten sowie der Verkehrsstrom aus dem Osten, was zu einem Konflikt führen würde. Aus diesem Grund betrachtet die koordinierte Bevorrechtigung von Einsatzfahrzeugen nur die nächsten zwei Knotenpunkte, um solche Konflikte auszuschließen. Zusätzlich hat der Knotenpunkt auf der direkten Route des Einsatzfahrzeugs beim Freiräumen Priorität. Eine weitere Strategie ist in den Fällen, wenn die Route des Einsatzfahrzeugs eine so hohe Verkehrsbelastung aufweist, dass mehrere Knotenpunkte hintereinander freigeräumt werden müssen, auf eine Alternativroute zum Umfahren des gestauten Bereiches auszuweichen.

5.2.2 Behandlung von Konflikten

Ein weiteres Problem ist es, wie mehrere Einsatzfahrzeuge zur selben Zeit gehandhabt werden sollen. Wenn zwei oder mehr Einsatzfahrzeuge sich im Netz befinden untersucht der Algorithmus, ob die Routen der Einsatzfahrzeuge gemeinsame Kno-

tenpunkte haben (bzw. Knotenpunkt, die im Rahmen der Koordinierung ebenfalls beeinflusst werden), da nur in diesem Fall ein Handlungsbedarf besteht. Wenn nicht, können die Signalzeitenpläne auf den Routen der Einsatzfahrzeuge unabhängig voneinander beeinflusst werden. Im anderen Fall wird ein Zeitslot berechnet, wann die Einsatzfahrzeuge den gemeinsamen Knotenpunkt wahrscheinlich erreichen. Hierbei wird das Einsatzfahrzeug Priorität bekommen, welches als erstes den Knotenpunkt erreicht. Wenn beide Einsatzfahrzeuge im selben Zeitslot den Knotenpunkt erreichen sollen, dann erhält das Einsatzfahrzeug mit der höheren Priorität Vorrang. Für die Bestimmung welches Einsatzfahrzeug eine höhere Priorität erhalten soll, kann die Vorgabe der StVO verwendet werden:

„Beim Zusammentreffen von Einsatzfahrzeugen haben der Reihe nach den Vorrang:

1. Rettungsfahrzeuge,
2. Fahrzeuge der Feuerwehr,
3. Fahrzeuge des Sicherheitsdienstes,
4. Sonstige Einsatzfahrzeuge.“ (§ 26 StVO, Abs. 4).

Wenn beide Einsatzfahrzeuge die gleiche Priorität haben und gleichzeitig den Knotenpunkt erreichen sollen, dann bekommen beide Fahrzeuge eine Warnung darüber, dass sich ein anderes Einsatzfahrzeug dem Knotenpunkt nähert und müssen sich dann ggf. durch Blickkontakt verständigen.

5.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das Konzept von dem Walabi-Ansatz vorgestellt. Das Grundprinzip des Algorithmus ist Einsatzfahrzeugen eine Grüne Welle zu ermöglichen, indem zu einem geeigneten Zeitpunkt die LSAs auf der Route des Einsatzfahrzeuges freigegeben werden für die Richtung des Einsatzfahrzeuges und gesperrt für die anderen Verkehrsteilnehmer. Damit die anderen Verkehrsteilnehmer keine unnötig langen Wartezeiten in Kauf nehmen müssen, wird berechnet, wie viele Fahrzeuge vor dem Einsatzfahrzeug den Knotenpunkt passieren müssen. Dem entsprechend lang wird die Freigabezeit bestimmt. Zudem wird geprüft, ob stromabwärts Knotenpunkte frei geräumt werden müssen, damit der Verkehr auf der Strecke des Einsatzfahrzeuges rechtzeitig abfließen kann.

Die hier beschriebene Herangehensweise wird mit verschiedenen Simulationsszenarien getestet. Die Beschreibung der verwendeten Szenarien befindet sich im Kapitel 6. Anschließend werden die Simulationsergebnisse im Kapitel 7 diskutiert.

6

Simulationsszenarien

Die Funktionsweise und die Verkehrsauswirkungen des im vorherigen Kapitel 5 beschriebenen Konzeptes sollen mittels einer Verkehrssimulation getestet und ausgewertet werden. Hierfür wurden verschiedene Simulationsszenarien aufgesetzt, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse der Szenarien ausgewertet und diskutiert.

6.1 Rahmenbedingungen

In dieser Forschungsarbeit wurden die Simulationsszenarien mit SUMO Version 1.3.1 simuliert [115].¹ Jedes Simulationsszenario wurde 50 mal durchgeführt, dabei variiert stets die Route und die Zeit, wann das Einsatzfahrzeug in die Simulation gesetzt wird. Bei jeder Simulationsausführung wird das Einsatzfahrzeug 10 Sekunden später in die Simulation eingesetzt, als beim vorherigen Simulationsdurchlauf. Die Variation wurde gewählt, damit die Verfahren mit unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb der Signalzeitenpläne und Abbiegerichtungen umgehen können und nicht auf eine konkrete Situation spezialisiert werden. Es wurden 50 Simulationsdurchläufe für jede Verkehrsstärke gewählt, um eine ausreichend große Anzahl an Replikationen für die Datenauswertung bereit zu stellen. Um eine statistische Signifikanz zu erhalten würde im Idealfall die Anzahl der Replikationen darüber bestimmt, wie groß die Unterschiede bei den einzelnen Verfahren sind. Das bedeutet, wenn die Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge sich nur minimal von einander unterscheiden müssten mehr Replikationen gewählt werden, als bei großen Unterschieden. Da allerdings in diesem Fall für alle Priorisierungsverfahren und Verkehrsstärke eine andere Anzahl an Replikationen notwendig wäre, wurden eine möglichst große Anzahl an Replikationen gewählt, die noch in vertretbarem Aufwand simuliert werden konnte.

¹Zur Nachvollziehbarkeit der Simulationsergebnisse sind die Simulationsszenarien unter <https://github.com/lbieder/dissertation> öffentlich zur Verfügung gestellt.

Beim Einsatzzeitpunkt wird berücksichtigt, dass Verkehrssimulationen eine Warm-up- und Cooling-off-Phase haben. Zu Beginn einer Simulation (Warm-up) ist das Szenario meistens leer und die Fahrzeuge müssen sich erst in dem Verkehrsnetz verteilen [116] [117]. Die simulierten Reisezeiten sind in dieser Phase nicht realistisch, da die Fahrzeuge schneller als zu erwarten das Straßennetz durchqueren können. Ein ähnlicher Effekt tritt beim Cooling-off auf. Am Ende einer Simulation haben bereits viele Fahrzeuge ihr Ziel erreicht und es werden keine neuen Routen mehr geladen, wodurch sich ebenfalls weniger Fahrzeuge auf den Straßen befinden als realistisch wäre [84]. Aus diesem Grund wird das Einsatzfahrzeug frühestens nach einer simulierten Zeit von 15 Minuten eingesetzt und die Simulation wird nach 60 Minuten beendet.

Es wurde das Modell von Krauß als Fahrzeugfolgmodell verwendet, da es das Standardfahrzeugfolgmodell in SUMO ist und dadurch bereits ausgiebig getestet wurde. Für das Einsatzfahrzeug wurde in der Simulation nicht das entwickelte Einsatzfahrzeugmodell verwendet. Wenn das Einsatzfahrzeugmodell verwendet werden würde, könnte das Fahrzeug den Knotenpunkt bei einem roten Signal überqueren wodurch jedoch die Unfallwahrscheinlichkeit des Einsatzfahrzeuges erhöht wäre. Mit der entwickelten Priorisierungsstrategie soll jedoch die Verkehrssicherheit erhöht werden, indem das Einsatzfahrzeug nicht mehr dazu gezwungen ist einen Rotlichtverstoß zu begehen.

Die Szenarien wurden jeweils mit verschiedenen Verkehrsnachfragen simuliert, um zu vergleichen, bei welcher Belastung die Algorithmen ihre Grenze erreichen. Alle Szenarien wurden mit vier verschiedenen Priorisierungsalgorithmen (FAST, Stream, Walabi und ohne Vorfahrt) der Einsatzfahrzeuge simuliert. Der Walabi-Ansatz wurde detailliert in Kapitel 5 beschrieben und entsprechend in der Simulation umgesetzt. Dagegen wurden die Priorisierungsansätze FAST und Stream in Abschnitt 2.2.3 nur grob skizziert. Deshalb und weil die Priorisierungsansätze auf die Simulationsszenarien angepasst werden mussten, werden sie im nächsten Abschnitt genauer beschrieben.

6.1.1 FAST

Der Grundgedanke bei FAST ist, dass Sensoren an bestimmten Punkten der Strecke verbaut wurden, an denen die Einsatzfahrzeuge detektiert werden. Wenn das Einsatzfahrzeug in den Detektionsbereich kommt wird eine entsprechende Meldung an die kommende LSA weitergegeben. In Abbildung 6.1 ist ein einfaches Beispiel eines vierarmigen Knotenpunktes dargestellt. Wenn das Fahrzeug in den roten Bereich fährt, der mit der 1 gekennzeichnet wurde, wird entweder die Freigabezeit der LSA verlängert bzw. eine Rotzeit verkürzt, damit das Einsatzfahrzeug die LSA bei grün passieren kann. Wenn weder durch eine Grünzeitverlängerung noch durch eine Rotzeitverkürzung eine freie Fahrt für das Einsatzfahrzeug gewährleistet werden kann, muss das Einsatzfahrzeug Sonder- und Wegerecht in Anspruch nehmen.

Das FAST-System wird in Tokio an verschiedenen Straßen verbaut. Dabei wurde nicht immer die gleiche Distanz zum Knotenpunkt gewählt, sondern sie wurde in Abhängigkeit von der gegebenen Infrastruktur gewählt. Für die Simulationsszenarien wurde eine Distanz von 200 Metern gewählt, da diese ungefähr der Distanz entspricht, die in der Forschungsarbeit von Kotani und Yamazaki beschrieben wur-

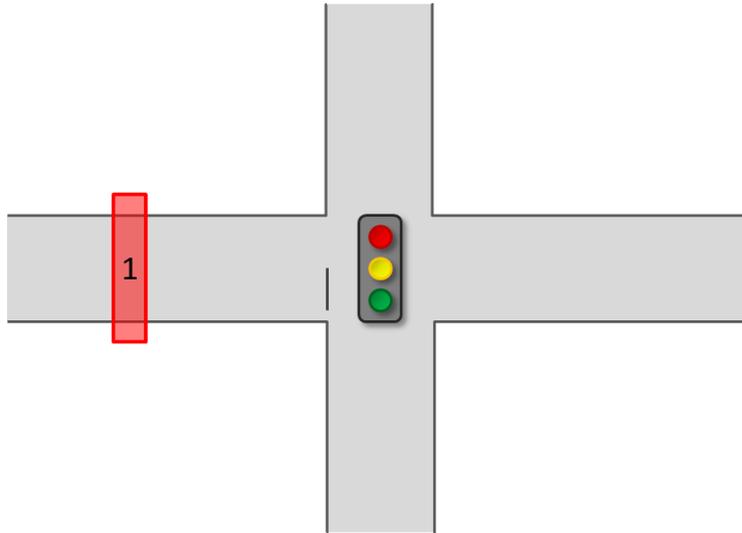


Abbildung 6.1: Knotenpunkt bei dem Algorithmus von FAST

de [70]. Wenn die Straßen in der Simulation kürzer als 200 Meter sind, wurde der Sensor am Anfang der Straße, also mit der maximalen Entfernung zum Knotenpunkt, angebracht.

6.1.2 Stream

Zum Vergleich der Algorithmen wurde das Grundprinzip von Stream wie folgt implementiert. Für jeden Knotenpunkt, der mit dem Stream-Ansatz ausgerüstet wird, werden drei virtuelle Meldepunkte erstellt (wie in Abbildung 6.2 dargestellt ist). Wenn ein Einsatzfahrzeug den ersten Meldepunkt überführt, wird das Priorisierungsverfahren für das Einsatzfahrzeug angestoßen. Bis spätestens zu dem Zeitpunkt, wenn das Einsatzfahrzeug den 2. Meldepunkt erreicht hat, soll der Signalzeitenplan des Knotenpunktes so angepasst sein, dass das Einsatzfahrzeug grün gezeigt bekommt und die anderen Verkehrsteilnehmer rot. Sobald das Einsatzfahrzeug den 3. Meldepunkt berfahren hat, wird das Programm für die LSA wieder auf den normalen Schaltplan zurückgesetzt. In der Realität wird manuell für jeden Knotenpunkt bestimmt, welche Entfernung für die virtuellen Meldepunkte am besten passt. In der Simulation wurde für den ersten Meldepunkt eine Distanz von 200 Meter zum Knotenpunkt angenommen, der zweite Meldepunkt bei einer Entfernung von 100 Metern und der dritte Meldepunkt direkt hinter dem Knotenpunkt. Das bedeutet, dass in einer Entfernung von 100 Metern die LSA dem Einsatzfahrzeug eine grüne Phase bereitstellt und beim Verlassen des Knotenpunktes wieder auf den alten Signalzeitenplan zurück geschaltet wird. Laut Aussagen von Siemens gibt es keine Probleme damit, dass der Umgebungsverkehr bei einer Rotzeit zu lange warten muss. Meistens wird unmittelbar durch das sich nähernde Einsatzfahrzeug deutlich, wodurch die verlängerte Wartezeit zustande kommt.

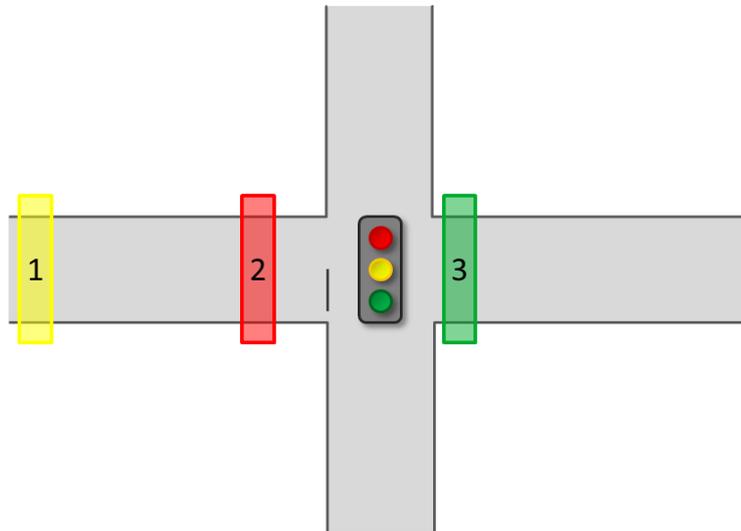


Abbildung 6.2: Knotenpunkt bei dem Algorithmus von Stream

6.1.3 Ohne Vorfahrt

Bei einem Szenario fährt das Einsatzfahrzeug ganz ohne Bevorrechtigung und verhält sich wie ein normaler Pkw. Dieses Szenario wurde benannt als „Ohne Vorfahrt“. Dies ist sozusagen ein Worst-Case Szenario, welches schlechtere Reisezeiten für das Einsatzfahrzeug mit sich bringen sollte als alle anderen Ansätze.

6.2 Szenario 1: Einfacher Knotenpunkt

Der Algorithmus wurde mit einem einfachen Knotenpunkt getestet. Dadurch, dass nur ein einziger Knotenpunkt existiert, gibt es nicht besonders viele Möglichkeiten der Beeinflussung. Die Qualität des Algorithmus richtet sich dadurch nur danach, wie schnell der Umgebungsverkehr abfließen kann. Die Verkehrsnachfrage ist für alle Straßen gleich. Es existiert eine Variante mit und eine ohne abbiegenden Verkehr. Die Umlaufzeit der LSA beträgt statisch 90 Sekunden mit einer Grünzeit von je 40 Sekunden für den Verkehr aus horizontaler bzw. vertikaler Richtung. Bei einem realen Knotenpunkt wäre der Signalzeitenplan in der Regel angepasst auf die angenommene Verkehrsnachfrage. Dies wurde bei den untersuchten Szenarien nicht gemacht, da kein optimaler Signalzeitenplan entwickelt werden soll, sondern der Einfluss der Einsatzfahrzeugpriorisierung.

In Abbildung 6.3 ist ein einfacher Knotenpunkt in SUMO dargestellt. Der Knotenpunkt besteht aus vier Straßen mit einer Länge von 500 Metern und einer maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Von dem Szenario existieren zwei Varianten einmal wie abgebildet mit einem Fahrstreifen pro Straße und zusätzlich einem Szenario mit zwei Fahrstreifen. Bei einem Knotenpunktszenario in der realen Welt mit nur einem Fahrstreifen, hätte der Umgebungsverkehr keine Möglichkeit eine Rettungsgasse zu bilden und das Einsatzfahrzeug müsste darauf warten, dass der Umgebungsverkehr abfließen kann, es sei denn das Einsatzfahrzeug hätte die Möglichkeit über den Fahrstreifen der Gegenrichtung in den Knotenpunkt einzu-

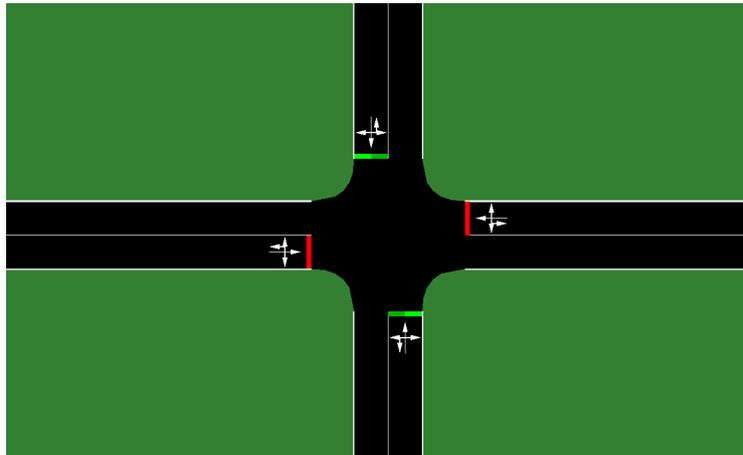


Abbildung 6.3: Ein einfacher Knotenpunkt in SUMO [23]

fahren. Dieses Verhalten ist jedoch ebenfalls relativ riskant, insbesondere wenn der Knotenpunkt nicht gut einsichtig ist.

6.3 Szenario 2: Korridor

Als nächstes wird ein einfacher Korridor mit mehreren Knotenpunkten nachgebildet. Das Simulationsszenario eines Korridors ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Der Korridor besteht aus drei Knotenpunkten mit je vier Straßen. Es gibt drei verschiedene Varianten bei denen alle Straßen jeweils einer Länge von 100 bzw. 200 und 500 Metern haben. Es wurden verschiedene Straßenlängen gewählt, um zu untersuchen ob es einen Unterschied macht wie dicht die LSAs im Netz verteilt sind. Alle Straßen haben nur einen Fahrstreifen und eine maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Hier sind die Möglichkeiten der Beeinflussung ebenfalls eingeschränkt, aber die Einzelknoten des Korridors müssen bereits miteinander geeignet koordiniert werden.

Die Umlaufzeit der LSAs beträgt in diesem Szenario ebenfalls 90 Sekunden, mit einer Grünzeit von 42 Sekunden. Damit das Simulationsszenario nicht zu schlechte und unrealistische Reiserouten produziert wurden die LSA-Signalzeitenplan bereits auf einander abgestimmt, sodass die Verkehrsteilnehmer des Korridors in der Regel bereits eine Grüne Welle erhalten. Um dies zu erhalten werden die Signalzeitenpläne zeitversetzt gestartet (mit einem sogenannten „Offset“). Der Offset entspricht hierbei der erwarteten Reisezeit, die ein Fahrzeug von dem einen Knotenpunkt zum nächsten bei freier Fahrt und maximal erlaubten Geschwindigkeit benötigt.

Die Verkehrsnachtfrage ist in diesem Szenario ebenfalls für alle Richtungen gleich gewählt, nur das Einsatzfahrzeug wird über alle drei Knotenpunkte geradeaus geroutet, entweder von Ost nach West oder in umgekehrter Richtung. Dies wurde so gewählt, damit das Einsatzfahrzeug in jedem Fall den gesamten Korridor nutzt.

6.4 Szenario 3: Manhattan-Grid

Als drittes wurde ein künstliches Manhattan-Grid erstellt, um die generelle Funktionsweise des Algorithmus bei einem größeren Netz mit mehr Variationsmöglichkeiten auszuwerten (siehe Abbildung 6.5). Bei diesem Szenario existieren sechs Straßen (drei vertikal und drei horizontal ausgerichtet). Dadurch entstehen neun Knotenpunkte, die mittels LSAs kontrolliert sind. Die LSA-Pläne wurden in diesem Netz nicht koordiniert sondern schalten synchron. Die Umlaufzeit der LSAs beträgt 90 Sekunden mit einer Grünzeit von 43 Sekunden. Die Straßen sind alle 200 Meter

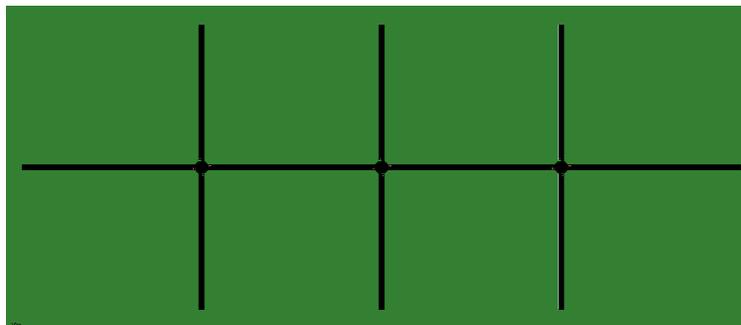


Abbildung 6.4: Beispiel für einen einfachen Korridor in SUMO

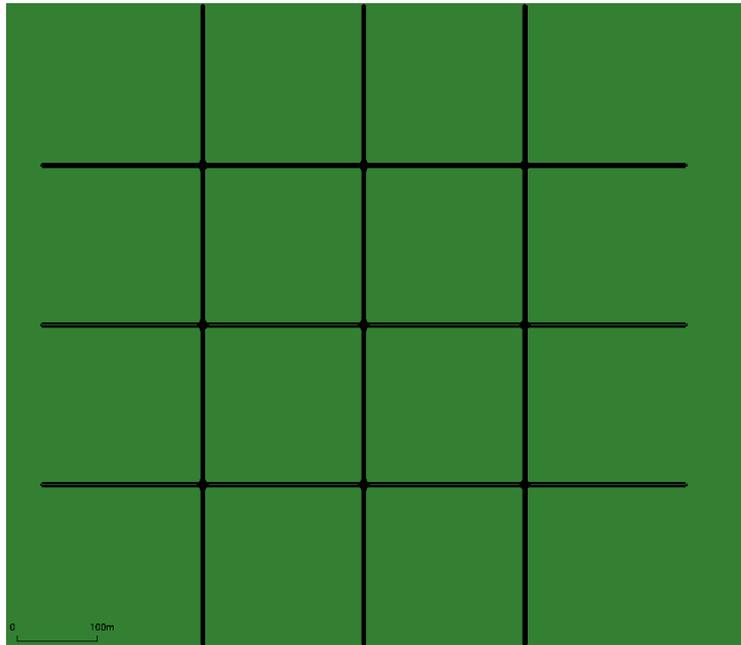


Abbildung 6.5: Grid-Szenario in SUMO

lang und haben einen Fahrstreifen. Die Verkehrsnachfrage in dem Netz ist für alle Routen gleich. Das Einsatzfahrzeug fährt vertikal oder horizontal über drei Knotenpunkte ohne abzubiegen, damit das Einsatzfahrzeug in jedem Simulationsdurchlauf die gleich Streckenlänge fahren musste.

6.5 Szenario 4: Braunschweig

Abschließend wird das Konzept an einem realen Simulationsszenario untersucht. Auf Grund der vorhandenen Daten bietet sich hier die Stadt Braunschweig an. Braunschweig hat ca. 250.000 Einwohner und erstreckt sich über eine Fläche von ca. 192 km^2 . Es gibt drei Feuerwachen der Berufsfeuerwehr sowie 30 Feuerwehrrhäuser der Freiwilligen Feuerwehr [118]. Der Rettungsdienst wird in Braunschweig neben der Berufsfeuerwehr ebenfalls von verschiedenen Hilfsorganisationen (z.B. Arbeiter-Samariter-Bund (ASB) und Deutsches Rotes Kreuz (DRK)) und privaten Anbietern (für Kranken- sowie Blut- und Organtransporte) durchgeführt. Allein die Berufsfeuerwehr wurde im Jahr 2012 zu 15.125 Einsätzen gerufen [118]. Zusätzlich noch weitere 49.724 Einsätze des Rettungsdienst bzw. des Krankentransportes von anderen Hilfsorganisationen.

Zur Ergänzung der künstlichen Szenarien wurde drei Szenarien aus Braunschweig erstellt: die Forschungskreuzung, einen Korridor und gesamt Braunschweig.

6.5.1 Forschungskreuzung

Als Beispiel für einen einfachen Knotenpunkt wurde die Forschungskreuzung von Braunschweig simuliert werden (siehe Abbildung 6.6). Es existieren für den abbie-

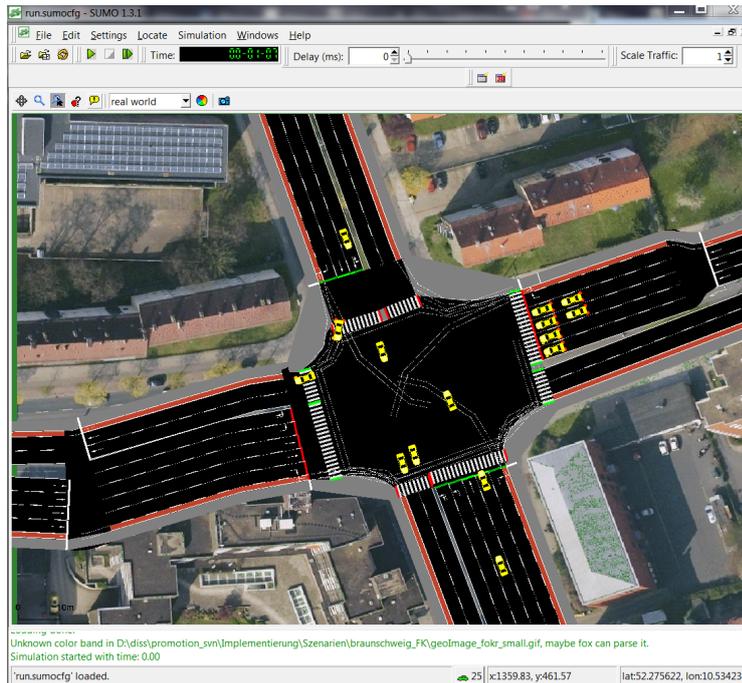


Abbildung 6.6: SUMO Simulation der Forschungskreuzung in Braunschweig

genden Verkehr separate Abbiegefahrstreifen und im LSA-Signalzeitenplan sind extra Phasen zum Abbiegen vorgesehen.

6.5.2 Braunschweiger Korridor

Ein Ausschnitt aus Braunschweig wurde als Simulationsszenario für diese Forschungsarbeit umgesetzt und ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Als Grundlage für das Straßennetz wurden die Daten von OSM verwendet. Die Verkehrsnachfrage beruht auf einer Nachfrage von dem Verkehrsmodell Travel and Activity Patterns Simulation (TAPAS) [119]. Die Signalzeitenpläne der LSAs sind von der Verkehrssimulation geschätzt und manuell angepasst.

In Abbildung 6.7 ist das verwendete Simulationsnetz von Braunschweig dargestellt. In orange wurde markiert wo sich im Netz eine Feuerwache befindet. In rot wurden die Krankenhäuser dargestellt, da viele der Routen der Einsatzfahrzeuge dort beginnen oder enden. In dem Simulationsszenario wurde als Startpunkt der Routen der Einsatzfahrzeuge die Feuerwache gewählt und als Endpunkt ist die Einsatzstelle markiert. In diesem Szenario fährt das Einsatzfahrzeug immer die gleiche Route zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Es wurden insgesamt 100 Simulationdurchläufe durchgeführt und mit jedem Simulationdurchlauf startet das Einsatzfahrzeug zehn Sekunden später seine Einsatzfahrt.

6.5.3 Stadt Braunschweig

Zum Schluss wurde ein komplexes Szenario des Verkehrsnetzes von Braunschweig und Umgebung simuliert. In Abbildung 6.8 ist ein Ausschnitt des Simulationsnet-

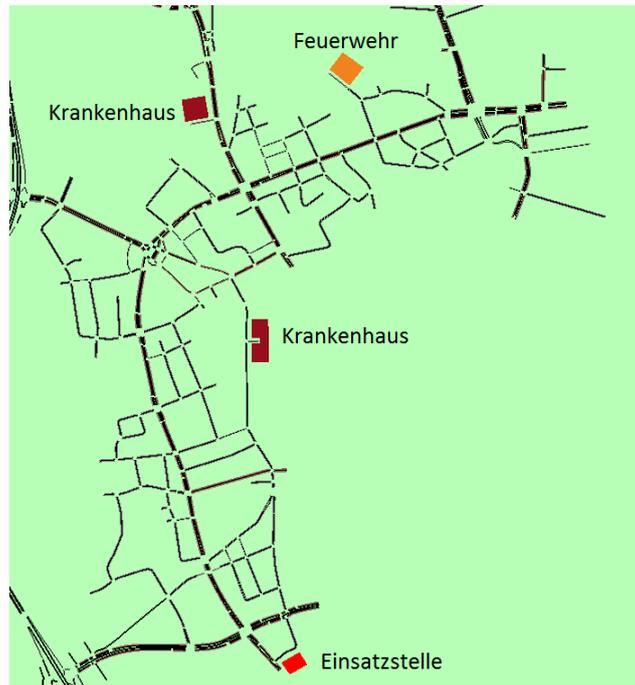


Abbildung 6.7: Simulationsnetz von einem Ausschnitt in Braunschweig

zes zu sehen. Das Straßennetz beruht auf der Datengrundlage von einem früheren Navteq-Netz (mittlerweile HERE). Es wurde die Verkehrsnachfrage eines durchschnittlichen Tages (Dienstag bis Donnerstag) verwendet. Die Verkehrsnachfrage beruht ebenfalls auf der Nachfrage des Verkehrsmodells TAPAS.

Für die Routen der Einsatzfahrzeuge wurden Einsatzfahrten aus Braunschweig aus dem Jahr 2017 ausgewählt. Hierfür wurden zufällige Einsatzfahrten ausgewählt, dessen Reisezeiten länger als 13 Minuten sind, da hier die Hilfsfrist nicht eingehalten werden konnte. Von diesen Einsatzfahrten wurden zehn Fahrten ausgewählt, deren Routen sich deutlich unterscheiden. Es wurde dabei darauf geachtet, dass die Routen von unterschiedlichen Einsatzfahrzeugen an verschiedenen Tagen und Uhrzeiten stattfanden. Pro Simulationdurchlauf wurde die Route einer Einsatzfahrt getestet. Hierfür startet das Einsatzfahrzeug zehnmal hintereinander mit einem Abstand von einer Stunde dieselbe Route. Der Abstand von einer Stunde wurde gewählt, damit der Umgebungsverkehr genug Zeit hat sich wieder auf die normalen Verkehrsbedingungen einzustellen. Da die Verkehrsnachfrage sich in dem Simulationsszenario über die Zeit ändert, werden die Priorisierungsalgorithmen mit unterschiedlichen Verkehrsstärken konfrontiert und getestet.

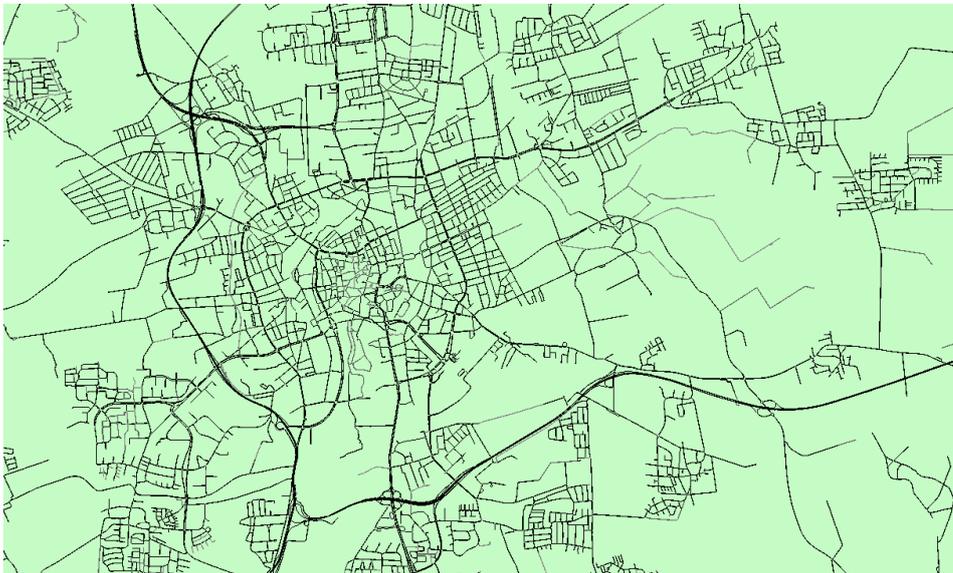


Abbildung 6.8: Simulationsnetz von Braunschweig

7

Simulationsergebnisse

Dieses Kapitel wertet aus, wie gut der Priorisierungsansatz Walabi im Vergleich mit bereits existierenden Strategien funktioniert. Zudem wird evaluiert, welche Verschlechterung für den Umgebungsverkehr durch die Bevorrechtigung der Einsatzfahrzeuge zu erwarten ist.

7.1 Szenario 1: Einfacher Knotenpunkt

Das Szenario mit einem einfache Knotenpunkt wurde sowohl mit einer als auch mit zwei Fahrstreifen simuliert. Insbesondere bei einem engen Szenario mit nur einen Fahrstreifen gibt es für den Umgebungsverkehr keine Möglichkeit eine Rettungsgasse zu bilden und das Einsatzfahrzeug passieren zu lassen.

7.1.1 Knotenpunkt mit einem Fahrstreifen pro Straßen

Die Szenarien wurden mit variierender Verkehrsstärke simuliert, um zu sehen bei welcher Belastung die Algorithmen an ihre Grenzen gelangen. Im besten Fall würde ein Einsatzfahrzeug ohne Warte- und Verlustzeit die Route beenden können. Bei der Auswertung wurde der Fokus auf die Reisezeit gelegt, da eine kurze Reisezeit und damit ein schnelles Erreichens des Einsatzortes für Einsatzfahrzeuge entscheidend ist. Das Szenario wurde mit verschiedenen Verkehrsnachfragen simuliert. Dabei wurden zwischen 1 und 3000 Fahrzeuge versucht in die gesamte Simulation innerhalb einer Stunde einzusetzen. Jede Verkehrsnachfrage wurde 50-mal simuliert, jedoch unterscheidet sich die Verkehrsnachfrage von der Verkehrsstärke die tatsächlich innerhalb einer Stunde simuliert werden kann. Für die Verkehrsstärke wurde gezählt, wie viele Fahrzeuge tatsächlich in der Simulation auf einem Fahrstreifen gefahren sind. Damit die Ergebnis-Diagramme nicht zu starken Schwankungen unterliegt, wurden wiederum die Verkehrsstärken von 0-25, 26-50, etc. zusammengefügt und die durchschnittlichen Werte ermittelt.

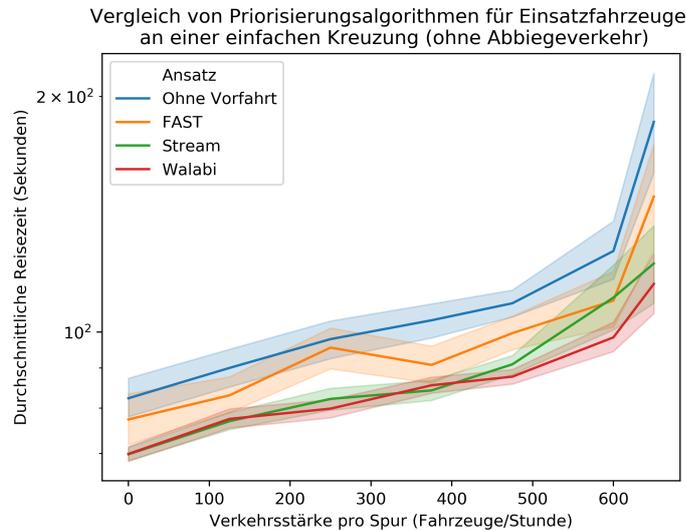


Abbildung 7.1: Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes (ohne Abbiegeverkehr)

7.1.2 Ohne abbiegenden Verkehr

Abbildung 7.1 zeigt die Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes mit nur einem einzigen Fahrstreifen pro Kante und ohne abbiegenden Verkehr. Bei der Auswertung wird der Mittelwert und das 95% Konfidenzintervall abgebildet.

Bei der Untersuchung der verschiedenen Algorithmen ist besonders wichtig auszuwerten, welcher Nutzen für das Einsatzfahrzeug erreicht werden kann. Es wäre jedoch denkbar einen Algorithmus zu entwickeln, der alle LSAs für die gesamte Einsatzfahrt für das Einsatzfahrzeug freigibt und die Durchfahrt für den Umgebungsverkehr sperrt. Dadurch würde sichergestellt (sofern durch die Route bei der Bevorrechtigung keine Konflikte auftreten), dass das Einsatzfahrzeug in jedem Fall eine Grüne Welle hat. Für die Einsatzfahrt wäre dies der beste mögliche Fall und zeigt das maximale Potential für die Beschleunigung der Einsatzfahrt an, allerdings würde der Umgebungsverkehr unverhältnismäßig lange beeinträchtigt werden und es wäre auch denkbar, dass ein Gridlock-Effekt dabei auftritt. Es wird deutlich, dass dies nicht die gewünschte Art einer Bevorrechtigung ist und daher spielt es ebenfalls eine Rolle, wie groß die Benachteiligung für den Umgebungsverkehr ist. Optimal sollte die Benachteiligung möglichst klein sein.

Die Reisezeiten des Umgebungsverkehr sind in Abbildung 7.2 dargestellt. Bei dem Umgebungsverkehr werden alle Fahrzeuge in einem Zeitrahmen von 30 Minuten ab Start des Einsatzfahrzeuges in der Simulation berücksichtigt. Bei einer geringen Verkehrsstärke gibt es keinen Unterschied bei der Reisezeit des Umgebungsverkehr (Median bei allen Ansätzen zwischen 93 und 94 Sekunden). Allerdings ist zu sehen, dass bei höheren Verkehrsstärken die Reisezeit für den Umgebungsverkehr sich bei den Priorisierungsalgorithmen unterscheiden (Reisezeit Median (Sekunden): Ohne Vorfahrt= 133, FAST= 133, Stream= 137 und Walabi= 157).

Das ein Verkehrsszenario ohne abbiegenden Verkehr sehr vereinfacht ist und in der Realität selten vorkommt, wurden alle weiteren Simulationsszenarien mit

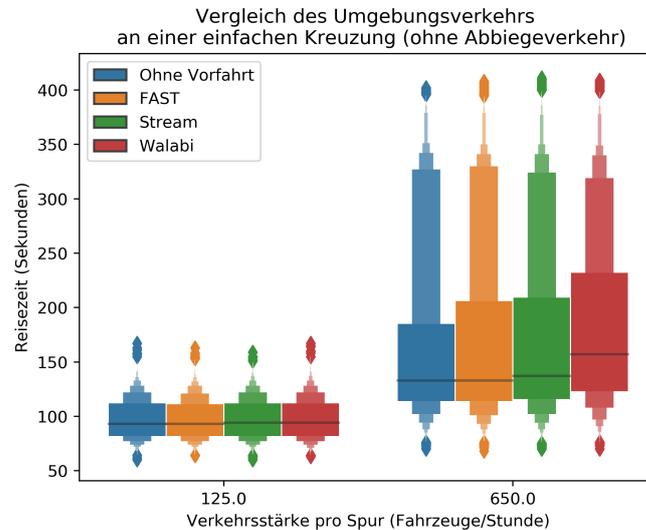


Abbildung 7.2: Vergleich des Umgebungsverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt

abbiegenden Verkehr simuliert. Bei den weiteren Ergebnissen fällt jedoch auf, dass die simulierte Verkehrsnachfrage durch den abbiegenden Verkehr deutlich kleiner ausfällt als in diesem vereinfachten Szenario.

7.1.3 Mit abbiegenden Verkehr

In Abbildung 7.3 sind die Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes, mit nur einem Fahrstreifen pro Kante und abbiegenden Verkehr, dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der FAST-Algorithmus nur eine leichte Reisezeitverbesserung mit sich bringt, verglichen mit einem Einsatzfahrzeug, das sich als ein normales Fahrzeug durchs Netz bewegt. Da die Freigabezeit nur um ein paar Sekunden verlängert bzw. die Rotzeit verkürzt wird, ist auch die zeitliche Ersparnis relativ gering. Bei höheren Verkehrsstärken bringt der FAST-Ansatz keine signifikante Verbesserung verglichen mit Fahrten ohne LSA-Bevorrechtigung. In der Simulation sowie auch in der Realität passiert es, dass durch die Adaption der Phasen nicht ausreichend Zeit zur Verfügung steht, damit das Einsatzfahrzeug den Knotenpunkt während einer Grünzeit überqueren kann. Gerade abbiegender Verkehr kann das Einsatzfahrzeug bzw. den Verkehr vor der LSA länger aufhalten. Da der FAST-Algorithmus keine Information darüber hat, wann das Einsatzfahrzeug den Bereich des Knotenpunktes verlassen hat, wird unter Umständen zu schnell zum normalen Signalzeitenplan gewechselt.

Der Stream und der Walabi-Ansatz haben relativ ähnliche Ergebnisse bezüglich der Reisezeit insbesondere bei niedrigen Verkehrsstärken. Lediglich für höhere Verkehrsstärken zeigt der Walabi-Ansatz seinen Vorteil, da er früher dazu in der Lage ist die LSA zu adaptieren. Es sollte zu erwarten sein, dass mit dem Walabi-Ansatz das Einsatzfahrzeug immer komplett ungestört seine Route fahren kann, jedoch ist das für ein sehr stark gestautetes Netz nicht der Fall. Der Ansatz modifiziert die LSAs erst sobald das Einsatzfahrzeug seine Route gestartet hat. Der Walabi-Ansatz braucht demnach einige Sekunden Vorlaufzeit bis der angestaute Verkehr abfließen kann.

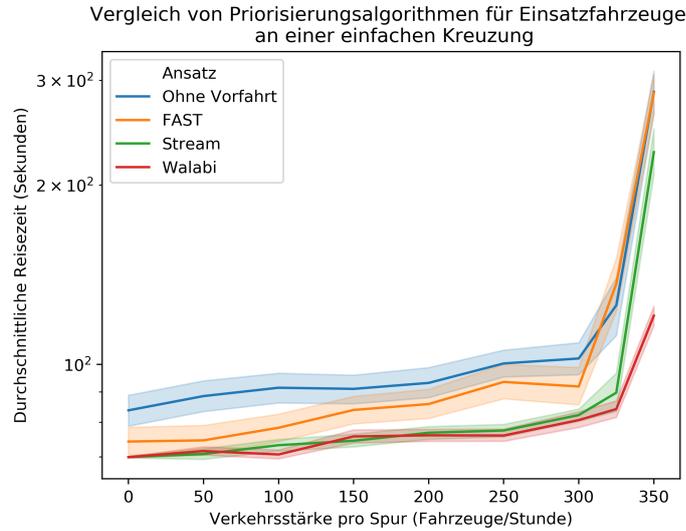


Abbildung 7.3: Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes

In Abbildung 7.4 ist die Reisezeit des Umgebungsverkehrs aufgetragen. Da die Werte der verschiedenen Verfahren sich kaum unterscheiden wurde hier ein Letter-Value Plot (eine Variante des Box-Whiskers-Plots [120]) verwendet für eine geringe und eine größere Verkehrsstärke. Bei der Auswertung wird deutlich, dass bei einem einfachen Knotenpunkt die Benachteiligung des Umgebungsverkehrs kaum ins Gewicht fällt und damit vernachlässigt werden kann. So ergibt sich bei einer Verkehrsstärke von 50 Fahrzeugen die Stunde kein Unterschied bei der Reisezeit (für alle ist der Median zwischen 90 und 91 Sekunden), bei einer Verkehrsstärke von 350 Fahrzeugen die Stunde sind die Unterschiede ebenfalls nicht signifikant (Median: Ohne Vorfahrt= 357, FAST= 351, Stream= 349 Walabi= 345).

Durch die Priorisierungsalgorithmen wäre es auch möglich, dass nur wenige Fahrzeuge besonders lange an der LSA warten müssen. Um dies auszuwerten wurden die Verteilungen der Wartezeiten in Abbildung 7.5 untersucht. Die Verteilungen unterscheiden sich kaum sichtbar, welches ebenfalls ein gutes Zeichen dafür ist, dass durch den Walabi-Ansatz keine signifikante Verschlechterung der Wartezeiten des Umgebungsverkehrs entsteht.

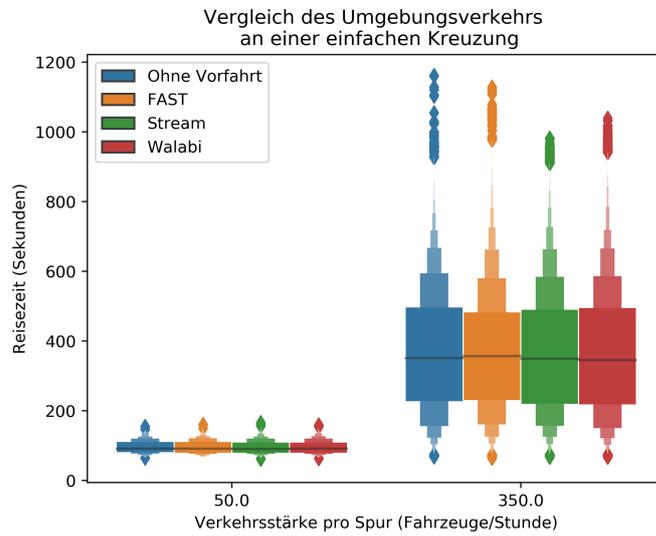


Abbildung 7.4: Vergleich des Umgebungsverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt

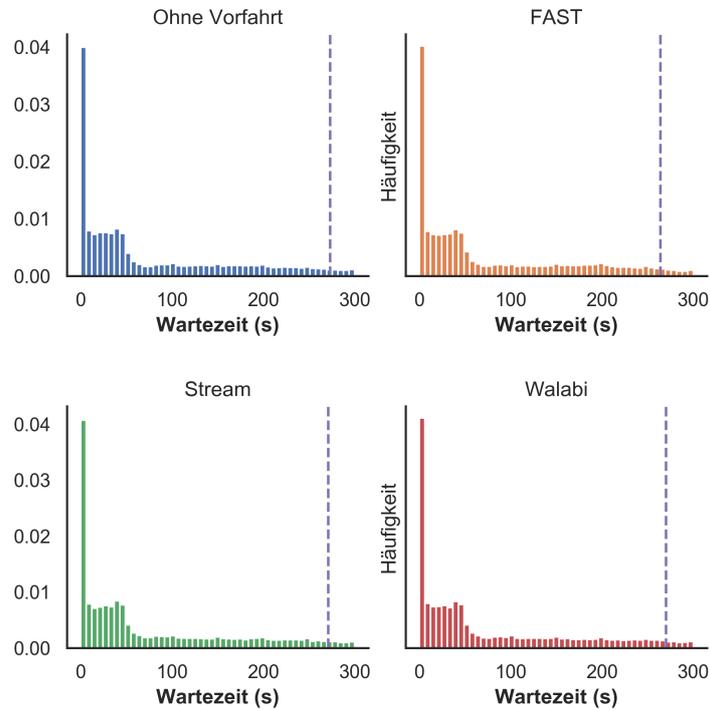


Abbildung 7.5: Verteilung der Wartezeiten des Gesamtverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt (gestrichelte Linie: 90 % Perzentil)

7.1.4 Knotenpunkt mit zwei Fahrstreifen pro Straße

In Abbildung 7.6 sind die Simulationsergebnisse für die Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge des Knotenpunkt-Szenarios mit zwei Fahrstreifen pro Straße dargestellt. Die Simulationsergebnisse sind hier vergleichbar mit den Ergebnissen des Knotenpunktes mit einem Fahrstreifen pro Straße. Die schlechtesten Ergebnisse werden wie zu erwarten erzielt, wenn keine Priorisierung des Einsatzfahrzeuges vorgenommen wird. Die Reisezeiten des FAST-Ansatz sind nur leicht besser bzw. vergleichbar. Bei höheren Verkehrsstärken kann es sogar dazu kommen, dass der FAST-Ansatz vereinzelt höhere Reisezeiten erzielt. Bessere Reisezeiten werden bei dem Stream-Ansatz und Walabi erzielt. Ein bedeutender Unterschied zwischen diesen beiden Verfahren wird erneut erst bei höheren Verkehrsstärken erzielt. Dies war zu erwarten, da die Funktionsweise dieser Verfahren ähnlich ist. Während Stream immer in der gleichen Distanz in den Priorisierungsmodus umschaltet, ändert sich die Distanz beim Walabi-Ansatz in Abhängigkeit zur aktuellen Verkehrslage. So kann beim Walabi-Verfahren früher priorisiert werden, wenn es an dem Knotenpunkt zu einem Stau kommt, der länger ist als die gewählte Distanz beim Stream-Verfahren (in diesem Fall 100 Meter).

Bei der Betrachtung des Umgebungsverkehrs fällt auf, dass sich die durchschnittliche Reisezeit kaum unterscheidet (siehe Abbildung 7.7). Bei dem Szenario mit zwei Fahrstreifen pro Straße ist allerdings die Streuung der Werte viel stärker als bei dem Szenario mit nur einem Fahrstreifen pro Straße. Die stärkere Variation der Reisezeiten lässt sich darauf zurückführen, dass es bei einem einzelnen Knotenpunkt einen zeitlichen Unterschied macht, ob ein Fahrzeug links abbiegt oder geradeaus weiterfährt. Bei zwei Fahrstreifen kann sich der Verkehr besser auf die Fahrstreifen aufteilen wodurch die längeren Wartezeiten nur für den abbiegenden Verkehr entstehen und nicht für alle Verkehrsteilnehmer.

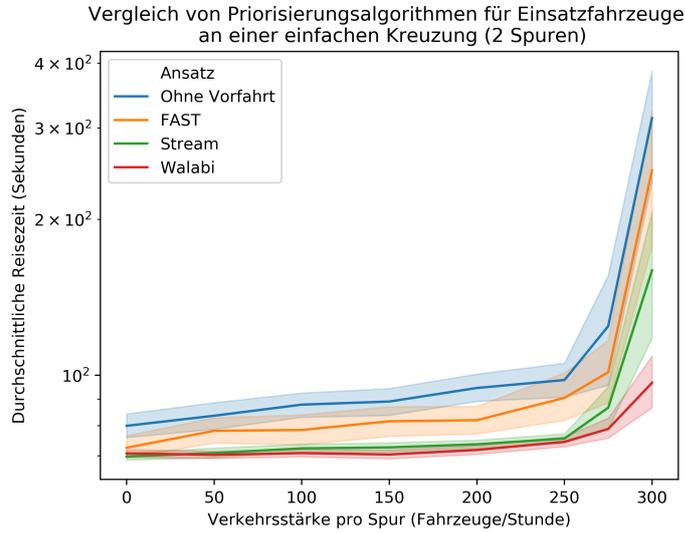


Abbildung 7.6: Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes mit je zwei Fahrstreifen

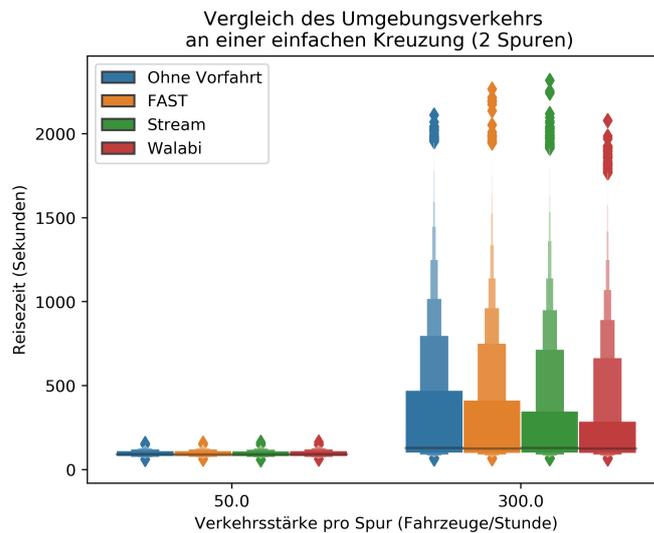


Abbildung 7.7: Vergleich des Umgebungsverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt (zwei Fahrstreifen)

7.2 Szenario 2: Korridor

Das Korridor Szenario beinhaltet drei kontrollierte Knotenpunkte. Alle Kanten sind 100 bzw. 200 oder 500 Meter lang und das Einsatzfahrzeug wird immer über alle drei Knotenpunkte geroutet.

7.2.1 100 Meter

Die Simulationsergebnisse, des Korridor-Szenarios mit einer Kantenlänge von je 100 Metern, sind in Abbildung 7.8 dargestellt. Dort ist abgebildet, wie lang die durchschnittlichen Reisezeiten für die Einsatzfahrzeuge mit den unterschiedlichen Priorisierungsalgorithmen sind. Die Priorisierungsalgorithmen schneiden hierbei ähnlich ab, verglichen mit dem Szenario mit nur einem Knotenpunkt. Die längsten Reisezeiten hat das Einsatzfahrzeug, wenn keine Priorisierung angewendet wird. Der FAST-Algorithmus schneidet etwas besser ab. Die Reisezeiten des Stream- und des Walabi-Ansatzes befinden sich für kleine Verkehrsstärken im selben Bereich. Erneut wird der positive Effekt des Walabi-Ansatzes bei höheren Verkehrsstärken sichtbar. Da beim Stream-Ansatz der virtuelle Meldepunkt zum Umschalten der LSA auf die der Kantenlänge gesetzt wurde (100 Meter), sollten sich der Stream und der Walabi-Ansatz nur wenig unterscheiden. Schließlich können sowohl bei Stream als auch bei Walabi frühestens in einer Entfernung von 100 Meter die LSA beeinflusst werden. Der Unterschied zwischen dem Stream und dem Walabi-Ansatz ist hier auf die Koordinierung mehrerer LSAs miteinander zurückzuführen. Die Koordinierung kommt dann zum Tragen, wenn das Netz stärker belastet ist, wodurch die Kapazität der Straßen nicht ausreicht, um den abfließenden Verkehr von eines stromabwärts liegenden Knotenpunktes aufzunehmen.

Im Idealfall ist es wünschenswert, dass durch die Priorisierung die Reisezeiten unabhängig von der Verkehrsstärke konstant bleiben sollte und keine Verzögerung der Einsatzfahrt stattfindet. In diesem Szenario kommt es jedoch ebenfalls dazu, dass ein bestimmter Vorlauf benötigt wird bis der Umgebungsverkehr abfließen kann.

In Abbildung 7.9 sind die Reisezeiten des Umgebungsverkehrs bei den verschiedenen Priorisierungsstrategien dargestellt. Durchschnittlich ist ebenfalls kein signifikanter Unterschied bei der Reisezeit erkennbar. Auffällig ist jedoch, dass es ohne Priorisierung und bei dem FAST-Ansatz zu extremeren Ausreißern kommt.

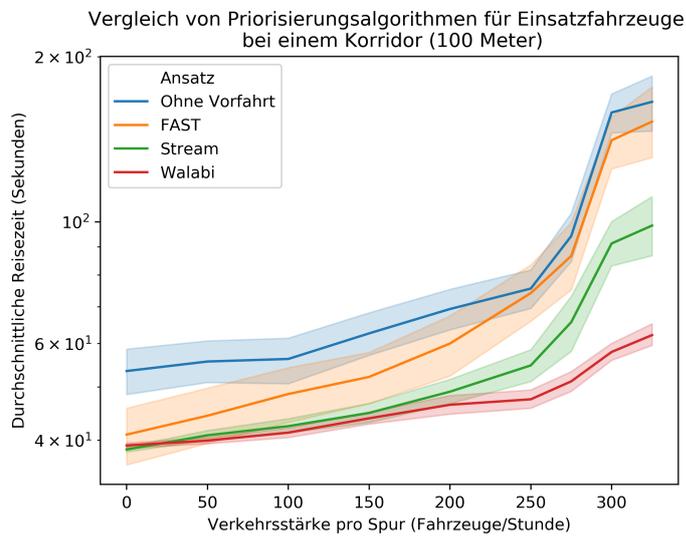


Abbildung 7.8: Simulationsergebnisse eines Korridors (100 Meter)

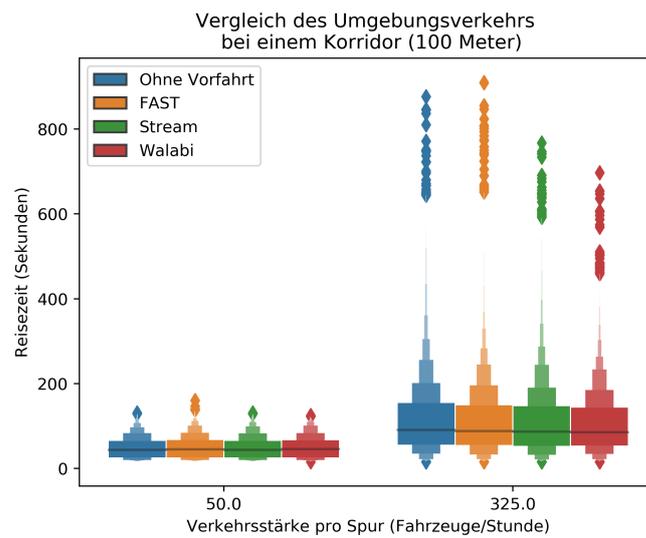


Abbildung 7.9: Vergleich des Umgebungsverkehrs bei einem Korridor (100 Meter)

7.2.2 200 Meter

In Abbildung 7.10 sind die simulierten Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge mittels verschiedener Priorisierungsalgorithmen dargestellt. Die Simulationsergebnisse ähneln denen der anderen Simulationsszenarien. Es ergibt sich wieder das Bild, dass die besten Reisezeiten für die Stream- und Walabi-Strategie erzielt werden. Verglichen mit dem Korridor-Szenario mit einer Kantenlänge von 100 Metern werden in diesem Szenario die Unterschiede zwischen Stream und Walabi früher und stärker deutlich. Der Grund hierfür ist, dass der Walabi-Ansatz schon früher auf das Einsatzfahrzeug reagieren kann. Da die virtuellen Meldepunkte des Stream-Ansatzes manuell festgelegt werden, wäre es auch möglich den Meldepunkt bei 200 Metern zu setzen. Dadurch müsste der Umgebungsverkehr jedoch immer länger vor dem Knotenpunkt warten, auch wenn sich kaum Verkehr vor dem Einsatzfahrzeug befindet.

In Abbildung 7.11 sind die simulierten Reisezeiten des Umgebungsverkehr dargestellt. In diesem Korridor-Szenario tritt auch bei einer Kantenlänge von 200 Meter keine signifikante Verschlechterung des Umgebungsverkehrs ein.

7.2.3 500 Meter

Zum Schluss wurde das Korridor-Szenario mit einer Kantenlänge von 500 Meter simuliert. Die Ergebnisse der Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge sind in Abbildung 7.12 zu finden. Auch hier schneidet Walabi am besten ab, gefolgt von Stream und FAST. Am langsamsten sind die Einsatzfahrzeuge ohne Priorisierung.

Interessanterweise scheinen die Reisezeiten in diesem Szenario stärker zu schwanken als in den anderen Szenarien. Aus diesem Grund wurde in Abbildung 7.13 zusätzlich die Reisezeit in Abhängigkeit der Verkehrsnachfrage, die in die Simulation als Eingabe mitgegeben wurde, dargestellt und nicht die tatsächlich simulierte Verkehrsstärke. In dieser Auswertung sehen die Kurven bereits wieder glatter aus. Die Schwankung in Abbildung 7.12 kommt dadurch zustande, dass in diesem Szenario die Simulation ein Problem damit hat die Verkehrsnachfrage in das Szenario innerhalb der simulierten Stunde einzusetzen. So könnte es z.B. dazu kommen, dass zwei Simulationen mit einer Verkehrsnachfrage von 250 Fahrzeugen pro Stunden eingesetzt werden sollen. In der einen Simulation kann der Verkehr durch Zufall besser abfließen (z.B. der Linksabbiegende Verkehr verteilt sich besser) wodurch mehr Fahrzeuge in die Simulation eingesetzt werden können. Dadurch dass sich weniger Staus gebildet haben, kann auch das Einsatzfahrzeug schneller das Simulations-Szenario durchfahren und hat eine kürzere Reisezeit als das Einsatzfahrzeug in der zweiten Simulation bei der trotz Verkehrsnachfrage von 250 Fahrzeugen nur 225 Fahrzeuge eingesetzt werden können und sich dadurch eine simulierte Verkehrsstärke von 225 Fahrzeuge pro Stunde ergibt. In jedem Fall ist in beiden Auswertungsdiagrammen der positive Effekt des Walabi-Ansatz auf die Reisezeit der Einsatzfahrzeuge gut zu erkennen.

In Abbildung 7.14 sind die Reisezeiten des Umgebungsverkehrs abgebildet. Bei kleinen Verkehrsstärken gibt es keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Reisezeiten. Bei größeren Verkehrsstärken werden bei FAST im Durchschnitt minimal kürzere Reisezeiten als bei den anderen Verfahren erzielt. Beim Walabi ist erneut keine Verschlechterung der Reisezeiten des Umgebungsverkehrs verglichen mit dem Verkehr ohne Priorisierung erkennbar.

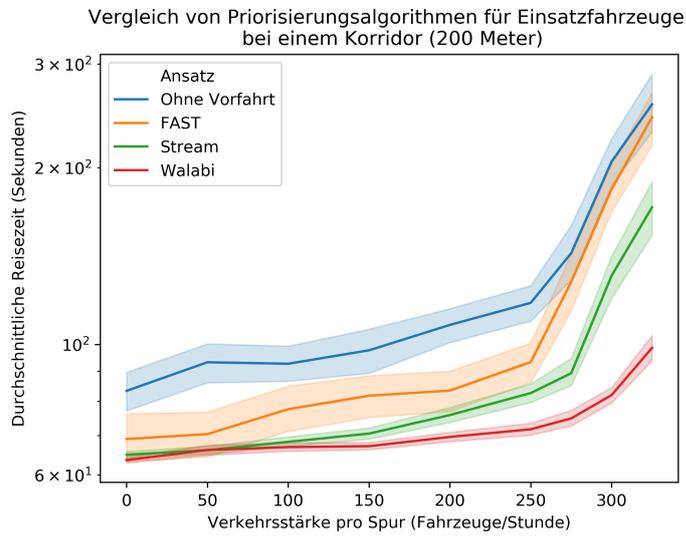


Abbildung 7.10: Simulationsergebnisse eines Korridors (200 Meter)

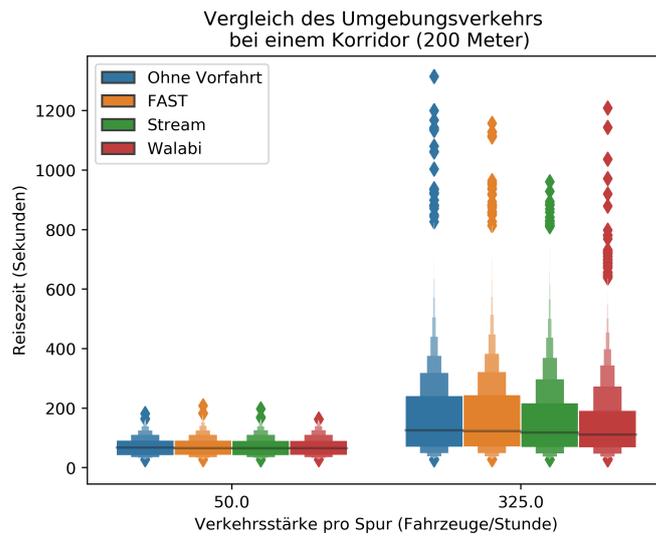


Abbildung 7.11: Vergleich des Umgebungsverkehrs bei einem Korridor (200 Meter)

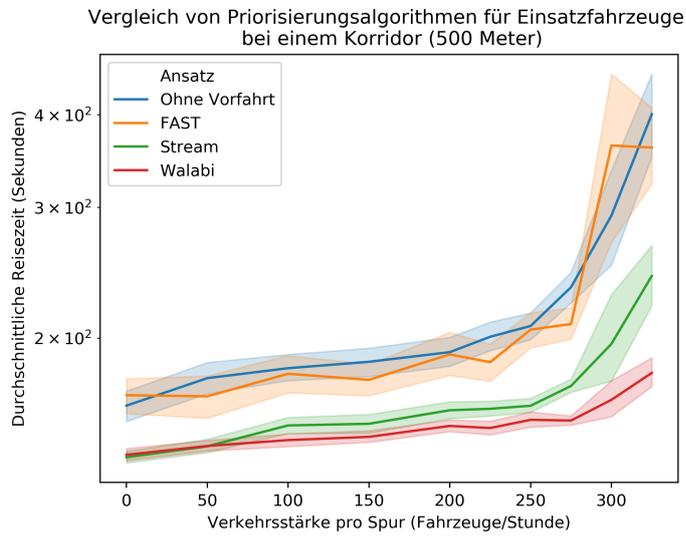


Abbildung 7.12: Simulationsergebnisse eines Korridors (500 Meter)

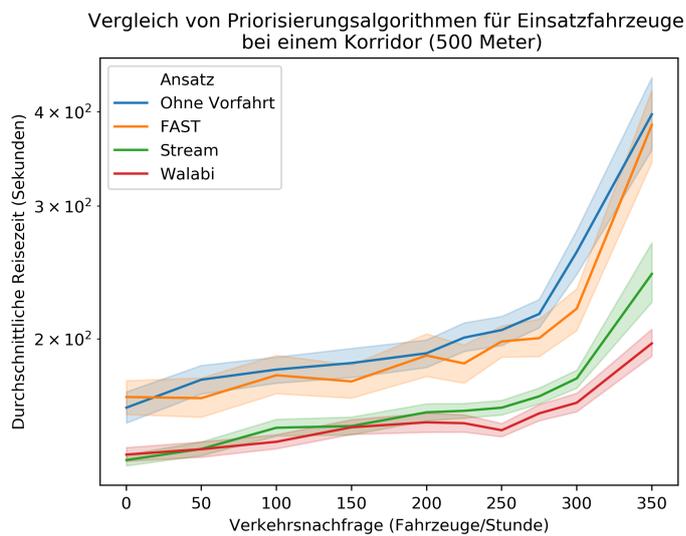


Abbildung 7.13: Simulationsergebnisse bezogen auf die Verkehrsnachfrage bei einem Korridor (500 Meter)

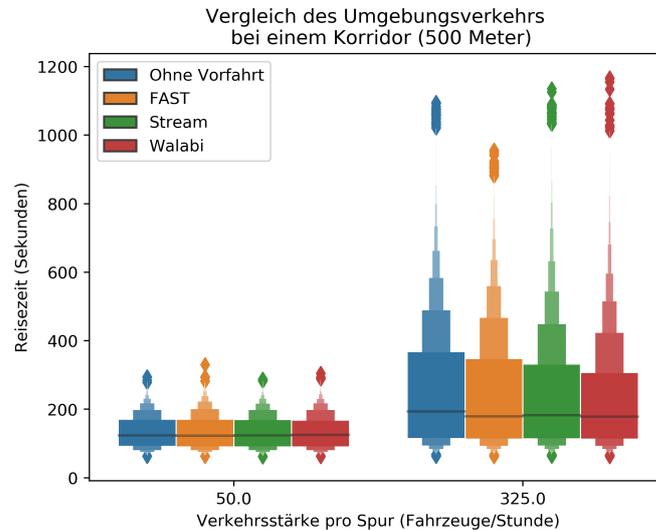


Abbildung 7.14: Vergleich des Umgebungsverkehrs bei einem Korridor (500 Meter)

7.3 Szenario 3: Manhattan-Grid

In Abbildung 7.15 sind die Simulationsergebnisse für das Grid-Szenario bezogen auf die Reisezeit der Einsatzfahrzeuge dargestellt. Wie bei den anderen Szenarien sind die Reisezeiten bei Walabi am kürzesten. Jedoch sind bis zu einer Verkehrsstärke von bis zu 250 Fahrzeugen pro Stunde die simulierten Reisezeiten bei Stream und Walabi gleich gut. Ebenfalls ist auffällig, dass der Reisezeitvorteil beim Grid-Szenario nicht ganz so deutlich wie bei den anderen Szenarien bei einer hohen Verkehrsstärke ausfällt. Dies kann dadurch kommen, dass alle Kanten des Grid-Szenario stets die gleiche Nachfrage haben. Bei einer hohen Verkehrsnachfrage ist demnach das gesamte Verkehrsnetz zu gestaut und es gibt auch bei einer Priorisierung kaum Möglichkeiten für den Umgebungsverkehr abzufießen.

Bei der Betrachtung der Reisezeit des Umgebungsverkehrs fällt erneut kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Verfahren auf. Die simulierten Ergebnisse sind in Abbildung 7.16 aufgezeigt.

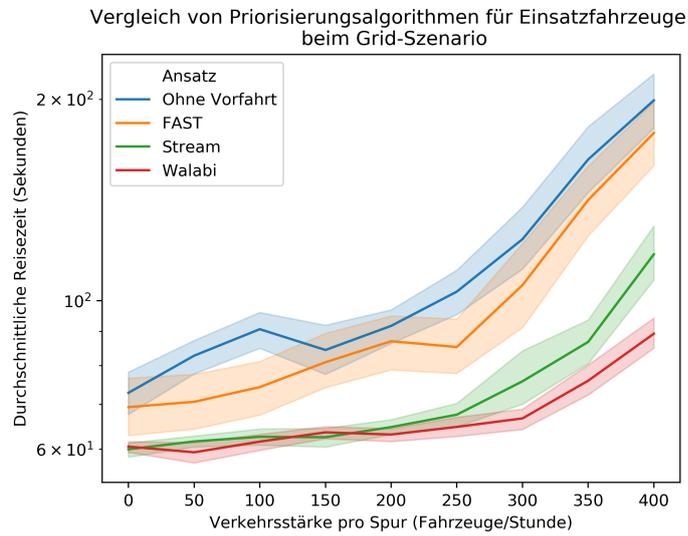


Abbildung 7.15: Simulationsergebnisse eines Grid-Szenarios bezogen auf die Verkehrsstärke

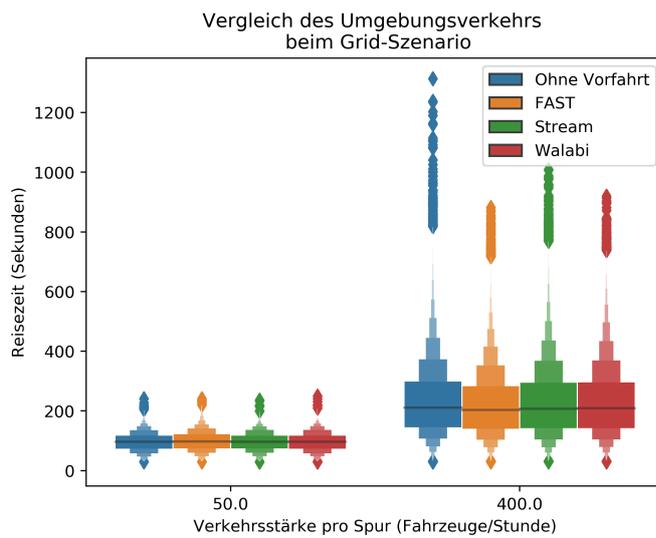


Abbildung 7.16: Vergleich des Umgebungsverkehrs im Grid-Szenario

7.4 Szenario 4: Braunschweig

Zu den Simulationsszenarien von Braunschweig gehören zunächst die Forschungskreuzung, die den Abschnitt eines einzigen Knotenpunkt umfasst, anschließend einen Ausschnitt aus Braunschweig, der einen Korridor in der Nähe einer Feuerwehrwache abbildet und zum Schluss das gesamte Verkehrsnetz von Braunschweig.

7.4.1 Forschungskreuzung in Braunschweig

Bei dem Forschungskreuzungs-Szenario wurde ein reale Knotenpunkt und die Priorisierungsalgorithmen mit der bestehenden Verkehrsnachfrage simuliert und ausgewertet. In Abbildung 7.17 ist ein Box-Plot von den Reisezeiten der simulierten Einsatzfahrzeuge zu sehen. Auch bei einem realen Knotenpunkt werden durchschnittlich die schlechtesten Reisezeiten für die Einsatzfahrzeug ohne Priorisierung erzielt (mit einer Reisezeit von durchschnittlich 60 Sekunden). Der FAST-Ansatz erzielt durchschnittlich zwar bessere Ergebnisse (57,8 Sekunden), jedoch ist die Streuung größer und es kann zu stärkeren Ausreißern kommen. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die Grünzeitverlängerung nicht ausreicht, um das Einsatzfahrzeug die Knotenpunkte passieren zu lassen. In diesem Fall muss das Einsatzfahrzeug eine gesamte Umlaufzeit der LSA warten. Zudem wird beim FAST-Ansatz nicht in den bestehenden Signalzeitenplan eingegriffen sondern nur die Richtung des Einsatzfahrzeuges bevorzugt. Das bedeutet, wenn ein Einsatzfahrzeug nach links abbiegen muss, reicht unter Umständen die Grünzeitverlängerung nicht aus, weil der linksabbiegende Verkehr nicht abfließen kann, weil z.B. geradeausfahrende Fahrzeuge von der Gegenfahrstreifen ebenfalls eine Grünphase haben.

Die Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge sind beim Stream-Ansatz durchschnittlich 17,9 Sekunden kürzer als ohne Bevorrechtigung und beim Walabi-Ansatz sogar 19,9 Sekunden.

In Abbildung 7.18 werden die Reisezeiten des Umgebungsverkehrs dargestellt. Es ist kein signifikanter Unterschied der Verfahren erkennbar. Bei dem FAST-Algorithmus sind im Durchschnitt die Reisezeiten etwas länger und es kommt zu stärkeren Ausreißern.

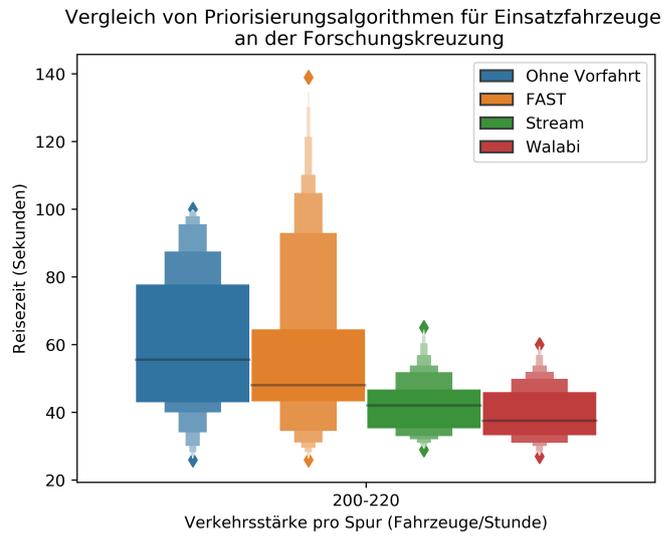


Abbildung 7.17: Vergleich der Priorisierungsalgorithmen für Einsatzfahrzeuge an der Forschungskreuzung

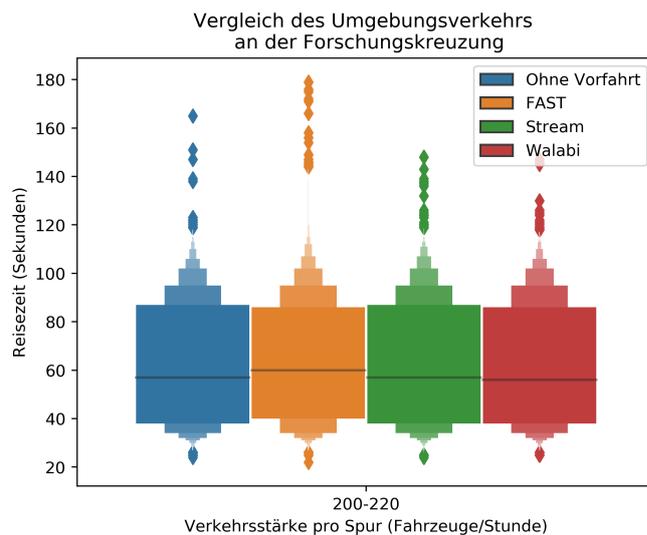


Abbildung 7.18: Vergleich des Umgebungsverkehrs an der Forschungskreuzung

7.4.2 Braunschweiger Korridor

In Abbildung 7.19 sind die Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge im Braunschweig-Szenario dargestellt. Im Durchschnitt sind die längsten Reisezeiten bei einem Einsatzfahrzeug ohne Bevorrechtigung, gefolgt von den Reisezeiten beim FAST-Ansatz. In diesem Simulations-Szenario sind die Reisezeiten des Walabi-Ansatzes 1,1 Sekunden schneller als beim Stream-Ansatz.

Zur genaueren Betrachtung wurden die Wartezeiten der Einsatzfahrzeuge ausgewertet und in Abbildung 7.20 dargestellt. Es ist zu sehen, dass sowohl beim Stream als auch beim Walabi-Ansatz die Einsatzfahrzeuge an keiner LSA warten müssen.

In Abbildung 7.21 sind die Reisezeiten des Umgebungsverkehrs in der Simulation zu sehen. Im Durchschnitt sind keine signifikanten Unterschiede sichtbar.

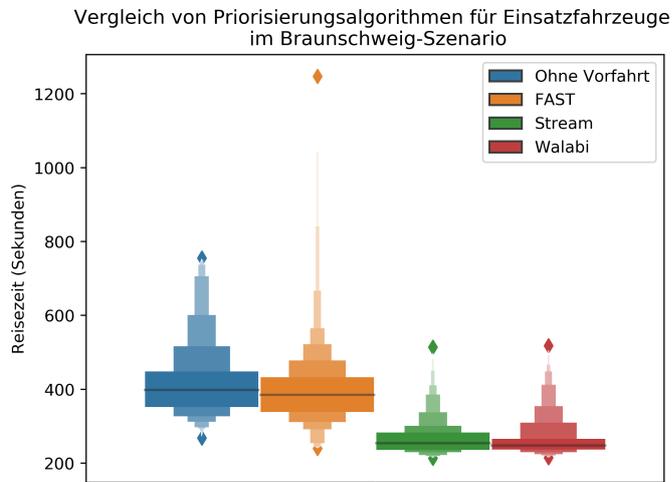


Abbildung 7.19: Vergleich der Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge im Braunschweig-Szenario (Korridor)

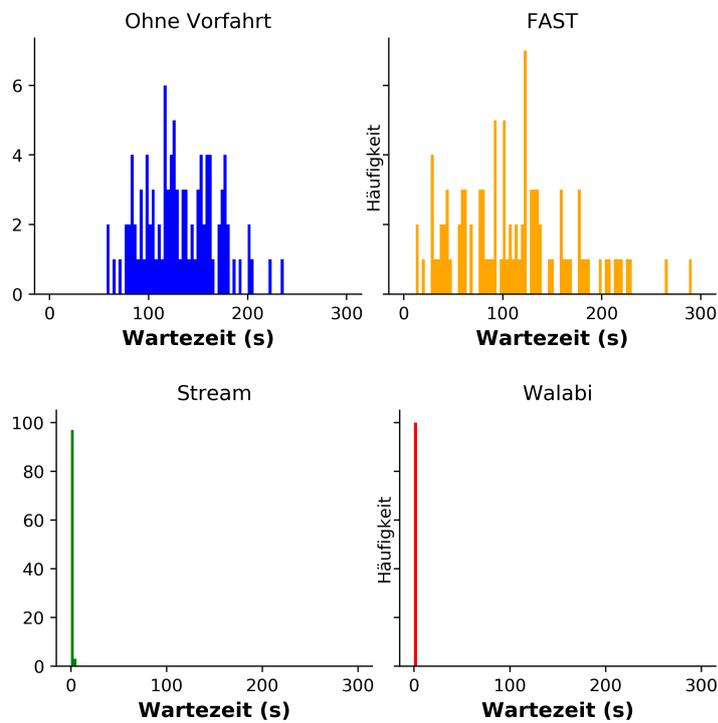


Abbildung 7.20: Vergleich der Wartezeiten der Einsatzfahrzeuge im Braunschweig-Szenario (Korridor)

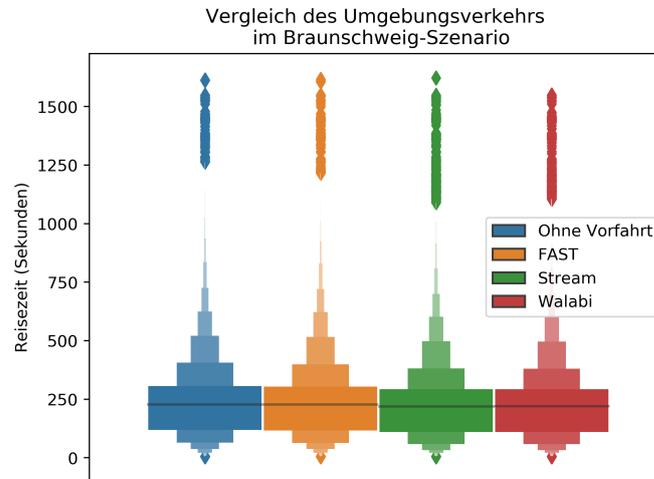


Abbildung 7.21: Vergleich der Reisezeiten des Umgebungsverkehrs im Braunschweig-Szenario (Korridor)

7.4.3 Stadt Braunschweig

In der Simulation des gesamten Stadtgebietes von Braunschweig wurden insgesamt 100 Fahrten der Einsatzfahrzeuge (10 unterschiedliche Routen je 10-mal simuliert zu unterschiedlichen Tageszeiten) gemeinsam in Abbildung 7.22 ausgewertet. Hierbei ist die Reisezeit bei den unterschiedlichen Priorisierungsalgorithmen dargestellt. Wie auch bei den anderen Szenarien werden die längsten Reisezeiten bei den Einsatzfahrzeugen, die ohne jegliche Bevorzugung fahren, erzielt (durchschnittliche Reisezeit: 540,4 Sekunden, Median: 482 Sekunden). Der FAST-Algorithmus erzielt eine Reisezeitverkürzung von im Schnitt 69 Sekunden (durchschnittliche Reisezeit: 471,4 Sekunden, Median: 405 Sekunden). Die Reisezeit bei der Verwendung des Stream-Algorithmus sind erneut um 62,2 Sekunden kürzer als beim FAST-Algorithmus (durchschnittliche Reisezeit: 409,2 Sekunden, Median: 353 Sekunden). Die Simulationsergebnisse für den Walabi-Algorithmus sind im Durchschnitt minimal besser (7,7 Sekunden) als für den Stream-Algorithmus, jedoch ist der Median leicht höher (durchschnittliche Reisezeit: 401,5 Sekunden, Median: 360 Sekunden). Der Walabi-Ansatz ist jedoch in der Lage, dass die Ausreißer nicht so extrem ausfallen (längste Reisezeit bei Stream: 1.128 Sekunden und bei Walabi: 916 Sekunden). Dies würde für eine Einsatzfahrt bedeuten, dass bei extrem ungünstigen Verkehrsbedingungen, im schlechtesten Fall kürzer als bei den anderen Priorisierungsansätzen wäre.

Abschließend bezogen auf das Braunschweig-Szenario stellt sich die Frage, ob die realen Einsatzfahrten mit dem Walabi-Ansatz in dem Maße verbessert werden könnten, dass für die ausgewählten Routen die Hilfsfristen eingehalten werden können. Hierfür wurde in Tabelle 7.1 die Routen mit ihrer gefahrenen sowie mit Unterstützung des Walabi-Ansatz simulierten Reisezeit aufgeführt. Bei allen Routen ist die durchschnittlich simulierte Reisezeit kürzer als die real gefahrene. Während bei den realen Einsatzfahrten die Hilfsfrist nicht eingehalten werden konnte und sich Reisezeiten von länger als 13 Minuten ergaben, waren die simulierten Reisezeiten bei

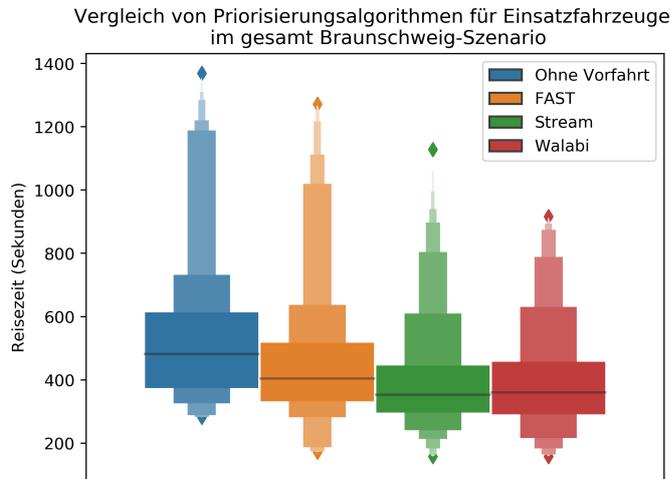


Abbildung 7.22: Vergleich der Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge im gesamt Braunschweig-Szenario

neun von zehn im Durchschnitt kürzer als 13 Minuten und bei acht Einsatzfahrten kürzer als acht Minuten.

Wenn statt der durchschnittlichen Reisezeiten die schlechteste simulierte Reisezeit betrachtet wird, zeigen die Ergebnisse immer noch eine Reisezeitverbesserung für die Einsatzfahrten. Bei acht von zehn Routen liegt die längste Reisezeit immer noch unter 13 Minuten bzw. bei sechs Routen unter acht Minuten. Nur in einer Simulation war, im schlechtesten Fall, die Reisezeit länger als bei dem real gefahrenen Einsatz.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass durch LSA-Priorisierung (insbesondere dem Walabi-Ansatz) die Einsatzfahrzeuge in Braunschweig dabei unterstützt werden können ihre Hilfsfristen einzuhalten und den Einsatzort so schnell wie möglich zu erreichen.

Bei der Auswertung der Braunschweig-Szenarien fällt jedoch auch auf, dass die Priorisierungsansätze es nicht immer schaffen eine Einsatzfahrt ohne jegliche Verzögerungen zu ermöglichen. Hierfür sind verschiedene Gründe möglich. Abstrakte Szenarien, die künstlich erstellt werden, sind stark vereinfacht, hingegen treten in Verkehrsnetzen aus realen Städten viele Sondersituationen auf, die unter Umständen manuelle Anpassungen benötigen. So werden beim Walabi-Ansatz zwei Knotenpunkt, die direkt hintereinander liegen, koordiniert betrachtet und frei geräumt. Jedoch erkennt der Algorithmus zurzeit noch nicht automatisch, wenn sich zwischen den beiden kontrollierten Knotenpunkten noch weitere unkontrollierte Knotenpunkte befinden. Insbesondere bei einem stark ausgelasteten Straßennetz kann es hierdurch zu stärkeren Verzögerungen kommen. Ein weiterer Grund für die entstandenen Verzögerung entstehen, indem der Umgebungsverkehr langsamer fährt als das Einsatzfahrzeug, welches durch fehlende Überholmöglichkeiten die Geschwindigkeit ebenfalls reduzieren muss.

Tabelle 7.1: Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Walabi-Algorithmus und realen Fahrzeit in Braunschweig

Route	gefahrte Reisezeit (Minuten)	∅ simulierte Reisezeit (Minuten)	Min. simulierte Reisezeit (Minuten)	Max. simulierte Reisezeit (Minuten)	Anzahl LSAs
1	20,8	9,0	7,8	12,7	4
2	14,2	13,6	11,9	15,3	24
3	14,8	5,2	4,4	6,5	7
4	20,1	3,9	2,6	13,3	8
5	17,6	3,7	3,5	4,1	7
6	15,1	6,5	5,8	7,6	12
7	18,4	7,5	6,8	8,1	11
8	18,7	5,2	4,4	5,8	3
9	35,5	6,4	5,5	7,2	3
10	18,6	5,8	5,2	6,5	10

7.5 Zusammenfassung

Alle simulierten Szenarien kommen zu einem ähnlichen Ergebnis: die besten Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge werden durch das Walabi-Verfahren erzielt. Der Stream-Ansatz hat in der Regel bei kleinen Verkehrsstärken vergleichbare Ergebnisse wie Walabi, jedoch werden die Reisezeiten bei höheren Verkehrsstärken hierbei schlechter. Bei den Simulationsergebnissen in Braunschweig unterscheiden sich die Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge bei dem Stream- und dem Walabi-Ansatz nicht besonders stark. Der FAST-Ansatz hat meistens nur einen geringen Reisezeit-Vorteil gegenüber einem Einsatzfahrzeug ohne Priorisierung und hat dementsprechend die schlechtesten Ergebnisse von den Priorisierungsalgorithmen.

Bei der Analyse der Reisezeiten des Umgebungsverkehrs konnten keine signifikanten Unterschiede beim Walabi-Verfahren, verglichen mit einer Einsatzfahrt ohne Priorisierung, festgestellt werden. Das Ergebnis legt nahe, dass zumindest bei einer einzelnen Einsatzfahrt der Nachteil für den Umgebungsverkehr vernachlässigbar ist. In weiteren Arbeiten könnte untersucht werden, wie es sich auswirken würde, wenn in kurzen Abständen mehrere Einsatzfahrzeuge die gleiche Route fahren würden.

8

Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und der neue Forschungsbeitrag herausgestellt. Zudem wird ein Ausblick darüber gegeben, welche Forschungsfragen in weiteren Arbeiten vertieft werden können.

8.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde an Hand von realen Verkehrsdaten ein mikroskopisches Verkehrsmodell von Einsatzfahrzeugen entwickelt und implementiert. Zudem wurde ein Konzept zur Priorisierung von Einsatzfahrzeugen erstellt, simulativ ausgewertet und mit bestehenden Verfahren verglichen. Der wesentlichen Vorteil des entwickelten Verfahrens, verglichen mit bereits existierenden Ansätzen, ist es, dass mehrere Knotenpunkte koordiniert betrachtet werden und abhängig zur aktuellen Verkehrslage die optimale Grünzeit bestimmt wird. Am Anfang dieser Arbeit wurden hierfür verschiedene Forschungsfragen aufgestellt und im weiteren Verlauf beantwortet. Diese Fragen werden im Folgenden wieder aufgegriffen und zusammengefasst in den Abschnitten Verkehrssicherheit, Verkehrsunterstützung und Verkehrssimulation beantwortet.

8.1.1 Verkehrssicherheit

Motivation dieser Arbeit war es die Verkehrssicherheit von Einsatzfahrzeugen zu erhöhen. Zu Anfang wurde festgestellt, dass Einsatzfahrzeuge bei einer Einsatzfahrt mit Blaulicht und Martinshorn eine erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit haben. Mittels Auswertung von Unfallberichten bei Einsatzfahrten wurden die Hintergründe und Ursachen der Unfälle evaluiert.

Wodurch kommt es zu der erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit von Einsatzfahrzeugen?

Die erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Ein großes Risiko existiert dadurch, dass Einsatzfahrzeuge mit Sonder- und Wegerechten fahren und dadurch die Vorschriften der StVO missachten dürfen. Dadurch können Einsatzfahrzeuge z.B. Rotlichtverstöße begehen, mit erhöhter Geschwindigkeit fahren oder die Fahrbahn der Gegenrichtung befahren. Im komplexen Verkehrsgeschehen ist es allerdings sowohl für den Einsatzwagenfahrer als auch für den Umgebungsverkehr nicht immer ersichtlich, welches Verhalten in den einzelnen Situationen richtig ist. So wissen z.B. Einsatzwagenfahrer nicht, ob der Umgebungsverkehr sie bemerkt hat und der Umgebungsverkehr realisiert häufig relativ spät, dass sich ein Einsatzfahrzeug nähert. Sowohl Blaulicht als auch Martinshorn werden im Stadtverkehr vom Umgebungsverkehr relativ spät wahrgenommen, außerdem können die Richtung und Route des Einsatzfahrzeugs nicht präzise vorausgesehen werden. Zudem haben Einsatzkräfte kaum die Möglichkeit das Fahren von Einsatzfahrzeugen unter realistischen Bedingungen risikofrei zu trainieren. Und dabei bedeutet jeder Einsatz auch enormen Stress für Einsatzkräfte.

Welche Bereiche sind für Einsatzfahrzeuge besonders riskant?

Für Einsatzfahrzeuge sind insbesondere Knotenpunkten sehr risikoreich, in Bezug auf Verkehrsunfälle. Als Hauptunfallursache während einer Einsatzfahrt wurde bei 32 % der Unfälle das Überfahren von rot zeigenden LSAs angegeben. Der Grund hierfür ist, dass Knotenpunkte viel Konfliktpotential bieten durch die sich kreuzenden Verkehrsströme. Insbesondere in Städten sind Knotenpunkte nicht gut einsehbar und sind daher für Einsatzwagenfahrer schwer einzuschätzen.

8.1.2 Verkehrsunterstützung

Ein neuer wissenschaftlicher Beitrag, dieser Forschungsarbeit, besteht in der Erstellung einer Verkehrsmanagementstrategie für Einsatzfahrzeug. Hierfür wurden zunächst Verkehrsdaten von Einsatzfahrten ausgewertet, um neue Erkenntnisse über die Probleme und Anforderungen von Einsatzfahrzeugen zu erhalten.

Welche Verkehrsprobleme treten bei Einsatzfahrten auf?

Einsatzfahrzeuge haben während einer Einsatzfahrt hauptsächlich zwei Problembe-
reiche: das Unfallrisiko und so schnell wie möglich das Ziel zu erreichen. Hierbei wurde in der Datenauswertung festgestellt, dass Knotenpunkte die Bereiche sind bei denen sowohl das Unfallrisiko am höchsten ist, als auch viel Zeit bei der Einsatzfahrt verloren wird (im Durchschnitt eine Minute pro Einsatzfahrt).

Für Einsatzfahrzeuge ist es besonders wichtig, das Ziel schnellstmöglich zu erreichen, um rechtzeitig erste Hilfe leisten zu können und die Hilfsfristen in Deutschland einzuhalten. Bei der Auswertung der Hilfsfristen in Braunschweig kam heraus, dass 62 % der Einsätze innerhalb von 13 Minuten bzw. 86 % innerhalb von 8 Minuten erreicht werden konnten. Das zeigt, dass das Hilffsystem in Deutschland schon relativ gut ist, aber trotzdem noch Verbesserungspotential besteht.

Wie können Einsatzfahrzeuge unterstützt werden?

Sowohl die Verkehrssicherheit als auch die Reisezeiten könnten bei Einsatzfahrten deutlich verbessert werden, wenn Einsatzfahrzeuge eine freie Fahrt an allen Knotenpunkten hätten, ohne dass rote Signale bei einer LSA überfahren werden müssen. Dementsprechend würde eine Grüne Welle für Einsatzfahrzeuge helfen Unfälle durch Rotlichtverstöße zu reduzieren und gleichzeitig die Reisezeiten der Einsatzfahrten zu verkürzen. Zusätzlich würde sich der Stress für die Einsatzwagenfahrer während der Einsatzfahrt reduzieren. Dadurch könnten sich die Einsatzkräfte besser auf den bevorstehenden Einsatz konzentrieren.

Aus diesem Grund wurden Supportstrategien für Einsatzfahrzeuge untersucht und ein neues Konzept Namens Walabi vorgestellt. Um Einsatzfahrzeuge unterstützen zu können, sollen Einsatzfahrzeuge eine Grüne Welle bekommen. Diese ermöglicht es ihnen, die Knotenpunkte sicher zu überqueren und reduziert zudem die Reisezeiten. Hierfür wurde der Walabi-Ansatz präsentiert und mit zwei anderen Verfahren dem FAST- und dem Stream-Ansatz verglichen, die bereits in Tokio bzw. Böblingen eingesetzt werden. Um die Ansätze miteinander vergleichen zu können, wurden sie in der Verkehrssimulation SUMO umgesetzt und mit verschiedenen Szenarien simuliert.

Bei den Simulationsergebnissen kam heraus, dass das Walabi-Verfahren die besten Ergebnissen, bezogen auf die Reise- und Wartezeiten von den Einsatzfahrzeugen, erzielen konnte. Die entwickelte Verkehrsmanagementstrategie zeichnet sich durch folgenden Alleinstellungsmerkmale ab:

- **Verhinderung von Rotlichtverstößen:** Während bei anderen Verfahren (z.B. dem FAST-Ansatz) lediglich die Grünzeit verlängert wird, wird bei dem entwickelten Walabi-Verfahren die Richtung des Einsatzfahrzeuges so lange Bevorrechtigt bis das Einsatzfahrzeug die Knotenpunkte überquert hat. Dadurch wird sichergestellt, dass das Einsatzfahrzeug selbst durch unvorhergesehenen Verzögerung die LSA während einer Grünzeit erreicht.
- **Berücksichtigung der aktuellen Verkehrslage:** Bei dem entwickelten Ansatz wird die aktuelle Verkehrslage bei der Berechnung der optimalen Grünzeit mitberücksichtigt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Freigabezeit für das Einsatzfahrzeug so lange wie nötig aber so kurz wie möglich ist.
- **Systemkoordinierung:** Bei dem Walabi-Ansatz wird nicht nur ein einziger Knotenpunkt bei der Priorisierung berücksichtigt, sondern auch der Knotenpunkt stromabwärts. Wenn lokal an einem Knotenpunkt die Einsatzfahrzeuge bevorrechtigt werden, so hat dies auch Auswirkungen auf alle stromabwärtige Knotenpunkte, die durch die verlängerte Grünzeit der LSA nun stärker belastet werden. Alle anderen bestehenden Verfahren berücksichtigen den Aspekt der Systemsicht nicht.

8.1.3 Verkehrssimulation

Ein weiterer Beitrag zur Forschung, der in dieser Arbeit erstellt wurde, ist ein mikroskopisches Verkehrsmodell. Zur Erstellung dieses Modells wurden Verkehrsdaten

von Einsatzfahrten ausgewertet. Das Modell wurde in der Simulation SUMO umgesetzt. Die Ergebnisse aus der Datenauswertung lassen sich jedoch auch für andere Verkehrssimulationssystemen nutzen, um dort ein Einsatzfahrzeugmodell einzufügen.

Wie unterscheidet sich das Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen von dem normaler Pkws?

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das besondere Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen als Anforderungen eines Einsatzfahrzeugmodells festgehalten und beschrieben. Im Allgemeinen unterscheidet sich das Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen von dem restlichen Verkehr dadurch, dass sie Verkehrsregeln missachten dürfen und vom Umgebungsverkehr eine freie Bahn gewährt bekommen sollen. Hierfür wurden Verkehrsdaten aus Braunschweig von Einsatzfahrten mit und ohne Blaulicht verglichen. Es ergeben sich große Unterschiede in Betracht auf die gefahrenen Geschwindigkeiten.

Wie lässt sich das Fahrverhalten von Einsatzfahrzeugen in einer Simulation abbilden?

Da zum Stand der Forschung noch keine mikroskopische Verkehrssimulation Einsatzfahrzeuge vollständig modelliert und implementiert hatte, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein solches Einsatzfahrzeug-Modell entwickelt und vorgestellt. Dieses Modell umfasst:

- **Rettungsgassenbildung:** Der Umgebungsverkehr bildet eine Rettungsgasse, wenn sich ein Einsatzfahrzeug nähert (ab einer Entfernung von 25 Metern). Die Rettungsgassen werden von den Einsatzfahrzeugen mit einer maximalen Geschwindigkeit von 20 km/h befahren. Videoauswertungen ergaben, dass viele Verkehrsteilnehmer nicht adäquat auf das sich nähernde Einsatzfahrzeug reagieren (in 34,4% der Fälle wurde gar nicht reagiert, bei 46,9% bei einer Entfernung von unter 25 Metern). Daher wurde ebenfalls eine verzögerte Reaktion in Abhängigkeit zu der Distanz des Einsatzfahrzeuges eingeführt.
- **Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit:** Während einer Einsatzfahrt wird im durchschnitt 28% schneller gefahren als bei einer Fahrt ohne Blaulicht und Martinshorn.
- **Bevorrechtigung an Knotenpunkten:** Die Einsatzfahrzeuge sind auch in der Simulation in der Lage einen Rotlichtverstoß zu begehen.
- **Überholen über die Fahrbahn des Gegenverkehrs:** Wenn die Verkehrslage es zulässt ist es möglich, dass Einsatzfahrzeuge auf die Fahrbahn des Gegenverkehrs zu wechseln.
- **Benutzung restriktierter Straßen:** Einsatzfahrzeuge können alle Straßentypen verwenden selbst Busfahrstreifen oder Radwege.

8.2 Ausblick

Durch die Erforschung dieser Fragen haben sich zwangsläufig eine Vielzahl neuer Forschungsfragen und Grenzen des Ansatzes ergeben. So ist zum Beispiel die Frage danach, was eine Verkehrssimulation eigentlich simulieren soll, eine wichtige komplexe Frage. In der Regel werden in einer Verkehrssimulation die Fahrzeuge so modelliert, dass es zu keinen Unfällen kommen kann. Kollisionen in der Simulation deuten meistens darauf hin, dass ein Fehler in der Implementierung oder im Modell besteht. Wir wissen jedoch aus der Wirklichkeit, dass der Verkehr nicht unfallfrei ist. Ein Modell ähnelt im Normalfall meistens dem Verhalten von autonomen Fahrzeugen, weil bei den Fahrzeugen ein Modell und künstliche Intelligenz dahintersteht und kein menschlicher Fahrer. Bei einer Verkehrssimulation wird versucht das Modell mit Parametern genauer an das Verhalten von Menschen anzugleichen, z.B. durch das Einführen von Reaktionszeiten oder stochastische Werte, um Schwankung oder Ungenauigkeiten in der Geschwindigkeitsanpassung oder dem Fahrzeugabstand herbeizuführen. Mit der Simulation können aber nicht alle unberechenbaren Verhaltensweisen von menschlichen Fahrern abgebildet werden. Es soll auch sicherlich nicht das Ziel der Simulation sein ein einzelnes Individuum konkret abzubilden, z.B. wenn illegale Autorennen durchgeführt werden oder eine Person unvorhersehbar auf der Straße stehen bleibt.

Solche außergewöhnlichen Ereignisse sollten im allgemeinen Verkehr eine untergeordnete Rolle spielen und daher muss nicht jedes Sonderverhalten perfekt nachsimuliert werden, sondern eher ein typisches allgemeines Verhalten. Doch auch da stellt sich die Frage, was ein typisches Verhalten ist. Da Menschen keine Maschinen sind, gehören zum typischen Verhalten auch Fehler und imperfektes Fahrverhalten dazu. So ist es bei der Simulation von Verkehr sicherlich immer ein gewisses Abwägen, wie sehr auf Sondersituationen eingegangen wird, um den Verkehr möglichst realistisch zu simulieren. Unter Umständen wird es einfacher, wenn nur noch autonome Fahrzeuge auf der Straße fahren, da dasselbe Fahrermodell des Fahrzeugs auch für die Simulation verwendet werden kann, wodurch eine realistische Simulation viel besser möglich ist. Das Forschungsfeld der Simulation wird aber gerade auch durch diesen komplexen Aspekt Mensch spannend und interessant.

Das Einsatzfahrzeugmodell, welches in dieser Arbeit entwickelt wurde, hat noch Potential weiterentwickelt und verbessert zu werden. So lässt sich zurzeit komplexeres Fehlverhalten oder auch kooperatives Fahrverhalten des Umgebungsverkehrs noch nicht simulieren. Das Modell könnte z.B. noch dadurch ergänzt werden, dass andere Fahrzeuge auf der Fahrbahn stehen bleiben oder zur Seite fahren, um das Einsatzfahrzeug überholen zu lassen. Auch das Verhalten, dass normale Pkws einen Rotlichtverstoß begehen oder auf den Gehweg ausweichen, um das Einsatzfahrzeug den Weg frei zu machen, wurde noch nicht umgesetzt. Außerdem hält sich in der Simulation der Umgebungsverkehr daran die Rettungsgasse nicht zu befahren. Allerdings kommt es immer wieder dazu, dass andere Fahrzeuge die Rettungsgasse nutzen, um selbst einen Zeitvorteil zu erzielen.

Zurzeit ist auch die Kombination von Rettungsgassenbildung und dem Überholen auf dem Fahrstreifen des Gegenverkehrs noch nicht möglich, d.h. wenn ein Einsatzfahrzeug in eine Rettungsgasse einfahren möchte, der Umgebungsverkehr aber zu lange zum Reagieren braucht, dann kann das Einsatzfahrzeug nicht wie in der Rea-

lität über den Fahrstreifen für den Gegenverkehr in den Bereich des Knotenpunktes hineinfahren.

In weiteren Arbeiten könnten auch noch weitere Daten von Einsatzfahrzeugen und dem Umgebungsverkehr genutzt werden, um noch genauere und bessere Aussagen darüber zu treffen, wie sich das Einsatzfahrzeug verhält. So ist die Entfernung wann der Umgebungsverkehr beginnt eine Rettungsgasse zu bilden aus den Videodaten nur geschätzt. Mit geeigneter technischer Unterstützung und weiteren Einsatzfahrten könnten quantitativ und qualitativ noch aussagekräftigere Daten ermittelt werden.

Auch bei der Forschung zur Priorisierung von Einsatzfahrzeugen haben sich verschiedene Grenzen und weitere mögliche Forschungsfragen ergeben. Der Walabi-Ansatz funktioniert so gut, da die LSA allwissend ist und durch Kommunikationstechnologie weiß, wie viele Fahrzeuge bei ihr warten. In der Realität wird dieser Fall sicher nicht sofort eintreten. Durch die Kombination verschiedener Technologien (Induktionsschleifen, V2X-Kommunikation, Bluetooth, Floating Car Data (FCD) etc.) und bestehender Verfahren (z.B. Rückstaulängenschätzungsverfahren) können relativ gute Schätzungen vorgenommen werden, um die fehlenden Informationen auszugleichen. Trotzdem wäre es interessant auszuwerten, wie sich die Ergebnisse mit verschiedenen Ausstattungsraten verschlechtern würden. Da sich der Walabi-Ansatz auf das ähnliche Wirkungsprinzip wie der Stream-Ansatz bezieht, bei dem keine weitere Informationen des Umgebungsverkehrs zur Verfügung stehen, ist davon auszugehen, dass das Walabi-Verfahren im schlimmsten Fall sich wie Stream verhält und vergleichbare Ergebnisse erzielt. Bei kleinen Verkehrsstärken sind die Reisezeiten von dem Walabi- und Stream-Verfahren gleich gut. Der Stream-Ansatz ist jedoch nicht so komplex und daher einfacher anwendbar. Daher wäre es auch denkbar den Stream-Ansatz großflächig und das Walabi-Verfahren nur in stark frequentierten Bereichen umzusetzen.

Ebenso wäre es hilfreich, wenn das Navigationsgerät Handlungsempfehlungen geben würde, damit sich die Autofahrer nicht durch die stressige Situation falsch verhalten. So könnte, das Navigationsgerät dazu auffordern die Geschwindigkeit zu halten bis sich eine geeignete Möglichkeit ergibt, um zur Seite zu fahren oder abzubiegen. Besonders vielversprechend ist dieser Aspekt, wenn der gesamte Verkehr autonom und vernetzt fahren würde. In so einen Fall könnten Einsatzfahrzeuge noch besser priorisiert werden, indem der Umgebungsverkehr ggf. zusätzlich noch umgeroutet werden kann. Zudem wäre es interessant zu untersuchen, wie viel Zeit hierdurch gewonnen werden kann und welche Verkehrsauswirkungen sich hierdurch ergeben.

Eine Grenze des vorgestellten Ansatzes wird erreicht, wenn mehrere Einsatzfahrzeuge gleichzeitig einen Einsatz haben und miteinander im Konflikt stehende Routen zur selben Zeit haben. Ein weiterer interessanter Forschungsansatz könnte es sein, neue Strategien zur Konfliktvermeidung zu entwickeln. In Bereichen in denen es nicht möglich ist eine Rettungsgasse zu bilden, könnte die LSA einen Knotenpunkt für alle Richtungen durch ein rotes Signal komplett sperren, um es den Einsatzfahrzeugen zu ermöglichen sicher über den Fahrstreifen des Gegenverkehrs in den Knotenpunkt hineinzufahren.

Zudem könnte es in Bereichen in denen sehr viele Einsatzfahrzeuge in einer kurzen Zeitspanne fahren dazu kommen, dass der Umgebungsverkehr sehr lange War-

tezeiten bekommt. In solchen Gebieten sollte bei der Bevorrechtigung darauf geachtet werden, benachteiligte Verkehrsrichtungen in der nächsten Umlaufzeit der LSA dynamisch eine längere Freigabezeit zu geben. Dadurch könnten mögliche Verkehrsstörungen, die durch die Einsatzfahrzeugpriorisierung entstehen würden, entgegen gewirkt werden.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen in dieser Arbeit, dass es für Einsatzwagenfahrer vorteilhaft wäre, wenn intelligente Verkehrsmanagementstrategien im Straßenverkehr umgesetzt werden würden.

Literatur

- [1] Stephan Bocking. „Verkehrsunfallanalyse bei der Nutzung von Sonder- und Wegerechten gemäß StVO“. In: *BGW Forschung* (2007). Hrsg. von Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst.
- [2] Jeffrey Goldberg u. a. „A simulation model for evaluating a set of emergency vehicle base locations: Development, validation, and usage“. In: *Socio-economic planning sciences* 24.2 (1990), S. 125–141.
- [3] Reinhard Schmiedel und Holger Behrendt. „Klassifizierung der Einsatzentscheidung und die Wirkungen auf die Notfallvorhaltung“. In: *Notfall & Rettungsmedizin* 5.8 (Dez. 2002), S. 588–591. ISSN: 1434-6222. URL: <https://doi.org/10.1007/s10049-002-0515-4>.
- [4] Andreas Buchenscheit u. a. „A VANET-based emergency vehicle warning system“. In: *Vehicular Networking Conference (VNC), 2009 IEEE*. IEEE. 2009, S. 1–8.
- [5] Statistisches Bundesamt. *Polizeilich erfasste Unfälle*. Abgerufen am 8.11.2018. 2017. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/UnfaelleVerunglueckte.html>.
- [6] Oliver Hempel. „Straßenverkehrsrecht und Rettungsdienst“. In: *Notfall+ Rettungsmedizin* 10.5 (2007), S. 367–371.
- [7] Manfred Unterkofler und Reinhard Schmiedel. „Verbesserung der Sicherheit bei Sondersignaleinsätzen. Bergisch-Gladbach, Info 34/95.“ In: *Wissenschaftliche Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen* 34/95 (1995).
- [8] BASt Bundesanstalt für Straßenwesen. *Ursachenuntersuchung innerörtlicher Unfallstellen. Wissenschaftliche Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen*. 1994.
- [9] C. Shawn Burke, Eduardo Salas und J. Peter Kincaid. „Emergency Vehicles that Become Accident Statistics: Understanding and Limiting Accidents Involving Emergency Vehicles“. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 45.4 (2001), S. 508–512.
- [10] Lee Burns. „So You Want To Drive an Ambulance?“ In: *Emergency medical services* 28 (1999), S. 53–58.
- [11] Brian J. Maguire u. a. „Occupational fatalities in emergency medical services: a hidden crisis“. In: *Annals of emergency medicine* 40.6 (2002), S. 625–632.

- [12] Shamsunnahar Yasmin, Sabreena Anowar und Richard Tay. „Effects of drivers’ actions on severity of emergency vehicle collisions“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2318 (2012), S. 90–97.
- [13] Robert Elling. „Dispelling myths on ambulance accidents.“ In: *JEMS: a journal of emergency medical services* 14.7 (1989), S. 60–64.
- [14] Andreas Leich u. a. „The Safety Impact of Additional Blue Lights of Rescue Vehicles“. In: *Transactions on Transport Sciences* (2018). URL: <https://elib.dlr.de/121173/>.
- [15] Laura Bieker. „Traffic safety evaluations for Emergency Vehicles“. In: *Young Researchers Seminar*. Juni 2015. URL: <http://elib.dlr.de/97829/>.
- [16] Laura Bieker-Walz u. a. „Evaluation of car-following-models at controlled intersections“. In: *European Simulation and Modelling Conference*. Bd. 31. Okt. 2017, S. 247–251. URL: <http://elib.dlr.de/115720/>.
- [17] Laura Bieker-Walz u. a. „Gaining insight into routing behaviors of emergency vehicle from real-world trajectories“. In: *European Transportation Conference*. Okt. 2018. URL: <https://elib.dlr.de/122233/>.
- [18] Laura Bieker-Walz, Yun-Pang Flötteröd und Alexander Sohr. „Modelling of Emergency Vehicles Route Choice with Use of Trajectory Data“. In: *MT-ITS*. Juni 2019. URL: <https://elib.dlr.de/127992/>.
- [19] Laura Bieker-Walz, Michael Behrisch und Marek Junghans. „Analysis of the traffic behavior of emergency vehicles in a microscopic traffic simulation“. In: *SUMO Conference 2018*. Bd. 2. EPiC Series in Engineering. Mai 2018, S. 1–13. URL: <https://elib.dlr.de/120851/>.
- [20] Laura Bieker. „Emergency Vehicle Prioritization using Vehicle-To-Infrastructure Communication“. In: *Young Researchers Seminar*. Juni 2011, S. 529–539. URL: <http://elib.dlr.de/70219/>.
- [21] Laura Bieker-Walz. „Self-organizing traffic management for emergency vehicles“. In: *AMAA*. Sep. 2017. URL: <http://elib.dlr.de/114847/>.
- [22] Laura Bieker-Walz. „Cooperative Traffic Management for Emergency Vehicles in the City of Bologna“. In: *SUMO 2017 – Towards Simulation for Autonomous Mobility*. Bd. 31. Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik. Mai 2017, S. 135–141. URL: <http://elib.dlr.de/118034/>.
- [23] Laura Bieker-Walz und Michael Behrisch. „Modelling green waves for emergency vehicles using connected traffic data“. In: *SUMO Conference 2019*. Hrsg. von Melanie Weber, Laura Bieker-Walz und Michael Behrische. EPiC Series in Computing 62. EasyChair, Mai 2019, S. 1–11. URL: <https://elib.dlr.de/128822/>.
- [24] Reinhard Schmiedel und Holger Behrendt. „Leistungen des Rettungsdienstes 2008/09“. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: Unterreihe Mensch und Sicherheit* 217 (2011).

- [25] Johann Peter Haus. *Entscheidungshilfe für die ärztliche Verordnung einer Krankenbeförderung*. https://www.rettungsdienst.brk.de/fileadmin/Eigene_Bilder_und_Videos/LGST/LGST_Dokumente/Entscheidungshilfe_fuer_die_aerztliche_Verordnung_einer_Krankenbefoerderung.pdf. Abgerufen am 4. April 2019. 2013.
- [26] Wikipedia. *Streifenwagen*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Streifenwagen>. Abgerufen am 29. Mai 2019.
- [27] Thomas Hochstein. *Sonderrechte und Wegerecht: Gesetzliche Regelung*. <https://th-h.de/law/sandrd/sonderwegerecht/>. Abgerufen am 20. März 2019. 2019.
- [28] *Optimierungsmethoden im Verkehr*. Abgerufen am 14. August 2019. OptiV.
- [29] Werner Brilon u. a. „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“. In: *Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE 2 (2001)*, R96A.
- [30] Alexander Haag. „Konzeption und Bewertung einer zentralen Entscheidungsinstanz zur Verkehrsoptimierung an Kreuzungen“. Diplomarbeit. Universität Karlsruhe, 2006.
- [31] Forschungsgesellschaft für Straßen. *VERKEHRSWESEN (2003b): Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)–Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr, Teilfortschreibung 2003*. 2003.
- [32] Werner Schnabel und Dieter Lohse. *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 1-Straßenverkehrstechnik*. Bd. 1. Beuth Verlag, 2011.
- [33] Robert Oertel. „Verlustzeitbasierte Steuerung von Lichtsignalanlagen“. ISSN 1866-721X. Diss. Institut für Verkehrssystemtechnik, 2015. URL: <http://elib.dlr.de/97398/>.
- [34] Stefan Lämmer. „Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest“. In: *Straßenverkehrstechnik* 60.3 (2016).
- [35] Dennis I. Robertson. „TRANSYT: a traffic network study tool“. In: (1969).
- [36] Stefan Lämmer. „Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2007.
- [37] Dennis I. Robertson und R. David Bretherton. „Optimizing networks of traffic signals in real time-the SCOOT method“. In: *IEEE Transactions on vehicular technology* 40.1 (1991), S. 11–15.
- [38] Vito Mauro und C. Di Taranto. „Utopia“. In: *Control, computers, communications in transportation*. Elsevier, 1990, S. 245–252.
- [39] D. Pavleski, D. Koltovska-Nechoska und E. Ivanjko. „Evaluation of adaptive traffic control system UTOPIA using microscopic simulation“. In: *2017 International Symposium ELMAR*. Sep. 2017, S. 17–20.
- [40] Swarco Group. *UTOPIA*. <https://www.swarco.com/de/Produkte-Services/Traffic-Management/Urbanes-Verkehrsmanagement/Systemeff%C3%BCr-den-Stadtverkehr/UTOPIA>. Abgerufen am 9. November 2018. 2018.

- [41] Pitu Mirchandani und Fei-Yue Wang. „RHODES to intelligent transportation systems“. In: *IEEE Intelligent Systems* 20.1 (2005), S. 10–15.
- [42] Bernhard Friedrich. „Steuerung von Lichtsignalanlagen: BALANCE- ein neuer Ansatz“. In: *Straßenverkehrstechnik* 44.7 (2000).
- [43] Fritz Busch und Günter Kruse. „MOTION for SITRAFFIC:a modern approach to urban traffic control“. In: *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*. IEEE. 2001, S. 61–64.
- [44] Siemens AG. *Adaptive network control Sitraffic Motion MX: The intelligent answer to congestion and pollution*. <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/mobility/road/traffic-management/strategic-management-and-coordination/adaptive-network-control/documents/sitraffic-motion-mx-en.pdf>. Abgerufen am 9. November 2018. 2013.
- [45] Carlos Gershenson. „Self-organizing traffic lights“. In: *Complex Systems* 16 1 (2005), S. 29–53.
- [46] Markus Rausch. „Ereignisorientierte Routenwahl in spontan gestörten Stadtstraßennetzen zur Anwendung eines selbstorganisierten Störfallmanagements“. Diss. Technische Universität Dresden, 2015.
- [47] Matthias Mändl und Jürgen Schafberger. *Untersuchung der Richtungsordnung von akustischen Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebeneutzer im Innenraum von Kraftfahrzeugen*. Abgerufen am 1. Februar 2018. 2015. URL: <https://www.oth-aw.de/files/oth-aw/Labore/MBUT/laus/Dokumente/Auszug-Forschungsbericht-2015.pdf>.
- [48] Uwe Golder. „Unfälle mit Fahrzeugen mit Sonderrechten“. In: *Verkehrs-RechtsReport* 9 (2008).
- [49] Thomas Strang. *Intelligent Transportation Systems: European C2C Activities*. 2010. URL: <http://www.sti-innsbruck.at/sites/default/files/courses/fileadmin/documents/its-ss10/08-its-C2C.pdf%20accessed%20January%2030,%202017>.
- [50] Ali Haghani, Huijun Hu und Qiang Tian. „An optimization model for real-time emergency vehicle dispatching and routing“. In: *82nd annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*. Citeseer. 2003.
- [51] Marko Woelki, Ting Lu und Sten Ruppe. „Ranking of alternatives for emergency routing on urban road networks“. In: *Urban Transport 2015*. Hrsg. von C. A. Brebbia. Bd. 146. WIT Transactions on the Built Environment. WIT Press, 2015, S. 591–598. URL: <http://elib.dlr.de/97461/>.
- [52] V. Ravish u. a. „Mobility Model with Inter Vehicular Communication Based Navigation for Emergency Vehicles“. In: *Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST2010)*. Nov. 2010.
- [53] Jiawen Wang, Xiaoguang Yang und Wanjing Ma. „Development of Degree-of-Priority Based Preemption Control Strategy for Emergency Vehicle Operation“. In: *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*. 13-1891. 2013.

-
- [54] Elham Sharifi, Ali Haghani und Hadi Sadrsadat. „An Optimization Model for Dispatching Heterogeneous Emergency Vehicles“. In: *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*. 13-1891. 2013, S. 23.
- [55] Eric Nelson und Darcy Bullock. „Impact of emergency vehicle preemption on signalized corridor operation: An evaluation“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1727 (2000), S. 1–11.
- [56] Maram Bani Younes und Azzedine Boukerche. „An efficient dynamic traffic light scheduling algorithm considering emergency vehicles for intelligent transportation systems“. In: *Wireless Networks* (2017), S. 1–13.
- [57] Wenwen Kang u. a. „Traffic signal coordination for emergency vehicles“. In: *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*. IEEE. 2014, S. 157–161.
- [58] Joji Maki und Masahide Hatakeyama. „Development of Fast Emergency Vehicle Preemption Systems“. In: *18th ITS World Congress*. 2011.
- [59] Charmaine Toy u. a. „Emergency vehicle maneuvers and control laws for automated highway systems“. In: *IEEE Transactions on intelligent transportation systems* 3.2 (2002), S. 109–119.
- [60] Mecit Cetin und Craig A. Jordan. „Making way for emergency vehicles at oversaturated signals under vehicle-to-vehicle communications“. In: *2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2012)*. Juli 2012, S. 279–284.
- [61] Craig Jordan, Mecit Cetin und Robert Michael Robinson. „Clearing Paths for Emergency Vehicles Using Vehicle-to-Vehicle Communication“. In: 13-1891 (2013).
- [62] W. Schnabel und D. Lohse. *Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Verkehrsplanung / unter Mitarb. von Lothar Lätsch Bd. 2*. Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Verlag für Bauwesen., 1997. ISBN: 9783345005671. URL: https://books.google.de/books?id=ahUh%5C_XeW2QMC.
- [63] Shiguang Jin. „Beitrag zum Ermitteln von Prioritätsstufen zur fahrtkonkreten Beeinflussung von Lichtsignalanlagen und zur Anschlusssicherung im ÖPNV“. Diss. 2012.
- [64] Ronald Nippold und Robert Oertel. *HALI Berlin: Bevorrechtigung von Sondereinsatzfahrzeugen an Lichtsignalanlagen mit Galileo PRS*. 2018.
- [65] Institut für Automation und Kommunikation e. V. *SIRENE: Secure and Intelligent Road Emergency Network*. <https://sirene.ifak.eu/>. Abgerufen am 14. November 2018. 2018.
- [66] Lars Schnieder und Karsten Lemmer. „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität-eine Plattform für die verkehrswissenschaftliche Forschung und die Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste“. In: *Internationales Verkehrsweisen* 64.4 (2012), S. 62–63.

- [67] Siemens AG. *Sitraffic Stream: Satellitengestütztes Bevorrechtigungssystem*. <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/mobility/road/connected-mobility-solutions/traffic-prioritization/stream/documents/sitraffic-stream-fire-brigade-v2-de-180223.pdf>. Aberufen am 14.11.2018. 2018.
- [68] SMEV AG *Smart Mobility Evolution*. Abgerufen am 14. November 2019. SMEV AG.
- [69] OpenStreetMap contributors. *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/copyright>. Abgerufen am 7. Februar 2018. 2018.
- [70] Jirou Kotani, Katsunori Yamazaki und Masayuki Jinno. „Expanding Fast Emergency Vehicle Preemption System in Tokyo“. In: *18th ITS World Congress TransCoreITS AmericaERTICO-ITS EuropeITS Asia-Pacific*. 2011.
- [71] Augsburgs Allgemeine. *Grüne Welle für Rettungswagen in Friedberg*. <https://www.augsburger-allgemeine.de/friedberg/Gruene-Welle-fuer-Rettungswagen-in-Friedberg-id51123921.html>. Abgerufen am 14. November 2018. 2018.
- [72] Global Traffic Technologies, LLC (GTT). *Town of Brookhaven upgrades to Opticom GPS to maintain fast, safe and affordable emergency response*. https://www.gtt.com/wp-content/uploads/79-1000-0335-0_B-Brookhaven-NY-Case-Study1.pdf. Aberufen am 14.11.2018. 2018.
- [73] Global Traffic Technologies, LLC (GTT). „Liberty Township positions itself as the regional leader for emergency response“. http://www.gtt.com/wp-content/uploads/79-1000-0787-0_A-Liberty-Township-0H-Case-Study.pdf. Aberufen am 14.11.2018. 2018.
- [74] Global Traffic Technologies, LLC (GTT). „Bellevue improves maintenance, reduces operating costs“. <https://www.gtt.com/wp-content/uploads/Bellevue-WA-Opticom-CMS-Case-Study.pdf>. Aberufen am 14.11.2018. 2018.
- [75] Global Traffic Technologies, LLC (GTT). „Traffic Signal Priority Control for emergency vehicle preemption“. <http://www.gtt.com/wp-content/uploads/Traffic-signal-priority-control-for-emergency-vehicle-pre\protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}{-}emption-in-Savannah-GA.pdf>. Aberufen am 14.11.2018. 2018.
- [76] Green Way Systems. *Was ist Traffic Green?* https://www.greenwaysystems.de/web/pdf/Produktblatt_Traffic_Green.pdf. Abgerufen am 14. November 2018. 2018.
- [77] Stefan Krauß. „Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics“. Diss. Mathematisches Institut, Universität zu Köln, 1998, S. 116.
- [78] Jaume Barceló u. a. *Fundamentals of traffic simulation*. Bd. 145. Springer, 2010.
- [79] Stefan Detering. „Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen.“ Diss. Technische Universität Braunschweig, 2011.

-
- [80] Rainer Wiedemann und Thomas Schwerdtfeger. „Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen (DYNEMO)“. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 500 (1987).
- [81] Nils Gustaf Eissfeldt. „Vehicle-based modelling of traffic. Theory and application to environmental impact modelling“. Diss. Universität zu Köln, 2004.
- [82] Mark Brackstone und Mike McDonald. „Car-following: a historical review“. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 2.4 (1999), S. 181–196. ISSN: 1369-8478. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(00\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(00)00005-X). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136984780000005X>.
- [83] Jörg Dallmeyer. „Verkehrssimulationssysteme“. In: *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*. Springer, 2014, S. 49–66.
- [84] Constantinos Antoniou u. a. *Traffic Simulation: Case for guidelines*. Techn. Ber. Joint Reserch Centre, Feb. 2014. URL: <https://elib.dlr.de/88212/>.
- [85] PTV. *Porsche SE is taking over PTV Group*. Abgerufen am 15. August 2019. PTV Group.
- [86] PTV. „VISSIM 5.40- Benutzerhandbuch“. In: *PTV Planung Transport Verkehr AG, Germany* (2011).
- [87] PTV. *PTV VISSIM-MODULES*. Abgerufen am 16. August 2019. PTV Group.
- [88] Peter Hidas. „Modelling individual behaviour in microsimulation models“. In: *Australian Transport Research Forum*. 2005.
- [89] Andreas Horni, Kai Nagel und Kay Axhausen, Hrsg. *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London: Ubiquity Press, Aug. 2016, S. 618. ISBN: 978-1-909188-75-4, 978-1-909188-76-1, 978-1-909188-77-8, 978-1-909188-78-5.
- [90] Nurhan Cetin und Kai Nagel. „Parallel queue model approach to traffic microsimulations“. In: *Proceedings of Swiss Transportation Research Conference*. 2002.
- [91] Quadstone Paramics. *Quadstone Paramics*. <http://www.paramics-online.com/>. Abgerufen am 14. November 2018. 2018.
- [92] Mohamed Essa und Tarek Sayed. „A comparison between PARAMICS and VISSIM in estimating automated field-measured traffic conflicts at signalized intersections“. In: *Journal of advanced transportation* 50.5 (2016), S. 897–917.
- [93] Abolhassan Halati, Henry Lieu und Susan Walker. „CORSIM-corridor traffic simulation model“. In: *Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century: Challenges, Innovations, and Opportunities* Urban Transportation Division, ASCE; Highway Division, ASCE; Federal Highway Administration, USDOT; and National Highway Traffic Safety Administration, USDOT. 1997.
- [94] Brent C. Crowther. „A Comparison of CORSIM and INTEGRATION for the Modeling of Stationary Bottlenecks“. Diss. Virginia Tech, 2001.

- [95] Pablo Alvarez Lopez u. a. „Microscopic Traffic Simulation using SUMO“. In: *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 2018. URL: <https://elib.dlr.de/124092/>.
- [96] Stefan Krauß, Peter Wagner und Christian Gawron. „Metastable states in a microscopic model of traffic flow“. In: *Phys. Rev. E* 55 (5 Mai 1997), S. 5597–5602. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.55.5597>.
- [97] Andreas Leich u. a. *COLOMBO Deliverable 7.6: Project Final Report*. Jan. 2016.
- [98] Yun-Pang Flötteröd und Laura Bieker. „Demand-oriented traffic management for incidents and disasters“. In: *Second International Conference on Evacuation Modeling and Management (ICEM 2012)*. 2012.
- [99] Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. *Straßenverkehrsunfälle innerhalb geschlossener Ortschaften*. Abgerufen am 19.06.2019. 2017. URL: <https://www.dvr.de/unfallstatistik/de/innerorts/>.
- [100] Sascha Knake-Langhorst und Kay Gimm. „AIM Research Intersection: Instrument for traffic detection and behavior assessment for a complex urban intersection“. In: *Journal of large-scale research facilities* 2.A65 (2016).
- [101] QGIS Contributors. *QGIS User Guide*. Abgerufen am 8. März 2018. 2018. URL: <https://docs.qgis.org/2.18/pdf/en/QGIS-2.18-UserGuide-en.pdf>.
- [102] Robert Kaiser. *Qualitative Experteninterviews: Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung*. Springer-Verlag, 2014.
- [103] *Bing maps*. Abgerufen am 26. Juni 2019. Microsoft.
- [104] Ulrich Grünewald. *Brandstatistik: Wie oft brennt es wann, wo und warum?* Abgerufen am 24. Juni 2019. WDR. 2018.
- [105] Li Zhang u. a. „Simulation modeling and application with emergency vehicle presence in CORSIM“. In: *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th*. IEEE. 2009, S. 1–7.
- [106] Florian Weinert und Michael Düring. „Development and Assessment of Cooperative V2X Applications for Emergency Vehicles in an Urban Environment Enabled by Behavioral Models“. In: *Modeling Mobility with Open Data*. Hrsg. von Michael Behrisch und Melanie Weber. Cham: Springer International Publishing, 2015, S. 125–153. ISBN: 978-3-319-15024-6.
- [107] *Traffic management for everyday road incidents*. Abgerufen am 28. Juni 2019. Aimsun.next.
- [108] Jiawen Wang u. a. „Travel time estimation model for emergency vehicles under preemption control“. In: *Procedia-social and behavioral sciences* 96 (2013), S. 2147–2158.
- [109] *Mikroskopische Verkehrssimulation mit VISSIM*. Abgerufen am 21. August 2019. PTV Group.
- [110] Forum Verlag Herkert GmbH. *Die rote Ampel an der ich stehe bleibt dauerhaft rot. Kann ich trotzdem weiterfahren?* <https://www.stvo.de/info/faq/165-ampel-bleibt-rot>. Abgerufen am 21. März 2019. 2019.

-
- [111] Thorsten Neumann. „Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten“. Diss. Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR, 2011. URL: <http://elib.dlr.de/66672/>.
- [112] Dieter Lohse und Werner Schnabel. *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2-Verkehrsplanung*. Beuth Verlag, 2011.
- [113] Manfred Boltze und Axel Wolfermann. „Der Einfluss von Zwischenzeiten auf die Kapazität von Lichtsignalanlagen“. In: *Tagungsbericht zur HEUREKA*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, März 2011.
- [114] Systemtechnik und Bildauswertung IOSB Fraunhofer-Institut für Optik. *Martinshorn-Erkennungs- und Warnsystem*. 2014. URL: http://www.rem2030.de/rem2030-wAssets/docs/downloads/03_Software/Martinshorn_Erkennung.pdf.
- [115] Daniel Krajzewicz u. a. „Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility“. In: *International Journal On Advances in Systems and Measurements*. International Journal On Advances in Systems and Measurements 5.3&4 (Dez. 2012), S. 128–138. URL: <http://elib.dlr.de/80483/>.
- [116] Constantinos Antoniou u. a. „Traffic simulation: case for guidelines“. In: *Scientific and Technical Research Series* (2014).
- [117] FGSV Verlag Köln, Hrsg. *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation - Grundlagen und Anwendung*. Bd. 388. FGSV Verlag Köln, 2006. ISBN: 3-939715-11-5.
- [118] Feuerwehr Braunschweig. *Zahlen, Daten, Fakten: Die Feuerwehr Braunschweig im Jahr 2012*. Abgerufen am 4. April 2018. 2012. URL: https://www.braunschweig.de/leben/gesundheit/feuerwehr/JB_2012_intern_2013-07-09.pdf.
- [119] Matthias Heinrichs u. a. „Disaggregated car fleets in microscopic travel demand modelling“. In: *Procedia Computer Science* 83 (2016), S. 155–162.
- [120] Heike Hofmann, Karen Kafadar und Hadley Wickham. *Letter-value plots: Boxplots for large data*. Techn. Ber. had.co.nz, 2011.

Unfallberichte mit Einsatzfahrzeugen

- [121] Augsburger Allgemeine. *Einsatzfahrt endet im Mühlbach*. <http://www.augsburger-allgemeine.de/illertissen/Einsatzfahrt-endet-im-Muehlbach-id7966901.html>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [122] Augsburger Allgemeine. *Rettungswagen erfasst Betrunkene*. <http://www.augsburger-allgemeine.de/bayern/Rettungswagen-erfasst-Betrunkene-id7164231.html>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [123] Augsburger Allgemeine. *Schneeglätte verursacht Verkehrsunfälle*. <http://www.augsburger-allgemeine.de/donauwoerth/Schneeglaette-verursacht-Verkehrsunfaelle-id7427876.html>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [124] Berliner Zeitung. *Golf rammt Krankenwagen um*. <http://www.bz-berlin.de/artikel-archiv/unfall-golf-rammt-krankenwagen-um>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [125] Berliner Zeitung. *VW Polo kracht in Feuerwehrgewagen*. <http://www.bz-berlin.de/artikel-archiv/vw-polo-kracht-in-feuerwehrgewagen>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [126] Bild GMBH. *Auto mit Spenderherz verunglückt*. <http://www.bild.de/regional/hannover/auto-mit-spenderherz-verunglueckt--op-glueckt-12378950.bild.html>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [127] Bild GMBH. *Tödlicher Unfall zwischen Rettungswagen*. <http://www.bild.de/regional/leipzig/toedlicher-unfall-zwischen-rettungswagen-12894014.bild.html>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [128] Bild GMBH. *Rettungswagen rammt Auto drei Schwerverletzte*. <http://www.bild.de/regional/hannover/rettungswagen-rammt-auto-drei-schwererletzte-13956168.bild.html>. Abgerufen am 12. Februar 2015. 2010.
- [129] Bild GMBH. *Zwei Tote und vier Verletzte bei Unfall*. <http://www.bild.de/regional/hamburg/zwei-tote-und-vier-verletzte-bei-unfall-mit-12660394.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [130] Bild GMBH. *Unfall bei Blaulichtfahrt*. <http://www.bild.de/regional/koeln/unfall-bei-blaulichtfahrt--vier-schwererletzte-13820290.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [131] Bild GMBH. *Autofahrerin rammt Rettungswagen mit Patient*. <http://www.bild.de/regional/leipzig/autofahrerin-rammt-rettungswagen-mit-patient-11038930.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.

- [132] Bild GMBH. *Blebschaden bei Unfall mit Polizeiauto.* <http://www.bild.de/regional/ruhrgebiet/blebschaden-bei-unfall-mit-polizeiauto-13241416.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [133] Bild GMBH. *Streifenwagen fährt Neunjährigen an.* <http://www.bild.de/regional/bremen/streifenwagen-faehrt-neunjaehrigen-an-10583422.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [134] Bild GMBH. *Zweimal unverschuldet in Unfälle verwickelt.* <http://www.bild.de/regional/stuttgart/zweimal-unverschuldet-in-unfaelle-verwickelt-10078424.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [135] Bild GMBH. *Krankenwagen kollidiert mit Auto.* <http://www.bild.de/regional/bremen/krankenwagen-kollidiert-mit-auto-10403856.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [136] Bild GMBH. *Fussgängerin von Notarzwagen überfahren.* <http://www.bild.de/regional/hannover/fussgaengerin-von-notarzwagen-ueberfahren-10324346.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [137] Bild GMBH. *Krankenwagen im Einsatz auf Kreuzung gerammt.* <http://www.bild.de/regional/duesseldorf/krankenwagen-im-einsatz-auf-kreuzung-gerammt-10312374.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [138] Bild GMBH. *Streifenwagen überschlägt sich Beamte verletzt.* <http://www.bild.de/regional/bremen/streifenwagen-ueberschlaegt-sich-beamte-verletzt-12656894.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [139] Bild GMBH. *Autofahrer übersieht Polizeiauto im Einsatz.* <http://www.bild.de/regional/hannover/autofahrer-uebersieht-polizeiauto-im-einsatz-10511164.bild.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [140] Braunschweiger Zeitung. *Unfall mit Notarzwagen.* <http://www.braunschweiger-zeitung.de/archiv/unfall-mit-notarzwagen-id249571.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [141] Der Tagesspiegel. *Feuerwehr mit Blaulicht in den Unfall.* <http://www.tagesspiegel.de/berlin/feuerwehr-mit-blaulich-in-den-unfall/1902380.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [142] Die Welt. *Polizei fährt Rentner an.* http://www.welt.de/welt_print/regionales/hamburg/article9388821/Polizei-faehrt-Rentner-an.html. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [143] Innsalzach24. *Rettungswagen übersehen eine Schwerverletzte.* <http://www.innsalzach24.de/innsalzach/polizei/rettungswagen-uebersehen-eine-schwerverletzte-innsalzach24-\protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}{871690.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [144] KA news. *Unfall mit Rettungswagen.* <http://www.ka-news.de/region/karlsruhe/Unfall-mit-Rettungswagen-Zwei-Leichtverletzte;art6066,376937>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.

- [145] Kölnischer Rundschau. *Zwei Rettungssanitäter verunglückt*. <http://www.rundschau-online.de/rhein-erft/zwei-rettungssanitaeter-verunglueckt,15185500,15444840.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.
- [146] LZ. *Martinshorn wirkt nicht*. http://www.lz.de/lokales/bad_salzufen/3704166_Martinshorn_wirkt_nicht.html?em_index_page=1. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [147] Mittelbayerische. *Trotz Blaulicht und Martinshorn*. http://www.mittelbayerische.de/region/cham/cham/artikel/trotz_blaulicht_und_martinshor/514683/trotz_blaulicht_und_martinshor.html. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [148] Morgenpost. *Betrunkener Autofahrer kollidiert mit Rettungswagen*. <http://www.morgenpost.de/berlin/polizeibericht/article1258325/Betrunkener-Autofahrer-kollidiert-mit-Rettungswagen.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [149] Morgenpost. *Verkehrsunfall mit Polizeifahrzeug bei Blaulichtfahrt*. <http://www.morgenpost.de/berlin/polizeibericht/article1209484/Verkehrsunfall-mit-Polizeifahrzeug-bei-Blaulichtfahrt.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [150] Nh24. *N.N.* http://www.nh24.de/index.php?option=com_content&view=article&id=33536:rotenburg-alle-auf-den-naw-ab-in-die-buesche-ua&catid=154&Itemid=190. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [151] Nh24. *N.N.* http://www.nh24.de/index.php?option=com_content&view=article&id=32434:hersfeld-rotenburg-unfaelle-mit-blaulicht-radfahrer-und-wild&catid=154&Itemid=190. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [152] NonstopNews. *N.N.* <http://www.nonstopnews.de/meldung/10239>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.
- [153] NonstopNews. *N.N.* <http://www.nonstopnews.de/meldung/9855>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.
- [154] NonstopNews. *N.N.* <http://www.nonstopnews.de/meldung/10617>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.
- [155] NonstopNews. *N.N.* <http://www.nonstopnews.de/meldung/10252>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.
- [156] NonstopNews. *N.N.* <http://www.nonstopnews.de/meldung/11750>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [157] NonstopNews. *N.N.* <http://www.nonstopnews.de/meldung/10325>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [158] Op-online. *N.N.* <http://www.op-online.de/lokales/nachrichten/rodgau/dienstfahrt-unfall-stadtbrandinspektor-487339.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.

- [159] Op-online. *Unfall Rettungswagen*. <http://www.op-online.de/lokales/nachrichten/offenbach/unfall-rettungswagen-offenbach-541961.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [160] Op-online. *Unfall Rettungswagen Mühlheim*. <http://www.op-online.de/lokales/nachrichten/muehlheim/unfall-rettungswagen-muehlheim-906116.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [161] Presseportal. *N.N.* http://www.presseportal.de/polizeipresse/pm/66841/1538751/polizeidirektion_hannover. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [162] Presseportal. *N.N.* http://www.presseportal.de/polizeipresse/pm/66841/1675375/polizeidirektion_hannover. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [163] Presseportal. *N.N.* http://www.presseportal.de/polizeipresse/pm/66841/1538636/polizeidirektion_hannover. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [164] RP Online. *Polizeiauto kracht in Straßenbahn*. <http://www.rp-online.de/nrw/staedte/duisburg/polizeiauto-kracht-in-strassenbahn-aid-1.1074531>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [165] RP Online. *Motorradfahrer bremst wegen Polizeiauto*. <http://www.rp-online.de/nrw/staedte/langenfeld/motorradfahrer-bremst-wegen-polizeiauto-bei-sturz-verletzt-aid-protect-discretionary{\char\hyphenchar\font}{\char\hyphenchar\font}{1.937890>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [166] RuhrNachrichten. *Rollerfahrer bei Kollision mit Ambulanz getötet*. <http://www.ruhrnachrichten.de/nachrichten/weiterenachrichten/nordrheinwestfalen/Rollerfahrer-bei-Kollision-mit-Ambulanz-getoetet;art5192,755458>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.
- [167] RuhrNachrichten. *Unfall an der Derner Strasse 41-Jähriger fährt in Polizeiwagen*. <http://www.ruhrnachrichten.de/staedte/dortmund/Unfall-an-der-Derner-Strasse-41-Jaehriger-faehrt-in-Polizeiwag\protect-discretionary{\char\hyphenchar\font}{\char\hyphenchar\font}{en;art2576,982945>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [168] Stern. *Mit Blaulicht in die Tierklinik*. <http://www.stern.de/panorama/mit-blaulicht-in-die-tierklinik-autounfall-wegen-verletzter-protect-discretionary{\char\hyphenchar\font}{\char\hyphenchar\font}{dienstthuendin-1582875.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [169] Stuttgarter Nachrichten. *Polizeipferd bei Unfall verletzt*. <http://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.blaulicht-vom-27-juli-polizeipferd-bei-unfall-verletzt.fb8efb16-596f-44e2-a370-d0dfbca8fc3b.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [170] Stuttgarter Nachrichten. *BMW rammt Rettungswagen*. <http://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.blaulicht-vom-4-august-bmw-rammt-rettungswagen.a8fd4b70-e777-4225-aaa5-90fd6201a378.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.

- [171] Stuttgarter Nachrichten. *Motorradfahrer der Polizei gefährdet*. <http://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt/blaulicht-vom-3-september-motorradfahrer-der-polizei-gefaehrdet\protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}{-}.bbf762e0-3833-4a9b-8429-2555c2503482.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [172] Südkurier. *Betrunkener Traktorfahrer rammt Streifenwagen*. <http://www.suedkurier.de/region/linzgau-zollern-alb/illmensee/Betrunkener-Traktorfahrer-rammt-Streifenwagen;art372561,3978706>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [173] Südkurier. *Feuerwehr verunglückt auf Einsatzfahrt 50.000 Euro-Schaden*. <http://www.suedkurier.de/region/nachbarschaft/allgaeu/Feuerwehr-verunglueckt-auf-Einsatzfahrt-50-000-Euro-Schaden;art378131,4277809>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [174] Südkurier. *Taxi rammt Polizeiauto*. <http://www.suedkurier.de/region/kreis-konstanz/singen/Taxi-rammt-Polizeiauto;art372458,4015167>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [175] Südkurier. *Benz kollidiert mit Rettungswagen zwei Verletzte*. <http://www.suedkurier.de/region/hochrhein/dogern/Benz-kollidiert-mit-Rettungswagen-zwei-Verletzte;art372592,4484156>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [176] Thüringer Allgemeine. *Kollision mit Krankenwagen*. <http://www.thueringer-allgemeine.de/web/zgt/leben/blaulicht/detail/-/specific/Kollision-mit-Krankenwagen-1529993999>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [177] Torsten Tödt. *Polizei in Hamburg verunfallt*. <http://www.blaulicht.org/polizei-in-hamburg-verunfallt/>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [178] Torsten Tödt. *Blaulicht-Unfälle*. <http://www.blaulicht.org/blaulicht-unfaelle/>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [179] Torsten Tödt. *PKW rammt Polizei-Motorrad*. <http://www.blaulicht.org/pkw-rammt-polizei-motorrad/>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [180] Torsten Tödt. *Streifenwagen in Bad Urach verunfallt*. <http://www.blaulicht.org/streifenwagen-in-bad-urach-verunfallt/>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [181] Torsten Tödt. *Streifenwagen auf der A12 gerammt*. <http://www.blaulicht.org/streifenwagen-auf-der-a12-gerammt/>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [182] Torsten Tödt. *Feuerwehr im Einsatz verunfallt*. <http://www.blaulicht.org/feuerwehr-im-einsatz-verunfallt-2/>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [183] T-online. *Fünf Leichtverletzte bei Unfall mit Streifenwagen*. http://www.t-online.de/regionales/id_42611018/zeugenaufruf-fuenf-leichtverletzte-bei-unfall-mit-streifenwagen-.html. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.

- [184] TVR-News. <http://www.tvr-news.de/detail2.asp?tpk=4068>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [185] Volksfreunde. *Feuerwehrmann stirbt bei Unfall mit Einsatzfahrzeug*. <http://www.volksfreund.de/nachrichten/region/region/Region-Feuerwehrmann-stirbt-bei-Unfall-mit-Einsatzfahrzeug;art1129,2377230>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [186] WAZ. *Drei Schwerverletzte nach Crash mit Rettungswagen*. <http://www.derwesten.de/staedte/nachrichten-aus-luedenscheid-halver-und-schalksmuehle/drei-schwererletzte-nach-crash-mit-rettungswagen-id2636906.html>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2010.
- [187] Westfälische Nachrichten. *Taxi kollidiert mit Streifenwagen*. <http://www.wn.de/Muenster/2009/11/Nachrichten-Muenster-Taxi-kollidiert-mit-Streifenwagen>. Abgerufen 12. Februar 2015. 2009.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Themenfelder und Zusammenhänge dieser Forschungsarbeit	5
2.1	Beispiel für eine LSA-Beeinflussung in einer Feuerwache in Berlin [23] und Lage der Feuerwehr in OSM [69]	21
2.2	Darstellung der Modellierungsarten von Verkehr	23
2.3	Beispiel für eine Simulation in Vissim	24
2.4	Beispiel für eine Simulation in AIMSUN	25
2.5	Beispiel für eine Simulation in MATSim	26
2.6	Beispiel für eine Simulation in Paramics	26
2.7	Beispiel für eine Simulation in CORSIM	27
2.8	Beispiel für eine Simulation in SUMO	28
3.1	Fahrzeugtypen von Einsatzfahrzeugen, die in einen Unfall verwickelt wurden (Anzahl der ausgewerteten Datensätze n=187).	32
3.2	Straßentypen auf denen die Unfälle passierten (n= 88)	33
3.3	Tageszeit der Unfälle mit Einsatzfahrzeugen	33
3.4	Involvierte Verkehrsteilnehmer bei Unfällen mit Einsatzfahrzeugen	34
3.5	Gründe für die Unfälle mit Einsatzfahrzeugen	34
3.6	Foto der Forschungskreuzung in Braunschweig (Die Linien repräsentieren die detektierten Trajektorien rot: Autos, blau: Fahrräder, gelb: Fußgänger). In Anlehnung an [16]	36
3.7	Positionen der Einsatzfahrzeuge in QGIS [101]	36
3.8	Reaktionsdistanz der Verkehrsteilnehmer auf das sich nähernde Einsatzfahrzeug (32 ausgewertete Situationen)	38
3.9	Beispiele aus den Videoaufnahmen von Einsatzfahrten in Berlin	38
3.10	Beispiele für Blockierung der Einsatzfahrt	39
3.11	Lage der optischen Schleifen	40
3.12	Benötigte Zeit und Durchschnittsgeschwindigkeit beim Überquerung des Knotenpunktes bei einer Geradeausfahrt (n=153)	41
3.13	Benötigte Zeit und Durchschnittsgeschwindigkeit beim Überquerung des Knotenpunktes beim Linksabbiegen (Anzahl ausgewertete Fahrten: 51)	42
3.14	Ausschnitt aus Braunschweig mit den evaluierten Streckenabschnitten (Kartenmaterial basiert auf einer Karte von Bing [103] in Qgis [101])	43
3.15	Durchschnittsgeschwindigkeiten der Einsatzfahrzeuge	44
3.16	Anteil der Einsatzfahrten die innerhalb einer bestimmten Zeit das Ziel erreichen (2017, 24.505 Einsatzfahrten)	45

3.17	Anteil der Einsatzfahrten die innerhalb einer bestimmten Zeit das Ziel erreichen (2017 nachts, 574 Einsatzfahrten)	45
3.18	Vergleich von der eingesetzten Fahrzeugtypen am Tag und in der Nacht (n= 4.785)	46
3.19	Dauer und Distanz der Einsatzfahrten (2017, 23.900 Einsatzfahrten)	47
4.1	Beispiel für das Bilden einer Rettungsgasse in der Simulation SUMO	53
4.2	Veränderung des Schalldruckpegels in Abhängigkeit zur Entfernung .	54
4.3	Verspätete Reaktion beim Bilden einer Rettungsgasse	54
4.4	Überholen eines Einsatzfahrzeug auf dem Fahrstreifen des Gegenverkehrs in SUMO	56
4.5	Darstellung von drei verschiedenen Einsatzfahrzeugklasse in SUMO: Rettungs-, Polizei- und Feuerwehrwagen (von links nach rechts) . . .	57
4.6	Durchschnittliche Reisezeit für das Einsatzfahrzeugmodell in SUMO	58
4.7	Verteilung der Wartezeiten für das Einsatzfahrzeug bei einem einfachen Knotenpunkt (2 Fahrstreifen)	59
5.1	Schematische Darstellung des Konzeptes	63
5.2	Beispielknotenpunkt für das Walabi-Konzept	64
5.3	Optimale Distanz zur LSA für den Signalzeitenplanwechsel	65
5.4	Koordinierter Walabi-Ansatz	65
5.5	Maximale Grünzeitverlängerung der 2. LSA beim koordinierten Ansatz	66
5.6	Beispielszenario mit einem gestauten Straßennetz (in rot)	67
5.7	Beispielszenario für ein Grid-Lock-Szenario	68
6.1	Knotenpunkt bei dem Algorithmus von FAST	73
6.2	Knotenpunkt bei dem Algorithmus von Stream	74
6.3	Ein einfacher Knotenpunkt in SUMO [23]	75
6.4	Beispiel für einen einfachen Korridor in SUMO	76
6.5	Grid-Szenario in SUMO	77
6.6	SUMO Simulation der Forschungskreuzung in Braunschweig	78
6.7	Simulationsnetz von einem Ausschnitt in Braunschweig	79
6.8	Simulationsnetz von Braunschweig	80
7.1	Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes (ohne Abbiegeverkehr)	82
7.2	Vergleich des Umgebungsverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt .	83
7.3	Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes	84
7.4	Vergleich des Umgebungsverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt .	85
7.5	Verteilung der Wartezeiten des Gesamtverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt (gestrichelte Linie: 90 % Perzentil)	85
7.6	Simulationsergebnisse eines einfachen Knotenpunktes mit je zwei Fahrstreifen	87
7.7	Vergleich des Umgebungsverkehrs an einem einfachen Knotenpunkt (zwei Fahrstreifen)	87
7.8	Simulationsergebnisse eines Korridors (100 Meter)	89
7.9	Vergleich des Umgebungsverkehrs bei einem Korridor (100 Meter) .	89
7.10	Simulationsergebnisse eines Korridors (200 Meter)	91

7.11 Vergleich des Umgebungsverkehrs bei einem Korridor (200 Meter)	91
7.12 Simulationsergebnisse eines Korridors (500 Meter)	92
7.13 Simulationsergebnisse bezogen auf die Verkehrsnachfrage bei einem Korridor (500 Meter)	92
7.14 Vergleich des Umgebungsverkehrs bei einem Korridor (500 Meter)	93
7.15 Simulationsergebnisse eines Grid-Szenarios bezogen auf die Verkehrs- stärke	94
7.16 Vergleich des Umgebungsverkehrs im Grid-Szenario	94
7.17 Vergleich der Priorisierungsalgorithmen für Einsatzfahrzeuge an der Forschungskreuzung	96
7.18 Vergleich des Umgebungsverkehrs an der Forschungskreuzung	96
7.19 Vergleich der Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge im Braunschweig- Szenario (Korridor)	98
7.20 Vergleich der Wartezeiten der Einsatzfahrzeuge im Braunschweig- Szenario (Korridor)	98
7.21 Vergleich der Reisezeiten des Umgebungsverkehrs im Braunschweig- Szenario (Korridor)	99
7.22 Vergleich der Reisezeiten der Einsatzfahrzeuge im gesamt Braunschweig-Szenario	100

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammenfassung Sonder- und Wegrechte [27]	9
2.2	Auswahl von eingesetzten Bevorrechtigungssystemen für Einsatzfahrzeuge	20
2.3	Zusammenfassung der Simulationswerkzeuge (Stand 19.11.2018)	29
4.1	Modellierung von Einsatzfahrzeuge	51
4.2	Geschwindigkeitsauswertung bei Einsatzfahrten	55
4.3	Zusammenfassung der Konfiguration von Einsatzfahrzeugen	59
4.4	Zusammenfassung der Einsatzfahrzeugfunktionen (Stand 19.11.2018)	60
7.1	Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Walabi-Algorithmus und realen Fahrzeit in Braunschweig	101

- AIM** Anwendungsplattform Intelligente Mobilität
- AIMSUN** Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks
- ASB** Arbeiter-Samariter-Bund
- BALANCE** Balancing Adaptive Network Control Method
- COP** Controlled Optimization of Phases
- CORSIM** Corridor Simulation
- DRK** Deutsches Rotes Kreuz
- ETH** Eidgenössischen Technischen Hochschule
- EVAW** emergency vehicle approaching warning
- FAST** Fast Emergency Vehicle Preemption Systems
- FCD** Floating Car Data
- FHWA** Federal Highway Administration
- FRESIM** FREeway SIMulation
- GPS** Global Positioning System
- HBS** Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
- KTW** Krankentransportwagen
- LSA** Lichtsignalanlage
- MATSim** Multi-Agent Transport Simulation
- MOTION** Method for the Optimization of Traffic Signals in Online Controlled Networks
- NEF** Notarzteinsatzfahrzeug
- NETSIM** NETwork SIMulation
- NSM** Nagel-Schreckenberg-Modell
- OBU** On-Board-Unit
- OSM** OpenStreetMap
- Paramics** Parallel Microscopic Simulation
- PRS** Public Regulated Service
- RDS** Radio-Data-System
- RHODES** Real Time Hierarchical Optimized Distributed Effective System

- RiLSA** Richtlinie für Lichtsignalanlagen
- RSU** Road Side Unit
- RTW** Rettungswagen
- SCOOT** Split, Cycle, and Offset Optimisation Technique
- SIRENE** Secure and Intelligent Road Emergency NEtwork
- StVO** Straßenverkehrs-Ordnung
- StVZO** Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
- SUMO** Simulation of Urban MObility
- TAPAS** Travel and Activity Patterns Simulation
- TMC** Traffic Management Center
- TraCI** Traffic Control Interface
- TRANSYT** Traffic Network StudY Tool
- TSIS** Traffic Software Integrated System
- TSS** Transportation Simulation System
- TU** Technischen Universität
- UTCS-I** Urban Traffic Control System
- UTOPIA** Urban Traffic OPTimization by Integrated Automation
- Vissim** Verkehr In Städten - SIMulationsModell
- V2X** Fahrzeug-zu-Fahrzeug und Fahrzeug-zu-Infrastruktur
- Walabi** Wartezeitreduzierung durch Lichtsignalanlagen-Bevorrechtigung im Einsatzfall

A

Anhang

A.1 StVO

Zur Übersicht sind hier die Abschnitte der StVO zitiert, die für diese Arbeit relevant sind.

„Fahrzeuge des Rettungsdienstes sind von den Vorschriften dieser Verordnung befreit, wenn höchste Eile geboten ist, um Menschenleben zu retten oder schwere gesundheitliche Schäden abzuwenden.“ (StVO §35, Abs. 5a).

„Die Sonderrechte dürfen nur unter gebührender Berücksichtigung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung ausgeübt werden.“ (StVO §35, Abs. 8).

„Blaues Blinklicht zusammen mit dem Einsatzhorn darf nur verwendet werden, wenn höchste Eile geboten ist, um Menschenleben zu retten oder schwere gesundheitliche Schäden abzuwenden, eine Gefahr für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung abzuwenden, flüchtige Personen zu verfolgen oder bedeutende Sachwerte zu erhalten. Es ordnet an: 'Alle übrigen Verkehrsteilnehmer haben sofort freie Bahn zu schaffen'“ (StVO §38, Abs. 1).

„Blaues Blinklicht zusammen mit dem Einsatzhorn darf nur verwendet werden, wenn höchste Eile geboten ist, um Menschenleben zu retten oder schwere gesundheitliche Schäden abzuwenden, eine Gefahr für die öffentliche Sicherheit oder Ordnung abzuwenden, flüchtige Personen zu verfolgen oder bedeutende Sachwerte zu erhalten. Es ordnet an: 'Alle übrigen Verkehrsteilnehmer haben sofort freie Bahn zu schaffen'“ (StVO §38, Abs. 1).

A.2 Leitfaden des Experteninterviews

Für die Experteninterviews mit den Rettungswagenfahrern wurde der folgende Leitfaden verwendet:

1. Berufsbezeichnung
2. Erfahrungen bei Einsatzfahrten
 - Wie lange fahren Sie schon bei Einsatzfahrten mit?
 - Wie häufig fahren Sie?
3. Kam es zu Unfällen bei Ihnen oder Ihren Kollegen?
4. Was sind typische gefährliche Situationen während einer Einsatzfahrt?
 - Wie häufig kommt es dazu?
 - Sind besondere Straßentypen besonders häufig bei bestimmten Problemen betroffen?
 - Wie reagieren andere Verkehrsteilnehmer auf ein sich näherndes Einsatzfahrzeug?
 - Wie sollte der Umgebungsverkehr idealerweise reagieren?
5. Was würde Sie bei der Einsatzfahrt unterstützen bzw. welche Maßnahmen werden bereits angeboten? Zum Beispiel:
 - Fahrsicherheitstraining
 - Navigationssysteme
 - Benachrichtigung vom anderen Verkehrsteilnehmer
 - Priorisierung an Lichtsignalanlagen
6. Gibt es Routen die Sie bei Einsatzfahrten bevorzugen?

A.3 Vereinfachte Transkripte der Experteninterviews

A.3.1 1. Experte: Freiwillige Feuerwehr

Wie lange fahren Sie schon bei Einsatzfahrten mit?

Seit ca. 2-3 Jahren.

Wie häufig fahren Sie?

Alle 2-3 Wochen gibt es einen Einsatz ca. 200 Einsätze. Insgesamt gab es letztes Jahr 400 Einsätze bei unserer Feuerwehrwache.

Kam es zu Unfällen bei Ihnen oder Ihren Kollegen?

Bisher gab es keine Unfälle. Nur Kleinigkeiten ganz selten wie z.B. abgefahrene Spiegel

Reagieren andere Verkehrsteilnehmer adäquat?

Viele Verkehrsteilnehmer verhalten sich falsch. Bleiben vor einer roten Ampel einfach stehen obwohl sie rüber fahren und Platz machen könnten, machen Platz aber schätzen die Breite des Feuerwehrwagens falsch ein, geben an einer roten Ampel keine Bevorrechtigung. Typische Rettungsgassenbildung kommt bei uns nicht vor, es wird nur Platz gemacht. Der Gegenverkehr reagiert dabei in der Regel gut.

Was würde bei der Einsatzfahrt unterstützen?

Navigation würde die Einsatzfahrt unterstützen, aber wird von der Leitung aus unbekanntem Gründen nicht gewünscht. Es ist Voraussetzung, dass der Fahrer sich sehr gut auskennt in der Gegend und auch weiß wo sich die Straßen befinden. Um Maschinist oder Gruppenführer zu werden ist dies Voraussetzung, diese beiden sitzen auch vorne im Führerhaus und können ggf. navigieren. 6 Personen passen ins Führerhaus.

Es funktioniert auch gut die Hausnummer selbst bei Nachts zu erkennen, im Ausnahmefall musste die Straße mehrfach befahren werden. Der Maschinist muss einen besonderen Lehrgang machen. Bei der Freiwilligen Feuerwehr sind auch Hauptamtliche eingestellt. Zusätzlich gibt es noch vom ADAC Fahrsicherheitstraining.

Viele Leute verhalten sich eher falsch. Eventuell würden sie besser reagieren, wenn sie von einem Rettungsfahrzeug wissen bevor sie es sehen, aber das ist eher Spekulation.

Grüne Wellen für Feuerwehr würde sehr helfen. Häufig dauert sogar der Weg zum Gerätehaus länger als der Weg zum Einsatzort, da die Freiwillige Feuerwehr zwar Wegerecht hat, aber Sonderrechte wie rote Ampel nicht überfahren wird, da dies zu riskant ist. Die Geschwindigkeit zu überschreiten bringt meistens nur einen sehr geringen Vorteil. Je nach Dringlichkeit der Situation werden schon mal 70-90 km/h gefahren aber nur wenn es wirklich dringlich ist, dementsprechend aggressiver ist dann auch die Fahrweise. Am meisten bringen die rote Ampeln zu überfahren an zeitlicher Ersparnis. Vor einer roten Ampel wird die Geschwindigkeit meist stark auf 10-20 km/h reduziert.

Gibt es Routen die Sie bei Einsatzfahrten bevorzugen?

Es werden lieber Hauptstraßen befahren, da dort eine höhere Geschwindigkeit gefahren werden kann und die Straßenbeschaffenheit besser ist. Die Bahnhofstraße wird während der Hauptverkehrszeit gerne vermieden, da sie stark befahren ist zu eng für die Verkehrsteilnehmer um das Feuerwehrauto durch zu lassen. Es wird nur innerorts gefahren.

A.3.2 2. Experte: Freiwillige Feuerwehr

Wie lange fahren Sie schon bei Einsatzfahrten mit?

Mehrere Jahre.

Kam es zu Unfällen bei Ihnen oder Ihren Kollegen?

Mir sind keine Unfälle bekannt.

Reagieren andere Verkehrsteilnehmer adäquat?

Es klappt normal nicht, dass Rettungsgassen gebildet werden, wenn es klappt dann auf der Autobahn. Innerorts funktioniert das eher nicht. Innerorts fährt man in der Regel nicht schneller als 70 km/h. Durch die Rettungsgasse fährt man sehr langsam vielleicht Schrittgeschwindigkeit.

Was würde bei der Einsatzfahrt unterstützen?

Eine Bevorrechtigung an Ampeln wäre praktisch, damit man gar nicht erst in die Situation kommt, dass eine Rettungsgasse nicht richtig gebildet wird.

A.3.3 3. Experte: Rettungsassistent

Erfahrungen bei Einsatzfahrten

Ausbildung als Rettungsassistent und in diesen Rahmen 3 Jahre Rettungswagen gefahren, das war von 2004 bis 2007. Allerdings bin ich jetzt nicht mehr in diesem Beruf tätig.

Kam es zu Unfällen bei Ihnen oder Ihren Kollegen?

Ja, als ich die Ausbildung angefangen habe kam es zu einem Unfall von zwei Kollegen. Es war ein Krankentransport auf dem Weg zu einen Patienten auf der Autobahn. Sie sind auf einen Pritschen-LKW aufgefahren. Ein Kollege wurde dabei tödlich verletzt, das war für uns alle ein sehr traumatisches Erlebnis.¹

Ein paar Jahre bevor ich angestellt wurde, war bereits ein anderer Kollege tödlich verunglückt. Die sind auf der Landstraße unterwegs gewesen und haben überholt und sind dann gegen einen Baum gefahren. Das ist leider ein sehr klassischer Unfall. Sehr klassisch, weil es unter Blaulicht und erhöhter Geschwindigkeit passiert ist.

Was sind typische gefährliche Situationen während einer Einsatzfahrt?

Wie sind gefährliche Situation definiert? Also unvorhergesehene Probleme treten bei fast jeder Fahrt auf. Aber beinahe Unfälle sind viel seltener. Man fährt generell ja viel defensiver auf eine Kreuzung. Wenn die Ampel eh grün ist, dann fährst du schnell ran. Aber bei einer roten Ampel fahren die meisten wirklich sehr langsam, Schrittgeschwindigkeit will ich jetzt nicht sagen, aber langsam. Probleme mit Fußgänger sind klassisch, die gehen eben mal rüber, obwohl sie den Rettungswagen sehen.

¹Anmerkung: die Details des Unfalls wurden im Interview erläutert jedoch aus Pietätsgründen wurde gewünscht sie nicht zu veröffentlichen

Sind besondere Straßentypen besonders häufig bei bestimmten Problemen betroffen?

Kreuzungen, immer dann wenn man die Grenzen der STVO verlassen muss, erhöhte Geschwindigkeit, dadurch ist auch die Reaktionszeiten der Autofahrer verkürzt.

Wie reagieren andere Verkehrsteilnehmer auf ein sich näherndes Einsatzfahrzeug?

Das kommt immer darauf an, ob andere das mitbekommen, dass man kommt. Auf geraden Straßen war es oft unkritisch auf Landstraßen, weil man oft früh gesehen wird. Schwierig ist, wenn ein Fahrzeug drei Fahrzeuge voraus dich sieht, aber das Fahrzeug direkt vor dir nicht und dann den anderen überholen will, weil er sich fragt was macht der denn da.

In Städten gibt es ein ganz anderes Problem aus Mangel an Platz. Viele trauen sich nicht in die Kreuzung zu fahren wenn rot ist oder auf dem Bürgersteig auszuweichen, dadurch hast du manchmal ein Problem durch zu kommen.

Wie sollte der Umgebungsverkehr idealerweise reagieren?

Ich persönlich, aber andere sehen das anderes, doch ich fand es gut, wenn die Leute langsamer gefahren sind, aber auch auf der rechten Spur bleiben. So etwas wie abruptes Bremsen war auch ein Problem, darauf muss du sonst auch noch reagieren. Gut war es, wenn die Fahrer sich berechenbar gemacht haben.

Was würde Sie bei der Einsatzfahrt unterstützen bzw. welche Maßnahmen werden bereits angeboten?

Wenn die Ampeln grün wären würde mir das helfen oder wenn die Autofahrer mehr Vorlauf hätten zu reagieren.

Gibt es Routen die Sie bei Einsatzfahrten bevorzugen?

Wir sind ganz häufig eher Querverbindungen gefahren. Ich bin mehr auf der Landrettung unterwegs gewesen. Dann sind wir eher querbeet gefahren, dass war nicht die kilometermäßig kürzeste Route, aber je weniger Verkehr desto besser kommst du in der Regel durch.

