

Abschlussbericht zum Vorhaben

**„Intelligente Verkehrsflussregelung für Mixed Autonomy Traffic mittels  
Infrastruktursensorik, Floating Car Data, Routing und LSA-Steuerung“**

<b>Projektnummer:</b>	S0047/10055/202
<b>Sachberichtnummer:</b>	4 (Abschlussbericht)
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	Universität Paderborn
<b>Projektbeginn:</b>	01.04.2021
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.04.2021 bis 31.08.2024
<b>Datum:</b>	25.09.2024

In diesem Abschlussbericht wird der Projektfortschritt des oben genannten Vorhabens der Universität Paderborn beschrieben. Dabei wird das Vorhaben im Folgenden mit dem gewählten Projektnamen *TraCMAS* („Traffic Control for Mixed Autonomy Systems“) bezeichnet. Der Bericht gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

1. Projektziele
2. Systemaufbau
3. Verkehrsmodell
4. Verkehrsbeobachter
5. Verkehrsregelungen
6. Zusammenfassung und Ausblick
7. Veröffentlichungen und studentische Arbeiten

## **1. Projektziele**

Die rapide Entwicklung von autonomen Fahrzeugen und deren Einführung in den Straßenverkehr bietet viele Herausforderungen und Potenziale für Verkehrssysteme der Zukunft. In Kombination mit der Nutzung von Car2X-Kommunikationstechnologie durch Verkehrsteilnehmer und Infrastruktur ergeben sich vielversprechende Möglichkeiten zur Erfassung und Beeinflussung der vorliegenden Verkehrssituation. Im Rahmen des Projekt *TraCMAS* sollten Methoden entwickelt und untersucht werden, die es erlauben, diese Potenziale zu erschließen.

Das übergeordnete Ziel war dabei die Entwicklung einer Verkehrsflussregelung, welche in der Lage ist, ein vorliegendes Mixed Autonomy Verkehrsaufkommen durch intelligente Nutzung der verfügbaren Datenquellen und Eingriffsmöglichkeiten bestmöglich zu bewältigen. Zur Verkehrsbeeinflussung sollten intelligente Schaltungen von Lichtsignalanlagen (LSA), ein flexibles Fahrzeug-Routing sowie dynamische Sollgeschwindigkeitsvorgaben zum Einsatz kommen. Eine Voraussetzung zur Berechnung der erforderlichen Regelungseingriffe ist eine hinreichend genaue und aktuelle Kenntnis des vorliegenden Verkehrssystems. Diese sollte durch die Entwicklung eines Beobachters erlangt werden, der die verfügbaren Daten nutzt, um den aktuellen Systemzustand in Echtzeit zu rekonstruieren. Die Grundlage zur Entwicklung und zum Test

dieser Systeme ist die Verfügbarkeit eines geeigneten Modells, welches die relevanten Aspekte des Verkehrssystems unter den Bedingungen des vorausgesetzten vernetzten Mixed Autonomy Traffic abbildet. Insgesamt wurden daraus folgende Teilziele abgeleitet:

1. Erstellung eines Verkehrsmodells zur Simulation aller relevanten Aspekte von Mixed Autonomy Traffic.
2. Entwicklung eines Verkehrsbeobachters, der die verfügbaren Sensordaten fusioniert und die aktuelle Verkehrssituation online rekonstruiert.
3. Entwicklung einer Verkehrsregelungsstrategie, die über die drei genannten Eingriffsmöglichkeiten den Verkehrsfluss optimiert.
4. Evaluation des Gesamtsystems.

Im Folgenden soll zunächst auf den allgemeinen Aufbau des Gesamtsystems eingegangen werden. Anschließend werden die entwickelten Teilsysteme thematisiert.

## 2. Systemaufbau

Bevor auf die einzelnen Ziele und Teilsysteme eingegangen werden soll, wird hier zunächst ein Überblick über den Aufbau des Gesamtsystems gegeben. In Bild 1 ist dazu das Strukturbild der entwickelten Systemarchitektur dargestellt, in dem das Zusammenwirken der Einzelkomponenten dargestellt ist.

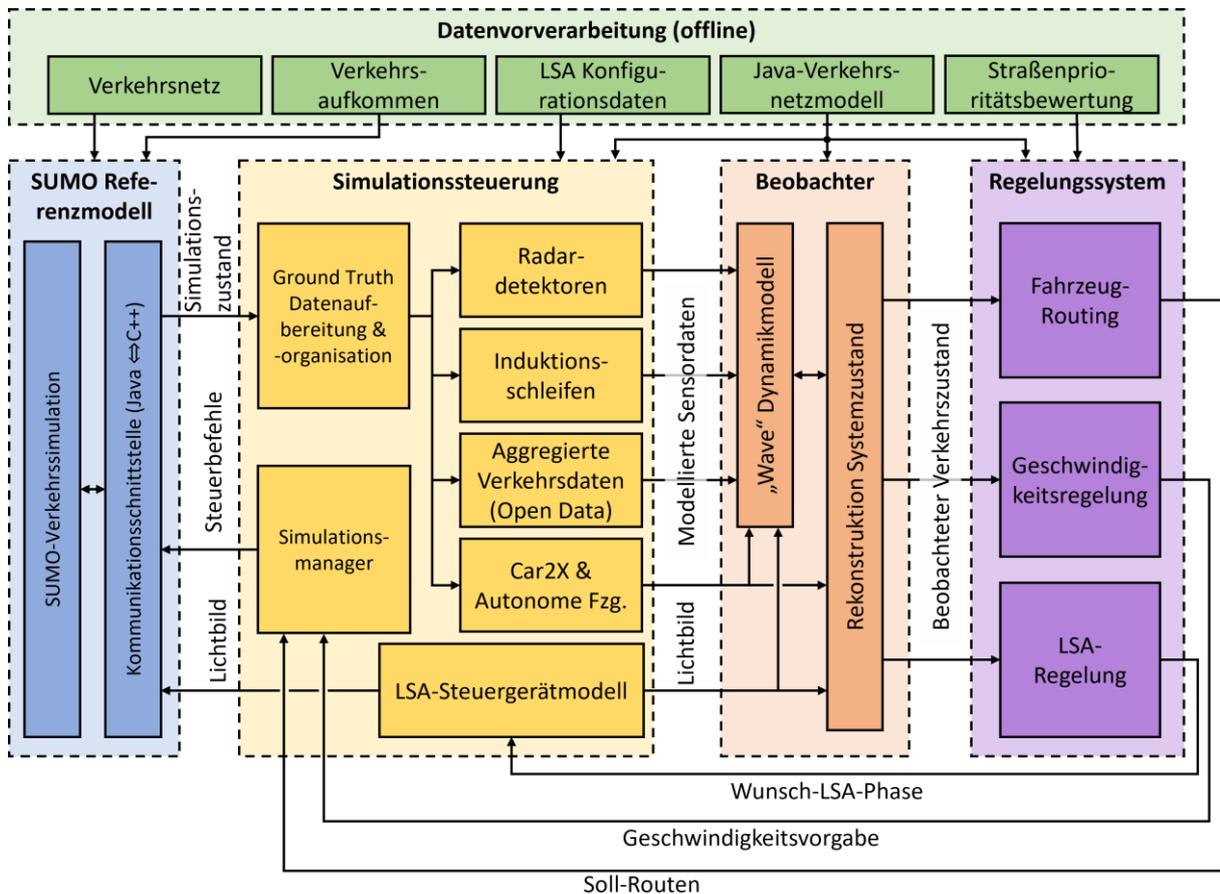


Bild 1: Strukturbild des Gesamtsystems

Als Grundlage des Verkehrsmodells wird die Software *SUMO* (Simulation of Urban Mobility) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (blau) eingesetzt. Diese stellt eine Reihe an Werkzeugen und Modellen zur Verfügung, welche es erlauben, die Interaktionen der Verkehrsteilnehmer untereinander sowie mit der modellierten Infrastruktur zu simulieren. Dazu gehören unter anderem Fahrzeugfolgemodelle, Spurwechselmodelle und Fahrerverhaltensmodelle, auf die in diesem Projekt zurückgegriffen wird. Über eine Kommunikationsschnittstelle kann mit der Simulation interagiert werden. So wird einerseits im jedem Berechnungszeitschritt der aktuell vorliegende Simulationszustand (Ground Truth) ausgelesen und andererseits werden Steuerbefehle für Fahrzeuge und die Signalgeber der Lichtsignalanlagen an die Simulation weitergegeben.

Die erfassten Ground Truth Zustandsdaten werden anschließend in der Simulationssteuerung (gelb) strukturiert und organisiert, und ermöglichen nach Abschluss der Simulation eine Bewertung des Simulationsablaufs. Gleichzeitig sind diese die Grundlage für die Generierung der virtuellen Sensordaten, welche dem Verkehrsbeobachter (rot) als Eingangsdaten dienen. Ein LSA-Steuergerätmodell sorgt zudem dafür, dass die geforderten Wunschphasen von den Lichtsignalanlagen realistisch und unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben geschaltet werden.

Der Verkehrsbeobachter nimmt Sensorinformationen sowie die aktuellen LSA-Lichtbilder entgegen und wertet diese aus. Dabei erfüllt dieser im Wesentlichen drei Funktionen:

1. Bereitstellen des aktuell geschätzten Systemzustands (insbesondere Verkehrsdichten und Flussgeschwindigkeiten) in Echtzeit, d. h. für den aktuellen Berechnungsschritt.
2. Modellbasierte Extrapolation des aktuellen Systemzustands zur Berechnung des jeweils nächsten Zeitschritts.
3. Fortlaufende Korrektur des Systemzustands durch die anfallenden Sensordaten.

Zur Beeinflussung des Verkehrszustands kommt schließlich das Regelungssystem (violett) zum Einsatz. Hier werden die Ziel-Phasen für die LSA ausgewählt und kooperierenden, Car2X-fähigen Fahrzeugen Routenempfehlungen gegeben. Darüber hinaus können an dieser Stelle die Sollgeschwindigkeiten für Fahrzeuge bestimmt und an die Simulationssteuerung weitergegeben werden.

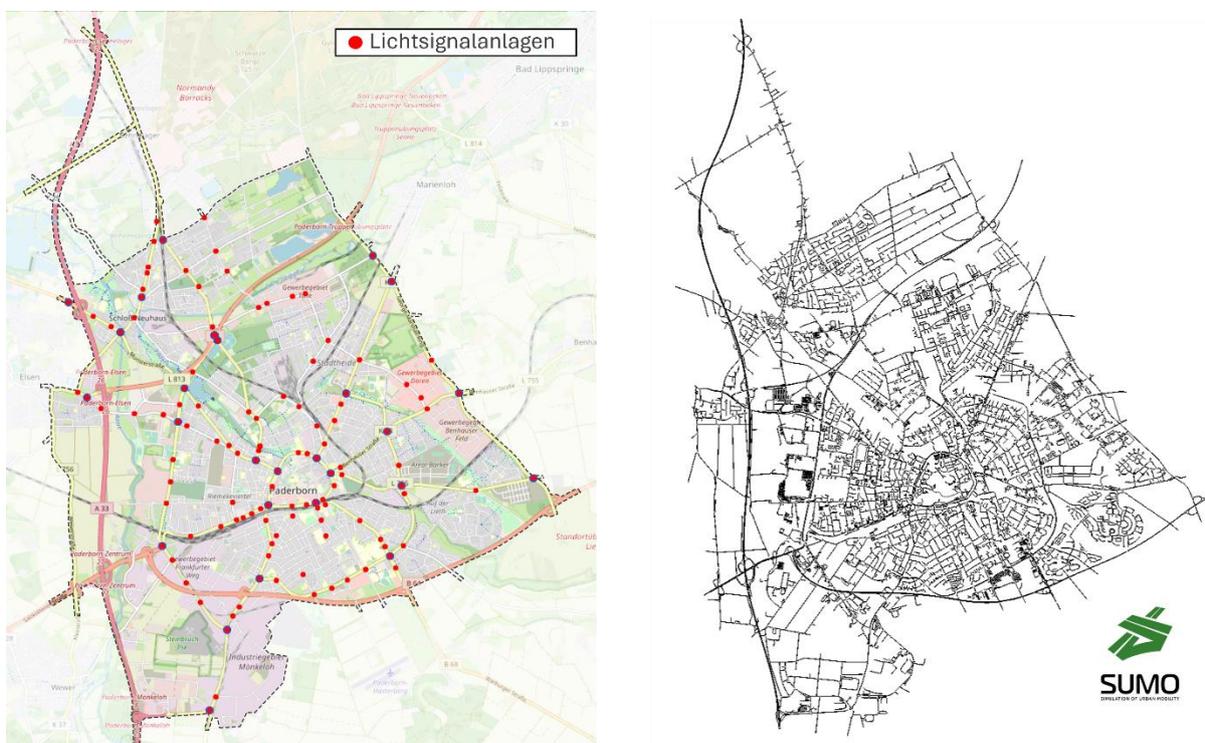
Eine wichtige Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der vorgestellten Teilsysteme ist die Verfügbarkeit von Informationen über das vorliegende Verkehrssystem. Während dynamische Informationen im Regelkreis selbst berechnet und genutzt werden, können zeitlich unveränderliche Daten offline (also im Vorfeld der Simulation ohne Anforderungen an Echtzeitfähigkeit) in einer Datenvorverarbeitung (grün) angelegt und weiterverarbeitet werden. Dazu zählt beispielsweise das Verkehrsnetz selbst, das erwartete Verkehrsaufkommen oder eine Prioritätsbewertung der einzelnen Straßenzüge.

Für die Entwicklung und Implementierung der einzelnen Komponenten wurde zunächst eine *MATLAB*-Umgebung genutzt, wie sie für regelungstechnische Anwendungen häufig zum Einsatz kommt. Aufgrund der Größe des betrachteten Verkehrsgebiets und der damit verbundenen hohen Anzahl an zu betrachtenden Fahrzeugen und LSA, wurde jedoch deutlich, dass eine effizientere Entwicklungs- und Simulationsumgebung erforderlich war. Die Wahl für die Umsetzung des Großteils der Echtzeitkomponenten fiel dabei auf *Java*, da mit den Bibliotheken *libsumo* und *libtraci* bereits Schnittstellen zu *SUMO* existieren. Im Gegensatz zu *MATLAB* oder *Python* (für die ebenfalls Schnittstellen existieren) werden *Java*-Anwendungen kompiliert statt

interpretiert, was erhebliche Effizienzsteigerungen ermöglicht. Für die Umsetzung der LSA-Regelung wurde darüber hinaus auf C++ zurückgegriffen, da der hier verwendete modellprädiktive Ansatz besonders hohe Anforderungen an die Recheneffizienz stellt und damit den Mehraufwand einer hardwarenäheren Implementierung rechtfertigt. Innerhalb der besonders aufwändig zu berechnenden Teilsysteme (insbes. LSA-Regelung, Beobachter und Datenaufbereitung) sind die Prozesse darüber hinaus parallelisiert und erlauben damit eine Aufteilung der Rechenlast auf mehrere Prozessorkerne.

### 3. Verkehrsmodell

Die Grundlage des Verkehrsmodells ist das Straßennetz, auf welchem sich das Verkehrsgeschehen abspielt. Hierfür wurde das Stadtgebiet in und um Paderborn als Grundlage genutzt, da hier für einige Bereiche aus früheren Projekten bereits Erfahrungen und Erkenntnisse vorlagen. Darüber hinaus standen die Resultate einer von der Stadt Paderborn durchgeführten Verkehrszählung aus dem Jahr 2018 zu Verfügung, welche Aufschluss über die Verkehrssituation an zahlreichen Messstellen in Paderborn liefert. Der ausgewählte Netzabschnitt ist in Bild 2 dargestellt. Er erstreckt sich über einen Bereich von ca. 12 km x 8 km und umfasst sowohl urbane Gebiete, Landstraßen, Bundesstraßen sowie einen Autobahnabschnitt. Außerdem umfasst das Netz 135 LSA, welche im Bild als rote Punkte eingezeichnet sind. Die Netzgröße ergab sich aus einer Abwägung zwischen den Anforderungen insbesondere des Routingsystems auf der einen Seite, welches eine möglichst vielfältige Auswahl an Verbindungsmöglichkeiten erfordert, und den Einschränkungen durch den erforderlichen Modellierungs- und Berechnungsaufwand auf der anderen Seite, der wiederum exponentiell mit den gewählten Dimensionen ansteigt.



*Bild 2: Auswahl und Modellierung des Paderborner Straßennetzes*

Für die Erstellung des Netzes wurde die frei verfügbare Datenbank *OpenStreetMap (OSM)* genutzt, aus der die Streckenverläufe mithilfe von *SUMO* extrahiert und in eine damit kompatible Form konvertiert wurden. Während die wesentlichen Elemente des Netzes auf diese Weise nachgebildet werden konnten, wurden jedoch auch zahlreiche fehlerhafte Netzabschnitte (insbesondere Fahrspurenanzahl- und verlauf sowie Abbiegemöglichkeiten) deutlich, insbesondere in Kreuzungsbereichen, welche zahlreiche aufwändige manuelle Netzkorrekturen erforderte. Um betroffene Abschnitte zu finden, wurden verschiedene automatisierte Netzanalysen durchgeführt, welche nach bekannten Fehlerbildern suchen und auf diese hinweisen.

Das Verkehrsnetz bildet die Grundlage für darauf aufbauende Analysen und Verarbeitungsschritte, welche in Bild 3 dargestellt sind. Dazu gehört zunächst eine Bewertung der Straßenabschnitte hinsichtlich ihrer Relevanz für das Gesamtsystem. Zu diesem Zweck wurden mehrere graphenbasierte Metriken (u. A. „Betweenness-Zentralität“ und „Straightness-Zentralität“) eingesetzt und so mit *OSM*-Netzwerkinformationen kombiniert, dass die daraus resultierende Bewertung eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den zur Verfügung stehenden Daten der Paderborner Verkehrszählung aufweist. Während die Messdaten lediglich punktuell erhoben wurden, konnte durch diese Methode die Prioritätsbewertung auf jede Straße im Netz ausgeweitet werden. Die gewonnenen Informationen sind sowohl für die weitere Modellbildung als auch für die späteren Regelungseingriffe (insbesondere für das Routing) relevant.

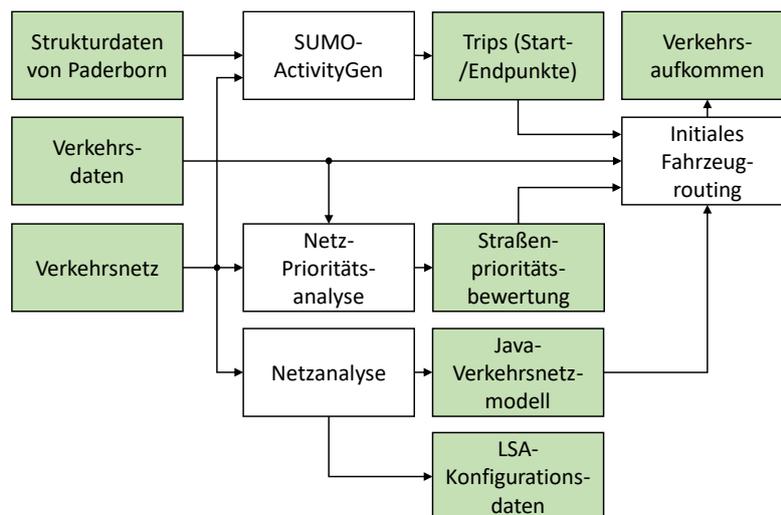


Bild 3: Offline-Verarbeitungsstruktur der Netz- und Verkehrsdaten (grün: Daten / weiß: Verarbeitungsschritte)

Ein wichtiger Aspekt der Modellbildung ist die Bestimmung des Verkehrsaufkommens. Dabei wurde sich am tatsächlich in Paderborn auftretenden Verkehr orientiert, wodurch eine realistische Beanspruchung des Netztes erreicht werden sollte. Mithilfe des Verkehrsnetzes und zusammengestellter Strukturdaten (darunter Bevölkerungszahl, Pendlerverkehr, Anteil an Fahrzeugbesitzern, Lage von Industrie- und Wohngebieten sowie von Schulen etc.) wurde in einem ersten Schritt mithilfe des *SUMO*-Tools *ActivityGen* ein zeitabhängiger Mobilitätsbedarf für alle Straßen im System erstellt. Diese sogenannten „Trips“ bestehen jeweils aus Start- und Zielpunkt in Kombination mit dem Zeitpunkt des Fahrtantritts. Ein Trip bildet somit eine einzelne durchzuführende Fahrt ab, zunächst ohne eine genaue Route zu spezifizieren. Zur Verknüpfung der Start- und Zielpositionen wurde ein Routing-Problem formuliert, welches für sämtliche

Trips eines Tages die zugehörigen Routen mithilfe von Dijkstra's Algorithmus berechnet. Dabei wird jeweils nach der „günstigsten“ Verbindung gesucht, wobei sich die Kosten aus der antizipierten Reisezeit, der Relevanzwertung der Straßenabschnitte sowie dem Grad der Übereinstimmung der Routen mit den bekannten Messdaten zusammensetzen. Reisezeit und Messdatenkonformität unterliegen dabei einer dynamischen Anpassung in Abhängigkeit der bereits berechneten Routen. Auf diese Weise streben Fahrzeuge die zeitlich kürzeste Route an, bevorzugen Hauptstraßen, sofern diese nicht bereits zu sehr befahren sind, und priorisieren Strecken, die zu einer möglichst guten Übereinstimmung mit den Messdaten führen. Das Ergebnis ist eine Menge an Routen und Abfahrtszeiten, welche das Verkehrsaufkommen für einen gesamten Tag beschreiben. Anhand der ausgewählten Anteile an autonomen bzw. Car2X-fähigen Fahrzeugen wird bestimmt, welche dieser Fahrten durch ein solches Fahrzeug absolviert und welche von konventionellen Fahrzeugen durchgeführt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass diese initial zugewiesenen Routen für kooperative, Car2X-fähige Fahrzeuge zur Laufzeit der Simulation durch das Routing-System überschrieben werden können, sofern es die Verkehrssituation erfordert. Zur Abbildung des ÖPNV wurden darüber hinaus die Routen der lokalen Buslinien sowie deren Haltestellen anhand der öffentlichen Fahrpläne der *PaderSprinter GmbH* rekonstruiert und den entsprechenden Straßenabschnitten im Netz zugeordnet.

Neben den Straßenverläufen gibt das Netz (z. T. nach manuellen Korrekturen) ebenfalls die Lage und den Aufbau von Kreuzungen wieder. Dies ist insbesondere an Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen von Bedeutung, da deren Schaltverhalten vom Aufbau der Kreuzungen abhängt. Daher wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher automatisiert entsprechende Kreuzungen analysiert und aus Geometrie- sowie Umgebungsinformationen die Konfigurationsdaten für die LSA-Steuergeräte und die LSA-Regelungen generiert. So werden anhand der Anzahl und Lage der Kreuzungsarme, der vorhandenen Spuren und deren Abbiegemöglichkeiten geeignete LSA-Signalgruppen angelegt und zu sinnvollen Phasen zusammengefasst. Außerdem werden plausible Daten für einzuhaltende Zwischenzeiten, Mindestgrünzeiten, Phasenkompatibilität untereinander und weitere für die LSA-Schaltung relevante Daten erzeugt. Der Algorithmus ist in der Lage, für die meisten LSA im Netzwerk sinnvolle Konfigurationsdaten generieren. Lediglich für sehr komplexe bzw. ungewöhnliche Kreuzungsgeometrien war eine manuelle Konfiguration erforderlich, da die geringe Anzahl dieser Sonderfälle den zusätzlichen Mehraufwand bei der Entwicklung des Netzanalysealgorithmus nicht gerechtfertigt hätte.

Zur weiteren Netzanalyse sowie zum effizienten Berechnen und Bereitstellen zusätzlicher netzwerkbezogener Informationen wurde zudem ein Netzwerkmodell für die Simulationsumgebung in *Java* entwickelt. Dieses ist in der Lage, *SUMO*-Netzwerkdateien einzulesen und darauf aufbauend eine interne, graphenbasierte Netzrepräsentation anzulegen. Darüber hinaus werden nach dem Einlesen verschiedene Analysen durchgeführt, um z. B. Einflussbereiche von LSA zu bestimmen, parallel bzw. entgegengesetzt verlaufende Straßen zu identifizieren oder Verkehrs- und berechnete Prioritätsdaten mit den zugehörigen Straßenabschnitten zu verknüpfen. Insbesondere ermöglicht dieses Modell einen schnellen, effizienten und zentralen Zugriff der Teilsysteme innerhalb des Regelkreises auf Netzwerkinformationen.

Die Simulation der Bewegungsdynamik der Einzelfahrzeuge geschieht innerhalb der *SUMO*-Anwendung, welche, wie zuvor erwähnt, bereits die dafür erforderlichen Teilmodelle (darunter Fahrzeugfolgemodelle, Spurwechselmodelle, Fahrerverhaltensmodelle etc.) bereitstellt. Um

die unterschiedlichen Eigenschaften von verschiedenen Fahrzeugtypen abzubilden, wurden entsprechende Parametersätze für mehrere Klassen von Verkehrsteilnehmern angelegt. Dazu zählen u. A. Fahrzeuglängen, das Beschleunigungsverhalten und Höchstgeschwindigkeiten (z. B. für Fahrradfahrer). Eine der so festgelegten Fahrzeugklassen wird für die Simulation des Bewegungsverhaltens autonomer Fahrzeuge genutzt. Während für konventionelle Fahrzeuge Abweichungen der Fahrweise zum Idealverhalten, z. B. durch gelegentliche Geschwindigkeitsüberschreitungen, teilweise ungeduldiges Verhalten beim Abbiegen und Unaufmerksamkeiten in den Modellen berücksichtigt werden, wurden derartige Abweichungen zum Idealverhalten für autonome Fahrzeuge deaktiviert. Ein autonomes Fahrzeug überschreitet beispielsweise nie die zulässige Höchstgeschwindigkeit oder verletzt auch nach längeren Wartezeiten an Kreuzungen keine Vorfahrtsregeln. Derartige Annahmen bilden das erwartete Verhalten von autonomen Fahrzeugen folglich in einer vereinfachten und idealisierten Weise ab und gehen nicht näher auf Elemente der konkreten Fahraufgabe (z. B. die Trajektorienberechnung und -verfolgung) ein. Während dies zwar für die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen wichtige zu lösende Probleme sind, spielen sie für die Betrachtungsebene eines Verkehrsmanagementsystems keine tragende Rolle. Hier sind eher die Eigenschaften dieser Fahrzeuge als Sensordatenquellen bzw. als Stellglieder (d. h. ihre Fähigkeit zur Beeinflussung der Verkehrssituation) relevant, auf welche in späteren Abschnitten genauer eingegangen wird.

Bei der Entwicklung sämtlicher Systemkomponenten wurde auf die Übertragbarkeit auf andere Verkehrsräume Rücksicht genommen. Während viele der beschriebenen Schritte und Komponenten der Modellbildung direkt übertragbar sind oder automatisiert erfolgen, sind für andere Elemente aufwändigere manuelle Anpassungen erforderlich. Insbesondere die Korrektheit der *OSM*-Netzdaten erfordert zahlreiche manuelle Korrekturen, insbesondere in Kreuzungsbereichen. Hier erwiesen sich zur Korrektur Satellitenaufnahmen, lokale Bildaufnahmen sowie eine gute Ortskenntnis als äußerst hilfreich. Der Prozess für die Berechnung des Verkehrsaufkommens ist weitestgehend automatisiert, erfordert jedoch, wie oben beschrieben, das Bereitstellen von Strukturdaten der Verkehrsregion sowie eine manuelle Zuordnung u. A. von Schulen sowie Wohn- und Industriegebieten. Für letztgenanntes Problem wurde speziell ein bildbasiertes Tool entwickelt, welches die Einordnung der Straßenabschnitte vereinfacht, dennoch sind hier Ortskenntnisse und eine hinreichende Datengrundlage erforderlich. Die Konfigurationsdaten für die meisten Lichtsignalanlagen können automatisiert generiert werden, nachdem das Verkehrsnetz erstellt und manuell überprüft und ggf. korrigiert wurde. Lediglich ungewöhnliche oder besonders komplexe Strukturen erfordern einen manuellen Eingriff. Die Konfiguration von *SUMO* sowie die weiteren Schritte zur Netzabbildung und -analyse erfolgen jedoch unabhängig von der bereitgestellten Datengrundlagen und sind somit prinzipiell ohne größere Anpassungen auch auf andere Verkehrsnetze übertragbar.

#### **4. Verkehrsbeobachter**

Die entwickelte Simulationsumgebung nimmt die Rolle eines „Ground Truth“ Modells ein und dient damit als Substitut für ein reales Verkehrssystem der nahen Zukunft. Während in der Simulation zwar sämtliche Systemzustände des Modells exakt und unverzögert bekannt sind, kann sich ein Regelungssystem in der Realität nicht auf eine solche umfassende Datenverfügbarkeit stützen. Derartige Systeme sind auf Datenquellen angewiesen, welche Informationen sammeln, auf deren Basis der vorliegende Zustand zunächst rekonstruiert werden muss. Aus

regelungstechnischer Sicht nennt man ein solches System einen „Beobachter“. Dieser kombiniert verfügbare Sensordaten mit Vorwissen über das Systemverhalten und ermöglicht auf diese Weise neben der Rekonstruktion auch eine begrenzte Extrapolation des aktuellen Zustands auch über die direkt überwachten Bereiche hinaus. Für den Aufbau des Verkehrsleitsystems unter realistischen Bedingungen war im Rahmen dieses Projektes daher ebenfalls die Entwicklung eines Beobachters vorgesehen, für den wiederum virtuelle Sensordaten auf Basis des wahren Systemzustands erzeugt werden müssen.

### Sensormodellierung

Folgende Sensoren bzw. Informationsquellen wurden hierbei berücksichtigt:

	<b>Sensoren/Datenquellen</b>	<b>Bereitgestellte Daten</b>
<b>1</b>	Induktionsschleifen	1. Zeitpunkt der Sensorüberquerung 2. Aktueller Belegungszustand
<b>2</b>	Radarsensoren	1. Zeitpunkt der Sensorüberquerung 2. Fahrzeuggeschwindigkeit 3. Fahrzeugtyp
<b>3</b>	Nichtautonome Fahrzeuge mit Car2X-Ausstattung	1. Eigene Position, Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp 2. Eigene Route und Zielort
<b>4</b>	Autonome Fahrzeuge mit Car2X- Ausstattung	1. Eigene Position, Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp 2. Eigene Route und Zielort 3. Positionen, Geschwindigkeiten und Fahrzeugtypen der Fahrzeuge im unmittelbaren Umfeld
<b>5</b>	Open Data Quellen	1. Zeitliche aggregierte, durchschnittliche Verkehrsdichten, Verkehrsflüsse und Reisezeiten

Die Induktionsschleifen und Radarsensoren zählen zu den statischen Detektoren, welche an festgelegten Positionen im Straßennetzwerk angebracht sind. Derartige Sensoren werden bereits seit Jahrzehnten in der Verkehrserfassung eingesetzt, im Rahmen des Projekts wird darüber hinaus angenommen, dass die gesammelten Daten in Echtzeit einem zentralen Auswertungssystem zur Verfügung gestellt werden. Durch Einsatz eines automatisierten Platzierungsverfahrens wurden Induktionsschleifen im Umfeld der vorhandenen Lichtsignalanlagen positioniert. Dabei wurden – wie auch bei realen LSA – unmittelbar vor den Haltelinien Sensoren eingefügt, welche insbesondere für die Erkennung von wartenden Fahrzeugen dienen. Außerdem wurden weitere Induktionsschleifen in Abständen von ca. 50 Metern von den Kreuzungen entfernt positioniert, welche eine Früherkennung der eintreffenden Fahrzeuge ermöglichen. Im Fall von mehreren Spuren werden zusätzliche Schleifen nebeneinander platziert, wodurch eine Zuordnung der Fahrzeuge zu der jeweiligen Fahrspur ermöglicht wird. Auf diese Weise wurden 1774 Induktionsschleifen im Netz verteilt. Während Induktionsschleifen eine relativ gute Abdeckung in der Nähe von LSA erreichen, sind Radarsensoren für eine zielgerichteter Positionierung vorgesehen. In der Realität müssten entsprechende Sensoren zusätzlich angeschafft und betrieben werden, weshalb ein Einsatz auf Positionen im Netz mit besonderer Relevanz beschränkt wäre. Sich daran orientierend, wurden 50 Radarsensoren manuell an Stellen platziert,

welche entweder hohe Verkehrsaufkommen aufweisen, weit von bestehenden Sensoren entfernt sind oder sich durch andere Eigenschaften (z. B. Nähe zu Autobahnauffahrten) auszeichnen. Auch hier ist eine Spurzuteilung der Fahrzeuge möglich, außerdem können Radardetektoren im Gegensatz zu Induktionsschleifen eine Geschwindigkeitsmessung sowie Klassifizierung der passierenden Fahrzeuge vornehmen, wodurch zusätzliche Verkehrsinformationen gewonnen werden können. Zur Generierung der Sensordaten beider Typen werden in jedem Simulationsschritt diejenigen Fahrzeuge aus dem Ground Truth Verkehrszustand identifiziert, welche die jeweiligen Sensorpositionen im letzten Zeitschritt überschritten haben. Abhängig vom Sensortyp werden neben der Überquerungsmeldung selbst auch weitere Informationen erfasst. Zur Simulation von Störungen wurde darüber hinaus die Möglichkeit geschaffen, Wahrscheinlichkeiten für Fehldetektionen, bzw., im Fall von Radardetektoren, Fehlklassifikationen einzustellen. Dadurch können probabilistisch Sensoreffekte abgebildet werden, ohne eine tiefgreifendere Sensormodellierung (z. B. durch Modellierung der magnetischen Eigenschaften von Fahrzeugen) durchzuführen, welche in *SUMO* nicht ohne Weiteres umsetzbar wäre.

Im Gegensatz zu den stationären Sensoren übernehmen Verkehrsteilnehmer mit Car2X-Ausstattung die Rolle von beweglichen Datenquellen. Eine Grundannahme dieses Projektes war, dass derartige Fahrzeuge bestimmte Daten in Echtzeit teilen und dass eine Weiterverarbeitung und Zuordnung dieser Daten zulässig ist. Hierzu zählen unter anderem auch die aktuelle Position und Geschwindigkeit, wodurch die Bewegungsdaten dieser Fahrzeuge direkt aus dem Ground Truth Systemzustand bezogen werden. Auch herrscht keine Unsicherheit über den Typ des jeweiligen Fahrzeugs. Das Teilen der Route und des Reiseziels ermöglicht es außerdem, diesen Fahrzeugen Alternativrouten zur Verfügung zu stellen, dazu später mehr.

Autonome Fahrzeuge besitzen darüber hinaus die Fähigkeit, ihre Umgebung durch Sensoren wahrzunehmen, was in der Regel auch mit einer Objekterkennung zur Identifikation und zur Analyse des Bewegungsverhaltens der Verkehrsteilnehmer in ihrem unmittelbaren Umfeld verbunden ist. Während derartige Informationen für die Funktionsfähigkeit autonomer Fahrzeuge unerlässlich sind, stellen sie für ein Verkehrsleitsystem ebenfalls einen großen Wert dar. Eine detaillierte Modellierung der Umfeldwahrnehmung inkl. Objektverdeckungen etc. würde eine dreidimensionale Umgebung erfordern, welche mit *SUMO* nicht gegeben ist. Für die hier angewandte Betrachtungsebene wird daher von einer idealisierten Umgebungswahrnehmung ausgegangen, welche es ermöglicht, Fahrzeuge in einem konfigurierbaren Umkreis (in der Regel 100 Meter) zu verfolgen. Für diese Fahrzeuge werden ebenfalls die Bewegungsdaten aus dem Ground Truth zur Verfügung gestellt, solange sie sich im Erfassungsbereich befinden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass nicht nur der Fahrzeugtyp erkannt, sondern auch das Fahrzeug selbst identifiziert wird, was eine spätere Wiedererkennung, ggf. auch durch andere autonome Fahrzeuge ermöglicht.

Open Data fasst unterschiedliche Datenquellen zusammen, welche aggregierte und zeitlich verzögerte Verkehrsdaten liefert. Sie ermöglichen damit zwar eine generelle Aussage zur aktuellen Verkehrssituation, sind jedoch für echtzeitkritische Regelungsanwendungen, wie die LSA-Phasenauswahl oder dynamische Geschwindigkeitsanpassungen von geringem Wert. Für die Modellierung spielten die konkreten Datenquellen (z. B. Bluetooth-Erfassungen, App-Telemetrie oder diverse Zusatzsensorik) keine Rolle, lediglich die daraus abgeleiteten makroskopischen Verkehrsdaten sind relevant. In jedem Berechnungsschritt werden daher für jeden Streckenabschnitt des Netzes Verkehrsdichte, Verkehrsfluss (Fahrzeuge pro Minute) und die mittlere

Flussgeschwindigkeiten aus dem Ground Truth erfasst und gespeichert. Die zur Verfügung stehenden Verkehrsgrößen ergeben sich schließlich aus dem gleitenden Mittelwert dieser Größen über die vergangenen zehn Minuten. Somit sind die erzeugten Daten nicht direkt Einzelfahrzeugen zuordbar und Änderungen wirken sich durch die Mittelung nur verzögert aus.

Neben diesen Datenquellen, welche direkt Informationen zur aktuellen Verkehrssituation beziehen, stehen zudem weitere Informationen zur Verfügung, die vom Beobachter berücksichtigt werden. Es wird davon ausgegangen, dass „historische Daten“, in Form von zeitlich aggregierten Informationen über das zuvor berechnete Verkehrsaufkommen bereitstehen. So wird angenommen, dass für zeitliche Intervalle von jeweils 5-10 Minuten über den gesamten Simulationszeitraum die Anzahl der erwarteten Fahrzeuge, welche über einen Streckenabschnitt geführt werden, bekannt ist. In der Realität können diese Daten durch regelmäßige Verkehrsmessungen und -auswertungen erhoben werden, für die Simulation wurden sie anhand der zuvor bestimmten Routen berechnet. Darüber hinaus verfügt der Beobachter ebenfalls über die aktuellen Stellengriffe der Regelung, so werden bspw. die aktuellen Lichtsignale der LSA verwendet, um Informationen über erlaubte bzw. gehemmte Verkehrsflüsse an den zugehörigen Kreuzungen zu erhalten.

Zur Erfassung des Ground Truth und zur Erzeugung der Sensorsignale daraus muss der aktuelle Simulationszustand zunächst abgefragt werden. Wie oben beschrieben, stehen zur Interaktion mit der *SUMO*-Verkehrssimulation die Schnittstellen *libtraci* und *libsumo* zur Verfügung. Während *libtraci* eine grafische Benutzeroberfläche zur Darstellung der Simulation unterstützt, ist es auf vergleichsweise langsame Port-Kommunikation angewiesen, welche den Datenaustausch erschwert. Dagegen kann *libsumo* direkt als Library auf Prozessebene eingebunden, was eine effiziente Kommunikation ermöglicht, dafür jedoch keine Visualisierung unterstützt. Da insbesondere während der Entwicklungsphase nicht auf eine grafische Darstellung verzichtet werden sollte und gleichzeitig in jedem Simulationsschritt (bei einer Schrittweite von einer Sekunde) der Zustand sämtlicher Fahrzeuge ausgelesen werden muss, wurde eine Modifikation der *SUMO*-Anwendung vorgenommen. Diese ermöglicht die Übertragung von gebündelten Daten über beide Schnittstellen, was besonders für *libtraci* eine erhebliche Beschleunigung darstellt und die Nutzung der Visualisierung auch bei hohen Verkehrsaufkommen ermöglicht.

### **Grundlagen des Verkehrsbeobachteralgorithmus**

Zur Rekonstruktion des aktuellen Verkehrszustands wurde schließlich ein Beobachteralgorithmus entwickelt, welcher die vorliegenden Sensordaten verarbeitet und daraus ein wahrscheinliches Verkehrsbild ableitet. Insbesondere die Größe des modellierten Verkehrssystems sowie die Anforderungen an die Aktualität des Verkehrsbildes heben den hier umgesetzten Ansatz von der meisten in der Literatur beschriebenen Konzepten ab. Im Rahmen des *Pilotprojekt Schlosskreuzung*, eines früheren Projektes der Universität Paderborn, wurde beispielsweise ein *SUMO*-basierter Echtzeit-Beobachter für die Erfassung zweier Straßenzüge mit sechs LSA eingesetzt. Ein solches System lässt sich allerdings nicht auf große Verkehrsbereiche skalieren. Darüber hinaus wurde das betrachtete Verkehrssystem mit ca. 40 Zusatzsensoren ausgestattet, wodurch eine relativ breite Sensorabdeckung ermöglicht wurde. Für das hier vorliegende System kann dies nicht überall vorausgesetzt werden. Insbesondere für mittlere und kleinere Straßen ohne LSA (also auch ohne Induktionsschleifen) kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese stets durch autonome Fahrzeuge überwacht werden oder dass dort stationäre Zusatzsensorik angebracht ist. Der Beobachter muss also vor allem gut mit lokalen Unsicherheiten

aufgrund der unvollständigen Informationslage umgehen können. Er muss zudem in der Lage sein, den wahrscheinlichen Verkehrszustand dort lokal zu extrapolieren, wo keine Messungen vorliegen, bzw. ihn an Stellen zu korrigieren, wo Sensordaten verfügbar sind. Speziell wahr-scheinlichkeitsbasierte Ansätze eignen sich für derartige Anforderungen gut.

Während der Entwicklung dieses Systems stellte sich heraus, dass dieser Projektteil deutlich aufwändiger ist als ursprünglich im Projektplan eingeplant war. Ansätze, die in isolierten und idealisierten Testumgebungen zunächst vielversprechend wirkten, zeigten häufig Schwächen bei der Integration oder Erprobung in der entwickelten Simulationsumgebung. Zum Teil betraf dies Grundannahmen über das Beobachter- bzw. Systemverhalten, welche entsprechend überarbeitet und angepasst werden mussten. Ein anderer Teil betraf den Aufwand bzw. die Effizienz der Implementierung, welche entsprechend angepasst wurde. Insbesondere die Robustheit des Algorithmus musste unter unterschiedlichen Strecken- und Verkehrsbedingungen sichergestellt werden. Das gilt sowohl für die Annahmen über den Verkehr also auch für die numerischen Berechnungen. So enthält das Verkehrsnetz auch ungewöhnliche oder im Kreis führende Streckenverläufe, welche identifiziert und adäquat behandelt werden müssen. Sehr kurz modellierte Teilstücke, z. B. als Folge mehrerer dicht hintereinander auftretender Änderungen der Spuranzahl in *SUMO*, brechen isoliert betrachtet makroskopische Annahmen über das Verkehrsflussverhalten, was darauf aufbauende Algorithmen berücksichtigen müssen. Gleiches gilt für nah beieinanderliegende Kreuzungen und ihr Zu- bzw. Abflussverhalten. Der aus dem Entwicklungsprozess hervorgegangene Beobachter soll im Folgenden vorgestellt werden.

### **Wahrscheinlichkeitsbasierte Fahrzeugmodellierung**

Das Kernproblem, welches der Beobachter löst, ist die Erfassung und Verfolgung von Fahrzeugen im Verkehrsnetz. Während mit Car2X-Kommunikationstechnik ausgestattete Fahrzeuge ihre Position aktiv teilen, wodurch diese direkt zu verorten sind, müssen die übrigen Verkehrsteilnehmer anhand der verfügbaren Daten lokalisiert werden. Abhängig davon, wie weit die letzte Erfassung eines Fahrzeugs zurückliegt, steigt die Unsicherheit über dessen aktuelle Position an, da das exakte Fahrverhalten des Fahrers nicht bekannt ist. Es ist allerdings möglich, einen Aufenthaltsbereich anzugeben, in dem sich das Fahrzeug mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (unmittelbar nach einer Detektion mit 100%) befindet. Mit der Zeit verschiebt und verbreitert sich dieser Aufenthaltsbereich, was einer Bewegung des Fahrzeugs und der gleichzeitigen Erhöhung der Unsicherheit über dessen exakte Position entspricht. Ein solcher Bereich, der eine Anwesenheitswahrscheinlichkeit auf eine Strecke verteilt, wird im Folgenden „Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion“ (WDF) oder einfach „Wave“ (aufgrund der beschriebenen Ausbreitungseigenschaften) genannt.

Stellt bspw. ein Radarsensor die Anwesenheit eines Fahrzeugs fest, wird eine Wave an der Sensorposition eingefügt, deren kumulierte Dichte eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit von 100% aufweist. Bis zur erneuten Detektion des Fahrzeugs muss die Wave nun alle wahrscheinlichen Bewegungsprofile des Fahrzeugs repräsentieren. Dazu bewegt sich die vordere Front der Funktion gemäß einer „optimistischen“ (d. h. schnellen) Prognose, während der hintere Bereich einem „pessimistischen“ (langsamen) Fahrprofil folgt. Folglich dehnt sich die Wave entlang der Strecke aus, die Unsicherheit über die genaue Fahrzeugposition steigt. Da die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Fahrzeugs innerhalb der gesamten Wave jedoch unverändert bleibt, reduziert sich mit der Verbreiterung nur die Wahrscheinlichkeitsdichte für jeden einzelnen Punkt auf der Strecke. Die Wahrscheinlichkeitsdichte wird dabei als gleichverteilt über den gesamten

Aufenthaltbereich angenommen. Zuvor wurden auch andere Funktionen untersucht und getestet, insbesondere die einer Gauß'schen Normalverteilung, welche häufig für die Beschreibung von Unsicherheiten genutzt wird (bspw. auch als Basis von Kalman-Filtern). Hier wäre der Erwartungswert der Fahrzeugposition die Mitte der Verteilungsfunktion und die Varianz entspräche der Ausdehnung. Es hat sich jedoch gezeigt, dass ein solcher angenommene Funktionsverlauf, welcher eine Wahrscheinlichkeitsverteilung innerhalb des Aufenthaltbereichs annimmt, infolge von Interaktionen mit der Umgebung seine Gültigkeit verliert. Tritt beispielsweise eine Hemmung des vorderen Wave-Abschnitts (z. B. durch eine LSA oder eine Stauung des Verkehrs) auf, wäre eine Konzentration der Wahrscheinlichkeitsdichte im vorderen Bereich zu erwarten. Eine solche dynamische Dichteverteilung wäre nicht mehr durch eine Normalverteilung abbildbar, sondern würde aufwändige numerische Berechnungen für jede Wave im System erfordern, was innerhalb der zur Verfügung stehenden Rechenzeit nicht durchführbar ist. Einer solche WDF würde dementsprechend keinen Vorteil bringen (siehe letzten Sachbericht für weitere Details). Gleichverteilte Waves sind dagegen einfacher und deutlich recheneffizienter umzusetzen, da lediglich die Bewegungen und Interaktionen der beiden Grenzen des Aufenthaltbereichs berücksichtigt werden müssen.

### **Berechnung makroskopischer Verkehrsgrößen**

Im Verkehrssystem befinden sich mehrere Fahrzeuge, welche miteinander interagieren und mit steigender Anzahl den Verkehrsfluss zunehmend hemmen. Während diese Effekte in mikroskopischen Verkehrssimulationen, wie *SUMO*, durch Fahrzeugfolgemodelle abgebildet werden können, können solche Modelle im Verkehrsbeobachter aufgrund der Unsicherheit über die genauen Fahrzeugpositionen nicht genutzt werden. Stattdessen wurden makroskopische Zusammenhänge zwischen den Verkehrsgrößen genutzt, welche mit dem wahrscheinlichkeitbasierten Ansatz vereint wurden. Dabei wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass die tatsächliche Fahrzeuganzahl auf einem (hinreichend groß gewähltem) Streckenabschnitt den kumulierten Aufenthaltswahrscheinlichkeiten aller Wave-Anteile entspricht, welche sich aktuell auf diesem Abschnitt befinden. Mithilfe von makroskopischen Fundamentaldiagrammen wird über die so bestimmte Verkehrsdichte die Flussgeschwindigkeit des Verkehrs auf den Streckenabschnitten berechnet, welche mit steigender Verkehrsdichte abfällt. Dieses Vorgehen hat zudem einen stabilisierenden Effekt: Während bei wenigen Waves zwar die Wahrscheinlichkeit höher ist, dass bei der Ermittlung der Verkehrsdichte Fehler auftreten (z. B. wenn sich zufällig überdurchschnittlich viele Fahrzeuge nicht in dem Teil der Wave bewegen, welche im erfassten Streckenabschnitt liegen), haben weniger Fahrzeuge ohnehin keinen großen Einfluss auf die Flussgeschwindigkeit, wodurch sind die Fehler nicht stark auswirken. Bei vielen Fahrzeugen hingegen gleichen sich statistisch die möglichen Fehler bei der Verkehrsdichteerfassung eher aus, wodurch genauere Aussage über die Verkehrsgrößen zu erwarten sind. Zur Verknüpfung der makroskopischen Verkehrsgrößen wurde zunächst das makroskopische Fundamentaldiagramm nach Greenshields eingesetzt, welches durch nur weniger Parameter beschreibbar ist. Als Alternative dazu wurde zudem das Fundamentaldiagramm nach Smulders integriert, welches eine größere Anpassungsfähigkeit aufweist, dafür jedoch aufwändiger zu parametrieren ist. Für vielbefahrene Straßen ist eine solche Parametrierung einfach bestimmbar, Nebenstraßen hingegen weisen häufig nicht genügend Messpunkte im hohen Verkehrsdichtebereich auf, um die zusätzlichen Parameter eindeutig zu setzen.

Für die Ermittlung der Flussgeschwindigkeit an einer beliebigen Stelle im Verkehrsnetz wird folglich die Verkehrsdichte im Bereich nach dieser Position (also in Flussrichtung) anhand der kumulierten Anwesenheitswahrscheinlichkeiten der sich dort befindlichen Wave-Anteile bestimmt und makroskopisch umgerechnet. Sofern zusätzliche Sensordaten in diesem Bereich vorliegen, überschreiben bzw. ergänzen diese den berechneten Wert. Liegen bspw. Car2X-Informationen über die Geschwindigkeit auf dem betrachteten Streckenabschnitt vor, hat diese eine größere Aussagekraft und wird der makroskopisch bestimmten Größe vorgezogen. Für Streckenabschnitte mit einem geringen Verkehrsaufkommen oder mit einer schlechten Sensorabdeckung werden darüber hinaus die aggregierten Geschwindigkeitsdaten aus Open Data Quellen bzw. aus den „historischen Daten“ (siehe oben) hinzugezogen und gewichtet mit dem makroskopisch bestimmten Wert verrechnet. Insbesondere in Bereichen mit wenig Datenquellen würden ansonsten dauerhaft zu geringe Verkehrsdichtewerte und damit zu hohe Geschwindigkeiten vorliegen, welche durch die Unkenntnis der dort vorherrschenden Verkehrssituation zu erklären sind. Eine Steigerung der Durchdringung des Verkehrs durch Car2X- bzw. autonomen Fahrzeuge und der damit verbundenen zusätzlichen Sensordaten ist für derartige Netzbereiche besonders förderlich.

Im Rahmen der Entwicklung mussten auch diverse Fälle berücksichtigt werden, welche vom idealisierten Fall einer langen, geraden Strecke abweichen. Erstreckt sich der Streckenabschnitt bspw. über eine Kreuzung hinaus, wird das beschriebene Verfahren für sämtliche Abbiegemöglichkeiten durchgeführt und die dort bestimmten Größen werden gewichtet addiert. Die Gewichtung richtet sich nach den vorliegenden Abbiegewahrscheinlichkeiten in die jeweilige Richtung, welche anhand der zuvor berechneten Routen bestimmt werden. Auch der Einfluss von LSA muss hierbei berücksichtigt werden. Blockierte Richtungen wirken als Schranken des zur Geschwindigkeitsberechnung betrachteten Bereichs und verhindern darüber hinaus das Passieren von Waves, welche sich infolgedessen vor der LSA sammeln – wie es bei einem roten Lichtsignal zu erwarten ist. Auch geschlossene Streckenverläufe, wie z. B. Kreisverkehre, sind bei der Bereichsbestimmung zu beachten, um logischen und numerischen Fehlern vorzubeugen. Zur Bewegung der Waves werden schließlich die Flussgeschwindigkeiten an beiden Enden des Erfassungsbereichs bestimmt und mit einem Faktor für die optimistische (vorderes Ende) bzw. die pessimistische Fortbewegungsoption (hinteres Ende) modifiziert. Rote LSA-Signale halten die Wave auf, gleichzeitig kann die Ausdehnung einer Wave nicht die vorgegebene Mindestlänge unterschreiten, welche der Länge des jeweiligen Fahrzeugtyps entspricht, sofern für eine Wave bekannt. Auch Detektoren sowie die Erfassungsbereiche autonomer Fahrzeuge stellen für Waves Schranken dar, dazu später jedoch mehr.

### **Abbildung von Abbiegeoptionen**

Die wahrscheinlichkeitsbasierte Modellierungsart der Waves ermöglicht nicht nur eine Darstellung der Unsicherheit der genauen Fahrzeugposition auf einem einzigen Straßenabschnitt. Durch Trennung und Aufteilung kann auch die Unsicherheit in Bezug auf die Routenwahl dargestellt werden. Nähert sich eine Wave einer Kreuzung, so ändert sich bereits frühzeitig das Bewegungsverhalten in Abhängigkeit der gewählten Abbiegerichtung. So kann es sein, dass bestimmte Abbiegerichtungen durch eine LSA freigegeben sind, andere jedoch nicht, oder dass sich in bestimmten Abbiegerichtungen Verkehr staut, während andere problemlos erreichbar sind. In Abständen von mindestens 100 Metern vor jeder Abbiegemöglichkeit im Verkehrsnetz wurden daher im Vorfeld mit einer automatisierten Netzanalyse Aufspaltungszonen angelegt.

Diese können auch über andere Kreuzungen hinausgehen und sich entsprechend überlagern. Kommt eine Wave in den Bereich einer solchen Zone (oder wird dort eingefügt), spaltet diese sich gemäß der Anzahl an Abbiegemöglichkeiten längs in mehrere „Child-Waves“ auf. Die ursprüngliche Anwesenheitswahrscheinlichkeit wird gemäß der Abbiegewahrscheinlichkeiten auf die neu entstandenen Waves verteilt und jeder wird die entsprechende Abbiegerichtung als Zwischenziel vorgegeben. Bei überlagerten Aufspaltungsbereichen werden die entsprechenden Zwischenziele nacheinander eingereiht. Jede dieser Child-Waves bewegt sich fortan weitgehend unabhängig voneinander weiter und repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, dass das echte Fahrzeug die jeweilige Route eingeschlagen hat.

Dennoch sind sämtliche Generationen von Child-Waves nach wie vor miteinander verknüpft, schließlich repräsentieren sie gemeinsam dasselbe Fahrzeug. Wird eine der Child-Waves entfernt, bspw. durch ausbleibende Detektion an einem Sensor oder beim Erreichen einer Sackgasse, so wird der zugehörige Wahrscheinlichkeitsanteil auf die verknüpften Waves verteilt. Die kumulierte Gesamtwahrscheinlichkeit aller verbleibenden verknüpften Waves bleibt damit stets bei 100 Prozent, das Fahrzeug kann schließlich nicht verschwinden (die Wahrscheinlichkeit, dass es am Straßenrand parkt bzw. sein Reiseziel erreicht hat, wird im Allgemeinen als vernachlässigbar gering angenommen). Durch die Verknüpfung wird darüber hinaus sichergestellt, dass Waves, welche demselben Ursprung entspringen, auch bei ihrem weiteren Weg durch das Netzwerk nicht über dieselben Straßen geführt werden. Es wäre z. B. nicht realistisch, wenn eine von einer Hauptstraße abgespaltene Child-Wave einen Umweg über eine Nebenstraße macht, anschließend wieder auf dieselbe Hauptstraße gelangt und dort der anderen Child-Wave folgt. Lediglich Child-Waves, welche durch das Einsetzen der Rotphase einer LSA entstanden sind und entsprechend in eine vordere (Kreuzung wurde passiert) und eine hintere Child-Wave (an Haltelinie wartend) gespalten wurden, dürfen dieselben Routen nutzen, bleiben aber dennoch verknüpft.

Ohne eine effektive Beschränkung der Wave-Anzahl würde die Menge an Waves durch die regelmäßigen Aufspaltungen exponentiell ansteigen und damit diesen Ansatz nicht umsetzbar machen. Einerseits bewirkt die Wiedererfassung eines Fahrzeugs im Rahmen der Verkehrszuordnung (siehe unten) die Entfernung einer Wave und aller mit ihr verknüpften Waves. Darüber hinaus wurde die maximale Anzahl an verknüpften Waves auf 15 beschränkt, ein einzelnes Fahrzeug kann also nie durch mehr Waves repräsentiert werden. Gleiches gilt für die Mindestwahrscheinlichkeit, welche eine Wave repräsentieren darf, welche auf 2% gesetzt wurde. Außerdem wurde das maximale „Alter“ einer Wave beschränkt. Ist eine Wave älter als 180 Sekunden, ohne dass diese an einer Kreuzung gespalten oder neu detektiert wurde, ist es fraglich, ob diese noch in ausreichendem Maße das abzubildende Fahrzeug repräsentieren kann. Wird eine Wave nach diesen Regeln zur Löschung freigegeben, wird wie im Beispiel oben die zugehörige Anwesenheitswahrscheinlichkeit auf die jeweils verknüpften Waves umverteilt.

Eine andere effektive Beschränkung von Waves sind die Erfassungsbereiche autonomer Fahrzeuge. Da diese ihr Umfeld kontinuierlich wahrnehmen und entsprechende Informationen teilen, besteht in ihrer Umgebung keine Unsicherheit über die An- oder Abwesenheit von Fahrzeugen. Waves, welche in einen Erfassungsbereich geraten, werden daher beschnitten, je nach Situation kann auch eine Löschung oder Aufteilung vorkommen (wenn z. B. nur der mittlere

Wave-Abschnitt betroffen ist). Erfasste Fahrzeuge werden vom Beobachter direkt an der festgestellten Position platziert. Sofern das entsprechende Fahrzeug wiedererkannt wurde und aktuell Waves davon existieren, werden diese zusätzlich aus dem System entfernt werden.

### **Verkehrszuordnung**

Neue, unverknüpfte Waves können durch drei unterschiedliche Wege entstehen: Durch Detektionen von Induktionsschleifen, durch Detektionen von Radarsensoren und durch Fahrzeuge, welche den Erfassungsbereich eines autonomen Fahrzeugs verlassen. Je nach Fall werden der entstandenen Wave bestimmte zusätzliche Informationen zugeordnet. So sind die Fahrzeugtypen von Radardetektionen bekannt und von autonomen Fahrzeugen erfasste Verkehrsteilnehmer können zusätzlich eindeutig wiedererkannt werden, sollten sie erneut in einen Erfassungsbereich geraten. Im Rahmen einer Verkehrszuordnung werden die statischen Sensoren zusätzlich eingesetzt, um die vorliegenden Waves mit den im selben Berechnungsschritt gemeldeten Detektionen zu verknüpfen. Trifft eine Wave auf einen Sensor, wird der Teil, welcher diesen passieren würde, abgeschnitten und die zugehörige Wahrscheinlichkeit wird zusammen mit der Wave beim Sensor registriert. Nachdem alle Waves bewegt wurden, ordnet ein Algorithmus die eingetroffenen Waves unter Berücksichtigung potenzieller Zusatzinformationen, wie dem Fahrzeugtypen, den Detektionen zu. Dabei werden diejenigen Waves mit den höchsten beim Sensor registrierten Wahrscheinlichkeiten bevorzugt. Dies wird so lange fortgesetzt, bis sämtliche Sensordetektionen zugeordnet, oder keine Waves mehr zum Zuordnen verfügbar sind. Im Falle einer erfolgreichen Zuordnung werden die zugeordnete (also am Sensor eintreffende) Wave und sämtliche mit ihr verknüpften Waves gelöscht, schließlich wurde das ursprüngliche Fahrzeug hier wiedererfasst – zumindest ist diese Zuordnung wahrscheinlicher als die anderen Optionen. Für nicht zugeordnete Waves wirkt der Detektor als eine Art Barriere, bis eine erfolgreiche Zuordnung (von der Wave selbst oder einer mit ihr verknüpften Wave) erfolgt ist oder die Wave vom Sensor vollständig aufgelöst wurde.

Ein Berechnungsschritt des Beobachters läuft insgesamt wie folgt ab:

1. Aktualisierung der LSA-Zustände. Betroffene Waves werden aufgeteilt und Verkehrsflüsse werden blockiert.
2. Aktualisierung der Position von Car2X-Fahrzeugen durch Telemetriedaten.
3. Auswertung der Erfassungsbereiche von autonomen Fahrzeugen. Unterscheidung zwischen neuerfassten, wiedererfassten und verlorenen Fahrzeugen. Zudem Auflösung der Waves im Umfeld.
4. Berechnung der Geschwindigkeiten auf den Straßenabschnitten anhand von Waves, Messdaten und makroskopischen Zusammenhängen.
5. Auswertung der Messdaten statischer Sensoren und Erzeugung neuer Waves.
6. Bewegung der Waves anhand der berechneten Geschwindigkeitsprofile.
7. Verkehrszuordnung an statischen Sensoren: Zuordnung eintreffender Waves zu angefallenen Detektionen.
8. Löschung von Waves, welche keinen relevanten Informationsmehrwert bringen.

Der entwickelte Beobachter stellt eine neue und innovative Möglichkeit dar, urbanen Verkehr unter den Bedingungen von Mixed Autonomy Traffic zu erfassen und zu verfolgen. Er ignoriert Unsicherheiten im System nicht, sondern integriert diese als Teil des Modells. Die unterschiedlichen Sensordaten werden effektiv fusioniert und Multimodalität wird berücksichtigt. Durch

eine effiziente Implementierung und die Parallelisierung von Programmabläufen konnte der Beobachter für Verkehrssysteme mit über erzeugten 10.000 Waves und ca. 800 exakt lokalisierten Fahrzeugen in unter 50 ms pro Berechnungsschritt ausgeführt werden. Durch die gewählte Systemstruktur wäre zudem eine Modularisierung und damit eine Anwendung auf noch größere Verkehrssysteme möglich. Da die Sensoren, wie oben beschrieben, als Barrieren auf die Waves wirken, eignen diese sich in besonderem Maße als Schnittstellen zwischen den Systemgrenzen. Dadurch müssten nur begrenzt Informationen mit den zuständigen Beobachtern der jeweiligen Nachbargebiete ausgetauscht werden und die komplexe Wave-Dynamik bleibt auf die jeweiligen Bereiche beschränkt. Auch Erweiterungen oder weitere Forschungen am Beobachter wären möglich. So könnten bspw. Störungsmodelle oder Latenzen in der Kommunikation mit Sensoren und Fahrzeugen untersucht werden, welche im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht wurden oder weitere Sensoren oder Datenquellen könnten eingebunden werden. Wie oben bereits beschrieben, stellte die Entwicklung des Beobachters im Rahmen dieses Projektes einen größeren Aufwand dar als im Vorfeld angenommen dar. Während zwar bereits früh erste Konzepte und Entwicklungen begannen, erforderte es zahlreiche Iterationen und Optimierungen – sowohl in den beschriebenen zugrundeliegenden Wirkprinzipien als auch in der konkreten Implementierung – bis das System auf das vollständige Streckenmodell angewendet werden konnte.

## 5. Verkehrsregelungen

Dieses Kapitel behandelt die Berechnung der Stellgrößen und die dafür entwickelten Systeme. Dabei wird zunächst mit der Schaltung der Lichtsignalanlagen begonnen. Im Anschluss daran folgen die Systeme zum Fahrzeugrouting und zur Geschwindigkeitsvorgabe.

### Schaltung der Lichtsignalanlagen

Eine gut funktionierende LSA-Schaltung ist für die Optimierung von urbanen Verkehrsflüssen von entscheidender Bedeutung. Durch die Häufigkeit dieser Anlagen (135 Stück im betrachteten Verkehrsraum) und deren Eigenschaft, Verkehrsströme zeitweise vollständig zu blockieren, ist eine effektive Regelung davon unerlässlich. In Rahmen des *Pilotprojekt Schlosskreuzung (PPS)* wurde von der Universität Paderborn ein LSA-Regelungssystem für einen Stadtteil von Paderborn entwickelt und untersucht. Dabei handelt es sich um einen modellprädiktiven Ansatz, der anhand einer modellbasierten Prädiktion des zukünftigen Verkehrszustands mittels eines Optimierungsverfahrens die am besten geeignete Zielphase und den zugehörigen Schaltzeitpunkt bestimmt. Anhand einiger LSA in Paderborn konnte simulativ gezeigt werden, dass dieser Algorithmus in der Lage ist, die durchschnittlichen Wartezeiten von Verkehrsteilnehmern im Vergleich zur bisher eingesetzten Bestandsschaltung signifikant zu reduzieren (bis zu 64% für geringe bzw. bis zu 8% bei hohen Verkehrsaufkommen). Im Rahmen von *TraCMAS* stehen dagegen keine Bestandsschaltungen zur Verfügung, anhand derer ein Regelungsalgorithmus getestet werden könnte. Die Weiterentwicklung und Adaption des bestehenden, validierten Ansatzes auf die hier vorliegenden Bedingungen liegen entsprechend nah. Dabei musste insbesondere eine Kompatibilität des Regelungsalgorithmus mit den makroskopischen Daten des Verkehrsbeobachters ermöglicht werden. Auch Unterschiede in der Funktionsweise des Steuergeräts mussten berücksichtigt werden. Der wesentliche Punkt ist jedoch eine erhebliche Steigerung der Recheneffizienz zu erreichen, da das ursprüngliche Verfahren im *PPS* für sechs LSA

auf einem modernen Computer nur knapp echtzeitfähig war, die Dimension von *TraCMAS* hingegen eine völlig andere ist. Während die Grundkonzepte erhalten blieben, wurde das komplette Regelungssystem neu aufgebaut und umgesetzt.

Bei der Betrachtung der Lichtsignalanlagen muss zwischen dem LSA-Steuergerät und dem Algorithmus zur Phasenauswahl unterschieden werden. Ersteres dient dazu, die ausgewählten Zielphasen, also die angestrebten Zustände der Signalgeber unter Berücksichtigung der Vorschriften der *RiLSA* (Richtlinie für Lichtsignalanlagen) umzuschalten. So müssen u. A. die Kompatibilität der geschalteten Signale überprüft, Mindest- und Räumzeiten eingehalten und die genauen Umschaltunkte der Einzelsignale festgelegt werden. Bei der Entwicklung des Steuergeräts wurde sowohl eine phasenorientierte als auch eine signalgruppenorientierte Steuerungsweise getestet. Erstere orientiert sich beim Phasenwechsel an zuvor festgelegten Phasenübergängen, z. B. über Zwischenphasen, die anhand des Phasenplans festgelegt werden können. Diese ermöglichen eine genauere Definition und größere Beeinflussung des Umschaltprozesses. Die signalgruppenorientierte Steuerung besitzt dagegen keine vordefinierten Übergänge, sondern kann direkt von jedem Ausgangszustand in jeden Zielzustand schalten, wobei lediglich die Vorgaben der *RiLSA* den Schaltprozess beschränken. Das Schaltverhalten ist dadurch flexibler und der Zielzustand wird in der Regel schneller erreicht. Aufgrund dieser Eigenschaften wurde schließlich die signalgruppenorientierte Methode ausgewählt. Sofern ein Übergang über eine Zwischenphase sinnvoll ist, kann die MPC dies aufgrund ihres vorausschauenden Charakters erkennen und diese zunächst direkt als Zielphase vorgeben. Das Setzen der Konfigurationsparameter sowie die Definition von Signalen und Phasen erfolgt, wie zuvor beschrieben, durch eine automatisierte Analyse der Kreuzungsgeometrie. Lediglich bei sehr komplexen bzw. ungewöhnlichen Kreuzungsgeometrien müssen diese Parameter manuell festgelegt werden.

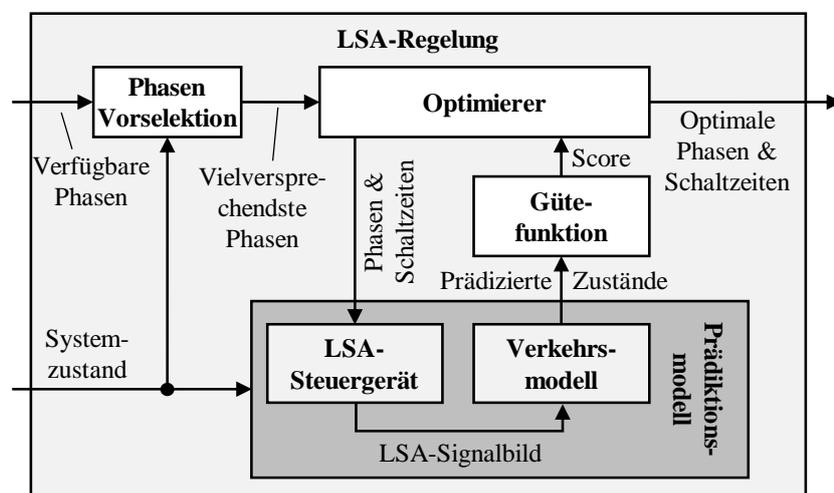


Bild 4: Aufbau der modellprädiktiven LSA-Regelung

Der Aufbau des Regelungsalgorithmus zur Phasenauswahl ist in Bild 4 dargestellt. Kernelement ist dabei das Prädiktionsmodell, welches anhand des aktuellen Systemzustands und der vorgebbaren Stellgrößen (Zielphasen sowie den zugehörigen Schaltzeiten) das daraus resultierende Verkehrsbild über die Dauer des Prädiktionshorizonts von 30 Sekunden prognostiziert. Für jede überprüfte Stellgrößenvorgabe führt das Prädiktionsmodell eine vollständige Simulation durch, wobei sich die Anzahl an Rechenschritten aus der Länge des Prädiktionshorizonts

ergeben. Die Simulation selbst basiert auf einem vereinfachten makroskopischen Verkehrsmodell, bei dem die Abbildung des Abflussverhaltens der Fahrzeuge auf den Fahrspuren unmittelbar vor den Haltelinien der LSA im Fokus steht. Die Fahrzeugströme werden dabei abhängig vom jeweiligen Schaltzustand der LSA durch verschiedene Einflüsse gehemmt, darunter zeitgleich freigegebenen Fahrzeugströme mit Vorfahrrecht (z. B. im Falle von Linksabbiegern, die zunächst auf entgegenkommende Fahrzeuge warten müssen) oder Rückstaueffekte durch gehemmte Ströme (also die Fahrzeuge hinter den wartenden Linksabbiegern). Sofern für eine Spur mehrere Abbiegerichtungen möglich sind, werden die Verkehrsströme anhand der zuvor bestimmten Abbiegewahrscheinlichkeiten auf die jeweiligen Richtungen aufgeteilt und die entsprechenden Verkehrshemmungen werden gemäß der makroskopischen Modellierungsweise anteilig berechnet und zusammengefasst. Um ein realistisches LSA-Verhalten zu erreichen, enthält das Prädiktionsmodell einen Zwilling des eingesetzten Steuergeräts der jeweiligen LSA, welches anhand der Stellgrößen das Lichtbild der Signalgeber und daraus den Freigabezustand der einzelnen Fahrspuren bestimmt.

Die Parameter des Verkehrsmodells und insbesondere des Abfluss- und Hemmungsverhaltens wurden dabei zunächst zu einem Teil aus geometrischen Informationen abgeleitet und zu einem anderen Teil global festgelegt. Mit dieser Vorgehensweise wurde ein gutes Prädiktionsverhalten für die meisten LSA im Netz erreicht, lediglich in einigen Sonderfällen mussten zusätzlich manuelle Anpassungen vorgenommen werden. Dennoch wurde festgestellt, dass die Vorhersagequalität durch eine individuelle Parameteroptimierung weiter gesteigert werden kann. Da die Anzahl der LSA eine manuelle Anpassung der Parameter nicht zulässt, läuft zu diesem Thema aktuell eine Masterarbeit, welche sich mit einer entsprechenden Parametergenerierung und -optimierung für generische Kreuzungsgeometrien für diesen Regelungsansatz beschäftigt.

Zur Auswertung der Simulationsdaten wird in jedem Simulationsschritt der Systemzustand erfasst und gespeichert. Dieser umfasst unter anderem die Anzahl der auf den einzelnen Spuren wartenden Fahrzeuge, ihren Fahrzeugtyp (sofern bekannt, unbekannt werden als PKW angenommen), die bisher angefallenen Wartezeiten sowie Anzahl und Typ der im jeweiligen Zeitschritt „abgeflossenen“ Fahrzeuge. Eine Gütefunktion wird nach Simulationsabschluss eingesetzt, um aus diesen Daten einen Score zur Bewertung der Auswirkungen der Stellgrößen zu berechnen. Die einzelnen Bestandteile der Gütefunktion können je nach Zielsetzung der Verkehrsplaner gewählt werden, wobei folgende Verkehrsgrößen zur Verfügung stehen:

1. Belegungszustand der Fahrspuren
2. Realisierter Fahrzeugflüsse über die Kreuzung
3. Durchschnittliche Wartezeiten aller Fahrzeuge
4. Maximale Wartezeit einer Lane

Außerdem können diese Werte für die verschiedenen Fahrzeugtypen gewichtet werden, wobei üblicherweise die durchschnittliche Anzahl der Insassen als Maßstab der Gewichtung genommen wurde. Da Prädiktionsfehler mit steigender Anzahl an Simulationsschritten größer werden und frühere Simulationsergebnisse daher verlässlicher sind als spätere, wird gleichzeitig eine zeitliche Gewichtung bei der Berechnung des Scores vorgenommen, deren Stärke ebenfalls eingestellt werden kann. Die Auswirkungen vorgegebener LSA-Phasen und Schaltzeiten werden somit in einem Score als Bewertung zusammengefasst.

Eine Phasenvorauswahl sortiert aus allen verfügbaren Phasen zunächst diejenigen aus, welche für die aktuelle Verkehrssituation ungeeignet sind, z. B. wenn keine oder nur sehr weniger Fahrzeuge auf den entsprechenden Spuren vorhanden sind. Andererseits kann auch die Freigabe bestimmter Fahrspuren forciert werden, indem nur Phasen, welche eine entsprechende Freigabe enthalten, selektiert werden. So können bspw. Maximalsperrzeiten eingehalten werden, auch wäre so eine ÖPNV-Priorisierung denkbar, wenngleich sich hierfür eher die Anpassung der Fahrzeugtypengewichtung eignet. Der Optimierer nutzt nun die Prädiktionssimulation, um nacheinander für jede der vorausgewählten Phasen anhand der Scores die optimale Schaltzeit zu bestimmen. Die am besten bewertete Phasen-Schaltzeit-Kombination wird schließlich ausgewählt. Umgeschaltet wird allerdings nur, wenn die ermittelte Schaltzeit eine sofortige Umschaltung vorsieht. Andernfalls wird in der aktuellen Phase verblieben und das Ergebnis der nächsten Optimierung abgewartet. Jedoch wird das Optimierungsergebnis auch bei zukünftigen Schaltzeitpunkten als prognostizierte LSA-Schaltung abgespeichert, und steht anderen Regelungssystemen zur Verfügung.

Während modellprädiktive Regelungssysteme sehr effektiv sein können, sind diese ebenfalls sehr rechenintensiv. Bei einem Prädiktionshorizont von 30 Sekunden, ca. 25 Prädiktionssimulationen pro Optimierung, durchschnittlich sieben vorausgewählten Phasenfolgen und 135 LSA müssen für das gesamte Verkehrsnetz über 700.000 Berechnungsschritte der Prädiktionssimulation pro Simulationsschritt der Simulationsumgebung (also sekundlich) erfolgen. Aus diesem Grund wurde das Teilsystem der LSA-Regelung in C++ implementiert und mithilfe des Tools *SWIG* als Library in die *Java*-Umgebung eingebunden. Gleichzeitig wurde die Ausführung des Reglers für jede einzelne LSA parallelisiert, wodurch die Rechenlast auf mehrere Prozessorkerne aufgeteilt werden konnte. Als Optimierer wurden zwei Optionen integriert: Zunächst wurde die Bibliothek *NLopt* eingebunden, die eine Reihe von geeigneten Verfahren für das hier vorliegende nichtlineare, ableitungsfreie Optimierungsproblem bereitstellt. Zusätzlich wurde ein Brute-Force Algorithmus integriert und getestet, welcher alle möglichen Schaltzeiten für eine zu untersuchende Zielphase testet, und somit garantiert die beste Stellgröße findet. Da Umschaltungen nur zu vollen Sekunden stattfinden können, ist die Anzahl der möglichen Schaltpunkte stark begrenzt und somit von einem derartigen Verfahren berechenbar. Durch diese Maßnahmen konnte mit der Nutzung des Brute-Force Verfahrens eine Ausführungszeit der LSA-Regelung für sämtliche LSA im System von ca. 100 ms erreicht werden, was für die Simulationsdauer akzeptabel ist.

Durch die makroskopische Modellierungsart des Verkehrsmodells innerhalb der Prädiktionssimulation, können die wahrscheinlichkeitsbasierten Daten aus dem Beobachter, wie zuvor beschrieben, in Verkehrsdichten umgerechnet werden. Dieser makroskopische Verkehrszustand wird für jede Fahrspur im Nahbereich von LSA zur Verfügung gestellt werden. Während die Datenlage unmittelbar im Umfeld der LSA durch die dort platzierten Induktionsschleifen (eine an der Haltelinie und eine im Abstand von etwa 50 Metern) relativ gut ist, hängt die Datenlage für weiter entfernte Bereiche und damit die Qualität der prädiktiven Schaltungen von der Sensordichte in diesen Bereichen bzw. dem Anteil von Car2X-Fahrzeugen bzw. autonomen Fahrzeugen ab. Genauere Untersuchungen dazu erfolgen, sobald die Parameteroptimierung des Prädiktionsmodell vollständig abgeschlossen ist.

### Routing

Eine weitere Möglichkeit für das Verkehrsleitsystem, Einfluss auf den beobachteten Systemzustand auszuüben, ist die Routenzuweisung von Fahrzeugen. Dabei hängt die Größe dieses Einflusses direkt vom Anteil an autonomen bzw. Car2X-fähigen Fahrzeugen am Gesamtverkehr ab, da dies die einzigen Verkehrsteilnehmer sind, an welche Routenvorschläge übermittelt werden können. Gleichzeitig kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass sämtliche Fahrzeuge (insbesondere die nichtautonomen) diese Routenvorschläge auch umsetzen, weshalb für jedes Fahrzeug zusätzlich eine „controllable“ Eigenschaft angelegt wurde, welche die Verfügbarkeit des Fahrzeugs für Routing und Geschwindigkeitsvorgaben steuert. Auf diese Weise ist es möglich, dass ein Fahrzeug zwar Daten für die Verkehrserfassung bereitstellt, sich aber nicht aktiv an der Verkehrsbeeinflussung beteiligt.

Ein Routingsystem wurde im Rahmen dieses Projektes bereits bei der Berechnung des Verkehrsaufkommens eingesetzt, wie zuvor beschrieben. Während dies die Wiederverwendung von Teilkomponenten ermöglicht, bspw. des Wegfindungsalgorithmus, unterscheiden sich hier sowohl die verfügbaren Informationen also auch die Ziele des Routings. Aufgabe der Routenbildung zur Berechnung des Verkehrsaufkommens war, eine reale Verkehrssituation nachzubilden, wodurch zwar eine realistische aber nicht eine optimierte Streckenführung durch das Straßennetz erreicht wurde. Dagegen ist das Ziel des Online-Routingsystems, die Routen so zu wählen, dass sich, wenn möglich, sowohl für die gerouteten Fahrzeuge Vorteile in Form von schnelleren Routen ergeben und gleichzeitig die kollektive Verkehrssituation verbessert. Wenn Fahrzeuge beispielsweise um überfüllte Streckenabschnitte mit gestautem oder zähfließendem Verkehr herumgeführt werden, ist das sowohl in ihrem eigenen Interesse und trägt gleichzeitig zur Entspannung der lokalen Verkehrssituation bei, wovon auch die betroffenen Fahrzeuge profitieren. Das Routing erfolgt außerdem in Echtzeit und als Datengrundlage steht die beobachtete Verkehrssituation zu Verfügung.

Zur Umsetzung des Routings wurde erneut eine Kostenfunktion für jeden Straßenabschnitt formuliert, welche aus den folgenden drei Komponenten besteht:

1. Reisezeit
2. Straßenprioritätswertung
3. Soziale Kosten (verursachte Reisezeitänderungen der anderen Fahrzeuge)

Die Reisezeit ist hierbei das Interesse des gerouteten Verkehrsteilnehmers, sein Ziel möglichst schnell zu erreichen. Die Straßenprioritätsbewertung kann bspw. als das Interesse der Anwohner, aufgefasst werden, die Hauptverkehrsadern den Nebenstraßen vorzuziehen und die sozialen Kosten repräsentieren die Interessen der übrigen Verkehrsteilnehmer, deren Reisezeiten durch die Routenwahl ebenfalls beeinflusst werden können. Mittels der Gewichtung der einzelnen Komponenten kann darüber hinaus die Zielsetzung für die Routenwahl angepasst werden.

Dabei ist insbesondere die Zeitvariabilität von Reisezeit und sozialen Kosten zu berücksichtigen. Während für das erste Streckenteilstück einer untersuchten Route die Reisezeit zum gegenwärtigen Zeitpunkt einfließt, müssen für die folgenden Teilstücke Prognosen über die Reisezeit für den jeweils antizipierten Ankunftszeitpunkt getroffen werden. Zur Lösung dieses Problems werden makroskopische Ansätze zur Verkehrsdatenberechnung eingesetzt und auf aktuelle Messdaten sowie historische Daten (siehe oben) angewandt. Im Kern davon steht eine Abschätzung, welche Verkehrsflüsse zu welchen Zeitabschnitten im Netz zu erwarten sind, also

wie viele Fahrzeuge in jeweils fünfminütigen Intervallen jeden Streckenabschnitt im Netz innerhalb des relevanten Routingzeitraums (ca. 30 min) passieren. Eine initiale Abschätzung wird dabei aus den vorliegenden historischen Daten gewonnen, welche den allgemeinen Trend vorgeben, dabei jedoch aktuelle, dynamische Effekte sowie bereits geänderte Fahrzeugrouten nicht beinhalten. Aus diesem Grund wird jede umgesetzte Routenänderung für die betroffenen Streckenabschnitten registriert, wobei für die ursprünglichen Routenteile eine Verringerung und für die neuen Routenteile eine Erhöhung der erwarteten Fahrzeugflüsse zu den antizipierten Zeitintervallen vermerkt wird. Zur Berücksichtigung der weiteren dynamischen Effekte wird darüber hinaus die Annahme zugrunde gelegt, dass sich aktuell gemessene Abweichungen der Fahrzeugflüsse gegenüber dem erwarteten Trend zumindest für eine gewisse Zeit in der Zukunft fortsetzen. Wenn auf einem Streckenabschnitt bspw. zum aktuellen Zeitpunkt 10 Prozent weniger Fahrzeuge gemessen werden als erwartet, wird ein entsprechende Korrekturfaktor bestimmt und auch auf die antizipierten Verkehrsflüsse angewandt. Auf diese Weise wird die aktuell beobachtete Verkehrssituation in die Berechnung der Routen mit einbezogen, schließlich ist der Verkehrsbeobachter nicht in der Lage ist, langfristige Prognosen aufzustellen. Abhängig von der Sensorabdeckung, der Verkehrsdichte und dem Grad der Durchdringung durch intelligente Fahrzeuge, spielen hier insbesondere die aggregierten Open Data Informationen eine wichtige Rolle. Diese stellen auch Informationen an sporadisch oder nicht erfassten Netzabschnitten zur Verfügung, wenngleich diese weniger genau und aktuell sind.

Durch Abschätzung der zu erwartenden Verkehrsflüsse innerhalb des relevanten Routing-Zeitraums werden schließlich anhand makroskopischer Fundamentaldiagramme die daraus resultierenden Reisezeiten bestimmt, ähnlich wie zuvor im Rahmen des Beobachters beschrieben. Diese Berechnung wird zweimal durchgeführt: Zunächst ohne die Berücksichtigung des zu routenden Fahrzeugs und schließlich unter Einbeziehung davon. Die so erhaltene Differenz beschreibt die Reisezeitänderung auf dem jeweiligen Streckenabschnitt als mögliche Konsequenz dieser Routenwahl. Zusammen mit dem Verkehrsfluss auf dem Streckenabschnitt können so die sozialen Kosten für die anderen Verkehrsteilnehmer in Form der kumulierten Reisezeitänderungen sämtlicher Fahrzeuge auf dem jeweiligen Abschnitt bestimmt werden. Zusammen mit dem unveränderlichen Wert der Straßenprioritätswertung wurde auf diese Weise eine Kostenfunktion für jeden Straßenabschnitt im Netz aufgestellt, welche einem Wegfindungsalgorithmus als Entscheidungsgrundlage dient. Für die Wegfindung selbst wurde erneute Dijkstra's Algorithmus eingesetzt, wobei dieser im Vergleich zum Routingfall für die Verkehrsdatenermittlung um die Unterstützung der zeitvariablen Kostenelemente ergänzt wurde. Auch wurde die Möglichkeit geschaffen, eine entfernungsbasierte Heuristik zur Kostenprädiktion zu aktivieren, wodurch das Verfahren zum A\*-Algorithmus würde, was eine Laufzeitverkürzung, jedoch auch eine Verschlechterung der Routingqualität zur Folge hätte. Gewählt wird schließlich diejenige Route, welche die geringsten Kosten verursacht, wobei mit der Verwendung von Dijkstra's Algorithmus gewährleistet ist, dass die optimale Route gefunden wird.

Im Gegensatz zu den anderen Teilsystemen des Regelkreises wird das Routing nicht in jedem Berechnungsschritt (also sekundlich) für sämtliche Fahrzeuge durchgeführt. Dies wäre weder hinsichtlich der vergleichsweise langsamen Dynamik des vorliegenden Problems sinnvoll, noch aus praktischer Sicht durchführbar, um schnell alternierende Routen und hohe Berechnungszeiten zu verhindern. Stattdessen wird das Routingproblem aufgeteilt, indem sämtliche kontrollierbare Fahrzeuge über ein sich wiederholendes Routing-Intervall von 60 Sekunden aufgeteilt

werden. Jedem kontrollierbaren Fahrzeug wird beim Einfügen ins Netz eine initiale Route zugewiesen, außerdem erhält es einen festen Platz im Routing-Intervall. Somit wird in jedem Berechnungsschritt lediglich eine Teilmenge der Fahrzeuge betrachtet, wobei die Route jedes Fahrzeugs weiterhin minütlich auf Optimierungspotenzial überprüft wird.

### **Geschwindigkeitsvorgaben**

Die dritte und letzte Möglichkeit, das Verkehrsgeschehen zu beeinflussen, ist durch die Vorgabe von dynamischen Sollgeschwindigkeiten. Dabei ist die Idee, wie bereits beim Routing, kooperative Fahrzeuge einzusetzen und durch gezielte Vorgabe der Geschwindigkeiten einen stetigeren Verkehrsfluss zu schaffen. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass es im zeitlichen Rahmen dieses Projektes noch nicht gelungen ist, ein solches System vollständig umzusetzen und zu implementieren. Dennoch wurden Teile des Systems ausgearbeitet und sollen daher dennoch in diesem Bericht vorgestellt werden. Eine Fertigstellung des Systems und die Veröffentlichung der damit erreichten Ergebnisse ist auch nach Ende des Projektes vorgesehen.

Insbesondere im urbanen Raum wird das Verkehrssystem sehr durch Lichtsignalanlagen geprägt. Daher ist für die Geschwindigkeitsvorgabe eine Kombination aus zwei Teilsystemen vorgesehen, welche hierarchisch die Zielwerte an bestimmten Positionen im Netz bestimmen:

1. Geschwindigkeitsvorgabe mit dem Ziel einer Stauwellenvermeidung
2. Geschwindigkeitsvorgabe zur Ankunftszeitvariation im LSA-Nahbereich

Ziel der Geschwindigkeitsregelung ist die Vermeidung von Stauwellen bzw. wandernden Bereichen mit hohen lokalen Verkehrsdichten, welche zu lokalen Geschwindigkeitsreduktionen führen. Als Lösungsansatz hierfür wurde der Konsensalgorithmus ausgewählt. Dieser Algorithmus strebt eine Angleichung der Verkehrsdichten im Bereich zwischen benachbarten Kreuzungen an. Gemäß makroskopischer Verkehrszusammenhänge hängen die Verkehrsdichten und die Flussgeschwindigkeiten direkt voneinander ab, wodurch durch die gezielte Variation der Flussgeschwindigkeiten auf entsprechenden Straßen, Dichteänderungen erreicht werden können. Die Wirksamkeit einer solchen Regelung wurde von der Universität Paderborn im Rahmen der Promotion von Sven Mertin für einen vollständig autonomen Verkehr und ohne die Berücksichtigung von LSA gezeigt und untersucht (anstatt LSA werden wurde ein Kreuzungsmanagementsystem eingesetzt, welches einen vollautonomen Verkehr voraussetzt). Gegenüber dem betrachteten vollautonomen Szenario sind die in *TraCMAS* verfügbaren Eingriffsmöglichkeiten eingeschränkt. Zum einen hängt die Effektivität bei der Umsetzung der Stellgröße direkt vom Anteil kooperierender Fahrzeuge ab. Außerdem ist in der Regel nur eine Verlangsamung des Verkehrsflusses möglich, da eine Beschleunigung die Kooperation sämtlicher Verkehrsteilnehmer erfordern würde. Zum anderen stellen Lichtsignalanlagen in dem betrachteten Verkehrsnetz ein zentrales Verkehrselemente dar, welche durch die periodische Sperrung und Freigabe der verschiedenen Richtungen aktiv der angestrebten Angleichung der Verkehrsdichten entgegenwirkt.

Um dennoch den Konsensalgorithmus in einer solchen Verkehrssituation einsetzen zu können und gleichzeitig Wartezeiten sowie Stop-And-Go Verkehr im Umfeld von LSA zu reduzieren, ist vorgesehen, im LSA-Nahbereich die Geschwindigkeiten von eintreffenden Fahrzeugen nach einem anderen System vorzugeben. Ziel ist es hier, die Ankunftszeiten so zu steuern, dass ein vollständiger Halt der Fahrzeuge an den LSA, wenn möglich, vermieden wird. Für eine solche Synchronisierung der Verkehrsflüsse mit den LSA-Schaltungen sollen die bereits umgesetzten

prädiktiven Eigenschaften der genutzten Regelung ausgenutzt werden: Diese bestimmt, wie zuvor beschrieben, neben der zu schaltenden Phase auch den Umschaltzeitpunkt. Sofern der Umschaltzeitpunkt in der Zukunft liegt, kann das Ergebnis als Prognose darüber aufgefasst werden, wann und zu welcher Phase voraussichtlich geschaltet wird. Zwar garantiert dies nicht ein Umschalten zum prädizierten Zeitpunkt, sofern sich jedoch die Verkehrslage in der Zwischenzeit nicht wesentlich verändert, stellt dieser Zeitpunkt eine gute Abschätzung dar. Auf Basis dieser Informationslage kann der Bereich vor einer blockierten LSA in drei Teile gegliedert werden, wie in Bild 5 zu sehen ist.

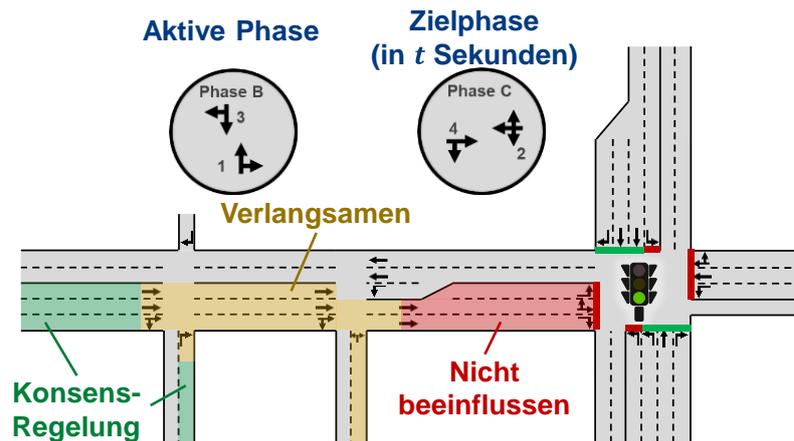


Bild 5: Konzept der Geschwindigkeitsvorgabe im Umfeld von LSA

Im Bereich unmittelbar vor der LSA ergibt es keinen Sinn, den Verkehr zu beeinflussen, da hier die Fahrzeuge bereits zum Stehen gekommen sind oder dies unmittelbar bevorsteht. In einem Übergangsbereich, dessen Größe und Entfernung sich durch den ermittelten Schaltzeitpunkt ergibt, können Fahrzeuge durch Geschwindigkeitsvorgaben so verzögert werden, dass der voraussichtliche Ankunftszeitpunkt erst nach der antizipierten Freigabe der LSA erfolgt. Die erforderliche Geschwindigkeitsreduktion sinkt mit zunehmendem Abstand zur Warteschlange. Bereiche, welche weit genug von der LSA entfernt sind, sowie aktuell freigegebene Spuren unterliegen dagegen dem Konsensalgorithmus. Aktuell wird die Integration dieser Ankunftszeitensteuerung in das Regelungssystem betrieben, ist allerdings noch nicht vollständig abgeschlossen. Von besonderem Interesse ist hier die Fragestellung, ob die Verwendung eines solchen Systems ausreicht, um die störenden Einflüsse der LSA auf die Dichteangleichung auszugleichen. Es ist davon auszugehen, dass der Effekt der Geschwindigkeitsbeeinflussung als Ganzes mit steigendem Verkehrsaufkommen reduziert wird, da höhere Verkehrsdichten zu geringeren Flussgeschwindigkeiten führen und somit den zur Verfügung stehenden Stellgrößenbereich weiter reduzieren.

## **6. Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine umfassende Simulationsumgebung zur Untersuchung von Mixed Autonomy Traffic auf Basis der Paderborner Verkehrsregion entwickelt. Dabei wurde sowohl ein Modell des Verkehrsnetzes erstellt als auch ein realistisches Verkehrsaufkommen nachgebildet. Anhand der Rahmenbedingungen des Vorhabens wurden unterschiedliche Sensortypen modelliert und Eingriffsmöglichkeiten für die Regelungssysteme geschaffen. Ein neuartiger Verkehrsbeobachter fusioniert die zur Verfügung stehenden Sensordaten mittels eines wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahrens und ermöglicht so die Rekonstruktion des vorliegenden Verkehrszustands in Echtzeit. Eine modellprädiktive Regelung wurde zur Schaltung der Lichtsignalanlagen im System integriert und für den effektiven Einsatz in einem Verkehrsnetz dieser Größe weiterentwickelt. Zur Optimierung der Verkehrsführung wurde ein Routingssystem entwickelt und implementiert, welches kooperierenden Fahrzeugen Routenvorschläge anbietet, wobei sowohl die Interessen der gerouteten Fahrzeuge selbst, also auch die der anderen Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden. Ein drittes Regelungssystem zur dynamischen Geschwindigkeitsvorgabe konnte innerhalb des Projektzeitrahmens nicht mehr in das Gesamtsystem integriert werden. Es wurde jedoch ein zweistufiges Regelungskonzept entwickelt, welches einerseits Synergieeffekte mit den LSA-Regelungen zur Beeinflussung der Ankunftszeiten an LSA ausnutzt und andererseits die Anwendung des Konsensalgorithmus zur Stauwellenvermeidung vorsieht.

Die erreichten Projektergebnisse stellen somit eine solide Grundlage für die weitere Erforschung von Mixed Autonomy Traffic dar und ermöglichen in Zukunft umfangreiche simulationsbasierte Untersuchungen. Während die Integration nahezu aller Systemkomponenten abgeschlossen ist, werden die einzelnen Systemteile aktuell sukzessive einer Parameteroptimierung unterzogen, wodurch die Simulations- bzw. Regelgüte weiter erhöht wird. Solche Vorgänge nehmen viel Zeit in Anspruch, – aktuell erfolgt bspw. die Optimierung der LSA-Parameter im Rahmen einer Masterarbeit – sind aber eine Voraussetzung für aussagekräftige Untersuchungen. Eine belastbare Antwort insbesondere auf die Frage nach dem Einfluss der Durchdringungsgrade von autonomen Fahrzeugen kann daher zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht gegeben werden, wird aber im Rahmen der Promotion von Christopher Link weiterverfolgt. Die bisher erarbeiteten Ergebnisse sowie weitere Untersuchungen, welche aus den Projektergebnissen hervorgehen, werden darüber hinaus veröffentlicht. Hierzu werden momentan Gespräche mit verschiedenen Open Access Journals geführt. Im Rückblick stellte sich besonders die Entwicklung des Verkehrsbeobachters als wesentlich aufwändiger und zeitintensiver als zunächst prognostiziert dar. Existierende Beobachteransätze waren für die gegebenen Rahmenbindungen nicht geeignet, was eine Neuentwicklung von Grund auf erforderte.

Über den Umfang des Projektes hinaus kann das entwickelte System auch für weitere Forschungen eingesetzt werden. So wird aktuell die Simulationsumgebung im Rahmen einer weiteren Masterarbeit zur Entwicklung und Erprobung von zukünftigen, intelligenten ÖPNV-Konzepten genutzt. Auch die Verknüpfung des Systems mit den Fahrsimulatoren des Heinz Nixdorf Instituts wäre möglich. Momentan befindet sich eine 3D-Umgebung des Paderborner Verkehrssystems in der Entwicklung, welche für Simulatorfahrten eingesetzt werden soll. Eine Verknüpfung dieser Komponenten könnte die direkten Auswirkungen von intelligenten Verkehrssystemen auf einzelne Fahrer untersuchen und damit sowohl Fragen der individuellen Auswirkungen als auch der subjektiven Akzeptanz untersuchen. Auch die Integration von weiteren Teilmodellen in das Framework der Simulationsumgebung wäre eine Option. Ein naheliegender nächster

Schritt wäre die Integration von Fußgängern, welche im Rahmen dieses Projektes nicht betrachtet wurden. Die Modellierung von Signalstörungen oder eine sichtfeldbasierte Sensormodellierung ist ebenso möglich wie die Entwicklung und Erprobung weiterer Systeme zur intelligenten Verkehrsregelung oder -erfassung.

Abschließend sind wir der Karl-Vossloh-Stiftung sehr dankbar, dass sie uns die Forschung an diesem wichtigen und zukunftsweisenden Thema ermöglicht hat. Die Projektergebnisse bilden eine solide Grundlage für weitere Untersuchungen im Bereich der zukünftigen Mobilität und werden einen wichtigen Beitrag auch zu weiteren Forschungsvorhaben leisten.

### 7. Veröffentlichungen und studentische Arbeiten

Im Rahmen der Forschungen des Lehrstuhls für Regelungstechnik und Mechatronik der Universität Paderborn im Bereich der Verkehrssteuerung war Christopher Link seit Projektbeginn an den folgenden Veröffentlichungen bzw. Patenten beteiligt:

- LINK, C.; MALENA K.; GAUSEMEIER, S.; TRÄCHTLER A.: Simulation Environment for Traffic Control Systems Targeting Mixed Autonomy Traffic Scenarios. VEHITS 2023: Proceedings of the 9th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, 2023
- MALENA, K.; LINK, C.; GAUSEMEIER, S.; TRÄCHTLER, A.: Implementation and Results of a Multi-Stage Model Predictive Traffic Signal Control System. IEEE ITSC 2024, 2024 (akzeptiert, Veröffentlichung steht aus)
- MALENA, K.; LINK, C.; BUBEMAS, L.; GAUSEMEIER, S.; TRÄCHTLER, A.: Traffic Estimation and MPC-Based Traffic Light System Control in Realistic Real-Time Traffic Environments. Smart Cities, Green Technologies, and Intelligent Transport Systems: 10th International Conference, SMARTGREENS 2021, and 7th International Conference, VEHITS 2021, 2022
- Patent: UNIVERSITÄT PADERBORN, Vorrichtung und Verfahren zur echtzeitbasierten dynamischen Verkehrszuordnung für zumindest zwei nachfolgende Fahrbahnen. Erfinder: Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A., Anmeldung: 26. 7. 2021. Deutschland, Patentschrift 10 2021 204 191
- Patent (in Prüfung): UNIVERSITÄT PADERBORN, Verkehrsleitsystem für die Steuerung von Lichtsignalanlagen (in Prüfung). Erfinder: Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A., Anmeldung: 26. 7. 2021. Deutschland, Patentschrift epoline Einreichungsnummer: 800863291

Das letztgenannte Patent befindet sich aktuell in Prüfung und die Erteilung steht noch aus. Geplant sind darüber hinaus noch mindestens zwei Veröffentlichungen mit direktem Bezug zu *TraCMAS*, wobei sowohl der entwickelte Verkehrsbeobachter also auch das fertiggestellte Gesamtsystem behandeln werden sollen. Im Rahmen des Projekts wurden darüber hinaus folgende nicht veröffentlichten studentische Arbeiten verfasst:

- MÜNSTER, N.: Entwicklung und Integration eines innovativen ÖPNV-Systems in eine Verkehrssimulationsumgebung. Masterarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2024 (in Bearbeitung)

- WILLER, J.: Entwicklung eines Systems zur automatisierten Parametergenerierung einer MPC-basierten Regelung für generische Lichtsignalanlagen. Masterarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2024 (in Bearbeitung)
- STANK, N.: Entwicklung eines dynamischen Routing-Systems für urbane Verkehrsszenarien. Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2023
- BORMANN, E.: Sammlung und Weiterentwicklung von recheneffizienten Beobachteransätzen für Verkehrssimulationen. Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2022
- LANDGRAF, G.: Modellierung der Verkehrsinfrastruktur und Aufbau einer Simulationsumgebung von Paderborn. Studienarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2021
- MEZLI, G.: Ermittlung, Bewertung und Generierung von Verkehrsdaten aus Open-Data-Quellen für Verkehrssimulationen. Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, 2021