



Abschlussbericht GreenValue

Managementsystem für ein vernetztes, automatisiertes und emissionsreduziertes Verkehrssystem zur Verkehrssteuerung auf Basis dynamischer Bepreisungsaspekte

Sachbericht



Inhaltsverzeichnis

Kurzdarstellung	5
1.	5
1.1. Aufgabenstellung	5
1.2. Voraussetzungen des Vorhabens	6
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4. Wissenschaftliche und technische Ausgangslage	7
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
2. Ergebnisse	13
2.1. Zielerreichung	13
2.1.1. AP 1 "Systemarchitektur eines Managementsystems für automatisierten Verkehr"	13
2.1.2. AP 2 "Aufbau eines geeigneten Simulationsmodells"	20
2.1.3. AP 3 "Szenariendefinition und Durchführung der Simulation"	29
2.1.4. AP 4 "Bewertung der Simulationsergebnisse"	32
2.2. Ressourcenverwendung	39
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten	40
2.4. Fortschritt bei anderen Stellen	40
2.5. Veröffentlichung der Ergebnisse	40
Abbildungsverzeichnis	41
Tabellenverzeichnis	41
Abkürzungsverzeichnis	41
3. Literaturverzeichnis	42

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung im Projekt **GreenValue** besteht in der Konzeptionierung sowie der simulativen Erprobung eines Managementsystems für automatisierten und vernetzten Verkehr unter Verwendung dynamischer Bepreisungsaspekte. Die Simulation dieses Systems generiert Use Cases für die Verwendung von Daten vernetzter Fahrzeuge.

Die aktuell bestehenden Verkehrsprobleme, u.a. Staus und Emissionen, werden auch in einer vernetzten und automatisierten Zukunft durch weiteres Verkehrswachstum nicht ohne Eingriffe von außen zu lösen sein. Der Bedarf nach Mobilität ist nach wie vor steigend und impliziert steigende Komplexität und Herausforderungen im Verkehrsmanagement. Zugleich erhöht sich die Menge an vom Verkehr generierten Daten durch die Zunahme der Vernetzung. Diese Daten werden nicht mehr nur punktuell passiv an Induktionsschleifen und Infrarotkameras erzeugt, sondern es werden aktiv Positions- und Statusmeldungen versendet. Die Nutzung dieser Daten ist eines der Kernthemen dieser Arbeit.

Durch die automatisierte Detektion automatisierter und vernetzter Fahrzeuge (AVF) kann der Verkehrszustand kontinuierlich erfasst werden. Dem Betreiber eines Verkehrsmanagementsystems ist somit möglich, Rückschlüsse auf die tatsächliche Verkehrslage zu ziehen ohne die Notwendigkeit der übermäßigen Extrapolation. Über die Empfangseinheiten der AVFs kann ein Managementsystem durch V2X-Nachrichten übermittelte Informationen auf die Routen der Fahrzeuge einwirken, um eine bestimmte, z.B. durch die Stadt vorgegebene, Policy durchzusetzen. Hierbei ist die Berücksichtigung verschiedenster Optimierungsziele denkbar. Zudem ist es einem solchen Managementsystem möglich, schnell auf spontane Änderungen in der Nachfrage oder dem Verkehrsangebot (z.B. durch Unfälle oder Veranstaltungen) zu reagieren. Die Arbeiten in diesem Projekt bauen auf einer bestehenden Patentanmeldung auf.

Im Rahmen dieser Studie wird ein Managementsystem untersucht, das Routen von Fahrzeugen über dynamisches Mobility Pricing im Sinne einer vorgegebenen Zielfunktion optimiert. Dynamisches Mobility Pricing bezeichnet in diesem Kontext die Bepreisung von Verkehrsraum auf sehr kurzen Zeitskalen, beispielsweise unter einer Minute. Die Preise von Netzwerkobjekten werden hierbei über die aus V2X-Nachrichten gemessene Nachfrage festgelegt. Durch die häufige Aktualisierung der Preise ist die Bedienbarkeit des Systems für einen menschlichen Nutzer während der Fahrt kaum noch gegeben, daher werden insbesondere AVFs betrachtet.

In dieser Studie wird vor allem eine simulative Abschätzung der Auswirkungen von dynamischem Mobility Pricing auf ein Verkehrssystem sowie eine Abschätzung der dafür notwendigen Kommunikationsbedarfe gemacht. Die zu untersuchenden Auswirkungen umfassen hierbei die Verlustzeiten der Verkehrsteilnehmer und die Menge der ausgestoßenen Emissionen (z.B. CO₂). Für die Abschätzung des Kommunikationsbedarfs werden von der ETSI standardisierte V2X-Nachrichtentypen (z.B. CAM¹). Zudem wird der Bedarf nach neuen Nachrichtentypen für das Mobility Pricing adressiert. Es wird hierbei sowohl die Größe der Nachrichten als auch auf die Häufigkeit des Übersendens berücksichtigt.

Die Genauigkeit des Simulationsmodells hängt von der Verfügbarkeit von notwendigen Eingangsdaten ab. Die Verkehrsnachfrage wird auf Grundlage von Verkehrserhebungen (z.B. MiD, SrV) erzeugt. Die Anzahl an Fahrten wird anhand soziodemographischer Merkmale des ausgewählten Raumtyps kalibriert und ist relativ genau (+/- 10%) zu approximieren. Eine zahlenmäßige Abschätzung der Genauigkeit der Fahrzeugrouten ist vorweg schwer vorzunehmen. Allerdings wird die Genauigkeit des Simulationsmodells durch die Hinzunahme von punktuellen Zählstellendaten, sofern diese verfügbar sind, erhöht.

Das dynamische Mobily Pricing wird hinsichtlich verschiedener Kriterien evaluiert, um die Effektivität und Effizienz des Systems bewerten zu können. Vor allem werden die Verlustzeiten von Verkehrsteilnehmern, die ausgestoßenen Emissionen (CO₂, NO_x) sowie die Reisezeiten und die resultierenden Routenlängen ausgewertet. Der zeitliche Verlauf der Spannweiten der dynamischen Bepreisung wird ebenfalls betrachtet, um bewerten zu können ob eine hohe Dynamisierung von Preisen sinnvoll ist oder vergleichbare Effekte ebenfalls mit einer statischen oder gestaffelten Maut erreicht werden könnten. Zur Auswertung werden die

¹ Cooperative Awareness Message

realisierten Bewegungen der Fahrzeuge im Verkehrsnetz in Form von Log-Dateien herangezogen. Diese stehen sowohl aggregiert für den ganzen Simulationszeitraum als auch für einzelne Simulationsschritte zur Verfügung. Aus diesen Ergebnisdateien werden die Evaluationskriterien extrahiert und für die verschiedenen Szenarien gegenübergestellt. Um eventuell bestehende statistische Fehler zu minimieren, wird eine Mittelung der Simulationsergebnisse über mehrere Random Seeds angestrebt, die das simulierte Fahrzeugverhalten innerhalb bestimmter Grenzen variieren. Die Auswertung der genannten Kriterien erfolgt sowohl in Form eines mittleren, globalen Kennwerts als auch im zeitlichen Verlauf, z.B. gestaffelt nach Stunden über den Simulationszeitraum. Die zu erwartende Höhe der Reduktion von Verlustzeiten und Emissionen hängt vom ausgewählten Raumtyp ab, allerdings wird insgesamt eine Verbesserung um 10 – 25% angestrebt.

1.2. Voraussetzungen des Vorhabens

Das Vorhaben wird mit dem Charakter einer Vorstudie konzipiert und allein vom DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik bearbeitet.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden.

Die Forschungsarbeiten des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik reichen von Fahrerassistenzsystemen bis hin zum vollautomatisierten Fahren. Mit mehreren Simulatoren und Forschungsfahrzeugen können neu entwickelte Funktionen getestet und z.B. in Probandenstudien evaluiert werden. Die Großforschungsanlage Anwendungsplattform Intelligente Mobilität ermöglicht als Digitales Testfeld die Erforschung von kooperativen Fahrerassistenzsystemen sowie deren Wirkung auf den Fahrer und den Verkehr als Gesamtsystem. Als Urheber der offenen Verkehrssimulationssoftware SUMO bieten sich dem Institut vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Steuerung und Beeinflussung von Verkehr. Auch die Möglichkeit der Kopplung von SUMO mit anderen Simulationsumgebungen und echter Hardware ist ein entscheidender Vorteil gegenüber anderer Software.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das Vorhaben wird eine Laufzeit von 12 Monaten eingeplant. Das Gesamtvorhaben wird in vier Arbeitspakete geteilt:

- **AP 1: Systemarchitektur eines Managementsystems für automatisierten Verkehr**
 - Definition der Systemarchitektur des Managementsystems inkl. Akteuren und Kommunikationsbedarfen im Rahmen eines Workshops
 - Mindestbedarfe an Informationen für Betrieb des Managementsystems
 - Abgleich der Informationen mit existierenden V2X-Standards
- **AP 2: Aufbau eines geeigneten Simulationsmodells**
 - Auswahl eines geeigneten Untersuchungsraums
 - Auswahl einer geeigneten Verkehrssimulationssoftware
 - Erstellung des Infrastruktur- und Nachfragemodells
 - Umsetzung des Managementsystems in ausführbaren Programmcode
- **AP 3: Szenariendefinition, Durchführung der Simulation**
 - Definition von Simulationsszenarien
 - Berechnung der Szenarien in der Verkehrssimulation
- **AP 4: Analyse und Bewertung**
 - Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse
 - Bewertung des Managementsystems hinsichtlich Einsparpotentialen bezogen auf Reise- und Verlustzeiten sowie CO₂-Emissionen

Das Projektmanagement wird aufgrund der alleinigen Bearbeitung durch das DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik und des Charakters des Projekts als Vorstudie begleitend in den jeweiligen Arbeitspaketen durchgeführt. Die zeitliche Abarbeitung der Arbeitspakete ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

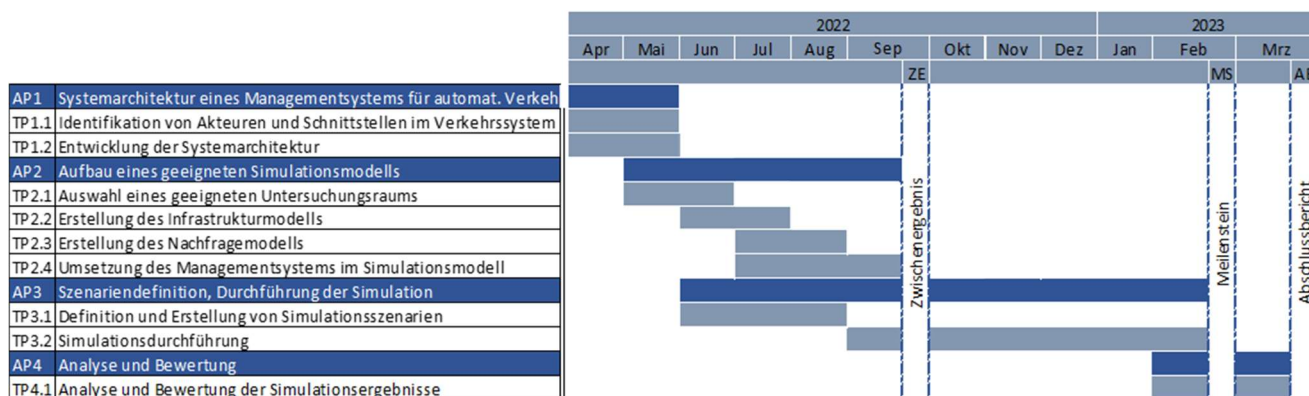


Abbildung 1: Projektablaufplan

Die Arbeitspakete werden zum Großteil sequentiell bearbeitet. So wird beispielsweise zunächst in AP 1 das Managementsystem definiert, bevor es an die Umsetzung in einem Simulationsmodell geht. Jedoch wird parallel bereits an der Auswahl eines Untersuchungsgebiets gearbeitet sowie der Erstellung des Infrastruktur- und Nachfragemodells. Das zeitlich längste Arbeitspaket stellt das AP 3 dar, die Szenariendefinition sowie die Simulationdurchführung. Hierbei wird dem Umstand Rechnung getragen, dass in der Simulation auftretende Fehler oder Ungenauigkeiten in der Modellierung durch kontinuierliches Monitoring behandelt und schrittweise behoben werden. Die Definition der Szenarien wird ebenfalls parallel zur Erstellung der Modelle für Infrastruktur und Verkehrsnachfrage begonnen.

Im Anschluss an die reguläre Projektlaufzeit wurde am 23.08.2023 die Abschlussveranstaltung virtuell durchgeführt. Arbeiten zur Ergebnisverwertung, d.h. die Veröffentlichung der Simulationsdaten auf der mCloud sowie die wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse, finden ebenfalls bis Ende dieses Jahres statt.

1.4. Wissenschaftliche und technische Ausgangslage

Im folgenden Abschnitt wird näher auf den Stand der Technik und den Stand der Wissenschaft der für dieses Vorhaben relevanten Themenfelder eingegangen. Im Besonderen betrifft dies die Datenerhebung im Verkehr, die Möglichkeiten des Verkehrsmanagements zur Einflussnahme, die Vernetzung und Automatisierung des Straßenverkehrs und die Bepreisung im Verkehrsbereich.

Bezüglich der **Datenerhebung im Verkehr** gibt es zahlreiche Lösungen auf Seiten der Infrastruktur in Form von ortsfesten Einrichtungen. Diese finden zum überwiegenden Teil Anwendung in der Lichtsignalsteuerung. Beispiele für bekannte Detektionstechnologien sind

- Induktionsschleifen / Magnetfeldsensoren:** Diese Sensoren sind fest in der Fahrbahn verbaut und erzeugen durch anliegende elektrische Spannung ein Magnetfeld. Sobald dieses Magnetfeld gestört wird, bspw. wenn ein Fahrzeug sich auf oder über den Sensor bewegt, ändert sich die Spannung im Sensor. Diese Änderung kann von einem Steuergerät gemessen und als Detektion eines Fahrzeugs registriert werden. Diese Art von Sensor kommt häufig an verkehrsabhängig gesteuerten Lichtsignalanlagen (LSA) in Form von Anforderungs- oder Bemessungssensoren zur Anwendung. Über haltliniennahe Anforderungssensoren werden hierbei bestimmte Phasen der LSA geschaltet, die im gewöhnlichen Umlauf nicht vorkommen würden, z.B. Sonderphasen für abbiegende Verkehrsströme. Bemessungssensoren sind meist von der Haltlinie abgesetzt, i.d.R. 30 Meter, und dienen zur Entscheidung, ob Phasen über eine definierte Mindestlaufzeit hinaus verlängert werden sollen. Kriterium hierfür ist häufig die sogenannte Zeitlücke, der zeitliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen oder Fahrzeugdetektionen. Ist dieser größer als ein gegebener Abstand, wird die Phase abgebrochen und weitergeschaltet.

- **Videokameras / Infrarotkameras:** Videokameras nehmen Pixelbilder der vom menschlichen Auge sichtbaren Frequenzbereiche des Lichts mit einer definierten Bildrate auf. Infrarotkameras funktionieren nach dem gleichen Prinzip, detektieren allerdings das Infrarotspektrum des Lichts. An LSA werden sie zur Detektion von Fahrzeugen und Radfahrern eingesetzt. Die Kameras werden hinsichtlich ihrer Ausstattung und ihrer Ausrichtung auf einen bestimmten Detektionsbereich eingestellt. Prinzipiell funktionieren sie ähnlich wie die soeben genannten Schleifendetektoren, allerdings ohne die Notwendigkeit von festen Einbauten in der Fahrbahn. Vorteilhaft gegenüber Schleifendetektoren ist weiterhin, dass durch die Analyse mehrerer Bilder die Möglichkeit besteht, dynamische Fahrzeugdaten zu erheben, bspw. die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder die Fahrtrichtung. Auch Fahrzeugtypen können durch den optischen Abgleich zu vordefinierten Klassen erhoben werden. Problematisch an Kamerasensoren ist allerdings, dass durch negative Wettereinflüsse (z.B. Nebel) oder Verdeckung Detektionsausfälle auftreten können.
- **Radarsensoren:** Radarsensoren senden Impulse aus. Diese Impulse werden von Objekten in ihrer Bahn reflektiert und zum Sensor zurückgeworfen. Der Sensor wiederum kann die reflektierten Impulse hinsichtlich ihrer Intensität auswerten und dadurch die Entfernung von Objekten zum Sensor messen. Aus dem zeitlichen Vergleich mehrerer Auswertungen lassen sich somit auch Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen auswerten. Im Verkehrsbereich am häufigsten zum Enforcement² von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten eingesetzt. Theoretisch ist jedoch auch eine Anwendung in der Verkehrssteuerung denkbar, jedoch sind die resultierenden Daten nicht direkt durch Steuergeräte auswertbar. In einer zusätzlichen Recheneinheit müssten die Daten des Radarsensors zunächst interpretiert und im Anschluss bspw. als Impuls an die Detektoreingänge des Steuergeräts weitergegeben werden.
- **Roadside Units (RSU):** Der Begriff RSU bezeichnet eine Infrastruktureinrichtung, die über eine Kommunikationseinheit und eine Recheneinheit verfügt und insbesondere im Bereich des vernetzten Fahrens (Vehicle-to-Everything, V2X) eingesetzt wird. Diese Einheit kommuniziert insbesondere mit fahrzeugseitigen Onboard Units (OBU). Es findet eine bidirektionale Kommunikation zwischen beiden Einheiten statt, so dass einerseits von der Infrastruktur Informationen zur Topologie der Straße. Zulässigen Höchstgeschwindigkeiten oder LSA-Schaltzuständen ausgesendet und andererseits Informationen von Fahrzeugen zu deren aktuellen Positionen, Geschwindigkeiten, Fahrtrichtungen usw. empfangen werden können. Zur weiteren Verarbeitung der Daten kommuniziert die RSU zudem mit Backend-Systemen, bspw. einer Leitzentrale oder einer Mobile Edge Cloud (MEC). Solche Systeme werden außerhalb von Forschungsprojekten nicht praktisch angewendet, da noch keine ausreichende Menge an Fahrzeugen mit dieser Technologie ausgestattet sind. Die Serienfertigung von V2X-fähigen Fahrzeugen wird allerdings in naher Zukunft erfolgen.

Der zweite Themenkomplex, den das Vorhaben beinhaltet, betrifft die fortschreitende **Vernetzung und Automatisierung des Straßenverkehrs**. Unter Vernetzung wird im Allgemeinen der Informationsaustausch von C-ITS (Cooperative Intelligent Transport System) Stationen, also Fahrzeugen untereinander und zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur, verstanden (Vehicle-to-Everything, V2X). Dieser Informationsaustausch dient im nicht-automatisierten Verkehr vor allem der Steigerung der Effizienz des Verkehrssystems, da gewisse Services wie eine Grüne Welle (Green Light Optimal Speed Advisory, GLOSA) oder Warnungen vor plötzlich auftretenden Ereignissen beinhaltet. Im Zusammenspiel mit der Automatisierung unterstützt die Vernetzung die Verkehrssicherheit, indem sie durch Meldungen jedes vernetzten Verkehrsteilnehmers ein Gesamtlagebild des Verkehrs erzeugen, dass die Planung individueller Trajektorien oder von Routen ohne Eingriff eines menschlichen Fahrers ermöglicht. Viele Nachrichtentypen, die in Services für C-ITS Verwendung finden, wurden in Europa bereits von der ETSI definiert. Diese umfassen unter anderem:

- SPATEM (Signal Phase and Timing Extended Message) – Übermittlung aktueller und zukünftiger Signalzustände einer LSA mit Prognose voraussichtlicher Schaltzeitpunkte. Kann auch

² Sicherstellung der Einhaltung von Gesetzen, Regularien und Regeln

Geschwindigkeitsempfehlungen für Fahrzeuge bereitstellen. Kann nur in Kombination mit der Map Data korrekt interpretiert werden.

- MAPEM (Map Data Extended Message) – Übermittlung der Straßentopologie (Fahrstreifen, Konnektoren an Knotenpunkten zwischen eingehenden und ausgehenden Fahrstreifen). Ermöglicht die Lokalisierung im Straßenraum und die Trajektorien- und Fahrplanung.
- CAM (Cooperative Awareness Message) – Ego-Daten der C-ITS Station, z.B. eindeutige ID, Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Fahrtrichtung.
- DENM (Decentralized Environment Message) – Hinweis auf Ereignissen, z.B. Baustelle, Unfallstelle.

Im Bahnbereich gibt es schon seit einigen Jahren Beispiele für autonome Verkehre, bspw. die seit 2010 fahrerlos verkehrenden U-Bahn-Linien U2 und U3 in Nürnberg. Die Automatisierung dieser Systeme ist allerdings verglichen mit Verkehrssystemen wie der Straße einfacher zu realisieren, da es hier entweder wenige oder gar keine Kreuzungspunkte mit anderen Verkehrssystemen gibt. Insbesondere U-Bahnen-Strecken sind häufig planfrei und somit gibt es keine Konfliktpunkte mit z.B. Fahrzeugen oder Fußgängern. Im Straßenverkehr stellt sich die Situation aus ebendiesem Grund weitaus schwieriger dar. Von der Society of Automotive Engineers (SAE) wurden 2014 sechs verschiedene Stufen des automatisierten Fahrens, die sogenannten SAE Levels of Driving Automation, definiert und seitdem regelmäßig aktualisiert (Vgl. Abbildung 2). Insbesondere wird definiert, welche Funktionen auf den einzelnen Automatisierungsstufen vom Fahrer und welche von der Automation übernommen werden. Dies reicht von Warnfunktionen, wie z.B. Assistenten für tote Winkel, und automatische Bremsassistenten auf SAE Level 0 bis hin zu Funktionen, die eine autonome Bewegung des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung unter Beachtung der Umwelt auf SAE Level 5 erlauben. In Deutschland wurde durch die Einführung des „Gesetzes zum autonomen Fahren“ ein Rechtsrahmen für zukünftige autonome Straßenverkehre geschaffen. Insbesondere betrifft dies die Betriebsformen für autonomes Fahren in festgelegten Betriebsbereichen. Es gibt Modellversuche mit automatisierten Shuttles (z.B. das Tegel Shuttle³, Übersicht US-amerikanischer Testfelder in Haque und Brakewood (2020)), in ebendiesen festen Betriebsbereichen, um die Wirkungen von automatisierten Verkehren insbesondere auf die Nutzer zu erfassen und neue Möglichkeiten der Verkehrssteuerung zu erproben. Solche Tests sind bisher nur mit Fahrbegleitern möglich, die im Notfall oder bei einem Ausfall der Technik in die Fahrfunktion des automatisierten Fahrzeugs eingreifen können. Die in solchen Testfeldern im Einsatz befindlichen automatisierten Fahrzeuge operieren momentan auf SAE Level 3.

³ <https://www.bvg.de/de/verbindungen/see-meile>



SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™

Learn more here: [sae.org/standards/content/j3016_202104](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104)

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver’s seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	

Copyright © 2021 SAE International.

	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering OR • adaptive cruise control 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering AND • adaptive cruise control at the same time 	<ul style="list-style-type: none"> • traffic jam chauffeur 	<ul style="list-style-type: none"> • local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed 	<ul style="list-style-type: none"> • same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Abbildung 2: SAE-Stufen des automatisierten Fahrens

Quelle: <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>

Bezüglich des Themas **Bepreisung im Verkehr** gibt es grundsätzlich zwei zu unterscheidende Formen der Bepreisung: Bepreisung im Zuge der Nutzung der Verkehrsinfrastruktur und Bepreisung im Zuge der Nutzung einer Verkehrsdienstleistung. Auch wenn sich die vorliegende Studie nur mit dem ersten Themenbereich beschäftigt, werden hier vollständigerweise beide Formen erläutert.

Bepreisung von Verkehrsinfrastruktur wird häufig auch als Maut bezeichnet. Die Ziele einer Maut können hierbei vielfältig sein. Zu den bekanntesten Zielen gehören:

- Finanzierung des Erhalts von Infrastruktur,
- Nachfragesteuerung,
- Internalisierung von externen Effekten des Verkehrs wie Stau oder Emissionen.

Welche dieser Ziele mit der Einführung einer Maut erreichbar sind, hängt ebenfalls stark vom Mautobjekt ab. Häufig werden einzelne Objekte in Verkehrsnetzen wie Tunnel oder Brücken (Warnowtunnel, Rostock, Herrontunnel, Lübeck) bepreist, um einerseits Verlagerungseffekte zur Reduzierung der Verkehrsbelastung zu erreichen und andererseits eine (Teil-)Finanzierung der Infrastruktur sicherzustellen. Ein anderes Beispiel stellt

die Kordonmaut und insbesondere die City-Maut (z.B. London, Stockholm, San Francisco) dar. Hierbei wird das Befahren umgrenzter Straßennetzbereiche, bspw. Innenstädte, bepreist. Die Ziele sind hierbei ebenfalls die Verlagerung von Verkehr, bzw. der Umstieg auf Verkehrsmittel des Umweltverbands, um stark frequentierte Innenstädte vor allem in den Spitzenstunden zu entlasten. Hierbei sind allerdings die Erfassung und das Enforcement der Maut, also die Sicherstellung der Einhaltung der festgelegten Regeln, mit hohen Aufwänden verbunden. Bei City-Mauten kommen häufig Kameras zur Überwachung zum Einsatz, um illegales Befahren der Mautzonen erfassen zu können. Es gibt ebenfalls Beispiele für netzweite Mauten, die auf allen Straßen erhoben werden und z.B. von der Fahrleistung abhängig gemacht werden. Bei solchen Mauten werden vor allem lange Fahrten mit Kraftfahrzeugen vermieden oder zumindest entsprechend ihrer Auswirkungen auf Infrastruktur und Umwelt adäquat bepreist. Unabhängig vom Objekt oder der Technik der Maut sind die zu erreichenden Ziele jedoch meist strategischer Natur und es werden langfristige Veränderungen im Verkehrsgeschehen angestrebt.

In Deutschland wurde 2005 eine entfernungsabhängige Lkw-Maut eingeführt. Dieses wurde zunächst nur auf Bundesautobahnen erhoben, wurde jedoch mittlerweile auch auf Bundesstraßen ausgeweitet. Lkw-Fahrer melden sich hier entweder automatisch über eine ins Fahrzeug eingebaute OBU oder manuell über ein Webportal oder eine Mautstelle in das System. Kontrollen dieses Systems finden entweder automatisch an Kontrollbrücken oder manuell über mobile oder stationäre Kontrollen durch das Bundesamt für Mobilität und Logistik bzw. das Bundesamt für Güterverkehr. Die Einführung einer deutschlandweiten Maut für Pkw ist bisher allerdings gescheitert.

Die Bepreisung von Mobilitätsdiensten kann vereinfachend auch als Fahrpreis bezeichnet werden. Somit wären auch die Fahrpreise im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) letztlich eine Form der Mobilitätsbepreisung. Analog zur Bepreisung der Infrastruktur kann die Bepreisung von Mobilitätsdiensten somit als Gebühr für die Nutzung von Verkehrsmitteln (Fahrzeuge, Flugzeuge, Züge) und die für ihren Betrieb notwendigen Organisationsstrukturen betrachtet werden. Insbesondere im Flugverkehr und bei Demand Responsive Transport (DRT, nachfrageorientierte Personenbeförderung, z.B. uber) gibt es eine dynamische Komponente bei der Preissetzung. Diese besteht zum einen in der Dynamisierung der Preise auf Grundlage der anliegenden Nachfrage. Bei besonders hoher Verkehrsnachfrage werden auch die Nutzungsentgelte erhöht, um übermäßige Nachfrage bzw. Überbuchung des Angebots zu vermeiden und somit das eigene System lauffähig zu halten.

In wissenschaftlichen Publikationen ist die Bepreisung von Infrastruktur ein häufig betrachtetes Thema. Insbesondere die dynamische Bepreisung findet sich dort in den letzten Jahren verstärkt, da sie nachfrageorientiert ist und somit bessere Möglichkeiten der Einflussnahme auf Verkehrsströme ermöglicht. In Ziyuan Gu and Meead Saberi (2021) werden in einem simulationsbasierten Ansatz mehrere Methoden verglichen, um die optimale dynamische Bepreisung für eine gegebene Verkehrsnachfrage zu finden. Ein weiteres Paper vergleicht eine dynamische verlustzeit- und distanzbezogene Maut mit einer statischen Maut (Cheng, Qixiu & Liu, Zhiyuan & Szeto, W. (2019)). Auch auf die Nutzung von V2X-Daten wird in einigen Arbeiten Bezug genommen. Bezogen auf die Preissetzung kommen verschiedenste Methoden zum Einsatz, angefangen von analytischen Methoden bis hin zu Ansätzen aus dem Bereich des maschinellen Lernens (Sharon et al. (2017), Zhang et al. (2019)). Das DLR hat sich das Wirkprinzip eines Verkehrsmanagementsystems auf Basis dynamischer Preissetzung unter dem Patent 10 2019 203 347.4 schützen lassen. In Wesemeyer und Ruppe (2021) wurde dieses Managementsystem bereits grob vorskizziert und in einem generischen Szenario erprobt.

Verkehrsmanagement beschreibt den Prozess der steuernden Einflussnahme auf eine vorhandene Verkehrsinfrastruktur zur Umsetzung vorgegebener Ziele. Dieser Prozess richtet sich am Regelkreis des Verkehrsmanagements (vgl. Abbildung 3) aus. Die Grundannahme ist zunächst, dass es eine reale Welt mit einem vorhandenen Straßennetz gibt sowie ein virtuelles Abbild derselben in einer Verkehrssimulation. In der realen Welt erzeugen Nachfrage und Umwelteinflüsse Verkehrsflüsse, die wiederum in Reisezeiten für die Nutzer des Verkehrssystems resultieren. Diese Verkehrsflüsse können über verschiedene Sensoren erfasst und Kennzahlen wie z.B. Flüsse oder Belegungen erhoben werden. Diese Kennzahlen werden in die virtuelle Welt übertragen und in eine Form verarbeitet, dass die resultierenden Daten interpretiert werden können, um sie

in einer vordefinierten Steuerungsstrategie verwenden zu können. Diese Steuerungsstrategie bekommt meist ein vorgegebenes strategisches Ziel, wie z.B. die Minimierung der Reisezeiten im Netz. Beispielsweise könnten aus der Steuerungsstrategie Schaltzustände für alle LSAs im Netz für einen festen Prognosehorizont herauskommen, die für die gemessenen Flüsse und Belegungen die Reisezeiten minimieren. Nach einigen Testläufen in der Verkehrssimulation werden diese Schaltzustände als Steuerungsbefehle an die realen LSAs weitergegeben und beeinflussen wiederum den Verkehrsfluss.

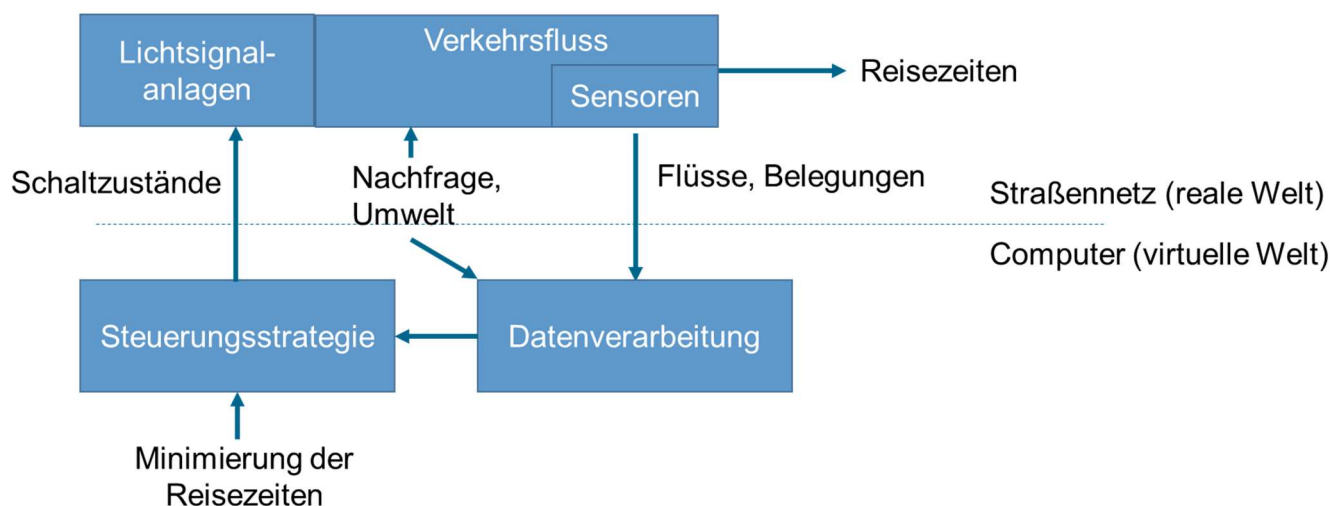


Abbildung 3: Regelkreis des Verkehrsmanagements

Eine grundlegende Möglichkeit des Verkehrsmanagements, die Steuerung von Verkehrsströmen über die Schaltung von LSAs, wurde zuvor ausführlich beschrieben. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, auf Veränderungen im Verkehrsgeschehen über dynamische Verkehrszeichen zu reagieren. Ein Beispiel hierfür ist die Änderung der Höchstgeschwindigkeiten auf Autobahnen. Bei einer Verdichtung des Verkehrs wird die Höchstgeschwindigkeit herabgesetzt, um die Stauentstehung zu verzögern. Ebenfalls auf Autobahnen kommen Techniken zur Zuflussdosierung, wie z.B. das Ramp metering, zum Einsatz.

- VMZen

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projekt „GreenValue“ wurde ein informeller Austausch mit der Firma Kapsch Telematic Services GmbH geführt. Dieses Austauschformat diente dazu, die Sichtweise eines etablierten Unternehmens im Bereich des Mobility Pricings in die Gestaltung des Systems einfließen zu lassen. Für eine eventuell spätere Erprobung des erarbeiteten Systems im Labor sowie im Testfeld sind solche Einsichten unerlässlich. Gleichzeitig erhielt Kapsch Einblick in die wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projekts.

2. Ergebnisse

2.1. Zielerreichung

2.1.1. AP 1 "Systemarchitektur eines Managementsystems für automatisierten Verkehr"

Ziel des AP 1 war die Definition einer Systemarchitektur für das dynamische Managementsystem sowie die Erfassung der Kommunikationsbedarfe. Hierfür wurden die folgenden Arbeitsschritte sequenziell durchgeführt:

- Erfassung der Stakeholder eines dynamischen Managementsystems für automatisierten und vernetzten Verkehr
- Erfassung der Kommunikationsangebote und -bedarfe der Stakeholder
- Identifikation von Kommunikationspartnern und -kanälen
- Abgleich der Kommunikationsinhalte mit existierenden V2X-Standards und Ableitung von Potenzialen für Erweiterungen

Im Ergebnis wurden verschiedene Schemata für die Darstellung der Stakeholder und ihrer Interaktionen erstellt. Die Erarbeitung dieser Schemata wird im Folgenden näher ausgeführt. Das in diesem Vorhaben beschriebene Managementsystem basiert auf dem in Kapitel 1.4 beschriebenen Regelkreis des Verkehrsmanagements. In Abbildung 4 wird die Anpassung von Elementen dieses Regelkreises für ein vernetztes, automatisiertes Verkehrssystem dargestellt. Die Rolle der messenden Sensoren wird statt von klassischen Induktionsschleifen oder Kameras von Roadside Units (RSU) übernommen, welche direkt Daten vernetzter Fahrzeuge, bspw. CAM, CPM und VAM, empfangen und zur Weiterverarbeitung an die virtuelle Welt übertragen. Die weiteren veränderten Elemente sind die Steuerungsimpulse (Routen, Preise, Trajektorien über MCM), die sich als Output aus der Steuerungsstrategie ergeben sowie die Aktoren, die Einfluss auf den Verkehrsfluss nehmen. Die Steuerungsimpulse bestehen in den Routenvorschlägen für die Nutzer sowie die resultierenden Preise. Diese werden direkt an die automatisierten, vernetzten Fahrzeuge übertragen, welche direkt darauf reagieren. Darüber hinaus nehmen die festgesetzten Preise Einfluss auf die Nachfrage, da durch eine Preissetzung im Straßenverkehr von einer Verlagerung einzelner Nutzer auf andere Modi zu erwarten ist.

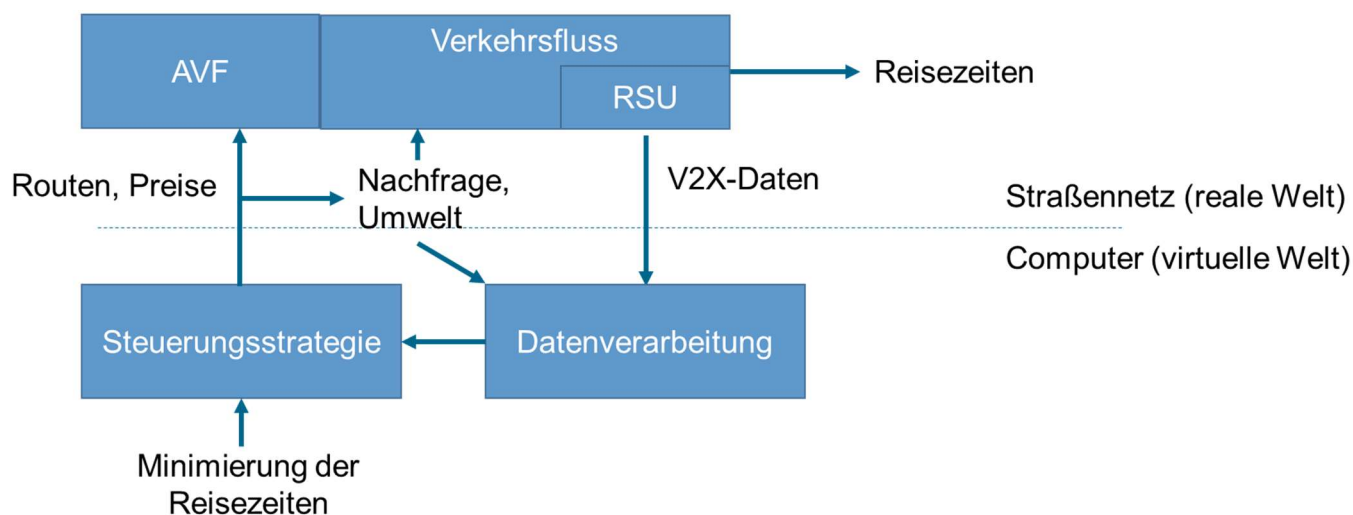


Abbildung 4: Regelkreis für ein Managementsystem eines vernetzten, automatisierten Verkehrssystems

Zunächst wird ein grober Überblick darüber gegeben, wie die Funktionsweise des zu definierenden Managementsystems ist. Unter der Annahme, dass ein Großteil der Fahrzeuge im urbanen Straßenverkehr in

Zukunft automatisiert und vernetzt sind und somit auch infrastrukturseitig die entsprechende Ausstattung mit RSUs vorhanden ist. Die Daten der AVF, insbesondere CAM und CPM, können zentral in einem Server zusammenlaufen. Dieser Server ist Teil eines dynamischen Verkehrsmanagementsystem. Das Verkehrsmanagementsystem hat vonseiten eines öffentlichen Auftraggebers (z.B. Gemeinde, Landkreis) die Aufgabe, ein Gleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und -nachfrage herzustellen und die negativen Effekte des Verkehrs (z.B. Stau und Emissionen) zu reduzieren. Wie genau dieses strategische Ziel definiert ist, obliegt dabei der öffentlichen Hand. Das dynamische Managementsystem verwendet als Mittel zur Zielerreichung dynamische Preise, mit denen operative Steuerungsmaßnahmen im Verkehr umgesetzt werden, bspw. die Vergabe von Routen für Fahrzeuge. Diese Preise werden auf Grundlage einer aktuellen Verkehrslage gesetzt, die sich aus den von AVF übertragenen Daten ergibt.

Die Routen für Fahrzeuge werden nachfolgendem Vorgehen vergeben: Bei Vorliegen einer neuen Anfrage und unter Angabe von Start- und Zielort berechnet das Managementsystem eine optimale Route, gegeben die aktuelle Verkehrsbelastung im Netz. Dem Nutzer werden mehrere Alternativrouten präsentiert, die bspw. nach den Kriterien Reisezeit oder Kosten optimiert wurden. Der Nutzer wählt aus den vorgeschlagenen Routen eine Alternative aus und erhält vom System eine Nutzungserlaubnis für den Straßenraum, einen Slot. Dieser Slot stellt den physischen Platz dar, den das Fahrzeug im Straßenraum einnehmen darf. Es ist gleichzusetzen mit einer Durchfahrterlaubnis für einen definierten Straßenbereich zu einem bestimmten Zeitpunkt. Für ein Funktionieren des Systems benötigt jedes Fahrzeug einen solchen Slot. Über den Slot bekommen die Fahrzeuge zudem Informationen, welcher Trajektorie sie folgen müssen, z.B. bei Fahrstreifenwechseln oder Abbiegevorgängen. Sobald ein Fahrzeug an seinem Zielort angekommen ist, wird der Slot entfernt.

Die Ergebnisse des AP 1 wurden im ersten Schritt in einem DLR-internen Expertenworkshop erarbeitet. Hierbei galt es zunächst, die Stakeholder des Systems zu identifizieren. Eine schematische Übersicht der Stakeholder kann Abbildung 5 entnommen werden.

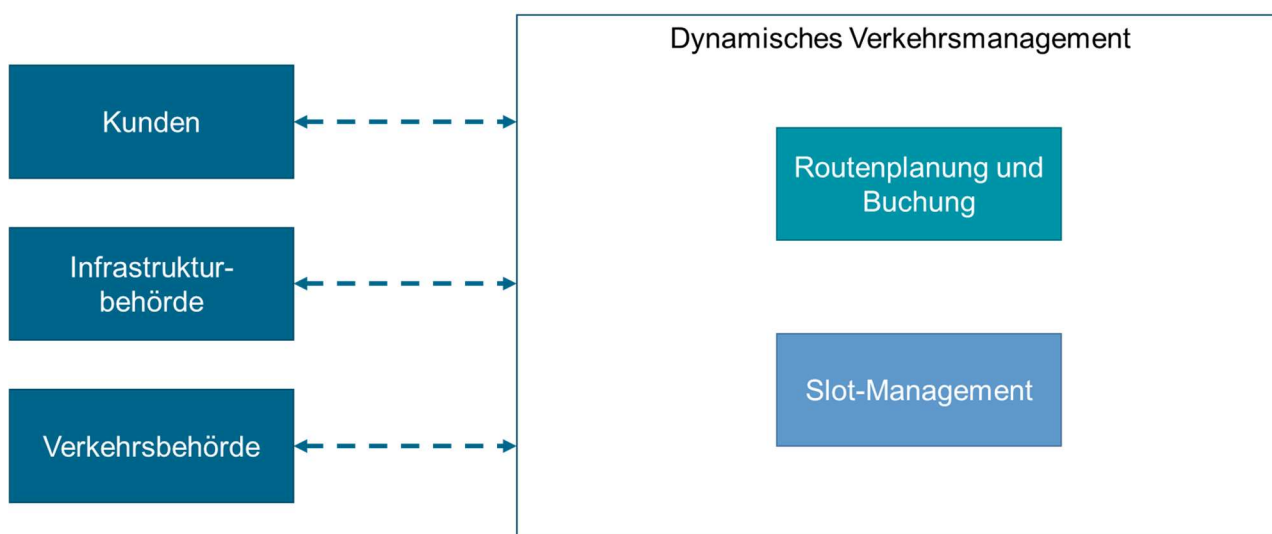


Abbildung 5: Stakeholder des dynamischen Managementsystems

Grundsätzlich gilt es zwei Gruppen von Akteuren zu unterscheiden: Das **dynamische Verkehrsmanagement** einerseits und andererseits alle Stakeholder, die nicht Teil dieses Systems sind. Als Teil des Managementsystems können die beiden Teilsysteme **Routenplanung und Buchung** sowie **Slot-Management** betrachtet werden. Auf die Funktionsweisen und Informationsflüsse innerhalb der Teilsysteme wird später noch im Detail eingegangen. Sonstige Stakeholder, die nicht Teil des Managementsystems sind, aber sehr wohl mit diesem interagieren, sind **Kunden** bzw. Nutzer des Systems (z.B. Privatnutzer, Unternehmen mit Fahrzeugflotten, Anbieter von Mobilitätsdiensten), die **Infrastrukturbehörde** (zuständig für Betrieb und Instandhaltung von Straßen) sowie die **Verkehrsbehörde** (zuständig für das Verkehrsmanagement).

Eine Übersicht der Akteure mit ihren jeweiligen Rollen, Zielen und Einflussdimensionen innerhalb des Verkehrsgeschehens ist in Tabelle 1 dargestellt. Jeder Verkehrsteilnehmer, der ein motorisiertes Verkehrsmittel benutzt, ist automatisch auch ein Kunde des dynamischen Verkehrsmanagements, da alle Fahrzeuge registriert und erfasst sein müssen. Andernfalls ließe sich die Optimalität der berechneten Preise nicht sicherstellen. Die Anliegen der Nutzer sind schnelle Verbindungen von ihren Startpunkten zu ihren Zielorten, d.h. möglichst direkte Routen ohne übermäßige Umwege. Zudem sollen die Zeitverluste durch Stau minimal gehalten werden und die Kosten sollten sich innerhalb eines angemessenen Rahmens bewegen. Stau und sonstige externe Effekte des Verkehrs gering zu halten, sind ebenfalls eines der Hauptanliegen der öffentlichen Hand (Infrastrukturbehörde und Verkehrsbehörde). Ebenso soll der Betrieb des Straßennetzes und seiner Steuerungselemente möglichst kostengünstig, bzw. bedarfsgerecht, finanziert sein. Dazu sollte übermäßiger Neubau von Infrastruktur vermieden werden und maximal der Erhalt bestehender Verkehrswege angestrebt werden. Als Auftraggeber und Finanzgeber des Verkehrsmanagements in der Kommune oder Region wird das Ziel der kostengünstigen Finanzierung ebenfalls an den Betreiber des dynamischen Managementsystems weitergegeben. Dieser soll mit angemessenen Investitionen in Hardware und Infrastruktur durch steuernden Eingriff ein Gleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und -nachfrage erreichen. Dieses soll im Rahmen des hier betrachteten Managementsystems in erster Linie durch die Verteilung von Nutzer auf vorgegebene Routen erreicht werden. Die Routenberechnung basiert auf zuvor festgelegten strategischen Zielen der Verkehrsbehörde zzgl. der von der Infrastrukturbehörde freigegebenen Verkehrswege und festgelegten Kapazitäten. Die Nutzer haben schließlich die Möglichkeit, aus den zulässigen Routen ihre Vorzugsvariante auszuwählen.

Tabelle 1: Akteure

	Kunden	Betreiber des dynamischen Managementsystems	Öffentliche Hand (Betreiber von Infrastruktur und Verkehrsbehörde)
Rolle	- Nutzer der Verkehrsinfrastruktur oder einer Mobilitätsdienstleistung	- Betrieb des dynamischen Verkehrsmanagementsystems und seiner Subsysteme	- Auftraggeber und Finanzgeber des Verkehrsmanagements
Ziele	- Schnelle Verbindungen zwischen Start- und Zielort - Wenig Zeitverlust durch Stau - Geringe Kosten	- Gleichgewicht zwischen Verkehrsnachfrage und -angebot herstellen - Operative Kosten gering halten	- Reduktion von negativen Effekten des Verkehrs (z.B. Stau, Emissionen) - Erhalt bestehender Infrastruktur ohne übermäßigen Neubau - Kostengünstiger Betrieb
Möglichkeiten der Einflussnahme	- Auswahl der individuellen Route	- Verteilung der Nutzer auf Routen	- Festlegung von Kapazitäten für Infrastrukturelemente - Ausbau / Sperrung von Infrastruktur - Vorgabe von strategischen Zielen

Im nächsten Schritt werden die Informationsangebote und -bedarfe der verschiedenen Stakeholder näher beleuchtet. Diese sind in Tabelle 2 als Übersicht dargestellt. Die Kunden oder Verkehrsteilnehmer können in erster Linie Daten zu ihren geplanten Ortsveränderungen wie z.B. den Startpunkt sowie den Zielort und die gewünschte Ankunftszeit bereitstellen. Diese Informationen werden typischerweise vor Fahrtantritt (off-trip)

mitgeteilt. Während der Fahrt (on-trip) können wiederum die aktuellen Positionen und Geschwindigkeiten des Fahrzeugs mitgeteilt werden, um den Weg einzelner Fahrzeuge nachvollziehen zu können bzw. aus den einzelnen Routen eine Gesamtverkehrslage generieren zu können. Die Kunden benötigen hierzu Routenempfehlungen nebst Kosten vor Fahrtantritt bzw. während der Fahrt, um auf Routenänderungen hingewiesen zu werden. Auch die Straßentopologie ist für die automatisierte Berechnung von Trajektorien erforderlich. Die Routen mit ihren dazugehörigen Kosten sowie die Trajektorien werden vom Betreiber des Verkehrsmanagements bereitgestellt. Dieser nimmt die Kundeninformationen (Start- / Zielpositionen, aktuelle Positionen und Geschwindigkeiten, Ankunftszeiten) entgegen und berechnet anhand dieser Angaben optimale Routen für die einzelnen Nutzer. Allerdings muss er hierfür auch Kenntnis über die Infrastruktur, die aktuelle Verkehrslage und die zu erreichenden Steuerungsziele besitzen. Diese wiederum erhält er von der öffentlichen Hand. Die Behörden haben wiederum keine zwingenden Informationsbedarfe, allerdings ist ein Zurückspielen der dynamischen Verkehrsdaten denkbar, um diese in die Gesamtverkehrslage zu übernehmen. Somit ergeben sich direkte Kommunikationskanäle nur zwischen Kunden und dem Betreiber des dynamischen Verkehrsmanagements einerseits sowie dem Betreiber und der öffentlichen Hand andererseits. Auf Grundlage dieser Analyse werden nun die weiteren Prozesse des Managementsystems und die Interaktionen mit der Umwelt entworfen.

Tabelle 2: Informationsangebote und -bedarfe der Stakeholder

Stakeholder	Informationsangebote	Informationsbedarfe
Kunden	Start- / Zielpositionen Gewünschte Ankunftszeit Aktuelle Fahrzeugpositionen Fahrzeuggeschwindigkeiten	Routen Kosten Trajektorien Topologie
Betreiber des dynamischen Verkehrsmanagements	Routen Kosten Trajektorien	Start- / Zielpositionen Aktuelle Fahrzeugpositionen Fahrzeuggeschwindigkeiten Allgemeine Verkehrslage Infrastrukturdaten Steuerungsziele
Öffentliche Hand	Steuerungsziele Infrastrukturdaten Verkehrslage	Dynamische Verkehrsdaten

Betrachten wir nun die Teilaspekte des Systems etwas genauer. Die Routenplanung und Buchung verteilt Nutzeranfragen auf das Verkehrsnetz, gegeben die Steuerungsziele der Infrastruktur- und Verkehrsbehörden. Zur Veranschaulichung der Abläufe wurde auf zwei Prozesse im speziellen eingegangen: Die Anfrage einer neuen Route (vgl. Abbildung 6) und die Aktualisierung einer Route während der Fahrt (vgl. Abbildung 7). Es wurde die Darstellungsform des Sequenzdiagramms gewählt, da auf diese Weise komplexe Abläufe zwischen verschiedenen Akteuren übersichtlich dargestellt werden können.

Bei der Routenanfrage werden zunächst vom Kunden Start- und Zielposition sowie die gewünschte Ankunfts- oder Abfahrtszeit an das Buchungsportal des dynamischen Managementsystems übertragen. Das Buchungsportal wiederum ist mit dem Routing- und Bepreisungsalgorithmus im Backend-System verbunden und stellt eine Routenanfrage. Der Algorithmus fragt hierfür zunächst die aktuellen Daten von Infrastruktur- und Nachfragemanagement ab sowie vom Bepreisungsmanagement die Parameter der Bepreisungsfunktion. Nach der erfolgten Routenberechnung durch den Algorithmus wird von diesem eine vorläufige Reservierung an das Nachfragemanagement gesendet. Bevor diese endgültig bestätigt wird, werden die berechneten Alternativen dem Kunden präsentiert. Sofern sich dieser für eine Route entscheidet, wird diese für ihn

bestätigt. Bei Zurückweisen der präsentierten Alternativen wird die vorläufige Reservierung gelöscht und die Anfrage abgebrochen. Der Kunde hat dann die Möglichkeit, mit veränderten Einstellungen eine neue Anfrage zu stellen oder auf einen anderen Transportmodus zu wechseln.

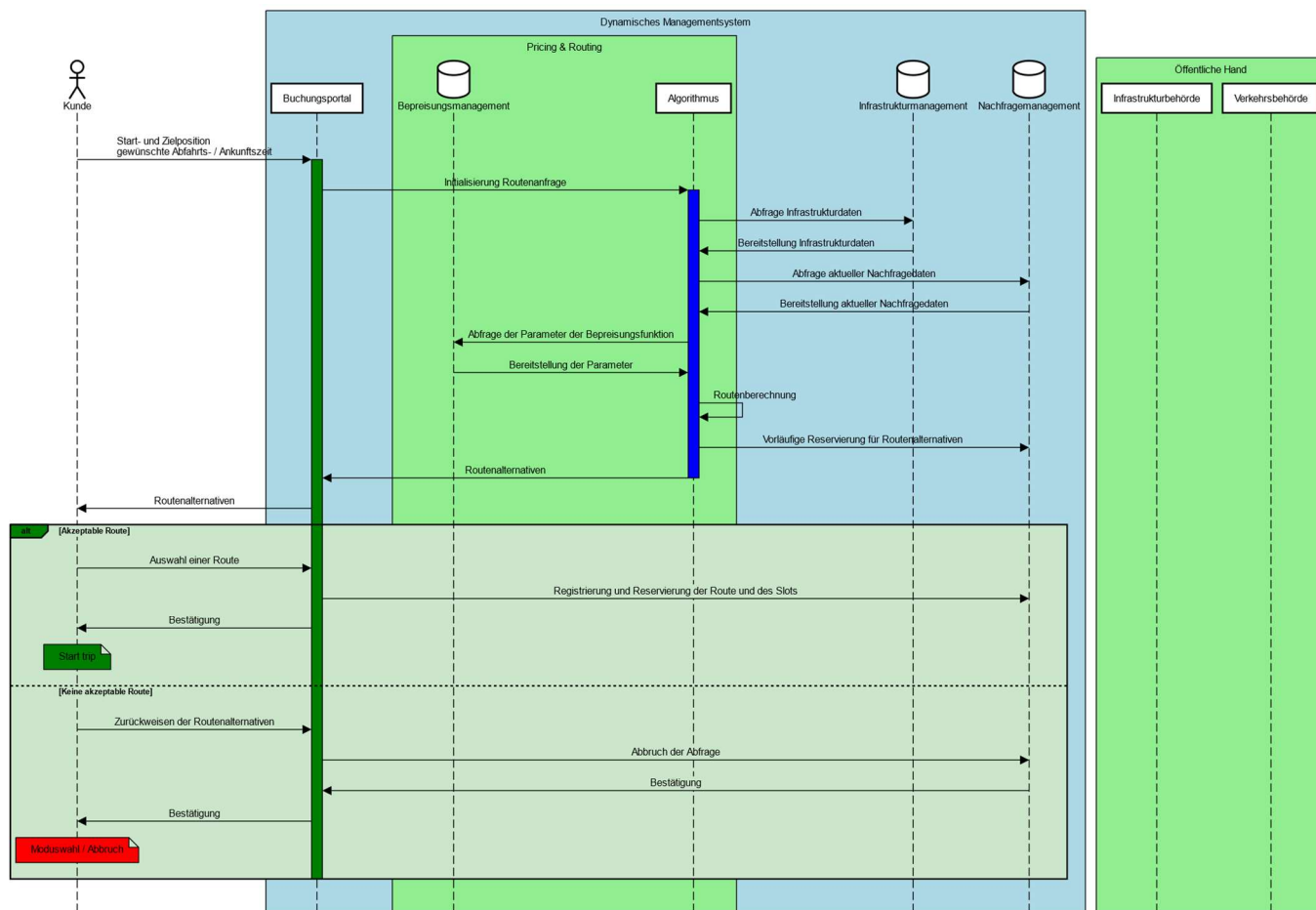


Abbildung 6: Beispielhafter Ablauf einer Routenanfrage

Der zweite Prozess, der auf diese Weise analysiert wird, ist die Änderung einer Route während der Fahrt (vgl. Abbildung 7). Hierbei überträgt der Kunde kontinuierlich seine Daten zu aktueller Position und Geschwindigkeit an das Nachfragemanagement des dynamischen Managementsystems. Dort werden die Daten einerseits gespeichert und für weitere Berechnungen und Analysen vorgehalten, als auch an die Verkehrsbehörde weitergeleitet. Ebenso werden durch das Nachfragemanagement des dynamischen Managementsystems kontinuierlich Daten der Verkehrsbehörde zur aktuellen Verkehrslage abgefragt, ebenso aktuelle Infrastrukturdaten durch das Infrastrukturmanagement. Das Bepreisungsmanagement des dynamischen Managementsystems stößt in regelmäßigen Abständen (Planungshorizont) ein Re-Routing – eine Neuberechnung - für alle aktuellen Routen an. Dieses Re-Routing wird durch den Algorithmus durchgeführt, der die Ergebnisse, die neuen optimalen Routen und Preise, an das Bepreisungsmanagement zurückgibt. Für jeden Kunden wird nun überprüft, ob sich die jeweilige optimale Route geändert hat. Falls ja, wird dieser über die Änderungen hinsichtlich Route und Preis informiert. Hierbei ist wichtig festzustellen, dass der neue Preis zwar ggf. unter aber niemals über dem ursprünglichen Preis liegen darf, den der Kunde ursprünglich bezahlen sollte. Auf diese Weise wird die Akzeptanz und Transparenz des Systems gegenüber den Nutzern verbessert werden und eine Art Maximalpreisgarantie gegeben werden. Der Kunde wird nun vor die Wahl

gestellt, die Änderungen und den neuen Preis zu akzeptieren oder sie abzulehnen. Im Fall der Annahme wird die Routenalternative vom System registriert und die erfolgte Änderung entsprechend dem Nutzer bestätigt. Falls der Kunde ablehnt, ist die Optimalität des Systems nicht mehr vollständig gewährleistet, was in einem erhöhten Entgelt für den betreffenden Kunden resultiert. Dieses wird ihm wiederum mitgeteilt und er kann auf seiner ursprünglichen Route verbleiben.

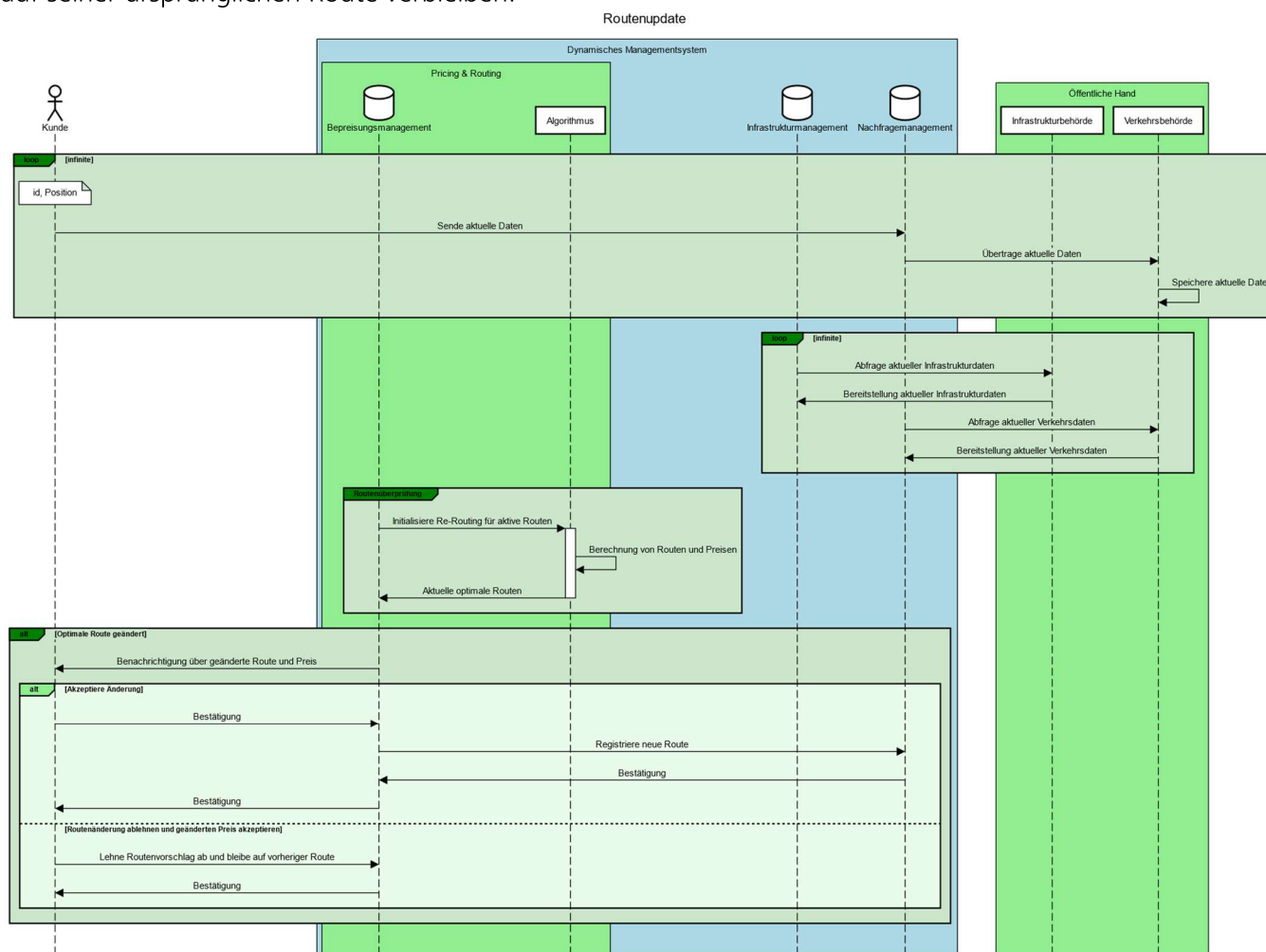


Abbildung 7: Beispielhafter Ablauf einer Routenänderung

Die soeben beschriebenen Prozesse wurden im nächsten Schritt auf vereinfachende Interaktionsschemata übertragen. Hierbei wurden einzelne Zwischenschritte der Interaktionen bewusst weggelassen, um herauszustellen, welche Stakeholder bei den einzelnen Prozessen miteinander in Verbindung treten.

In Abbildung 8 sind diese Interaktionen für den Prozess **Routenplanung und Buchung** innerhalb des dynamischen Managementsystems dargestellt. Das Schema wurde um den Akteur **Zustandssimulation** erweitert, der die digitale Abbildung von Infrastruktur und Verkehr darstellt. Die einzigen Interaktionen von nicht-systemeigenen Akteuren finden über das Buchungssystem sowie das Infrastruktur- und das Nachfragemanagement statt. Interne Akteure sind der Optimierungsalgorithmus sowie die Zustandssimulation, die für die Planung von Routen und die Berechnung von Preisen im Backend zuständig sind.

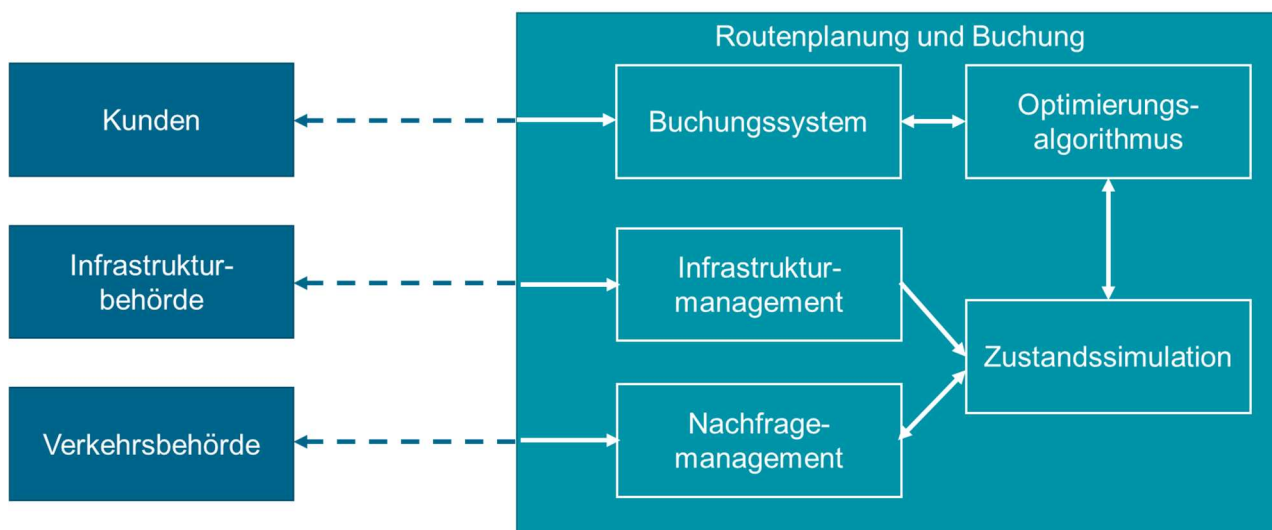


Abbildung 8: Schema der Interaktionen bei Routenplanung und Buchung

Abbildung 9 stellt das Interaktionsschema des Slot-Managements dar. Dieser Prozess findet während der Fahrt statt und somit entfällt das Buchungssystem als Akteur. Der Kunden interagiert nun direkt mit dem Nachfragemanagement, dem er seine aktuellen Positions- und Geschwindigkeitsdaten zur Verfügung stellt. Über die Verarbeitung von Infrastruktur- und Nachfragedaten in der Zustandssimulation werden die resultierenden Fahrzeug-Slots in der Slot-Verwaltung registriert und deren Bewegungen durch das Straßennetz vorausgeplant.

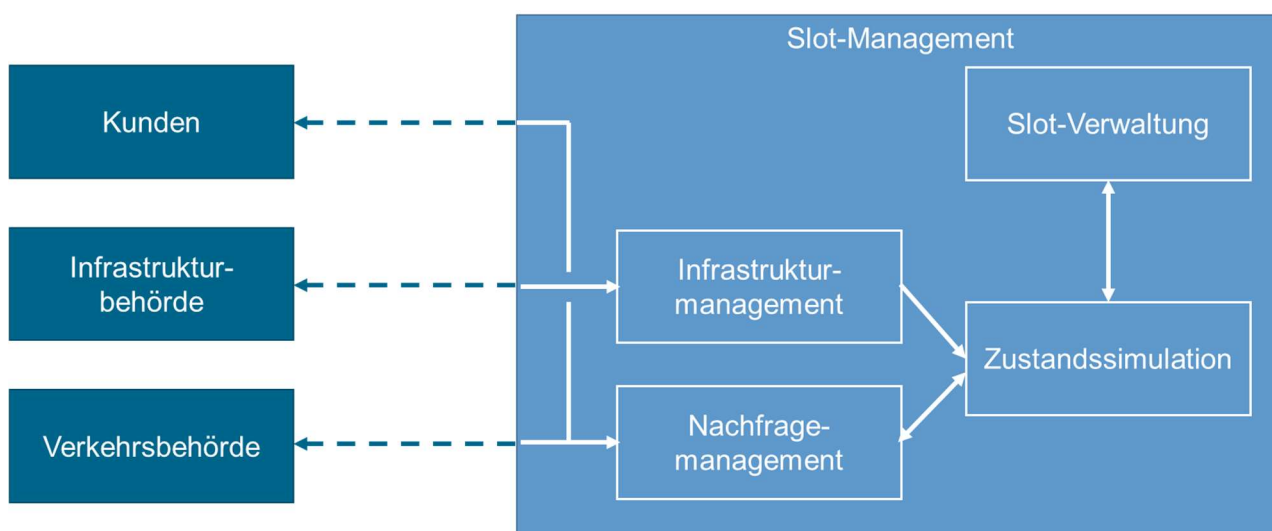


Abbildung 9: Schema der Interaktionen bei Slot-Management

Der letzte Arbeitsschritt innerhalb des AP 1 betrifft den Abgleich der Inhalte der Kommunikation zwischen den Stakeholdern mit existierenden V2X-Standards. Ziel ist eine Beurteilung, ob V2X als Kommunikationstechnologie geeignet ist, die notwendigen Inhalte für ein Funktionieren des in diesem Vorhaben definierten dynamischen Managementsystems zu transportieren.

Um die Frage zu beantworten, ob V2X im Rahmen dieses Managementsystems als Kommunikationstechnologie verwendet werden kann, müssen zwei Unterfragen beantwortet werden:

- Zu welchem Zeitpunkt werden Informationen zwischen den Stakeholdern ausgetauscht?
- Mit welchen existierenden Standards können diese Informationen übermittelt werden?

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 3 dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass ein Großteil der Informationen, die im dynamischen Managementsystem zwischen den Akteuren ausgetauscht werden, durch existierende V2X-Standards abgedeckt werden. Dies betrifft in erster Linie Informationen, die während der Fahrt ausgetauscht werden (z.B. aktuelle Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten, Trajektorien und Straßentopologie), was auch der eigentliche Anwendungsbereich von V2X ist. Lediglich Informationen, die im Vorfeld von Fahrten zwischen Kunden und dem System ausgetauscht werden, z.B. Start- und Zielpositionen von Fahrten, werden vor Fahrtantritt übermittelt und sind nicht in bestehenden V2X-Nachrichten abbildbar. Gleiches gilt für Routenempfehlungen und damit verbundene Kosten. Da die Routenempfehlungen allerdings auch während der Fahrten übermittelt werden, gäbe es hier Potenzial für eine mögliche Erweiterung in Form eines neuen Nachrichtentyps. Vonseiten der V2X-Community sind bereits Überlegungen in Richtung einer vernetzten und kooperativen Navigation gemacht worden⁴, allerdings haben solche Use-Cases noch keinen Einzug in die Welt der V2X-Standards erhalten.

Tabelle 3: Abgleich Kommunikationsinhalte mit existierenden ETSI-V2X-Nachrichtentypen

Information	Zeitpunkt der Übermittlung	ETSI-Nachrichtentypen
Aktuelle Fahrzeugposition Fahrzeuggeschwindigkeit	On trip	CAM (Nutzer) IVIM (System)
Topologie	On trip	MAPEM (System) SPATEM (System)
Trajektorien	On trip	MCM (System)
Start- / Zielpositionen Gewünschte Ankunftszeit	Off trip	-
Routenempfehlungen mit Kosten	Off trip & on trip	-

2.1.2. AP 2 “Aufbau eines geeigneten Simulationsmodells”

In AP 2 wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, um simulationsbasierte Tests des zuvor entworfenen dynamischen Managementsystems zu ermöglichen. Die untergeordneten Arbeitsschritte hierbei umfassten:

- Auswahl eines Untersuchungsgebiets
- Erstellung des Infrastrukturmodells
- Erzeugung der Verkehrsnachfrage
- Programmierung des Managementsystems

Im Ergebnis wird hierbei ein digitales Abbild des Untersuchungsgebiets erstellt in Form eines detaillierten Straßennetzes bis auf die Ebene von Wohnstraßen sowie eines realitätsnahen Nachfragemodells. Der zweite Teil des Ergebnisses umfasste den ausführbaren Quellcode, der die Funktionsweise des zuvor entworfenen dynamischen Managementsystems nachbildet.

Bezüglich der Auswahl des Untersuchungsgebiets wurden zunächst einige Rahmenbedingungen festgelegt, die es einzuhalten galt:

⁴ <https://www.c-roads-germany.de/english/c-its-services/route-advice/>

- Das Untersuchungsgebiet sollte zumindest zum Teil einen urbanen Raum abbilden, da die in diesen Raumtypen stattfindenden Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern ein höheres Potential für Konflikte beinhalten und daher auch inhärent ein Bedarf nach Verkehrsmanagements besteht.
- Das Verkehrsaufkommen im Untersuchungsgebiet sollte groß genug sein, um die Einrichtung eines Verkehrsmanagements rechtfertigen zu können. Andererseits sollte es sich nur in Größenordnungen bewegen, die innerhalb einer angemessenen Rechenzeit berechenbar sind.
- Für das Untersuchungsgebiet müssen Eingangsdaten, z.B. betreffend die Infrastruktur, Verkehrszählungen oder Mobilitätsbefragungen, in einer zumindest ausreichenden, idealerweise aber hohen Verfügbarkeit vorliegen. Dies betrifft sowohl das absolute Vorhandensein solcher Daten als auch deren Aktualität.

Auf Grundlage der soeben genannten Rahmenbedingungen wurden verschiedene Varianten an Untersuchungsräumen betrachtet und bewertet. Schließlich fiel die Wahl auf die Stadt Braunschweig, genauer gesagt das Stadtgebiet zwischen Stockheim und dem Braunschweiger Flughafen (vgl. Abbildung 10). Ein wichtiger Grund für die Auswahl Braunschweigs lag darin, dass von einer anderen Arbeitsgruppe des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik bereits Vorarbeiten an einem Simulationsmodell geleistet wurden. So gab es bereits ein grobes Infrastrukturmodell des Stadtgebiets und vom DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik wurden Nachfragedaten in Form von Wegetagebüchern aus der Mobilitätsbefragung „Mobilität in Deutschland“ (MiD) zur Verfügung gestellt.

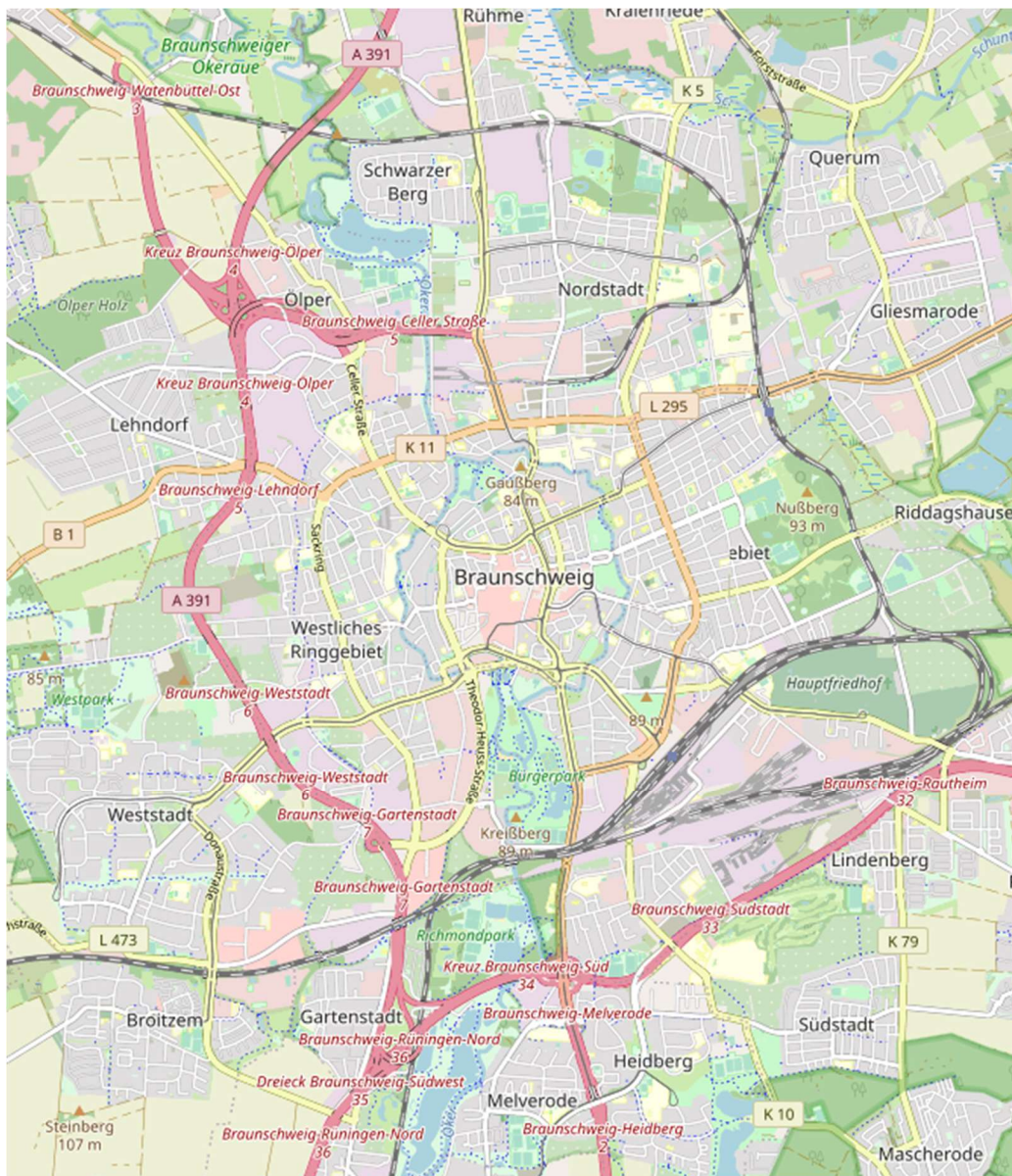


Abbildung 10: Kartendarstellung des Untersuchungsraums, Quelle: OpenStreetMap

Im Vorfeld der Modellerstellung muss noch die Frage geklärt werden, welche Simulationsumgebungen für das Vorhaben geeignet sind. Auch hier werden zunächst Anforderungen an die Simulation gesammelt, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können:

- Bezüglich der Rechenzeit sollte es möglich sein, großräumige Szenarien effizient und schneller als in Echtzeit zu berechnen. Das ist notwendig, um eine hinreichend große Anzahl an Daten für statistisch signifikante Ergebnisse generieren zu können.
- Die Darstellung der Verkehrsteilnehmer sollte als Einzelobjekte oder Agenten möglich sein. Da das Vorhaben sich zum Ziel gesetzt hat, nicht nur Verkehrsströme zu organisieren, sondern auch Einzelfahrzeuge und deren Bewegungen durch das Straßennetz anhand von Slots zu managen, ist es vonnöten, eine mikroskopische Simulation zu verwenden. Das bedeutet ebenfalls, dass das Straßennetz bis auf Ebene einzelner Fahrstreifen modelliert werden können muss.
- Während der laufenden Simulation muss es möglich sein, Fahrzeugdaten zu erheben und steuernd auf die Fahrzeuge einzuwirken. Diese Rahmenbedingung ergibt sich aus der geschlossenen

Kontrollschleife aus Abbildung 3 sowie Abbildung 4. Eine kontinuierliche Messung der aktuellen Verkehrssituation ist notwendig, um kontrollieren zu können, ob die eingesetzten Steuermethoden zum gewünschten Ergebnis geführt haben oder nicht.

Die genannten Kriterien werden allesamt von der DLR-eigenen Verkehrssimulation SUMO (Simulation of Urban Mobility) (Pablo Alvarez Lopez et al. (2018)) erfüllt. SUMO ist eine mikroskopische Verkehrssimulation, die bereits in zahlreichen Szenarien erprobt und weiterentwickelt wurde. Die Abbildung verschiedenster Transportmodi, z.B. Fußgänger, Radfahrer, Kfz, Bahnen oder auch Ride-sharing, ist mittlerweile möglich. Über die Schnittstelle TraCI (Traffic Control Interface) ist es zudem möglich, Objekte in der Simulation zur Laufzeit zu beeinflussen oder Daten von diesen Objekten abzufragen. Beispiele hierfür sind das Ändern einer Fahrzeugroute oder das Abfragen eines aktuellen Signalzustands an einer LSA.

Nach der Auswahl einer geeigneten Simulationsumgebung wird im Folgenden näher auf die Erstellung des Modells eingegangen.

Im ersten Schritt der Modellerstellung wird das bereits bestehende Infrastrukturmodell verfeinert. Das bestehende Modell wurde mit dem SUMO-Tool OSM Web Wizard automatisiert aus OpenStreetMap-Daten (OSM) generiert. Bei dieser automatischen Netzwerkgenerierung vom OSM-Format in das SUMO .net.xml-Format kommt es zwangsläufig zu Ungenauigkeiten und Fehlern in der Abbildung von Straßen. Die Qualität des vorläufigen Ergebnisses ist allerdings auch stark abhängig von den in OSM hinterlegten Daten zu Verkehrswegen. Beispielsweise werden durch das SUMO-Tool für alle Straßentypen Standard-Parameter angenommen, die Verwendung finden, wenn die entsprechenden Parameter in OSM nicht gesetzt sind. Insbesondere betrifft dies die zulässige Höchstgeschwindigkeit und die Anzahl der Fahrstreifen. An Kreuzungen müssen in der Regel die Fahrbeziehungen und deren Zuordnung zu LSA-Phasen händisch nachbearbeitet werden, da diese mikroskopischen Daten im vereinfachten OSM-Datenmodell nicht oder zu ungenau hinterlegt sind. Im verwendeten Infrastrukturmodell wurden an sämtlichen lichtsignalgesteuerten Kreuzungen Festzeitsteuerungen verwendet, d.h. LSA-Programme mit fester Signalfolge und fester Umlaufzeit. Diese Entscheidung wurde getroffen, da eine händische Einarbeitung aller real existierenden LSA-Programme zwar möglich, allerdings mit unverhältnismäßig hohen Aufwänden verbunden gewesen wäre und modellseitig kaum Verbesserungen hinsichtlich des Realitätsgrades gegeben hätte. Dennoch wurden strategische LSA-Schaltungen wie Beispielsweise der Grünzeitversatz auf den Anlagen des Braunschweiger Stadtrings zur Schaffung einer Koordinierung (Grüne Welle) umgesetzt.



Abbildung 11: Infrastrukturmodell des Untersuchungsraums

Nach erfolgter Erstellung des Infrastrukturmodells wird die Nachfrageerzeugung für das Simulationsmodell begonnen. Hierfür wird zunächst das Verkehrsaufkommen im Stadtgebiet Braunschweigs erhoben. Laut Pendleratlas der Bundesagentur für Arbeit⁵ gibt es ca. 133.000 tägliche Pendlerbewegungen in Braunschweig. Diese verteilen sich auf 28.000 Binnenpendler, 38.000 Aus- sowie 67.000 Einpendler von und nach Braunschweig (vgl. Abbildung 12).

⁵ <https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Pendleratlas/Pendleratlas-Nav.html>

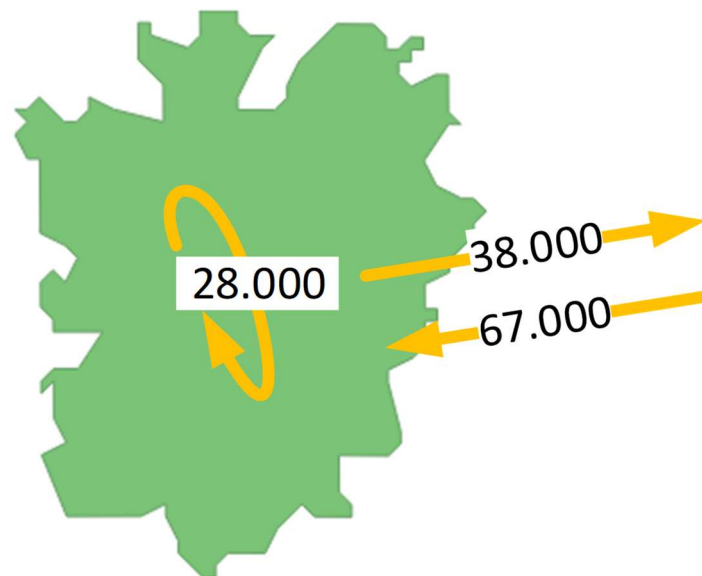


Abbildung 12: Pendlerbeziehungen im Untersuchungsgebiet

Da es in SUMO kein natives Tool zur Nachfrageerzeugung auf Grundlage von Verkehrszählungen oder Mobilitätsbefragungen gibt, ist hier die Verwendung eines weiteren Tools notwendig. Das DLR-Institut für Verkehrsforschung hat das Verkehrsmodell TAPAS (Travel and Activity Pattern Simulation) (Hertkorn (2005)) entwickelt, das Daten zur Personenverkehrsnachfrage in urbanen Räumen liefert. Als Eingangsdaten werden soziodemografische Daten einer zu modellierenden Bevölkerung sowie Daten zum individuellen Verkehrsverhalten verwendet und in Aktivitäten und Ortsveränderungen übersetzt, sogenannte Agenten-Tagespläne. Diese Verhaltensdaten können bspw. aus repräsentativen Wegetagebüchern für eine gegebene Bezugsregion der Verkehrsbefragung MiD stammen. Über eine Middleware werden die Agenten-Tagespläne aus TAPAS in SUMO-Fahrten übersetzt, damit sie in unserem Modell Anwendung finden können. Auf diese Weise wurden für unser Simulationsmodell ungefähr 600.000 Fahrten mit Pkw für einen simulierten Tag modelliert. Die genannten Arbeitsschritte sind zusammengefasst in Abbildung 13 dargestellt.

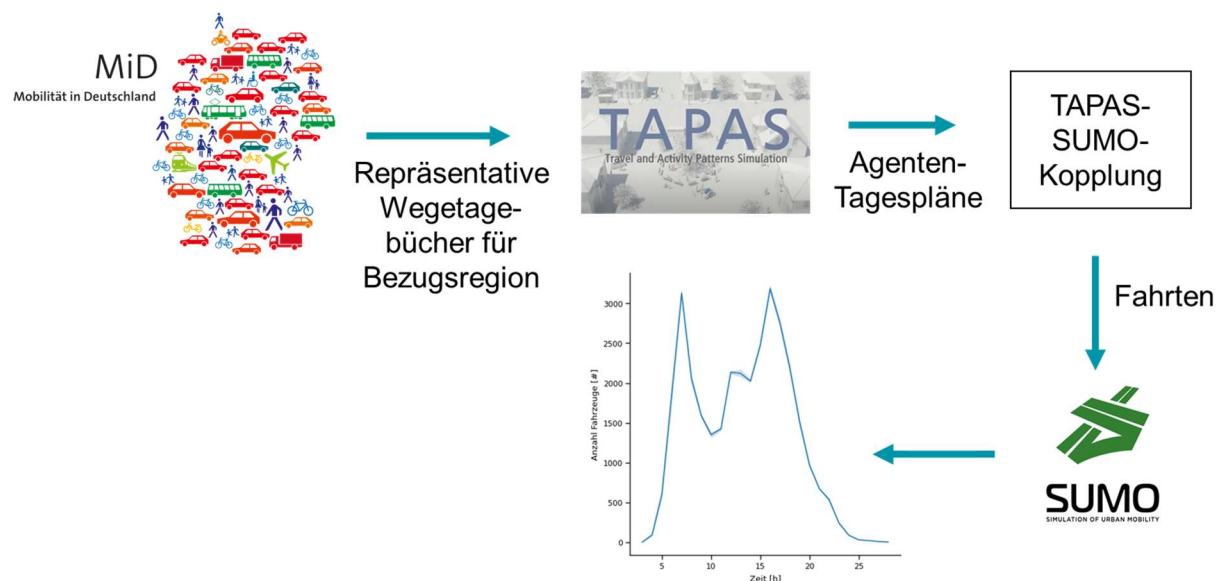


Abbildung 13: Arbeitsschritte zur Nachfragerzeugung

Die auf diese Weise erzeugte Verkehrsnachfrage besteht vollständig aus Fahrzeugen des motorisierten Individualverkehrs. Um eine realistische Durchmischung des Fahrzeugbestands und somit des Verkehrsgeschehens modellieren zu können, wurden die Fahrzeuge in drei Größenklassen eingeordnet. Diese Fahrzeugklassen unterscheiden sich jedoch nur in ihren Dimensionen und nicht in ihren fahrdynamischen Eigenschaften. Die in Tabelle 4 dargestellten Fahrzeugklassen besitzen bspw. alle die gleichen minimalen Zeitlücken, d.h. es wird zu einem vorausfahrenden Fahrzeug mindestens ein zeitlicher Abstand von 1,5 Sekunden eingehalten.

Tabelle 4: Parametrierung der simulierten Fahrzeugklassen

Fahrzeugklasse	Länge [m]	Min. Zeitlücke [s]
Klein	3,5	1,5
Mittel	4,3	1,5
Groß	5,0	1,5

Zudem werden in der Simulation automatisierte, vernetzte Fahrzeuge (AVF) betrachtet. Diese werden ebenfalls in die soeben genannten Größenklassen eingeteilt. Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich einiger entscheidender Parameter von nicht-automatisierten Fahrzeugen (Vgl. Tabelle 5). Als erstes ist festzustellen, dass die minimale Zeitlücke bei AVF auf eine Sekunde herabgesetzt wurde. Hintergrund dieser Parametrierung ist, dass AVF aufgrund der algorithmischen Steuerung die Möglichkeit haben werden, viel schneller auf Verkehrssituationen, insbesondere kritische Situationen, zu reagieren. Theoretisch wäre sogar eine Herabsetzung unter eine Sekunde möglich gewesen, allerdings hätte dafür die Schrittweite der Simulation herabgesetzt werden müssen, was in einer deutlichen Verlängerung der Laufzeit resultiert wäre. Des Weiteren wurde die Geschwindigkeitsabweichung auf Null gesetzt. Die Geschwindigkeitsabweichung soll ein realistischeres Fahrverhalten dadurch erzeugen, dass die resultierenden Geschwindigkeiten der simulierten Fahrzeuge um einen Mittelwert normalverteilt werden. So wie in der Realität auch gibt es somit Fahrzeuge, die leicht schneller fahren als die zulässige Höchstgeschwindigkeit und solche, die stets unterhalb dieser Geschwindigkeit fahren. Der Mittelwert der Geschwindigkeit ist dennoch weiterhin die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Für AVF wurde angenommen, dass aufgrund der algorithmischen Fahrzeugsteuerung eine bewusste Abweichung von der zulässigen Geschwindigkeit nicht praktikabel wäre. Der letzte angepasste Wert ist die sogenannte Imperfektion. Diese modelliert ein „Rauschen“ in den Geschwindigkeitsupdates der Fahrzeuge in jedem Simulationsschritt. Die Auswirkung ist, dass Fahrzeuge beispielsweise nicht so viel beschleunigen, wie sie in der Lage wären, in gewisser Weise also „trödeln“. Diese Verhaltensweise würde in einer algorithmischen Steuerung ebenso wegfallen.

Tabelle 5: Parametrierung nicht-vernetzter und automatisierter, vernetzter Fahrzeuge

	Min. Zeitlücke [s]	Geschwindigkeitsabweichung [m/s]	Imperfektion []
Nicht-vernetztes Fahrzeug	1,5	0,1	0,5
Automatisiertes, vernetztes Fahrzeug	1,0	0,0	1,0

Da wir in diesem Vorhaben Verhaltensänderungen von Verkehrsteilnehmern beobachten wollen, benötigen wir ein Modell für ebendieses Verhalten. Die Erstellung dieses Modells stellt den letzten Schritt der Nachfrageerzeugung dar. Da es in SUMO keine zugrundeliegende Ökonometrie zur Bewertung des Agentenverhaltens gibt, wurde ein vereinfachtes Modell implementiert. Wichtig ist zudem, dass in dieser Studie explizit keine Moduswahl betrachtet wird. D.h. alle Fahrten mit Kraftfahrzeugen werden mit diesen durchgeführt, es werden keine Fahrten entfernt oder hinzugefügt. Dies mag im Hinblick auf das zu erwartende Verhalten einer Bepreisung auf Nutzer nicht realistisch erscheinen, erlaubt uns allerdings die Auswirkungen eines dynamischen Verkehrsmanagements auf Basis von Bepreisung ceteris paribus zu messen.

Zunächst wird ein sogenannter Value of Time (VoT) festgelegt. In den Verkehrswissenschaften stellt dieser Wert die Opportunitätskosten der Zeit dar, also einen Wert, den eine Person für eine Reisezeitersparnis bereit wäre zu zahlen. Typischerweise wird er in der Dimension Euro pro Stunde angegeben. Für unser Vorhaben wurde der Wert auf 7,83 €/h gesetzt (Kay W. Axhausen, Ilka Ehreke, Axel Gelmser, Stephane Hess, Christian Jödden, Kai Nagel, Andreas Sauer, Claude Weis 2014). Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass der konkrete Betrag für die Ableitung von Schlussfolgerungen zunächst keine Rolle spielt. In erster Linie sollen in dieser Studie Auswirkungen der dynamischen Bepreisung abgeschätzt werden und keine konkreten, verwendbaren Mautbeträge definiert werden.

Der VoT wird für die Modellierung eine Zahlungsbereitschaft der Nutzer verwendet. Um eine gewisse Streuung der Verhaltensweisen zu erreichen, wurden die Zahlungsbereitschaften global um den festgesetzten Wert normalverteilt. Inwieweit dies das tatsächliche Verhalten aller Verkehrsteilnehmenden widerspiegelt, ist schwer abzuschätzen, aber im Rahmen dieser Vorstudie wurde die Normalverteilung als hinreichend akkurat angesehen.

Es musste nun noch eine Annahme getroffen werden hinsichtlich der Annahme von systemseitigen Routenempfehlungen. Im Sinne eines einfach zu implementierenden Modells wurde ein regelbasierter Ansatz gewählt: Solange die Kosten einer empfohlenen Route unterhalb der Zahlungsbereitschaft des Nutzers liegen, wird die Route angenommen. Liegen die Kosten über der Zahlungsbereitschaft, so wird entweder neu geroutet oder die Fahrt an einen späteren Zeitpunkt verschoben.

Der letzte Arbeitsschritt der Modellerstellung ist die Erstellung des Kommunikationsmodells für V2X. Hier gibt es viele Möglichkeiten, aus sehr guter existierender Software auszuwählen. Ein paar Beispiele sind ns-3, OMNeT++, Veins sowie Artery, die allesamt die komplexen Vorgänge in VANs (Vehicle ad-hoc Networks) in hohem Detailgrad abbilden können. Allerdings ist das Aufsetzen solcher Modelle sehr komplex und zudem sehr rechenintensiv, insbesondere für hohe Verkehrsnachfragen. Daher wurde eine abstrakte Modellierung der Kommunikationsprozesse mit SUMO und TraCI umgesetzt.

Als erster Schritt werden hierfür RSUs an innerstädtischen LSAs modelliert. Deren Verteilung über das Stadtgebiet ist in Abbildung 14 zu erkennen. An diesen RSUs werden über die Schnittstelle TraCI Daten von AVF erhoben und zur Weiterverarbeitung gespeichert. Dies soll dem Empfang von realen CAMs nachempfunden sein. Ebenfalls wird eine Begrenzung der Empfangsreichweiten von RSUs eingeführt. Theoretisch ist möglich, über weite Entfernungen V2X-Daten zu senden und zu empfangen. In innerstädtischen Räumen ist diese Entfernung allerdings häufig aufgrund von Abschirmung durch Gebäude oder Vegetation begrenzt. Im Falle unseres Modells wird sie auf 500 Meter parametrieret.

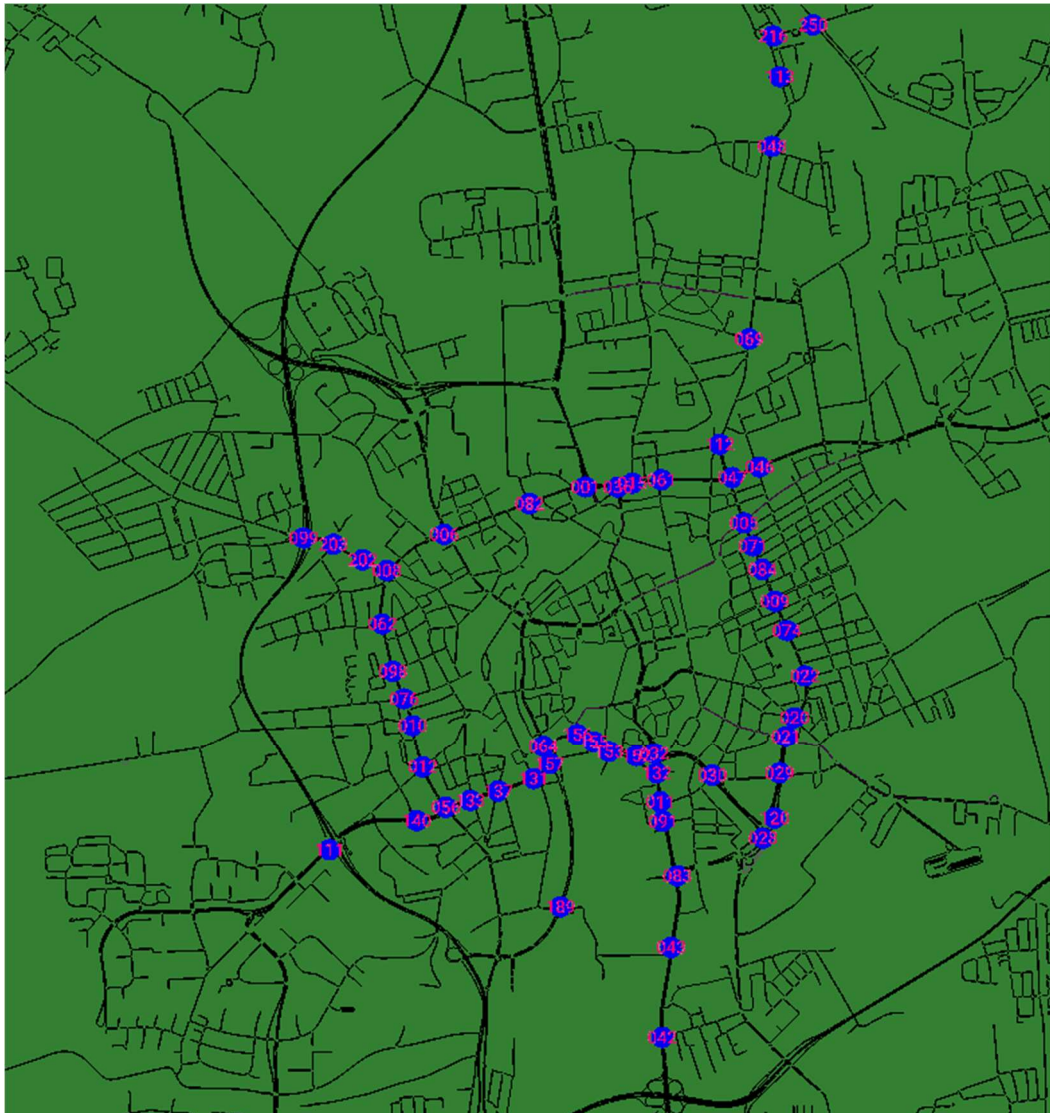


Abbildung 14: RSU-Standorte im Simulationsnetz

Der letzte Arbeitsschritt dieses AP ist die Umsetzung des Managementsystems in ausführbaren Programmcode. Die entsprechenden Softwaremodule werden anhand der in AP1 erhobenen Anforderungen design und konzipiert. Insgesamt werden die folgenden Module programmiert:

- **Infrastrukturmodul:** Speichert Daten zur Infrastruktur und bietet diese über Schnittstellen anderen Modulen zum Zugriff an.
- **Nachfragemodul:** Speichert von RSUs erhobene Daten zur aktuellen Verkehrsnachfrage und wandelt sie in Verkehrsbelastungen auf dem Netz um. Bietet die Nachfragekenngrößen Verkehrsfluss, Verkehrsdichte oder Daten einzelner Fahrzeuge anderen Modulen zum Zugriff an.
- **Bepreisungsmodul:** Berechnet auf Grundlage der Daten aus Infrastruktur- und Nachfragemodul die aktuellen Preise für das Befahren von Streckenabschnitten. Die Preise pro Strecke werden anderen Modulen über Schnittstellen bereitgestellt.
- **Aushandlungsmodul:** Implementierung des Verhaltensmodells. Anhand der gegebenen Zahlungsbereitschaft eines Nutzers und der zuvor vom Bepreisungsmodul berechneten Preise wird eine Route berechnet und dem Nutzer zugewiesen.

Der gesamte Code des Managementsystems wurde in der Programmiersprache Python umgesetzt. Die Wahl für Python wurde getroffen, da es eine sehr verbreitete Sprache mit umfassender Dokumentation und einer Vielzahl nützlicher Bibliotheken – insbesondere aus dem wissenschaftlichen Bereich – ist und es eine der Sprachen ist, die von TraCI unterstützt wird. Zur Absicherung der Funktionen der einzelnen Module wurden Testmodule mit Testfällen geschrieben. Zur Versionierung und zum Deployment der Software wurde ein DLR-internes Gitlab verwendet.

2.1.3. AP 3 “Szenariendefinition und Durchführung der Simulation“

In AP 3 werden auf Grundlage des im vorherigen Arbeitspaket erstellten Simulationsmodells für das dynamische Managementsystem Anwendungsszenarien definiert und im Rahmen einer Verkehrssimulation getestet. Insbesondere werden die Auswirkungen der dynamischen Bepreisung auf die Routenverteilung sowie die Umweltwirkungen des dynamischen Verkehrsmanagements auf die netzweiten CO₂-Emissionen untersucht. Weiterhin werden die Auswirkungen des Slot-Managements näher beleuchtet. Das Managementsystem soll vor allem im Hinblick auf die Kennwerte Reisezeit, Verlustzeit und CO₂-Emissionen analysiert werden. Bei diesen Kennwerten werden Verbesserungen im Bereich zwischen 10 und 25% angestrebt.

Relativ frühzeitig in der Erstellung des Simulationsmodells hat sich gezeigt, dass eine gleichzeitige Berechnung von Routen und das Management der Fahrmanöver durch Slots nicht effizient auf großen Skalen möglich ist. Bei teilweise mehreren tausend Fahrzeugen, die sich gleichzeitig im Simulationsnetz befinden, ist eine Ausführung der Simulation nicht mehr in Echtzeit möglich. Daher wurde die Entscheidung gefällt, die Untersuchung in zwei Teile zu unterteilen und die Effekte des dynamischen Managements auf das Routing in einer **großräumigen Simulation**, die das gesamte Stadtgebiet abbildet, sowie einer **kleinräumigen Simulation**, in der auf einem exemplarischen Streckenabschnitt die Effekte des slotbasierten Managements untersucht werden.

In der großräumigen Simulation werden die Auswirkungen verschiedener Bepreisungsmethoden auf den werktäglichen motorisierten Verkehr eines ganzen simulierten Tages gegenübergestellt. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Basisszenario ohne Bepreisung berechnet, das die aktuelle Verkehrslage widerspiegelt. Im nächsten Schritt wurde eine feste, nicht-veränderliche Maut in das Untersuchungsgebiet eingeführt in Form einer City-Maut. Diese City-Maut war so gestaltet, dass insbesondere kleine Wohnstraßen stärker bepreist werden als große Hauptstraßen. Dies sollte starke Umgehungsverkehre durch besonders schützenswerte Wohngebiete vermeiden. Schließlich werden diese beiden Varianten mit dem dynamischen Managementsystem (GreenValue-System) verglichen. Die Parametrierung der einzelnen Szenarien ist in Tabelle 6 dargestellt. Als variable Dimensionen wurden der Anteil der AVF am Gesamtverkehr sowie die Skalierung der Nachfrage festgelegt. Bezüglich der Nachfrageskalierung war ursprünglich geplant, geringere Verkehrsmengen mit zu betrachten, um feststellen zu können, ob das GreenValue-System auch bei wenig Verkehr eine Verbesserung gegenüber dem aktuellen Zustand bringen kann. Allerdings wurden auf niedrigeren Nachfrageniveaus keine signifikanten Unterschiede gemessen, sodass lediglich die normale Nachfrage betrachtet wurde.

Tabelle 6: Parametrierung der großräumigen Simulation

	Keine Bepreisung	City-Maut	GreenValue-System
Anteil AVF	0%	0%	0%, 10%, 25%, 50%, 75%, 100%
Nachfrage-Skalierung	100%		

Das kleinräumige Szenario betrachtet einen exemplarischen Streckenabschnitt, der entweder einen Autobahnabschnitt oder einen Abschnitt einer Stadtstraße darstellen kann. In diesem Szenario werden die Auswirkungen des slotbasierten Managements der Selbstorganisation des Verkehrs gegenübergestellt.

Insbesondere werden an einer Einengung Fahrstreifenwechsel unter verschiedenen Verkehrsstärken koordiniert. Bezüglich des slotbasierten Managements wurden zwei unterschiedliche Verfahren erprobt:

- **Steuerungsmethode 1 (Einfädeln in existierende Lücken):** Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen möchten einen Fahrstreifenwechsel auf den linken Fahrstreifen durchführen. Sie suchen dafür aktiv nach Lücken zwischen den Fahrzeugen auf dem linken Fahrstreifen und verzögern solange ihre eigene Geschwindigkeit, bis sie den Fahrstreifen wechseln können (Vgl. Abbildung 15).

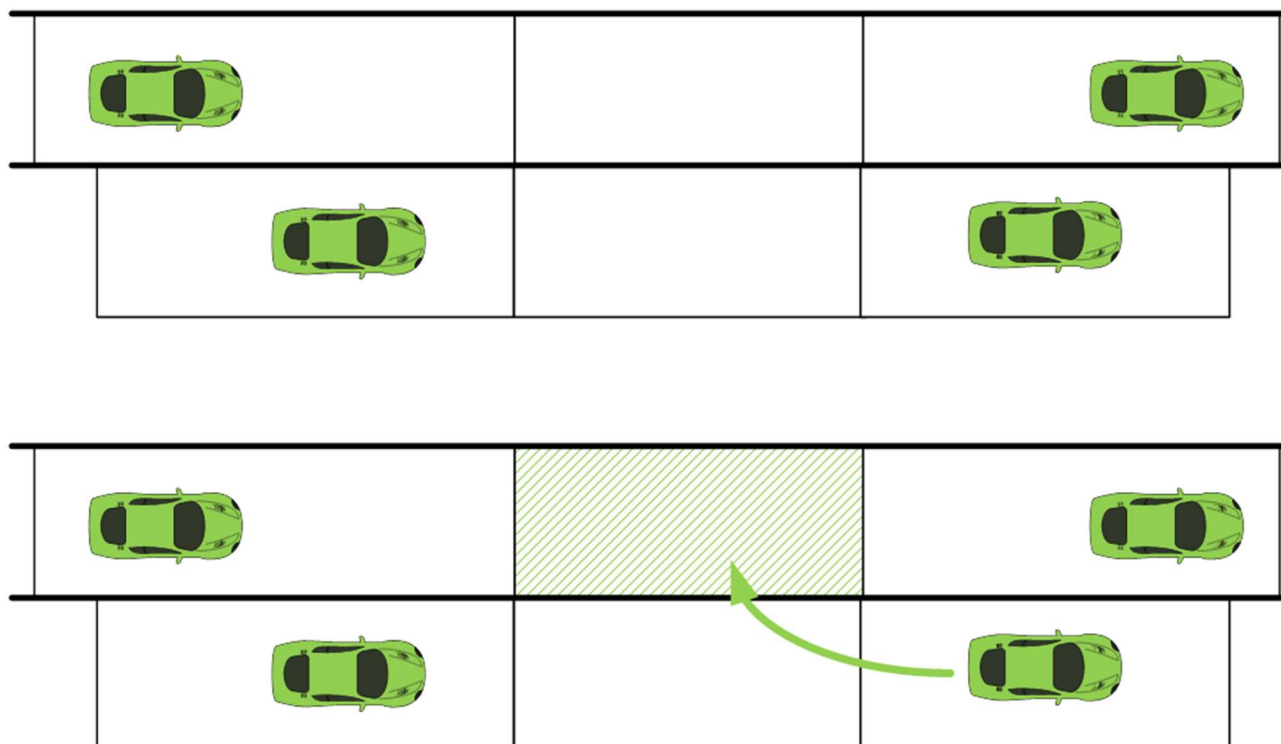


Abbildung 15: Verkehrsmanagement mit Slots, Steuerungsmethode 1

- **Steuerungsmethode 2 (Öffnen von Lücken):** Voraussichtlich wird die Steuerungsmethode 1 unter besonders hohen Verkehrsstärken nicht mehr jederzeit effizient Fahrstreifenwechsel ermöglichen. Daher wird die Methode erweitert um einen kooperativen Aspekt: Sobald ein Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen einen beabsichtigten Fahrstreifenwechsel signalisiert und anfängt, seine Geschwindigkeit zu verringern, wird zunächst überprüft ob eine Lücke vorhanden ist. Falls dies nicht der Fall ist, verzögert das nächste stromaufwärtige Fahrzeug auf dem linken Fahrstreifen seine eigene Geschwindigkeit, um eine Lücke zu öffnen. Sobald diese groß genug ist, kann das Fahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen den Wechsel durchführen und alle Geschwindigkeiten können auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit zurückgesetzt werden (Vgl. Abbildung 16).

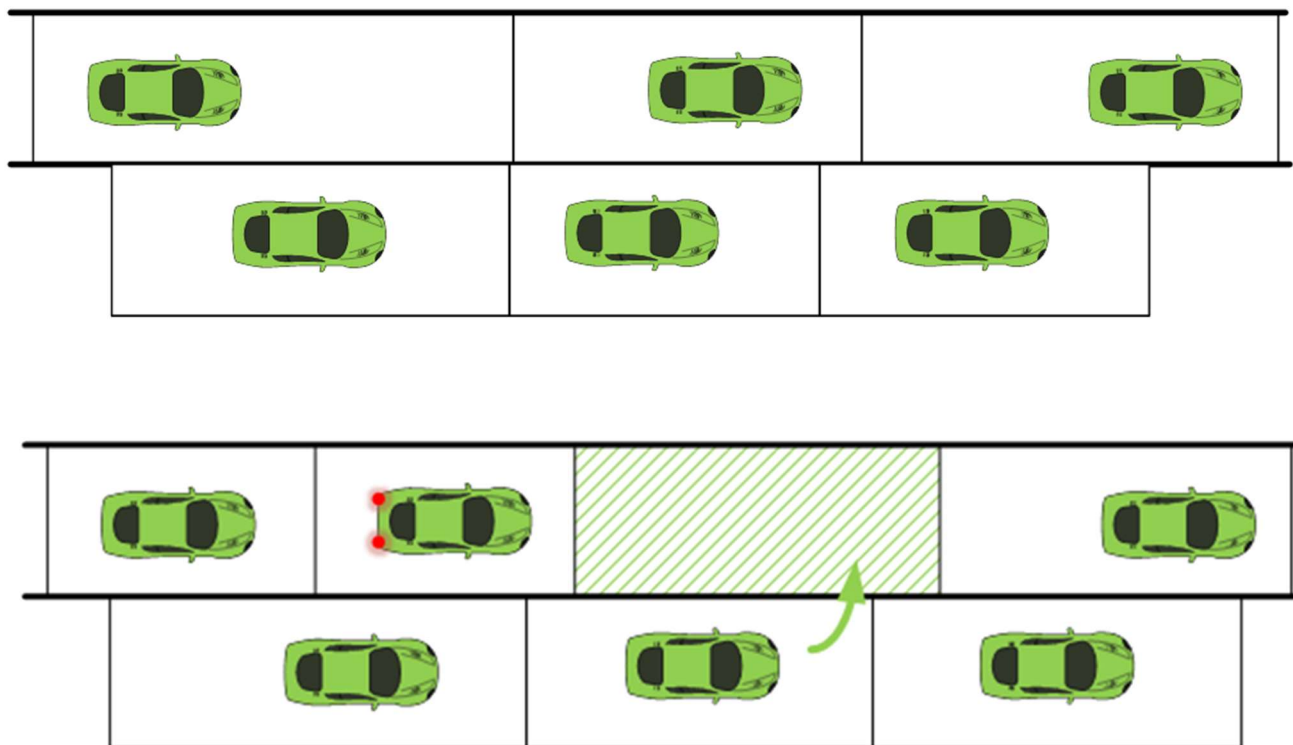


Abbildung 16: Verkehrsmanagement mit Slots, Steuerungsmethode 2

Für das kleinräumige Szenario werden ebenfalls die Dimensionen „Anteil AVF“ sowie die „Nachfrage-Skalierung“ variabel gehalten. Die Nachfrage wird auf vier verschiedenen Stufen skaliert, von 25% bis 100% in 25%-Schritten. Für die beiden Steuerungsmethoden werden zum in 25%-Schritten der Anteil der AVF variiert (Vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Parameterierung der kleinräumigen Simulation

	Keine Slots	Slots Methode 1	Slots Methode 2
Anteil AVF	0%	25%, 50%, 75%, 100%	25%, 50%, 75%, 100%
Nachfrage-Skalierung		25%, 50%, 75%, 100%	

Sowohl für das großräumige als auch für das kleinräumige Szenario werden 15 verschiedene Simulationsberechnungen mit jeweils unterschiedlichen Random Seeds durchgeführt. Diese Random Seeds beeinflussen die Zufallszahlen, die während der Simulation in verschiedenen Modellen verwendet werden, bspw. beim Fahrzeugfolgemodell oder der Festlegung von Zahlungsbereitschaften. Die Verwendung der Zufallszahlen trägt dem Umstand Rechnung, dass die Modellierung mit einem speziellen Random Seed einen statistischen Fehler gegenüber der Realität einbaut, da das Verhalten einzelner Agenten entweder exakt nachmodelliert wird oder sehr stark vom realen Verhalten abweicht. Die Verwendung mehrerer Random Seeds verringert diesen Fehler, so dass statistisch relevante Aussagen zu den Ergebnissen gemacht werden können. Die möglichen Variationen an Parametern ergeben sich durch die Berechnungsformel $\text{Anteil AVF} * \text{Nachfrageniveau} * \text{Seed}$. Somit ergeben sich für das großräumige Szenario $15 + 15 + 6 * 15 = 120$ Simulationsläufe, für das kleinräumige Szenario $15 + 4 * 4 * 15 + 4 * 4 * 15 = 495$ Simulationsläufe.

2.1.4. AP 4 "Bewertung der Simulationsergebnisse"

AP 4 beschäftigt sich mit der Analyse und Bewertung der zuvor berechneten Simulationsergebnisse. Die zahlreichen Simulationenläufe werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Kennwerte Reisezeit, Verlustzeit und CO₂-Emissionen ausgewertet und über die verschiedenen Bepreisungs- bzw. Steuerungsverfahren miteinander verglichen. Hierbei wird es für das großräumige und das kleinräumige Szenario verschiedene Bewertungen geben:

- Im großräumigen Szenario werden zum einen globale Kennwerte ausgewertet, die pro Simulationsschritt netzweit erhoben werden und zum anderen Kennwerte, die auf den Daten einzelner Fahrzeugfahrten (Trips) erhoben wurden. Für die globalen Kennwerte wurde die Darstellungsform der Zeitreihe gewählt, um die Veränderung der Werte über den simulierten Tag beobachten zu können. Der Übersichtlichkeit halber wurden hier die relativen Abweichungen zwischen City Maut, bzw. GreenValue-System zum Bestand ohne Bepreisung bzw. ohne Verkehrsmanagement dargestellt. Für die Trip-Daten wurden Boxplots verwendet, um die Verteilung der Kennwerte besser darstellen zu können. Diese Darstellungsform ermöglicht bspw. schnell die Veränderung hinsichtlich der Maxima, Minima oder Durchschnittswerte zu erfassen.
- Im kleinräumigen Szenario werden lediglich die Trip-Daten in einer sogenannten Heatmap ausgewertet. Diese Darstellungsform nimmt zweidimensionale Variablenkombinationen, in diesem Fall Verkehrsstärke und Anteil AVF, und kodiert die resultierende Kenngröße über die Farbe.

Beim großräumigen Szenario ist zu beachten, dass in den Nachtstunden (Randbereiche der Zeitreihen) große Abweichungen auftreten. Da relative Abweichungen zwischen den Szenarien dargestellt werden und in den Nachtstunden nur wenige Fahrzeuge unterwegs sind, fallen diese überproportional stark ins Gewicht. Der Aussagegehalt dieser Tagesbereiche ist somit fraglich und wird daher aus der Analyse ausgeschlossen.

Die erste Auswertungsdimension im großräumigen Szenario stellen die „Fahrzeuge im Netz“ dar (Vgl. Abbildung 17). Genauer gesagt handelt es sich um die Fahrzeuge, die sich gleichzeitig im Verkehrsnetz befinden, also die Verkehrsstärke. Im Vergleich zwischen City-Maut und Bestand gibt es bis auf höhere Verkehrsstärken in den Spitzenstunden keine signifikanten Unterschiede. Die höhere Verkehrsstärke bei der City-Maut lässt sich womöglich darauf zurückführen, dass durch das Design der Maut mehr Fahrzeuge von Neben- auf Hauptstraßen geleitet wurden und somit höhere Verkehrsbelastungen und damit Reisezeiten als im Bestand auftraten. Im GreenValue-System zeigt sich hingegen ein vollkommen anderes Bild. Bereits ab einem AVF-Anteil von 25% zeigen sich, vor allem in den Spitzenstunden, deutlich geringere Verkehrsstärken (-5%) als im Bestand, die sich bei 100% AVF auf bis zu -20% verringern. Somit verbleiben die Fahrzeuge im GreenValue-System deutlich kürzer im Netz als im Bestand und auch im Fall der City-Maut.

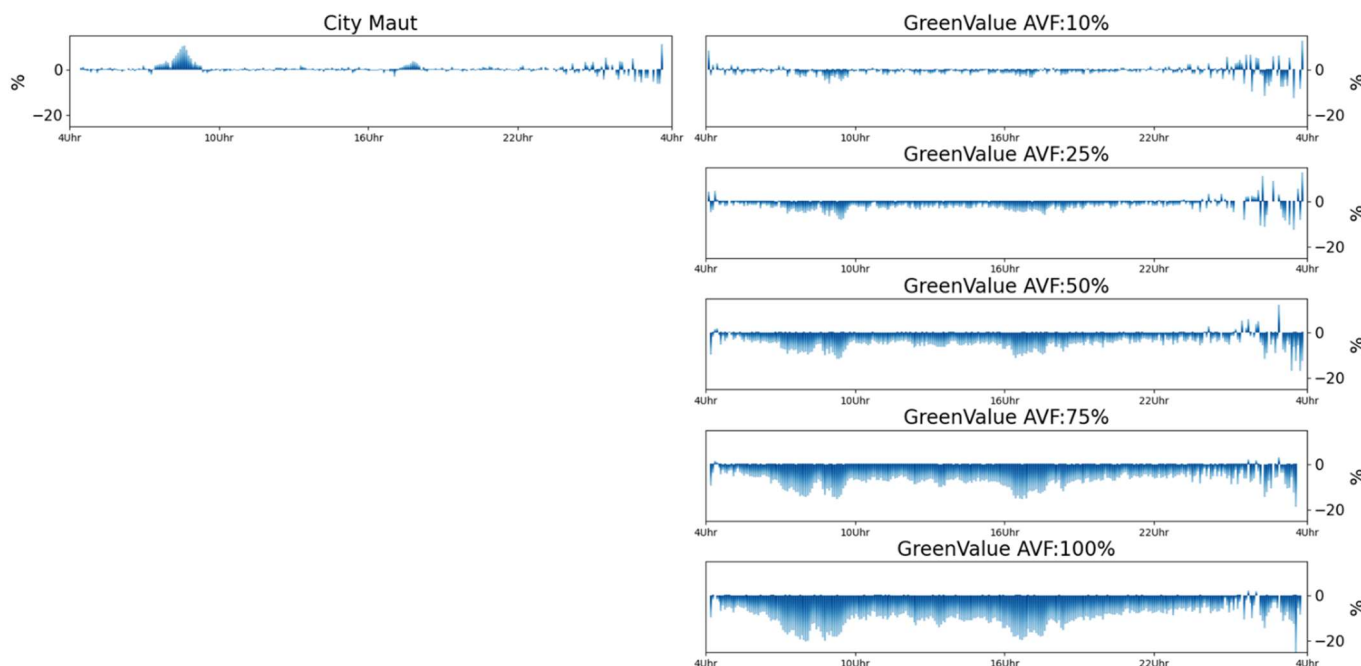


Abbildung 17: Großräumiges Szenario - Fahrzeuge im Netz

Betrachtet man im großräumigen Szenario die durchschnittlichen Geschwindigkeiten über die Zeit, zeigt sich ein ähnliches Bild (Vgl. Abbildung 18). Auch hier gibt es bei der City-Maut geringfügige Abweichungen zum Bestand, die sich im Mittel aber gegenseitig aufheben. Abgesehen von einer geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit während der morgendlichen Spitzenszene gibt es keine signifikanten Unterschiede. Beim GreenValue-System hingegen gibt es eine klare Tendenz zu hohem Einsparpotential. Insbesondere in den Spitzenstunden konnte die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit um bis zu 20% bei einer ausschließlich aus AVF bestehenden Fahrzeugflotte gesteigert werden.

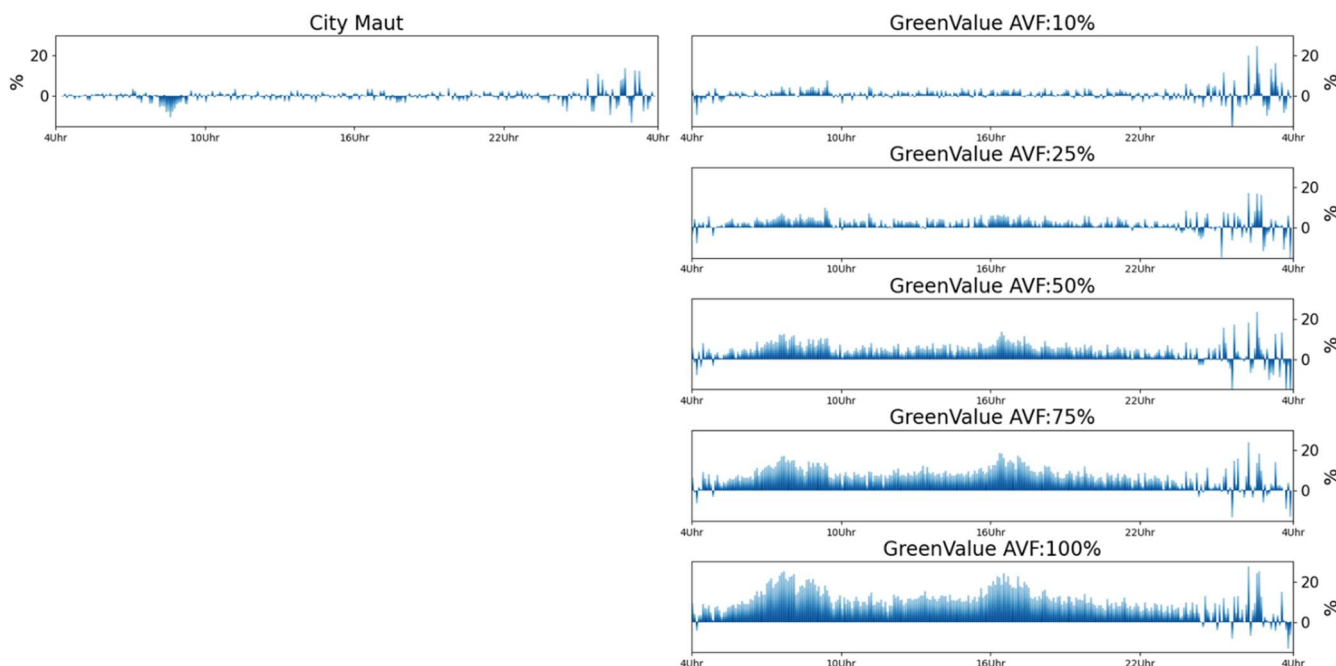


Abbildung 18: Grobäumiges Szenario - Geschwindigkeit

Auch bei den netzweiten Reisezeiten setzt sich der zuvor aufgezeigt Trend fort. Bei der City-Maut sind kaum signifikante Unterschiede messbar, die Unterschiede bewegen sich im einstelligen Prozentbereich verglichen mit dem Bestand. Beim GreenValue-Verfahren hingegen gibt es mit steigender Ausstattungsrate wiederum eine deutliche Abnahme der netzweiten Reisezeiten. Diese bewegen sich bei 100% AVF zwischen 10 und 12%.

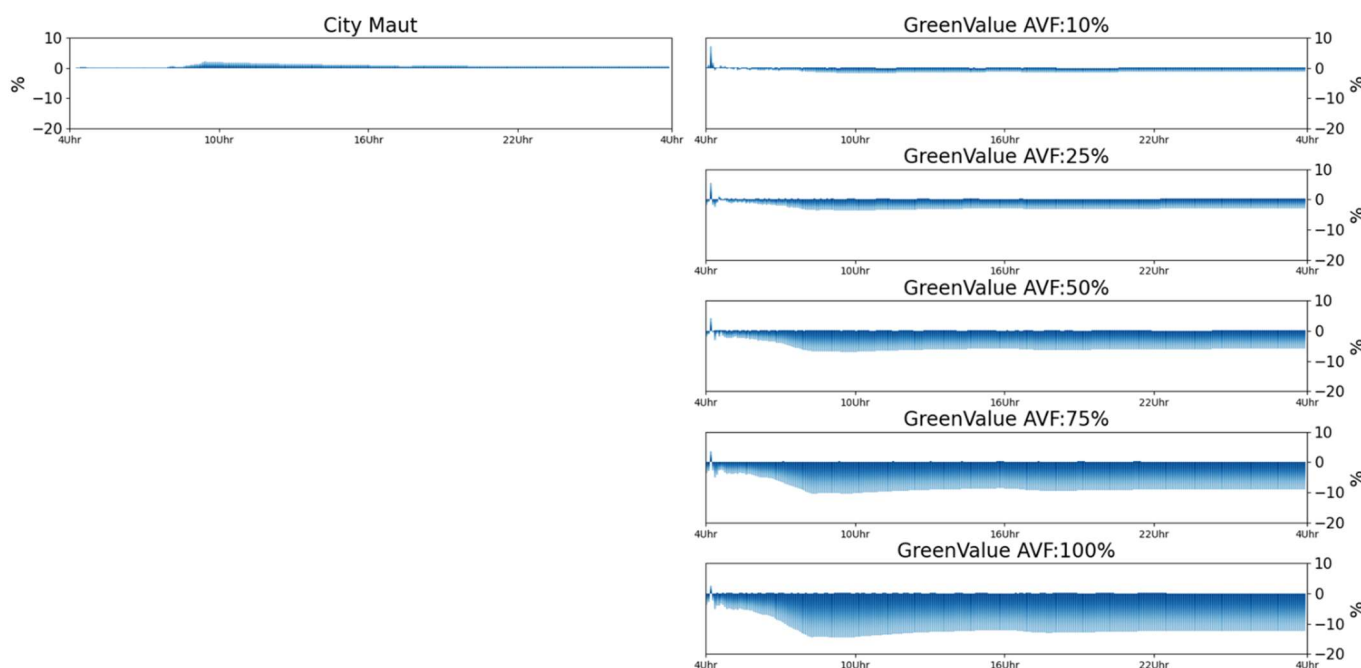


Abbildung 19: Grobäumiges Szenario – Reisezeit

Als nächstes werden die Trip-basierten Auswertungen im großräumigen Szenario vorgenommen. Der Bestand ist hierbei ganz links dargestellt, gefolgt von der City-Maut und dem GreenValue-Verfahren in unterschiedlichen Automatisierungsraten von AVF.

Betrachtet man die Reisezeiten auf Basis der Trips (Vgl. Abbildung 20), zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der globalen Reisezeit. Mit zunehmender Automatisierungsrate sinkt die Reisezeit im GreenValue-System stetig bis sie bei Vollautomatisierung im Mittel 12% niedriger liegt als im Bestand oder bei der City-Maut. Zu beachten ist zudem, dass die Streuung der Reisezeiten in Richtung der freien Reisezeit abnimmt, zu sehen an den kürzeren Antennen der Boxplots.

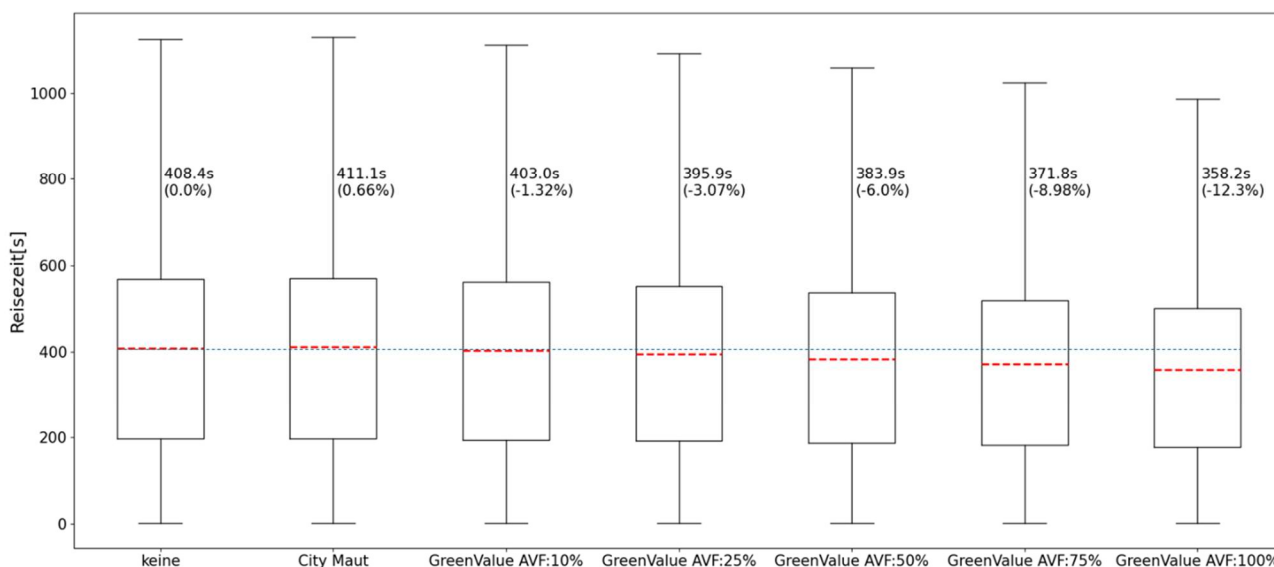


Abbildung 20: Großräumiges Szenario - Reisezeit Trips

Abbildung 21 zeigt die Verlustzeit auf Grundlage der Trips. Hier ist ebenfalls zu beobachten, dass die City-Maut im Grunde keine Veränderung gegenüber dem Bestand erzielt. Das GreenValue-Verfahren hingegen ermöglicht eine Verringerung der Verlustzeit von bis zu 45% gegenüber einem Verkehrssystem ohne Verkehrsmanagement. Zwar sind Fahrzeuge im Durchschnitt immer noch um 56 Sekunden verzögert gegenüber einer störungsfreien Fahrt, allerdings mit 38 Sekunden zwei Drittel davon auf Wartezeiten z.B. vor LSAs (Vgl. Abbildung 22). Diese Wartezeiten entsprechen der Zeit, in der das Fahrzeug komplett während einer Ortsveränderung vollständig stillstand. Die verbleibenden 18 Sekunden Verlustzeit lassen sich mit Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern erklären, die sich lediglich durch eine Verringerung des Gesamtverkehrsaufkommens reduzieren lassen. Die reine Wartezeit ließe sich durch Maßnahmen wie z.B. GLOSA oder andere Methoden der Kreuzungskordinierung außer LSAs reduzieren.

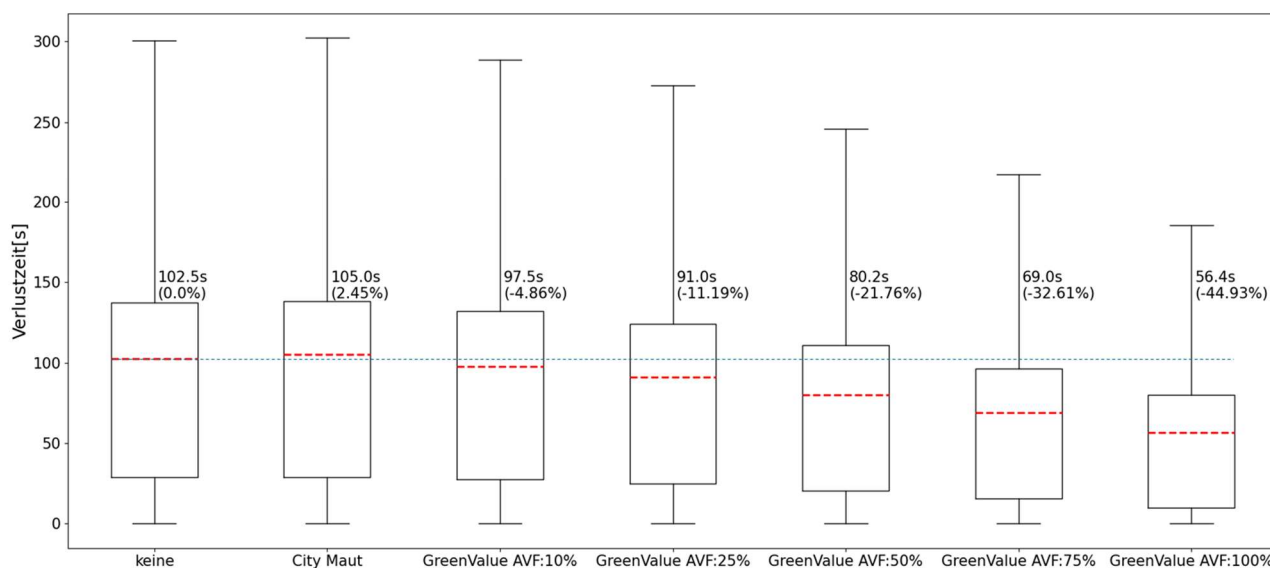


Abbildung 21: Großräumiges Szenario - Verlustzeit Trips

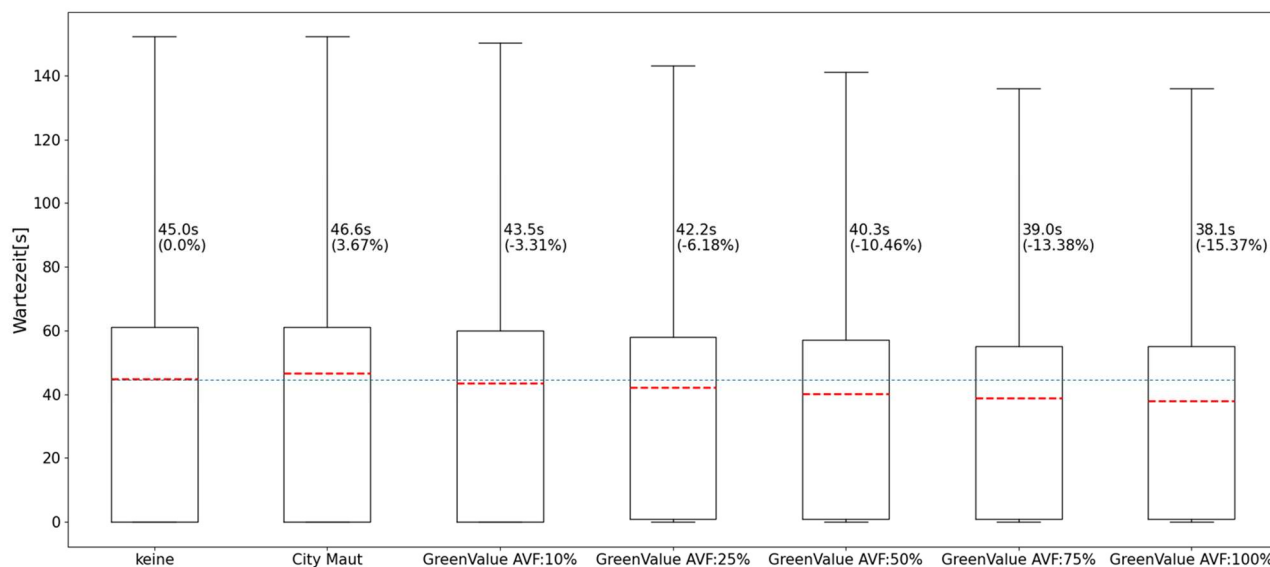


Abbildung 22: Großräumiges Szenario - Wartezeit Trips

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse hinsichtlich der Trip-basierten CO₂-Emissionen dargestellt. Entgegen unserer Erwartungen fielen die Verbesserungen hier nicht so deutlich aus wie bei den Reise- und Verlustzeiten. Bei 100% Ausstattungsrate werden lediglich 4% der Emissionen eingespart. Allerdings wurden beim Optimierungsverfahren die Reisezeiten berücksichtigt, die zu erwartenden Emissionen hingegen nicht. Somit waren sie nicht Teil des Optimierungsziels und daher wurden sie weniger stark reduziert.

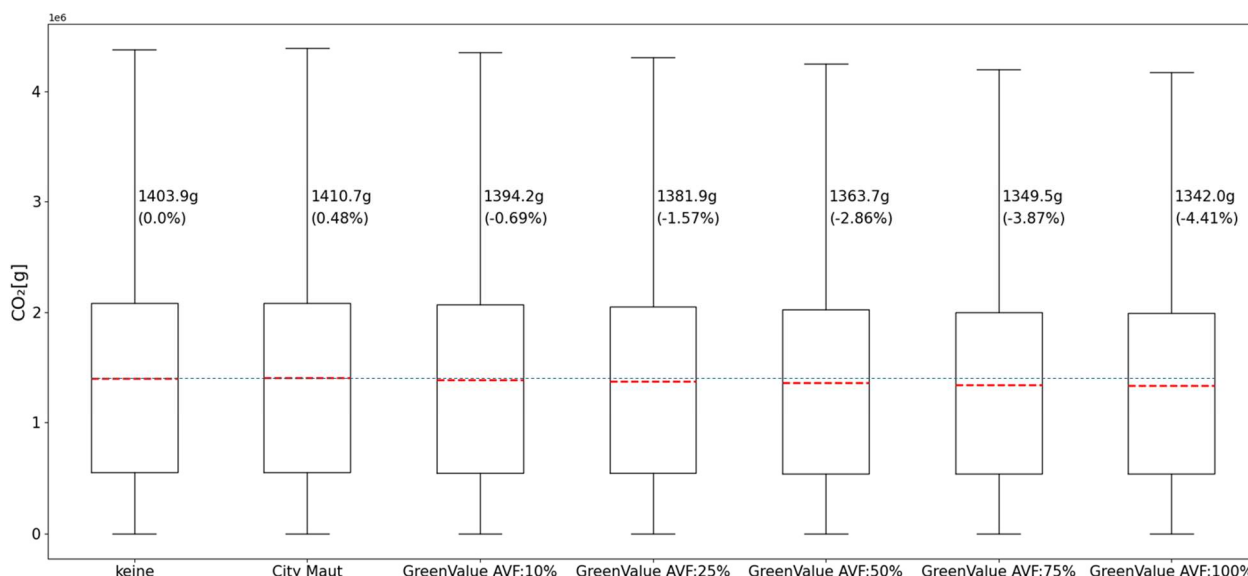


Abbildung 23: Großräumiges Szenario - CO₂-Emissionen Trips

Zu beachten ist, dass die soeben erreichten Einsparungen erreicht wurden, ohne irgendwelche Kfz-Fahrten mit anderen Modi zu ersetzen. Zudem wurde auch die durchschnittliche Routenlänge der Fahrzeuge nicht verändert (Vgl. Abbildung 24). Das bedeutet, trotz gleichem Verkehrsaufkommen und gleicher Routenlänge sind Einsparungen hinsichtlich Reisezeit von bis zu 12% und hinsichtlich der Verlustzeit sogar bis zu 45% möglich. Lediglich bei den Emissionen sind kaum messbare unterschiede vorhanden. Dieser Umstand ist allerdings der Methodik bei der Szenarienerstellung geschuldet und würde bei einer Modellierung prognostizierter Antriebsmixe in zukünftigen Kfz-Flotten mit Sicherheit anders ausfallen.

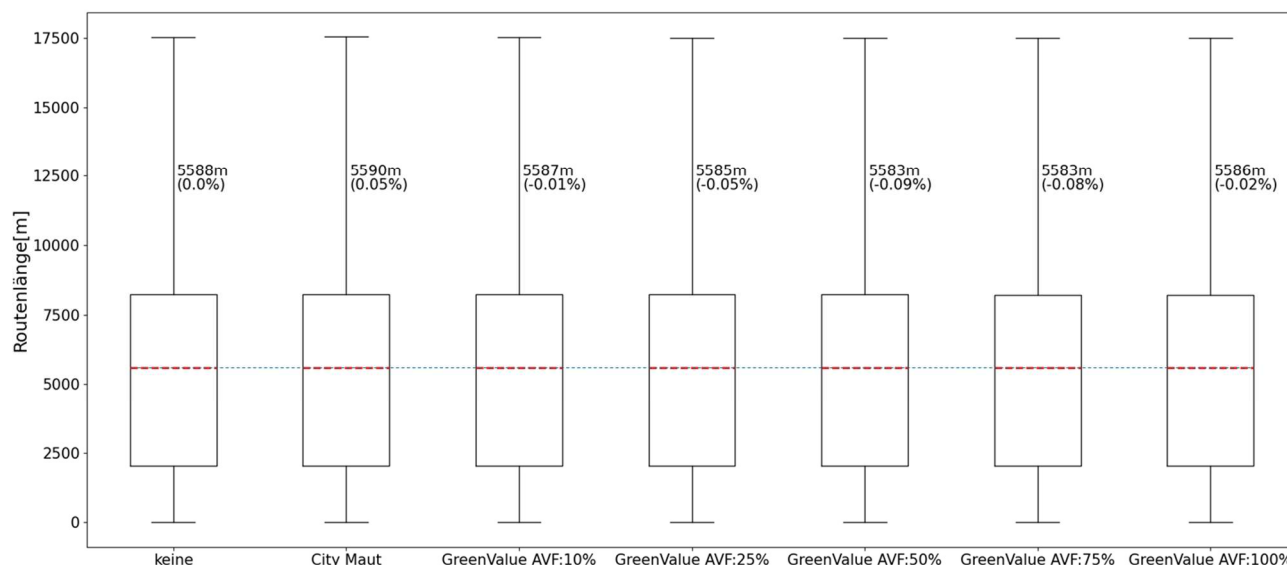


Abbildung 24: Großräumiges Szenario - Routenlänge Trips

Im kleinräumigen Szenario werden nun die Ergebnisse hinsichtlich der durchschnittlichen Verlustzeiten betrachtet (Vgl. Abbildung 25). Die beiden dargestellten Heatmaps stellen die jeweiligen Steuerungsmethoden für das slotbasierte Management mit dem Bestand (Koordinierung der Fahrzeuge untereinander) gegenüber. Besonders bei hohen Verkehrsstärken fällt hier das Management ins Gewicht. Gegenüber dem Bestand erzielt das Steuerungsverfahren 1 bereits deutliche Verbesserungen. Bereits bei einer Ausstattungsrate mit AVF von 25% kann ein Drittel der Verlustzeiten eingespart werden. Bei Vollautomatisierung sind hier sogar Einsparungen von bis zu 90% möglich. Noch deutlicher fällt dieses Ergebnis bei Steuerungsmethode 2 aus, bei dem die Verlustzeiten im vollausgestatteten Fall sogar beinahe vollständig vermieden werden konnten. Bei geringeren Ausstattungsraten erzielen die beiden Steuerungsverfahren hingegen vergleichbare Ergebnisse was auf die negativen Einflüsse der nicht-automatisierten Fahrzeuge auf das Verkehrsgeschehen illustriert.

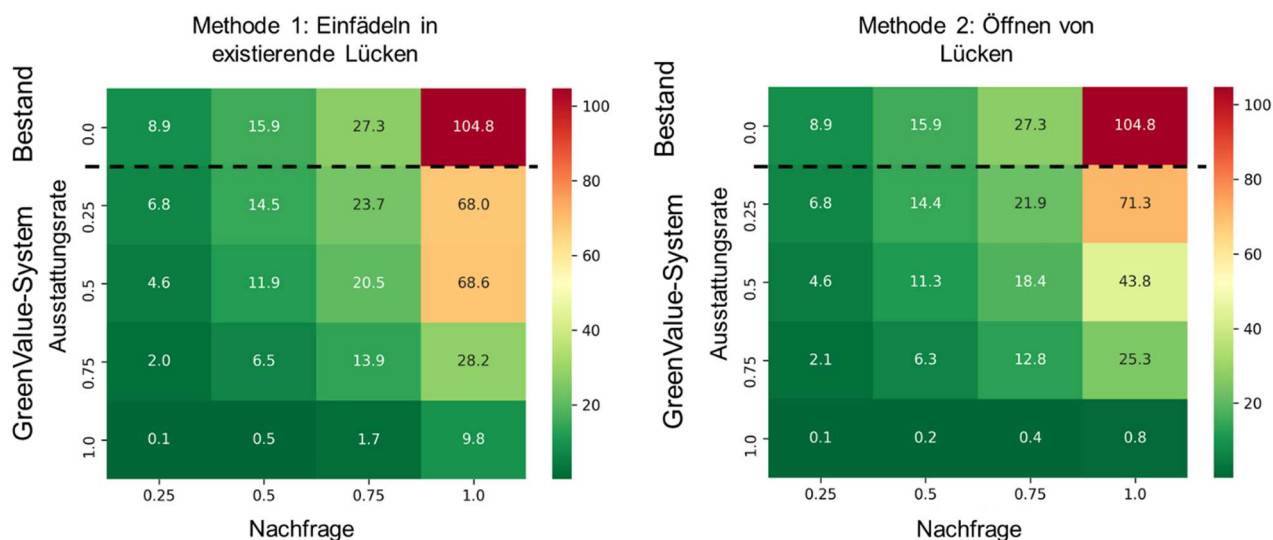


Abbildung 25: Kleinräumiges Szenario – Verlustzeit

Zusammenfassend ist das große Potential des dynamischen Verkehrsmanagements in Verbindung mit Bepreisung hervorzuheben. Die Ergebnisse hinsichtlich der Reise- und Verlustzeiten illustrieren, dass Fahrzeuge deutlich schneller als ohne Management durch das Netz bewegt werden können, wodurch weniger negative Effekte wie Staus oder Emissionen entstehen. Einzig hinsichtlich der Emissionen konnten die prognostizierten 10 – 25% Einsparung nicht erreicht werden, allerdings waren diese auch nicht Teil des Optimierungsverfahrens. In zukünftigen Implementierungen dieses Systems wäre daher eine multikriterielle Optimierung hinsichtlich einer Kombination von Reisezeiten und Emissionen denkbar und sinnvoll. Außerdem ist die positive Entwicklung der Verlustzeiten durch slotbasiertes Management zu beachten. Das gewählte Szenario ist zwar nur als exemplarisch zu betrachten, dennoch deuten die Ergebnisse auf eine sehr effiziente Methode zur Verlustzeitreduktion hin. In zukünftigen Untersuchungen müsste dieses Verfahren in realen Verkehrsnetzen erneut überprüft werden, um die Potentiale besser einschätzen zu können.

Nochmals hervorzuheben ist, dass sämtliche Szenarien und Verfahren verglichen mit dem Bestand lediglich um das dynamische Verkehrsmanagement ergänzt wurden und alle anderen Eingangsgrößen unverändert blieben. Verkehrliche Einsparungspotentiale hinsichtlich Moduswahl oder Verkehrsvermeidung wurden im Rahmen dieses Verfahrens nicht erhoben. Auch die Modellierung der Verteilung potentieller zukünftiger Antriebstechnologien über die Fahrzeugflotte wurden nicht berücksichtigt. Daher sind die Einsparungspotentiale bei CO₂-Emissionen unter Annahme einer weiteren Elektrifizierung und auch die Potentiale zur Verringerung der Verlustzeiten vermutlich höher anzusetzen.

2.2. Ressourcenverwendung

Die Zuwendungen an das DLR von insgesamt rund 100T€ wurden für folgende Posten eingeplant:

- **Personalkosten**, um die in der Vorhabensbeschreibung ausgewiesenen wissenschaftlichen und technischen Arbeiten durchzuführen,
- **Reisekosten** (Teilnahme an Begleitformaten des mFund, Konferenzteilnahme)

Betragsmäßig sehen die einzelnen Posten wie folgt aus:

Kostenart	Betrag [EUR]
Personalkosten	99.526,37
Reisekosten	400

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten im Forschungsprojekt „GreenValue“ einschließlich der dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.

Bei den geplanten Reisekosten konnten Mittel eingespart werden, da insbesondere durch die im März 2020 beginnenden Einschränkungen in Form von Hygieneverordnungen persönliche Treffen nicht mehr möglich waren und zu einem nennenswerten Anteil durch virtuelle Treffen ersetzt worden sind. Verwertung der Ergebnisse

2.4. Fortschritt bei anderen Stellen

Uns sind keine Kenntnisse über Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

2.5. Veröffentlichung der Ergebnisse

Zum Beginn des Vorhabens wurden der Projektsteckbrief⁶ sowie eine Pressemitteilung veröffentlicht. Die Projektbeteiligten nahmen im Rahmen der mFund-Begleitforschung an fachlichem Austausch im Rahmen der mFund-Konferenz am 13. Und 14. September 2022 in Berlin teil. Zudem wurden Vernetzungsaktivitäten während des Diskussionsforums „Zukunftsfähige Mobilität in Kommunen“ am 7. März 2023 unternommen. Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Vorhabens werden in zwei zurzeit in Erstellung befindlichen Journal-Papers veröffentlicht. Thematisch wird das erste Paper die Systemarchitektur sowie den simulationsbasierten Test des slotbasierten Verkehrsmanagements behandeln, das zweite Paper wird sich in der Tiefe mit der Kanallast für dynamisches Verkehrsmanagement unter Verwendung von V2X beschäftigen. Zudem werden die Inputdaten der Verkehrssimulation auf dem Mobilitätsdatenportal des BMDV, der Mobilithek, veröffentlicht. Die hierfür erforderlichen Schritte werden zurzeit unternommen.

⁶ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/greenvalue.html>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektablaufplan	7
Abbildung 2: SAE-Stufen des automatisierten Fahrens	10
Abbildung 3: Regelkreis des Verkehrsmanagements.....	12
Abbildung 4: Regelkreis für ein Managementsystem eines vernetzten, automatisierten Verkehrssystems	13
Abbildung 5: Stakeholder des dynamischen Managementsystems	14
Abbildung 6: Beispielhafter Ablauf einer Routenanfrage	17
Abbildung 7: Beispielhafter Ablauf einer Routenänderung	18
Abbildung 8: Schema der Interaktionen bei Routenplanung und Buchung	19
Abbildung 9: Schema der Interaktionen bei Slot-Management	19
Abbildung 10: Kartendarstellung des Untersuchungsraums, Quelle: OpenStreetMap	22
Abbildung 11: Infrastrukturmodell des Untersuchungsraums.....	24
Abbildung 12: Pendlerbeziehungen im Untersuchungsgebiet	25
Abbildung 13: Arbeitsschritte zur Nachfrageerzeugung.....	26
Abbildung 14: RSU-Standorte im Simulationsnetz.....	28
Abbildung 15: Verkehrsmanagement mit Slots, Steuerungsmethode 1	30
Abbildung 16: Verkehrsmanagement mit Slots, Steuerungsmethode 2	31
Abbildung 17: Großräumiges Szenario - Fahrzeuge im Netz	33
Abbildung 18: Großräumiges Szenario - Geschwindigkeit	34
Abbildung 19: Großräumiges Szenario – Reisezeit.....	34
Abbildung 20: Großräumiges Szenario - Reisezeit Trips	35
Abbildung 21: Großräumiges Szenario - Verlustzeit Trips	36
Abbildung 22: Großräumiges Szenario - Wartezeit Trips.....	36
Abbildung 23: Großräumiges Szenario - CO ₂ -Emissionen Trips	37
Abbildung 24: Großräumiges Szenario - Routenlänge Trips	38
Abbildung 25: Kleinräumiges Szenario – Verlustzeit	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Akteure	15
Tabelle 2: Informationsangebote und -bedarfe der Stakeholder.....	16
Tabelle 3: Abgleich Kommunikationsinhalte mit existierenden ETSI-V2X-Nachrichtentypen	20
Tabelle 4: Parametrierung der simulierten Fahrzeugklassen.....	26
Tabelle 5: Parametrierung nicht-vernetzter und automatisierter, vernetzter Fahrzeuge.....	27
Tabelle 6: Parametrierung der großräumigen Simulation	29
Tabelle 7: Parameterierung der kleinräumigen Simulation	31

Abkürzungsverzeichnis

A	
AVF	<i>Automatisiertes, vernetztes Fahrzeug</i>
C	
CAM.....	<i>Cooperative Awareness Message</i>

C-ITS..... *Cooperative Intelligent Transport System*
CPM *Collective Perception Message*

D

DENM *Decentralized Environment Message*

G

GLOSA..... *Green Light Optimal Speed Advisory*

L

LSA..... *Lichtsignalanlage*

M

MAPEM *Map Data Extended Message*

MCM..... *Maneuver Coordination Message*

MEC *Mobile Edge Cloud*

MiD *Mobilität in Deutschland*

O

OBU..... *Onboard Unit*

R

RSU..... *Roadside Unit*

S

SPATEM *Signal Phase and Timing Extended Message*

SrV *System repräsentativer Verkehrsbefragungen*

V

V2X..... *Vehicle-to-Everything*

VAM..... *Vulnerable Road User (VRU) Awareness Message*

3. Literaturverzeichnis

Cheng, Qixiu & Liu, Zhiyuan & Szeto, W. (2019): A cell-based dynamic congestion pricing scheme considering travel distance and time delay. In: *Transportmetrica B*.

Haque, Antora Mohsena; Brakewood, Candace (2020): A synthesis and comparison of American automated shuttle pilot projects. In: *Case Studies on Transport Policy* 8 (3), S. 928–937. DOI: 10.1016/j.cstp.2020.05.005.

Hertkorn, Georg (2005): Mikroskopische Modellierung von zeitabhängiger Verkehrsnachfrage und von Verkehrsflußmustern. German Aerospace Center. Institute of Transport Research.

Kay W. Axhausen, Ilka Ehreke, Axel Gelmser, Stephane Hess, Christian Jödden, Kai Nagel, Andreas Sauer, Claude Weis (2014): Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf Basis der

Schätzung eines Modells für modale Verlagerungen im nicht ... Online verfügbar unter <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/89615/ab1028.pdf>.

Pablo Alvarez Lopez; Michael Behrisch; Laura Bieker-Walz; Jakob Erdmann; Yun-Pang Flötteröd; Robert Hilbrich et al. (2018): Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems: IEEE. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/124092/>.

Sharon, Guni; Levin, Michael W.; Hanna, Josiah P.; Rambha, Tarun; Boyles, Stephen D.; Stone, Peter (2017): Network-wide adaptive tolling for connected and automated vehicles. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 84, S. 142–157. DOI: 10.1016/j.trc.2017.08.019.

Wesemeyer, Daniel; Ruppe, Sten (2021): Verkehrssteuerung in Netzwerken auf Grundlage dynamischer Preise. FGSV. Wesemeyer, Daniel; Ruppe, Sten, 2021.

Zhang, Yundi; Atasoy, Bilge; Akkinepally, Arun; Ben-Akiva, Moshe (2019): Dynamic Toll Pricing using Dynamic Traffic Assignment System with Online Calibration. In: *0361-1981*. Online verfügbar unter <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/125430>.

Ziyuan Gu and Meead Saberi (2021): Simulation-based optimization of toll pricing in large-scale urban networks using the network fundamental diagram: A cross-comparison of methods. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (122).