Band
422

Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts
Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler (Hrsg.)
Regelungstechnik und Mechatronik

Kevin Malena

Konzipierung, Analyse und Realumsetzung eines mehrstufigen modellprädiktiven Lichtsignalanlagenregelungssystems

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

Kevin Malena

Konzipierung, Analyse und Realumsetzung eines mehrstufigen modellprädiktiven Lichtsignalanlagenregelungssystems

Design, Analysis and Realization of a Multi-Stage Model Predictive Traffic Light Control System

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über `http://dnb.de` abrufbar.

Band 422 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – Mai 2024

ISSN (Print): 2195-5239
ISSN (Online): 2365-4422
ISBN: 978-3-947647-41-5

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Kevin Malena

Konzipierung, Analyse und Realumsetzung eines mehrstufigen modellprädiktiven Lichtsignalanlagenregelungssystems

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Kevin Malena, M. Sc.
aus Höxter

Tag des Kolloquiums: 22.04.2024
Referent: Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik des Heinz Nixdorf Instituts an der Universität Paderborn.
Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler für die Möglichkeit bedanken, an seinem Lehrstuhl mit diesem interessanten Thema zu promovieren. Ohne im Studium eine studentische Arbeit mit seiner Betreuung geschrieben zu haben, wurde ich als Technomathematiker direkt für die gesamte Projektlaufzeit des Pilotprojekts Schlosskreuzung eingestellt. Das gleiche Vertrauen habe ich stets bei der Durchführung meiner Tätigkeiten am Lehrstuhl gespürt, wobei ich neben respektvollen fachlichen Diskussionen vor allem die öffentliche Bestärkung bei der negativen Kritik der Presse erwähnen möchte. Ich bin gerne Teil des RtM und freue mich auch zukünftig auf den weiteren Austausch sowie gemeinsame Herausforderungen und Ziele.
Mein Dank gilt zudem Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling, der ohne zu Zögern das Korreferat für diese Arbeit übernommen hat. Ebenso schön war die Einladung zum verkehrstechnischen Seminar, welches mit sehr viel Herzblut organisiert wird und zu vielen spannenden Diskussionen führte und führt.
Prof. Dr. Thomas Tröster und Jun.-Prof. Dr. Sebastian Peitz danke ich für ihr sympathisches und sehr angenehmes Mitwirken in der Promotionskommission.
Dass ich gerne Teil des RtM bin, verdanke ich neben den Aufgaben vor allem meinen Kolleginnen und Kollegen und besonders meinem Team unter der Leitung von Dr.-Ing Sandra Gausemeier. An dieser Stelle muss ich Christopher Link fachlich besonders herausheben, da wir auch in der Corona-Zeit gemeinsam große Fortschritte gemacht haben, die für den erfolgreichen Abschluss meines Promotionsvorhabens maßgeblich waren.
Grüße gehen raus an meine Freunde und Weggefährten, die zum Glück darauf achten, dass ich meine notwendige Dosis an Zerstreuung und Sport erhalte, ohne die ich nicht sein kann.
Den letzten Absatz widme ich den wichtigsten Menschen in meinem Leben, meiner Familie. Es ist eine Sache, zu sagen, dass man alles für jemanden macht, und eine ganz andere, es tatsächlich zu tun. Danke!

Paderborn, 28.05.2024 Kevin Malena

Vorveröffentlichungen

[LMGT23] Link, C.; Malena, K.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Simulation Environment for Traffic Control Systems Targeting Mixed Autonomy Traffic Scenarios. *9th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*. Hrsg. von Vinel, A. Setúbal, 2023, S. 367–377

[MLB+22] Malena, K.; Link, C.; Bussemas, 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*. Hrsg. von Klein, C.; Jarke, M.; Helfert, M.; Berns, K.; Gusikhin, O. Bd. 1612. Springer eBook Collection. Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2022, S. 232–254

[MLGT21] Universität Paderborn, Verkehrsleitsystem für die Steuerung von Lichtsignalanlagen (in Prüfung). Erfinder: Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A., Anmeldung: 26. 7. 2021. Deutschland, *epoline Einreichungsnummer 800863291*

[MLGT23] Universität Paderborn, 2023. Vorrichtung und Verfahren zur echtzeitbasierten dynamischen Verkehrszuordnung für zumindest zwei nachfolgende Fahrbahnen. Erfinder: Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A., Anmeldung: 27. 4. 2021. Deutschland, *Patentschrift 10 2021 204 191*. 29. 6. 2023

[MLM+21a] Malena, K.; Link, C.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Online State Estimation for Microscopic Traffic Simulations using Multiple Data Sources. *7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*. Hrsg. von Berns, K. Setúbal, 2021, S. 386–395

[MLM+21b] Malena, K.; Link, C.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Validation of an Online State Estimation Concept for Microscopic Traffic Simulations. *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. Hrsg. von IEEE. Piscataway, NJ, 2021, S. 212–217

[MML+20] Mertin, S.; Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Macroscopic Traffic Flow Control using Consensus Algorithms. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Hrsg. von IEEE. Bd. 23. Piscataway, NJ, 2020

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschreibt das Konzept und den Entwicklungsprozess eines Lichtsignalanlagenregelungssystems bis zur Realumsetzung. Das Regelungssystem, welches im Rahmen des Pilotprojekts Schlosskreuzung entstanden ist, besteht dabei aus zwei untereinander abgestimmten Methoden zur Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion und zur modellprädiktiven Regelung des Verkehrssystems anhand der vorhandenen Lichtsignalanlagen. Die Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion approximiert dabei simulationsbasiert den aktuellen Verkehrszustand anhand gegebener Messdaten über dynamische Verkehrszuweisungen. Die entwickelte mehrstufige Lichtsignalanlagenregelung nutzt ein Fuzzy-System zur Phasenvorauswahl, um anschließend über eine modellprädiktive Regelung das nichtlineare Problem mit dem Ergebnis der optimalen Kombinationen von Phasen und Schaltzeitpunkten zu lösen. Das Regelungssystem wird in dieser Arbeit anhand eines ausgewählten Verkehrsgebiets zunächst rein simulativ getestet und mit dem vorliegenden Bestandsverfahren verglichen. Im Anschluss an die prototypische Inbetriebnahme wird dieser Vergleich durch die Feldtests abgeschlossen. Entsprechende Ergebnisse zeigen das große Potential der Entwicklung hinsichtlich der Reduktion von Kriterien wie Emissionen oder Wartezeiten und gleichzeitig den Handlungsbedarf für eine standardmäßige Nutzung.

Abstract

This dissertation describes the concept and the development process of a traffic signal control system up to the real implementation. The control system, which was developed in the context of the Pilotprojekt Schlosskreuzung, consists of two mutually coordinated methods for real-time traffic reconstruction and for model-predictive control of the traffic system based on the existing traffic light systems. The real-time traffic reconstruction approximates the current traffic state simulation-based using given measurement data via dynamic traffic assignments. The designed multi-stage traffic signal control system uses a fuzzy-system for phase preselection and subsequently employs model predictive control to solve the nonlinear problem resulting in the optimal combinations of phases and switching times. In this work, the control system is first tested purely simulatively on the basis of a selected traffic area and compared with the existing inventory method. Following the prototypical commissioning, this comparison is finalised by field tests. Corresponding results show the great potential of the development with regard to the reduction of criteria such as emissions or waiting times and at the same time the need for action for use as standard.

Konzipierung, Analyse und Realumsetzung eines mehrstufigen modellprädiktiven Lichtsignalanlagenregelungssystems

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung 3

1.3 Struktur der Arbeit 4

2 Theoretische Grundlagen **7**

2.1 Verkehrsmodellierung 7

2.1.1 Mikroskopische Verkehrsmodellierung 9

2.1.2 Makroskopische Verkehrsmodellierung 12

2.1.3 Mesoskopische und weitere Verkehrsmodellierungen 18

2.2 Verkehrstechnik und deren Richtlinien 19

2.2.1 Lichtsignalanlagen und deren regulatorische Grundlagen 20

2.2.2 Sensoren in der Verkehrstechnik 32

2.2.3 OCIT-Kommunikationsstandard 36

2.3 Verkehrssimulation 40

2.3.1 SUMO – Softwarelösung und Frameworks 40

2.3.2 Verkehrssimulationsszenarien: Verkehrsnetz, -infrastruktur und -aufkommen in SUMO 42

2.3.3 Benutzerschnittstelle in SUMO: TraCI/TraCI4Matlab 44

2.3.4 SUMO Verkehrsmodell 45

2.4 Regelungstechnische Grundlagen 50

2.4.1 Zustandsbeobachter 51

2.4.2 Reglerentwurfsverfahren 54

2.4.3 Vernetzte Regelungssysteme 61

3 Stand der Wissenschaft und Technik 69
3.1 Regelungstechnische Konzepte im Themenfeld von LSA 69
3.1.1 Verkehrsbeobachter 70
3.1.2 LSA-Regelungsstrategien 77
3.2 Handlungsbedarf für LSA-Regelungskonzepte 83

4 System zur modellprädiktiven LSA-Regelung 87
4.1 Grundidee und Modellbildung 87
4.2 Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion 88
4.2.1 Konzept und Aufbau der Verkehrsrekonstruktion 89
4.2.2 Kalibrierung und Validierung der Verkehrsrekonstruktion 97
4.3 Mehrstufiges modellprädiktives LSA-Regelungskonzept 100
4.3.1 Grundgedanke, Aufbau und Umsetzung der LSA-Regelung . . . 100
4.3.2 Fuzzy-Regler zur Phasenvorauswahl 103
4.3.3 Modellprädiktive LSA-Regelung 105
4.4 Robustheitssteigernde Maßnahmen 113

5 Implementierung und simulative Analyse des LSA-Regelungssystems . 115
5.1 Aufbau der Simulationsumgebung 115
5.1.1 Testgebiet und Modellierung des Verkehrsaufkommens 116
5.1.2 Integration von Netzwerkstörungen 119
5.2 Ergebnisse und Auswertung der Simulationen 121
5.2.1 Analyse bei idealisierten Verhältnissen 122
5.2.2 Analyse der realitätsnahen Situation 130

6 Realumsetzung des LSA-Regelungssystems 139
6.1 Voraussetzungen der Feldtests 140
6.1.1 Infrastrukturelle und projektspezifische Rahmenbedingungen . . 140
6.1.2 Inbetriebnahme 143
6.1.3 Sicherheitsmaßnahmen und Rückfallebenen 147
6.2 Auswertung des LSA-Regelungssystems 149
6.2.1 Methodik der Auswertung 149
6.2.2 Ergebnisse der Realumsetzung 154

7 Zusammenfassung und Ausblick 163
7.1 Zusammenfassung 163
7.2 Ausblick 164

8 Literaturverzeichnis 167

Literaturverzeichnis der studentischen Arbeiten 185

Anhang

A1 Weitergehende Grundlagen und Methodik 188
A1.1 Boxplots 188
A1.2 Ergänzungen zur Methodik und Darstellung der Realergebnisse 189

A2 Exemplarisches Material der Verkehrsplanung im PPS 191

A3 Weitergehende Diagramme und Tabellen 198
A3.1 Ergänzungen zu Kapitel 5 198
A3.2 Ergänzungen zu Kapitel 6 202

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
AGT	Absoluter Ground Truth
ANPR	Automatic Number Plate Recognition
AP	Anwenderprogramm
AR	Alles Rot
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BTPPL	Basis Transport Paket Protokoll Layer
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DTA	Dynamic Traffic Assignment
DUA	Dynamic User Assignment
EKF	Erweitertes Kalman-Filter
FCD	Floating-Car-Daten
FIFO	First-In-First-Out
GHR	Gazis Herman Rothery
GLOSA	Green Light Optimal Speed Advisory
GT	Ground Truth
GTR	Ground Truth Referenz
GUI	Graphical User Interface
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HiL	Hardware-in-the-Loop
HNI	Heinz Nixdorf Institut
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
LSA	Lichtsignalanlage

MAC	Medium Access Control
ML	Machine Learning
MoM	Middle of Maximum
MPC	Model-Predictive Control
NCS	Networked Control Systems
NMPC	Networked Model-Predictive Control
NRMSE	Normalized Root Mean Square Error
OCIT	Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems
OCIT-C	OCIT-Center to Center
OCIT-O	OCIT-Outstations
OD	Origin-Destination
ODG	OCIT Developer Group
ÖPNV	Öffentlicher Personen- und Nahverkehr
OSI	Open Systems Interconnection
OSM	OpenStreetMap
PPS	Pilotprojekt Schlosskreuzung
QoS	Ouality of Service
RAP	Roadside Access Point
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RL	Reinforcement Learning
RSU	Roadside Unit
RtM	Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique
SiL	Software-in-the-Loop
SOAP	Simple Object Access Protocol
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TCP	Transmission Control Protocol
TraCI	Traffic Control Interface

UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equilibrium
UKF	Unscented Kalman-Filter
V2X	Vehicle-to-Everything
VMS	Verkehrsmanagementsystem
VR	Verkehrsrechner
VTN	Verkehrsteilnehmende
XML	Extensible Markup Language

Symbolverzeichnis

Einige grundlegende Notationen werden zum Verständnis der Arbeit vorausgesetzt. Spezielle Symbole und deren unterschiedliche Spezifikationen werden dagegen im Folgenden, chronologisch nach erstmaligem Vorkommen sortiert, erläutert.

Kapitel 2: Theoretische Grundlagen

Verkehrsmodellierung

α	Bezeichnung des betrachteten Fahrzeugs
$\square_\alpha$	Variablenbezug auf Fahrzeug α
x_α	Position
v_α	Geschwindigkeit
a_α	Beschleunigung
l_α	Fahrzeuglänge
t_α^0	Zeitpunkt der Messquerschnittsüberschreitung der Front
t_α^1	Zeitpunkt der Messquerschnittsüberschreitung des Hecks
Δt_α	Brutto-Zeitlücke
T_α	Netto-Zeitlücke
d_α	Bruttoabstand
s_α	Nettoabstand
τ	Reaktionszeit
$s_{\text{jam},\alpha}$	Stillstandsabstand
a_{max}	Maximalbeschleunigung
v_{des}	Wunschgeschwindigkeit
a_{min}	Minimalbeschleunigung
s_α^*	Hilfsgröße im Gipps-Modell
$\hat{a}_{\text{min}}$	Geschätzte Minimalbeschleunigung
λ	Sensitivität
γ	Sensitivität (GHR)-Modell
m, l	Kalibrierparameter zur Modellanpassung im (GHR)-Modell
Q	Verkehrsfluss
V	Mittlere Flussgeschwindigkeit
ρ	Verkehrsdichte

N	Fahrzeuganzahl
O	Belegungsgrad
$Q_{\max}$	Maximaler Verkehrsfluss
ρ_{crit}	Kritische Verkehrsdichte
$\square_e$	Equilibriumszustand der spezifizierten Variable
$V_{\max}$	Freie Flussgeschwindigkeit
$\rho_{\max}$	Stauungsverkehrsdichte
A	Beschleunigungsfunktion
P	Druck
A_{rmp}	Rampenterm der Beschleunigung

Verkehrstechnik und deren Richtlinien

t_G	Gelbzeit
v_{zul}	Zulässige Höchstgeschwindigkeit
t_{RG}	Rotgelbzeit
t_Z	Zwischenzeit
$t_{ü}$	Überfahrtzeit
t_r	Räumzeit
t_e	Einfahrzeit
s_0	Grundräumweg
l_{FZ}	Fiktive Fahrzeuglänge
s_e	Einfahrweg
v_r	Räumgeschwindigkeit
$t_{Z,i\rightarrow j}$	Zwischenzeit des Phasenübergangs von Phase i zu j
$t_{Z,kl}$	Zwischenzeit des Phasenübergangs von Signal k zu Signal l
t_U	Umlaufzeit
P	Phasenanzahl einer definierten Phasenfolge
$t_{F,\text{maß},i}$	Maßgebliche Freigabezeiten der Signalgruppen von Phase i
$t_{Z,\text{erf},i}$	Erforderliche Zwischenzeiten des Phasenübergangs zu Phase i

Verkehrssimulation

v_{safe}	Sicherheitsgeschwindigkeit
d_b	Bremsweg
$v_{\max}$	Maximalgeschwindigkeit

v_{dawdle}	Trödelgeschwindigkeit
r	Zufallszahl
σ	Imperfektionsparameter
$v_{\text{dawdle,new}}$	Angepasste Trödelgeschwindigkeit in SUMO
o	Belegung der Best Lane
ξ	Versatz im Fahrspurindex zur Best Lane
d_{DL}	Abstand zum Ende der Dead Lane
v_{LA}	Prädizierte Geschwindigkeit am Ende der Dead Lane (Look Ahead Speed)
f	Manöverabhängiger Anpassungsfaktor
p_{SG}	Parameter zur Beschreibung der Geschwindigkeitserhöhungswahrscheinlichkeit (Speed Gain Probability)
v_{LC}	Erwartbare Geschwindigkeit bei Spurwechsel
v_{KL}	Erwartbare Geschwindigkeit bei Halten der Fahrspur
p_{KR}	Parameter zur Beschreibung der Rechtshaltewahrscheinlichkeit (Keep Right Probability)
$t_{\text{LC},v_{\text{des}}}$	Voraussichtliche Dauer bei Geschwindigkeit v_{des} auf der rechten Spur vor einem notwenigen Überholmanöver
T_K	Kalibrierungsfaktor des regulatorischen Spurwechsels

Regelungstechnische Grundlagen

x	Systemzustand
n	Systemordnung
A	Dynamikmatrix
B	Eingangsmatrix
u	Systemeingang
y	Systemausgang
C	Ausgangsmatrix
D	Durchgriffsmatrix
p	Anzahl der Eingangsgrößen
q	Anzahl der Ausgangsgrößen
x_0	Anfangszustand
$\hat{x}$	Schätzwert des Systemzustands
r	Zustandskorrektur

$\hat{y}$	Schätzwert des Systemausgangs
L	Beobachtermatrix
Δy	Ausgangsfehler
Δx	Schätzfehler
A_B	Dynamikmatrix des Schätzfehlers
f	(Nichtlineare) Systemfunktion
g	(Nichtlineare) Ausgangsfunktion
w	Referenz
K	Zustandsregler
$\hat{x}_0$	Geschätzter Anfangszustand
μ, ρ	Rauschprozesse
Q, S	Kovarianzen der Rauschprozesse
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	Normalverteilung mit Erwartungswert μ und Varianz σ^2
P	Lösung der algebraischen Riccati-Gleichung
$\mathbb{E}[x]$	Erwartungswert von x
$\hat{P}$	Fehlerkovarianz
$\hat{x}_{k+1\|k}$	Schätzung von x_{k+1} gegeben Zeitschritt k
$\mathbb{E}[x_{k+1}\|k]$	Bedingter Erwartungswert von x_{k+1} gegeben Zeitschritt k
$\mathcal{K}$	Kalman-Verstärkung
I	Einheitsmatrix
T_s	Äquidistante Schrittweite
n_p	Prädiktionshorizont
n_c	Stellhorizont
u_{opt}	Aufzuschaltender Teil des optimalen Stellgrößenverlaufs
J	Gütefunktional der Optimierung
Q, R, S	Gewichtungen im MPC-Konzept
$u_{\min}, u_{\max}$	Stellgrößenbeschränkungen
$\Delta u_{\min}, \Delta u_{\max}$	Stellgrößenänderungsbeschränkungen
$x_{\min}, x_{\max}$	Zustandsbeschränkungen
$y_{\min}, y_{\max}$	Ausgangssbeschränkungen
$\|\|v\|\|_A^2$	Quadratische Form ($v^T A v$)
x	Eingang

n	Anzahl der Eingangsvariablen
y	Ausgang
m	Anzahl der Ausgangsvariablen
μ	Zugehörigkeitsfunktion
G	Grundmenge
F	Fuzzy-Menge
t_w	Wartezeit
μ_{res}	Interferenzergebnis

τ_{ca}	Netzwerkinduzierte Totzeit von der Regelung zur Aktorik
τ_{sc}	Netzwerkinduzierte Totzeit vom Sensor zur Regelung
u_C	Übermittelte Stellgröße an Regler C
P_i	Strecke des Subsystems i
C_i	Regler des Subsystems i
N	Anzahl an Subsystemen
$\mathcal{S}$	Indexmenge der Subsysteme
τ_T	Netzwerkinduzierte Totzeit
τ_{pre}	Dauer der Vorbearbeitung
τ_{MAC}	Dauer des Medienzugriffs
τ_{phy}	Dauer der der physikalischen Datenübertragung
τ_{route}	Dauer des Datenpaketroutings durch das Kommunikationsnetz
τ_{post}	Dauer der Nachbearbeitung
$\tau_{T,\min}$	Minimale Übertragungsdauer
$\tau_{T,\max}$	Maximale Übertragungsdauer
τ_c	Regler-Berechnungszeit
u^*_{opt}	Opimale Stellgrößensequenz
m^*	Länge der Stellgrößensequenz
Q	Warteschlange
l_Q	Länge der Warteschlange

Kapitel 3: Stand der Wissenschaft und Technik

Regelungstechnische Konzepte im Themenfeld von LSA

d	Störgrößen
X	Zustandsvektor

X^H	Zustandsvektor auf Basis historischer Daten
η, v, ν	Zufällige Fehlerterme
M	Messwerte
$\mathcal{F}$	Autoregressiver Prozess
$\mathcal{S}$	Simulationsmodell
p	Ordnung des autoregressiven Prozesses
$\mathcal{G}$	Graph (Graphentheorie)
$\mathcal{N}$	Knotenmenge (Nodes)
$\mathcal{L}$	Kantenmenge (Links)
n_{OD}	Anzahl an betrachteten OD-Strömen
n_l	Anzahl sensierter Kanten
$\mathcal{L}_S$	Menge der Fahrspuren
M, N	Exemplarische Knotenpunkte
$\mathcal{J}$	Knotenmenge
$\mathcal{I}_j, \mathcal{O}_j$	Ein- bzw. Ausgangsverbindungen von Knoten j
q_z	Zufluss zu Kante z von vorherigen Knotenpunkt
h_z	Abfluss von Kante z über nachfolgenden Knotenpunkt
d_z	Zufluss zu Kante z innerhalb der Kante selbst
s_z	Abfluss von Kante z innerhalb der Kante selbst
x_z	Fahrzeuganzahl bzw. Zustand auf Kante z
T	Schrittweite
T_c	Umlaufzeit
E	Störeingangsmatrix
$t_{w,z}$	Abbiegerate von Verbindung w zu Verbindung z
S_z	Sättigungsfluss von Verbindung z
$x_{\max}$	Straßenkapazität
$u_{\min}$	Minimale Grünzeit
$u_{\max}$	Maximale Grünzeit
$T_{j,\max}$	Maximale Gesamtgrünzeit für Knoten j
$L_{j,\max}$	Geometrieabhängige Zeitverluste für Knoten j
$\tilde{x}$	Zusammenfassung der prädizierten Zustände
c	Kombination von Zustand und Störung über den Prädiktionshorizont n_p

$\tilde{B}$	Untere Dreiecksblockmatrix zusammengesetzt aus Blöcken der Eingangsmatrix B
g	Zusammenfassung der prädizierten Zustände
F	Zuordnungsmatrix der Nebenbedingungen
η	Grenzen der Nebenbedingungen
q	Diagonalelemente der Gewichtung Q
r	Diagonalelemente der Gewichtung R
Φ	Konstante Matrix innerhalb der Kostenfunktion
β	Zustandsabhängiger Vektor innerhalb der Kostenfunktion

Kapitel 4: System zur modellprädiktiven LSA-Regelung

Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion

N_{veh}	Fahrzeuganzahl
V	Fahrzeugmenge
ξ	Belegungszustand des Verkehrsnetzes
ξ_i	Belegungszustand von Fahrzeug i
N_{vehtype}	Anzahl der unterschiedenen Fahrzeugtypen
$V_{\mathbb{P}}$	Frei routingfähige Fahrzeuge
τ	Schrittweite
q_i	Anzahl für Fahrzeug i erreichbare Sensoren
n	Anzahl an Fahrzeugen, die mehr als zwei Messtellen mit mindestens einer Detektion erreichen können
N_a	Anzahl möglicher Routingentscheidungen
x_a	Binäre Optimierungsvariable der Routingentscheidungen
t_t	Reisezeit
w_t	Reisezeitgewichtung
w_a	Zuordnungsgewichtung
A_1, b_1	Nebenbedingungen zur maximal einfachen Fahrzeugzuweisung
A_2, b_2	Nebenbedingungen zur Begrenzung der Fahrzeugzuweisung anhand der Messungsanzahl
$\mathbb{1}$	Konstanter Vektor gefüllt mit Einsen
n_S	Maßgebliche Anzahl an Sensoren im Fall von notwendigen Routingentscheidungen (siehe Fußnote 42)
$t_{t,\text{th}}$	Reisezeitschwelle

S	Exemplarische Induktionsschleife
$\mathcal{S}_S$	Menge vorgelagter Sensoren zu Induktionsschleife S
E_S	Fahrzeugmenge im Einzugsgebiet von Induktionsschleife S
$t_{t,i,S}$	Reisezeit (t_t) von Fahrzeug i zu Induktionsschleife S
$r_{i,S}$	Route von Fahrzeug i zu Induktionsschleife S
$\mathcal{N}_{r_{i,S}}$	Knotenmenge passierter Knoten auf Route $r_{i,S}$
$\tilde{E}_S$	Routingfähige Fahrzeuge im Einzugsgebiet von Induktionsschleife S
i^*	Fahrzeug aus $\tilde{E}_S$ mit minimaler Reisezeit

Mehrstufiges modellprädiktives LSA-Regelungskonzept

Π	LSA-spezifische Phasenmenge
n_{splits}	Anzahl maximal ermöglichter Schaltvorgänge innerhalb des Prädiktionshorizonts t_p
$t_{u,\min}$	Frühester Schaltzeitpunkt
$t_{u_k,P}$	Berechneter Schaltvorgang in Phase P zum Zeitpunkt k
$t_{f_k,P}$	Fixierter Schaltvorgang in Phase P zum Zeitpunkt k
n_Π	Phasenanzahl zugehörig zu Π
$n_{\Pi,\text{Fuzzy}}$	Phasenanzahl der Fuzzy-Vorauswahl
R_P	Priorität von Phase P
x_{Fuzzy}	Spurspezifische Belegung inkl. VTN-Gewichtung für die Fuzzy-Vorauswahl
t_w	Wartezeit
$t_{w,\text{Fuzzy}}$	Spurspezifische Wartezeit inkl. VTN-Gewichtung für die Fuzzy-Vorauswahl
x_{Ped}	Belegung des Fußverkehrs
$t_{w,\text{Ped}}$	Wartezeit des Fußverkehrs
$x_{\text{Ped,Fuzzy}}$	Spurspezifische Belegung des Fußverkehrs für die Fuzzy-Vorauswahl
$t_{w,\text{Ped,Fuzzy}}$	Spurspezifische Wartezeit des Fußverkehrs für die Fuzzy-Vorauswahl
$q_{\text{in,Fuzzy}}$	Spurspezifischer Fahrzeugeingang inkl. VTN-Gewichtung für die Fuzzy-Vorauswahl
$\models$	Symbol der Fuzzy-Zugehörigkeit in Kurzschreibweise

$\boldsymbol{\mathcal{P}}$	Prädiktionsmodell
$\Pi_{\text{Fuzzy}}^{n_{\text{splits}}}$	Menge möglicher Phasenkombinationen nach der Fuzzy-Vorauswahl
s_k	Systemzustand einer isolierten LSA
$\boldsymbol{s}_k$	Zustandsprognose einer isolierten LSA
$\boldsymbol{J}$	Gesamtgütemaß zur Bewertung der Zustandsprognose
q_{in}	Eingangsfluss
l	Zustandsspur
x	Typspezifische Spurbelegung (x_{PKW} als Beispiel der PKW-Belegung)
$\boldsymbol{x}_{\text{PKW}}$	Funktion zur Extraktion der typspezifischen Spurbelegung (Beispiel PKW)
c	Spurbelegungskapazität
q_{out}	Ausgangsfluss
$\boldsymbol{m}$	Ausgangsflussbemessung
$\boldsymbol{r}$	Gesamtabflussrestriktion
$q_{\text{out,max}}$	Maximaler Ausgangsfluss
φ	Skalierungsfaktor des abflussrelevanten VTN-Anteils
$\boldsymbol{d}$	Verzögerung des Ausgangsflusses
ζ	Belegungsabweichungen des Prädiktionsmodells
x_{Ref}	SUMO-Referenz der Spurbelegung
A, b	Nebenbedingungen zur Einhaltung der Reihenfolge der Schaltvorgänge
u^*	Optimale Phasenkombination
t^*	Optimale Schaltzeiten der gegebenen Phasenkombination
$L_{\boldsymbol{J}}$	Menge der Fuzzy-ausgewählten Phasenkombinationen und deren jeweils optimaler Schaltzeiten
$\boldsymbol{j}_K$	Teilzielfunktion des Kriteriums K
g_t	Zeitliche Gewichtung der Prädiktionen
$\|\cdot\|_K$	Normierung innerhalb von $\boldsymbol{j}_K$
$t_{w,\text{th,Ped}}$	Schwellenwert der Fußverkehrswartezeit
$t_{w,\text{Ped,max}}$	Maximal vorliegende Fußverkehrswartezeit

Kapitel 5: Implementierung und simulative Analyse des LSA-Regelungssystems

Aufbau der Testumgebung

$\tau_{\text{sc,TOPO}}$	Netzwerkbedingte Totzeit der TOPO.box-Systeme

Ergebnisse und Auswertung der Simulationen

$p_{\text{Prio,bal}}$	Parametersatz der ausgewogenen VTN-Gewichtung
$p_{\text{Prio,uni}}$	Parametersatz der uniformen VTN-Gewichtung
$p_{\text{Prio,em}}$	Parametersatz der VTN-Gewichtung mit Fokus auf stärker emittierende VTN
$\overline{\square}$	Durchschnittswerte der spezifizierten Größe
m_{E,PM_x}	Feinstaubemissionen (Masse)
n_H	Anzahl an Haltvorgängen
$t_{w,\text{Schwer}}$	Wartezeit des Schwerverkehrs
$\tau_{\text{sc,LSA}}$	Netzwerkbedingte Totzeit der LSA (zum eingesetzten VR)
t_{TL}	Verlustzeit

Kapitel 6: Realumsetzung der LSA-Regelungsstrategie

Voraussetzungen der Feldtests

$t_{S,\max}$	Maximale Sperrzeit (Steuergerät)
$t_{w,\text{th}}$	Schwellenwert der Wartezeit
t_S	Sperrzeit

Auswertung des LSA-Regelungssystems

x_{total}	Zusammengefasste Belegung aller Zustandsspuren

1 Einleitung

Die Verkehrswende ist nicht erst seit Aufkommen medienwirksamer Bewegungen wie „Fridays For Future“ ein vieldiskutiertes Thema unserer Gesellschaft, welches sowohl Politik und Wissenschaft als auch die breite Öffentlichkeit gleichermaßen bewegt. Nachhaltige Veränderungen sind dabei in Zeiten steigender Verkehrsaufkommen sowie zunehmender Belastungen für Städte und mit Blick auf die Gesundheit der Menschen offensichtlich notwendig. Neben dem grundsätzlichen Bevölkerungswachstum Deutschlands der letzten 25 Jahre um 2,6 % auf über 84 Millionen Menschen in 2022 ist gleichzeitig auch der Urbanisierungsgrad auf über 77,6 % vorangeschritten [Wor23]. Als eine der Folgen wird für die täglich zurückgelegte Strecke pro Person im urbanen Raum in Deutschland von 2019 bis 2035 eine Steigerung um 23,2 % prognostiziert [Del19].
Die vorliegende Dissertation widmet sich ebendieser Herausforderung und stellt dabei das Themengebiet der Verkehrsregelung in urbanen Gebieten in den Mittelpunkt ihrer Untersuchungen. Viele der derzeitig umgesetzten Konzepte im Verkehrsbereich sind veraltet. Die zwingend erforderliche neue Mobilitätskultur sollte nicht nur auf umweltfreundlichere Antriebsformen wie Elektromobilität oder Wasserstoff beschränkt sein, was durch den Verbrennerausstieg namhafter Autobauer in näherer Zukunft vermeintlich gewährleistet wird [ADAC24]. Stattdessen sollte diese Kultur ebenso eine Neugestaltung der Verkehrsinfrastruktur, eine adäquate Förderung des Öffentlichen Personen- und Nahverkehrs (ÖPNV) und die notwendige Digitalisierung des gesamten Verkehrssektors umfassen.
In dieser Einleitung wird diese Arbeit zunächst anhand des möglichen Einflusses motiviert, bevor die Ziele und erarbeiteten Forschungsfragen der Dissertation in Verbindung mit der umgesetzten Vorgehensweise skizziert werden. Im Anschluss folgt eine Übersicht über die Struktur der Arbeit.

1.1 Motivation

Mit der Entwicklung eines hierarchischen Verkehrsmanagementkonzepts für einen vollständig autonomen und homogenen Verkehr ist am Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik (RtM) ein idealisiertes Grundszenario untersucht worden [Mer22]. Die rein simulativen Ergebnisse zeigen in vielen unterschiedlichen Konstellationen eindrucksvoll das große theoretische Potential der untersuchten Verkehrsbeeinflussung, was u. a. anhand der deutlichen Reduktion der durchschnittlichen Reisezeiten und Wartezeiten beobachtet werden kann.
Im Gegensatz zu dieser derzeit realitätsfernen Fragestellung existieren gerade im urbanen Bereich akute Verkehrsprobleme, die einer kurz- bis mittelfristigen Lösung bedürfen.

Zur Identifikation dieser Probleme muss morgens lediglich das Radio im Auto angeschaltet werden, um die neuerlichen Staumeldungen in die private Routenplanung zu integrieren. Die durch unvermeidliche Staus verursachten Emissionen ziehen vielerorts Einschränkungen wie Umweltzonen oder im Extremen Fahrverbote nach sich, wenn bspw. definierte Emissionsgrenzwerte überschritten werden. In Nordrhein-Westfalen ist der Fall der Stadt Essen dabei sicherlich das prominenteste Beispiel. Obwohl die Verbote zunächst widerrufen wurden, sind als Reaktion verschiedene Präventionsmaßnahmen durch die Stadt vorsorglich ergriffen worden. Diese reichen von einer regelmäßigen Verkehrserfassung über neue Geschwindigkeitsbegrenzungen und leicht angepasste Signalsteuerungen (Stichwort *Grüne Welle*) bis hin zur situativen Limitierung der täglichen Verkehrsmenge [Sta19; Sta20]. Drastische „Lösungen“ wie Fahrverbote setzen dabei nicht bei der Ursache der Probleme an, sondern bekämpfen lediglich kurzfristig die Symptome, sodass einige der tatsächlich umgesetzten Maßnahmen vielversprechender und nachhaltiger sind. Weil auch Paderborn mit dieser Problematik zu kämpfen hatte und noch immer hat – 2022 verbrachten Pendler hier durchschnittlich 28 Stunden im Stau, was zu Platz 34 im deutschlandweiten und Platz 376 im globalen Stauranking reichte [INR24] – und anhand der Vorarbeiten am RtM das Wissen um Verbesserungspotential im Straßenverkehr bestand, wurde bereits im Jahr 2019 das gut dreijährige Pilotprojekt Schlosskreuzung (PPS)[1] gestartet. Im Gegensatz zu den Einflussmöglichkeiten auf einen autonomen Verkehr wurde für die Realumsetzung, also der tatsächlichen Umsetzung im realen Verkehrsbetrieb, eine flexible und intelligente *Lichtsignalanlagen (LSA)-Regelung* als angestrebtes Lösungskonzept identifiziert. Zusammen mit der Stadt Paderborn und lokalen Unternehmen der Verkehrsbranche als Projektpartner[2] war es das Ziel auf diese Weise Theorie und Praxis zu verknüpfen.

Als Testgebiet des Forschungsprojekts wurden daher Straßenzüge des Paderborner Stadtteils Schloß Neuhaus mit insgesamt sechs LSA (u. a. der sog. Schlosskreuzung) ausgewählt. In der folgenden Abbildung 1-1 ist ebenjenes Testgebiet angedeutet[3]. Dieses Verkehrssystem, das im Hauptteil detaillierter beschrieben wird, wurde u. a. aufgrund seiner Urbanität, der Nähe zu allen Projektpartnern, was die praktische Umsetzung erleichtern sollte, und der sehr unterschiedlichen Anforderungen der beteiligten LSA ausgewählt. In Anbetracht dieses speziellen Anwendungsfalls ist zu bemerken, dass im Pilotprojekt sehr großer Wert auf die Übertragbarkeit des Konzepts andernorts gelegt wurde, damit zukünftig weitere Kommunen von den Erfahrungen und Ideen profitieren.

[1] Im Rahmen der Förderungen von digitalen Modellregionen in Nordrhein-Westfalen durch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen unterstützt und nach einer Kreuzung im Testgebiet benannt.

[2] Die zusätzlichen Projektpartner im PPS waren die RTB GmBH aus Bad Lippspringe, zuständig für die Verkehrssensorik, und die Stührenberg GmBH aus Detmold, als Signalbauer zuständig für die Umrüstung und Versorgung der LSA im Testgebiet.

[3] Das verwendete Kartenmaterial wurde von OpenStreetMap (OSM) bezogen [OSM24].

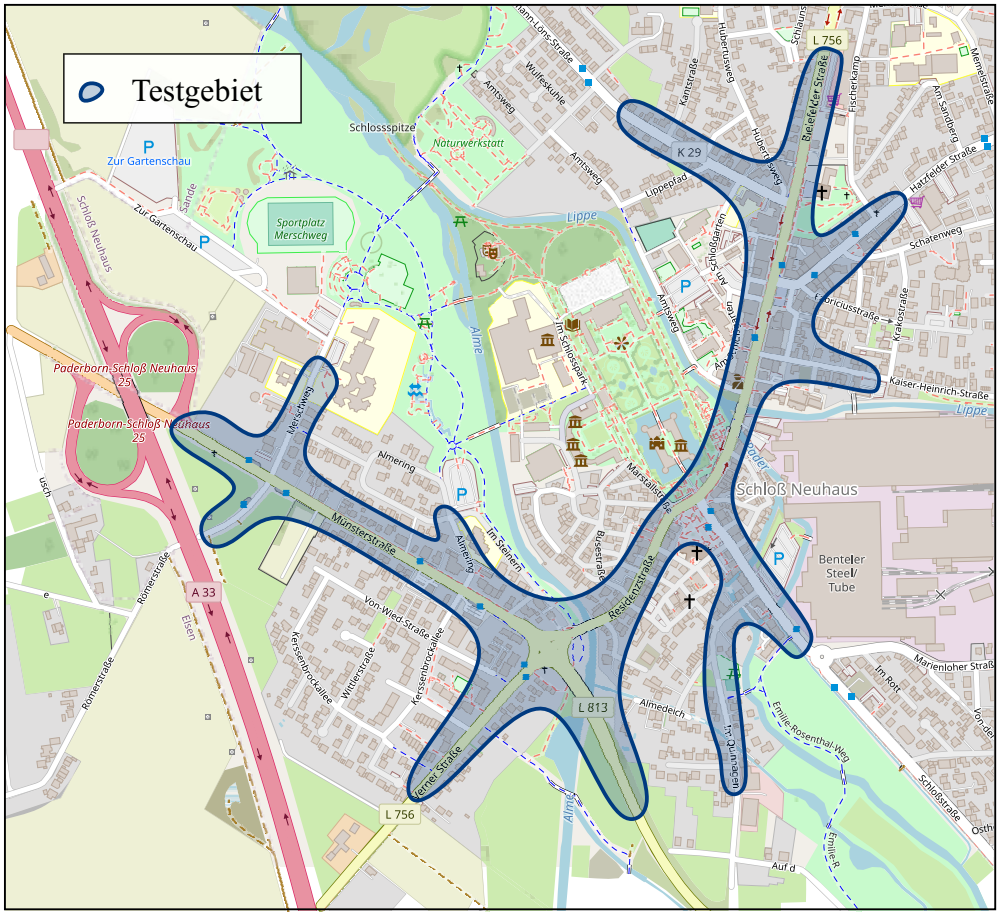


Abbildung 1-1: *Testgebiet des PPS im Paderborner Stadtteil Schloß Neuhaus [OSM24]*

1.2 Zielsetzung

Ausgehend von der Lücke derzeitiger Bestandsverfahren und Forschungsarbeiten zum Vorhaben des PPS kann das Ziel dieser Arbeit als generische Entwicklung und Untersuchung eines ganzheitlichen Regelungssystems zur gezielten und flexiblen Regelung eines realen Verkehrssystems durch deren LSA zusammengefasst werden.

Die Aufgabe der generischen Entwicklung ist dabei direkt aus dem PPS abgeleitet, sodass eine Übertragbarkeit sichergestellt wird und vergleichbare Verkehrsgebiete ebenso Ansätze dieser Arbeit nutzen können. In dem Zusammenhang der obigen Zielsetzung resultiert der Begriff der Ganzheitlichkeit aus der verzahnten Konzipierung einer *echtzeitfähigen Verkehrsrekonstruktion* basierend auf einer mikroskopischen Verkehrssimulation mit einer *mehrstufigen modellprädiktiven LSA-Regelung*. Diese gleichzeitige Entwicklung bietet u. a. das Potential, durch die gegenseitige Abstimmung reaktionsschnell (im Sekundentakt) auf sich verändernde Situationen reagieren zu können. Um hier den modernen und verbesserten Methoden der Verkehrserfassung Rechnung zu tragen und anhand der vorhandenen LSA gezielt Einfluss auf den Verkehr zu nehmen, sollen in dem Konzept einzelne Verkehrsteilnehmende (VTN) und deren fahrzeugtypspezifischen

Charakteristika betrachtet werden. Auf diese Weise besteht innerhalb der Regelung die Möglichkeit, VTN bei der Bewertung der aktuellen und zukünftigen Verkehrszustände zu unterscheiden und anhand von gegebenen (behördlichen) Vorgaben gegebenenfalls zu priorisieren. Die genannte Flexibilität des Ansatzes äußert sich zum einen in der Modifizierbarkeit der LSA-Regelung und zum anderen im Vergleich zu LSA-Steuerungen mit fixierter Phasenreihenfolge eines Umlaufs. Situationsbedingt soll dabei ein optimaler Kompromiss für alle VTN gefunden werden, sodass unterschiedliche Anforderungen wie Staus oder Situationen außerhalb der Spitzenzeiten jeweils ideal adressiert werden. Als Gegenbeispiel zur Verkehrsstauung ist ebenso die Situation des Wartens an einer „leeren“ Kreuzung bekannt und zu lösen, mit der oftmals aufkommenden Frage warum die entsprechende LSA nicht unmittelbar die Fortsetzung der Reise ermöglicht. Das letzte Stichwort „real“ der Zielsetzung deutet den Praxisbezug und Machbarkeitsnachweis des gesamten Vorhabens an. Gerade in Verbindung mit der Ganzheitlichkeit soll u. a. auch der Fußverkehr vollständige Berücksichtigung im Konzept finden. Das LSA-Regelungssystem soll nicht nur theoretisch entwickelt werden, sondern im Anschluss an simulationsbasierte Tests mit realitätsnahen Szenarien auch in der Realumgebung implementiert werden. Dementsprechend gilt es, die gesetzlichen Rahmenbedingungen direkt in das Konzept zu integrieren, damit diese eingehalten werden. Für die einhergehende Analyse der LSA-Regelung sollen Kriterien wie die Wartezeiten der VTN oder auch deren Emissionen herangezogen werden, um die Reaktionen des Verkehrs auf die Regelung zu beurteilen.
Grundsätzlich wird durch das entwickelte LSA-Regelungssystem eine Verbesserung des Gesamtverkehrszustands für alle VTN angestrebt, sodass bspw. nicht primär die Erhöhung des Durchsatzes verfolgt wird, sondern vielmehr die allgemeine Reduktion von Emissionen und Wartezeiten sowie die präzise Verkehrsbeeinflussung im Vordergrund stehen.

1.3 Struktur der Arbeit

Im Anschluss an diese Einleitung werden in Kapitel 2 die erforderlichen theoretischen Grundlagen zum Verständnis und zur Einordnung dieser Arbeit beschrieben. Beginnend mit der Verkehrsmodellierung, welche die Basis der Forschung bildet, wird im Folgenden zunächst auf die Verkehrstechnik und deren Richtlinien sowie anschließend auf das Themengebiet der Verkehrssimulation eingegangen. Hinsichtlich der Verkehrstechnik wird der Fokus vor allem auf LSA und bei der Simulation entsprechend auf das verwendete Softwarepaket von *Simulation of Urban Mobility (SUMO)* gelegt. Das Kapitel schließt in Abschnitt 2.4 mit den benötigten regelungstechnischen Grundlagen, in denen bspw. das Prinzip der modellprädiktiven Regelung eingeführt wird.
Dem Stand der Wissenschaft und Technik widmet sich das dritte Kapitel. Anhand der angestellten Analysen zu Beobachterkonzepten und LSA-Regelungen für Verkehrssysteme

werden Herausforderungen und Fragestellungen identifiziert, sodass ein Handlungsbedarf für die Entwicklung eines ganzheitlichen und übertragbaren LSA-Regelungssystems zur Realumsetzung abgeleitet wird.
Dieser Handlungsbedarf wird im folgenden Kapitel 4 behandelt, indem das entwickelte mehrstufige System zur modellprädiktiven LSA-Regelung dargestellt wird. Es werden chronologisch die beiden Hauptkomponenten der Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion und des mehrstufigen modellprädiktiven LSA-Regelungsansatzes behandelt, nachdem zu Beginn der geschlossene Regelkreis mit allen notwendigen Komponenten geklärt wird. Innerhalb der ausgeführten Umsetzungskonzepte wird dabei u. a. in Abschnitt 4.3.3 das Optimierungsproblem der MPC detailliert hergeleitet.
Im Anschluss an das Grundkonzept der Arbeit folgt dessen Implementierung und simulative Analyse. An dieser Stelle werden sowohl das Testgebiet mit dem Simulationsframework eingeführt als auch die in den korrespondierenden Simulationen erzielten Ergebnisse diskutiert. Die analysierten Simulationsszenarien beschränken sich dabei nicht auf idealisierte Verhältnisse, sodass auch realitätsnahe Studien zur Vorbereitung der Realumsetzung präsentiert werden.
Das vorletzte Kapitel 6 adressiert ebendiese Realumsetzung, wobei zunächst die notwendigen Vorbereitungen und die Inbetriebnahme beschrieben werden, um schließlich die Ergebnisse des Feldtests zu analysieren und einzuordnen.
Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick im Schlusskapitel 7.

2 Theoretische Grundlagen

Die nachfolgenden Abschnitte diskutieren die wesentlichen theoretischen Bestandteile der in dieser Arbeit behandelten Verkehrsthematik und bilden somit die Basis zum Verständnis der Dissertation. Aufgrund dieser thematischen Einordnung werden zunächst Grundsätze und generelle Begriffe aus dem Bereich der Modellierung und Simulation des Straßenverkehrs vorgestellt, um daran anschließend die wichtigsten verkehrstechnischen Grundlagen zu behandeln. Es folgt eine komprimierte Beschreibung der untersuchten und später eingesetzten regelungstechnischen Methoden und Verfahren sowie eine kurze Einordnung weiterer zu berücksichtigender Bereiche wie die der vernetzten Regelungssysteme.

2.1 Verkehrsmodellierung

Bereits 1934 veröffentlichte der Amerikaner Bruce D. Greenshields in [Gre34] eine Methodik zur Erfassung von Verkehrsverhalten. Unter anderem diese Fortschritte in der Aufzeichnung und Messung des Verkehrsgeschehens erlaubten ihm die anschließende Arbeit [Gre35], in der er grundlegende Verkehrsphänomene analysiert, modelliert und damit über mathematische Beziehungen greifbar macht. Dabei sind die Gründe dieser damaligen Studien die gleichen wie heutzutage – eine steigende Verkehrsbelastung und der bestmögliche Umgang mit dieser – und auch die erstellten Modelle und Überlegungen finden bis heute noch Verwendung.
Die Grundlagen der Verkehrsmodellierung zur Analyse von Verkehrsdynamiken werden in [TK10] aus vielen Blickwinkeln umfangreich beschrieben. Dabei wird zwischen der *Verkehrsflussmodellierung* und der *Verkehrsplanung* unterschieden. Beide Domänen widmen sich zeitlich veränderlichen Verkehrsphänomenen, wobei die Verkehrsflussmodellierung Aspekte betrachtet, die sich in einem Zeitbereich von maximal wenigen Stunden bewegen. Bei der Verkehrsplanung werden dagegen zeitliche Abschnitte mit Dauern von Tagen bis hin zu Jahren untersucht, was in einer unterschiedlichen Auffassung von Dynamik resultiert. Bspw. stellt eine Änderung der grundsätzlichen Verkehrsinfrastruktur ein Instrument der Verkehrsplanung dar, wobei dieser Eingriff einer komplett anderen Dynamik unterliegt als die situationsabhängige Schaltung einer LSA. Dementsprechend ist für das Ziel der intelligenten LSA-Regelung die Verkehrsflussmodellierung entscheidend und die Planung als übergeordnete Modellebene bleibt in dieser Arbeit unangetastet.
Wie schon bei Greenshields wird die quantitative Beschreibung des Verkehrs durch Messungen ermöglicht und damit durch die mittlerweile sehr vielfältigen Messmöglichkeiten heutzutage stark begünstigt. Aus den beobachteten Phänomenen können Modelle entwickelt werden, die über empirische Daten an die tatsächliche Situation angenähert werden

können. Mithilfe dieser *Kalibrierung* der Modelle ist es möglich, diese etwa für Prognosen aber auch für den Live-Einsatz zur Schätzung des jeweiligen Verkehrszustands eines ausgewählten modellierten Verkehrsgebiets zu nutzen. Diese gegenseitige Beeinflussung von Modell und Empirie ist in der folgenden Abbildung 2-1 dargestellt.

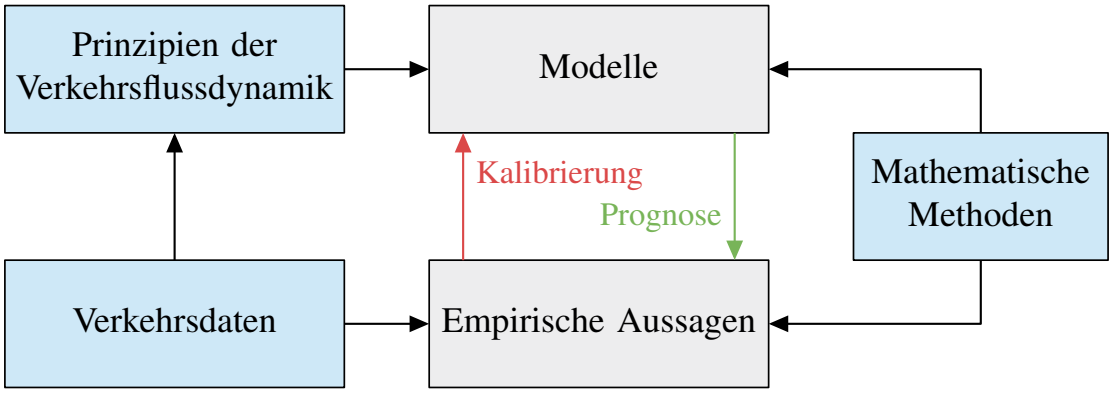


Abbildung 2-1: *Zusammenhänge der Verkehrsmodellierung; angelehnt an [TK10]*

Durch die sich entwickelnden Erfassungsmöglichkeiten im Verkehrsbereich steigt gleichzeitig auch die Modellqualität. Auf diese Weise werden einerseits detailliertere Modellierungsansätze und andererseits darauf aufbauend auch anspruchsvollere Folgeaufgabenstellungen wie die Echtzeitregelung von LSA ermöglicht. Um die dabei gemessenen Werte selbst und deren Erfordernis bei bestimmten Modellierungsansätzen einordnen zu können, wird im nächsten Abschnitt auch auf die verschiedenen Querschnittsdaten des Verkehrs eingegangen. Die Beschreibung dieser Querschnittsdaten ist in die folgende Vorstellung der wichtigsten Modellierungsklassen des Verkehrsflusses integriert, deren Ursprung oft auf Greenshields zurückgeführt wird [TK10; vvVH15]. Die unterschiedlichen Modellierungsklassen sind von großer Bedeutung und bieten verschiedenste Detaillierungsgrade bezüglich der Modellierungstiefe. Diese Möglichkeiten zeigen sich auch im allgemeinen Zeitintervall der Verkehrsflussmodellierung, welches sehr vielfältig ist. Die Zeitspanne erstreckt sich dabei von Sekundenbruchteilen – die menschliche Reaktionszeit beträgt durchschnittlich ca. 0,2 s [WWY+15] – über Zeitabstände zwischen Fahrzeugen im Sekundenbereich und LSA-Umlaufzeiten im Bereich von einer Minute (siehe Abschnitt 2.2.1) bis hin zur Verkehrsnachfrage, die typischerweise stündlich variiert [TK10]. Je nach Modellierungstiefe und Fokus der Untersuchung finden entsprechende Phänomene Berücksichtigung und andere werden vernachlässigt.

In [vvVH15] und [Kes19] kann die Genealogie, Klassifikation und Unterscheidung von Verkehrsmodellen genau nachvollzogen werden. Die Klassifikation kann dabei aufgrund verschiedenster Kriterien wie der Art der Modellgleichungen – (partielle) Differentialgleichungen, diskrete oder statische Modelle –, der Stochastizität, der Berechnungseffizienz

oder der konzeptionellen Grundlage – *heuristische* oder *First-Principles-Modelle*[4] – vorgenommen werden. Klassischerweise wird oftmals auf Basis des Abstraktionsgrades von Verkehr und Fahrerverhalten zwischen der *mikroskopischen*, *mesoskopischen* und *makroskopischen Verkehrsmodellierung* unterschieden.
Eine gute Übersicht dieser drei Modellierungsprinzipien, deren Eigenschaften und Einsatzgebiete im Folgenden weiter beschrieben werden, ist in [Bar10b] einsehbar. Die an dieser Stelle granulierteste Modellierungsart, die mikroskopische Modellierung, setzt bei den einzelnen Entitäten, demnach den Fahrzeugen, eines Verkehrssystems an. Makroskopische Modelle beziehen sich dagegen auf aggregierte Größen und beschreiben mithilfe einer höheren Abstraktion die zeitlich-räumliche Entwicklung von Verkehrssystemen in Analogie zu einem Fluid. Als Hybrid ist die mesoskopische Modellierung zwischen den beiden anderen Modellierungsarten anzusiedeln.

2.1.1 Mikroskopische Verkehrsmodellierung

Mikroskopische Modelle sind gekennzeichnet durch die Beschreibung des longitudinalen und lateralen Verhaltens von Einzelfahrzeugen inkl. der Fahrer, sodass Längsdynamik (Fahrzeugfolge) und Querdynamik (Spurwechsel) berücksichtigt werden. Die *Fahrer-Fahrzeug-Teilchen* bilden als Kollektiv den Verkehrsstrom. Über mathematische Beziehungen wird die Reaktion eines jeden Fahrers abhängig von seinen Nachbarn ausgedrückt. Dementsprechend werden Fahrzeuge zur Reproduktion ihrer Reihenfolge durchnummeriert. Dabei bezeichnet α das betrachtete Fahrzeug, $\alpha - 1$ dessen Vorgänger und $\alpha + 1$ wiederum den Nachfolger, wie in Abbildung 2-2 skizziert.

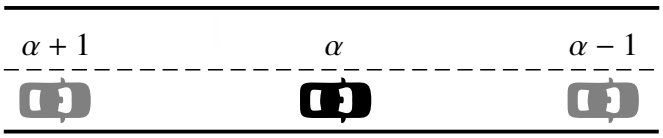


Abbildung 2-2: *Fahrzeugfolgenummerierung für mikroskopische Verkehrsmodelle*

Die Anwendungsgebiete der Mikromodelle ergeben sich direkt aus deren Modellierungsweise. Aufgrund der individuellen Betrachtung der VTN ist es möglich, den Gesamtverkehr heterogen zu modellieren und damit viele verschiedene Fahrzeugtypen und Fahrverhalten zu realisieren. Dementsprechend können spezifische Untersuchungen bzgl. Einzelfahrzeugreaktionen auf vorgegebene infrastrukturelle Rahmenbedingungen und Maßnahmen wie neue LSA-Regelungsstrategien oder Tempolimits angestellt werden. Auf Basis der Individualbetrachtung können Interaktionen von verschiedenen VTN wie PKW,

[4] Heuristische Modelle bestehen aus einfachen mathematischen Ansätzen, wobei First-Principles-Modelle sich aus geforderten Eigenschaften eines Fahrverhaltens wie der Einhaltung von Wunschgeschwindigkeiten ableiten.

LKW, Busse sowie Rad- und Fußverkehr untereinander beobachtet und gleichzeitig Fahrerassistenzsysteme wie die adaptive Beschleunigungsregelung Adaptive Cruise Control (ACC) realitätsnah (weiter-)entwickelt werden. Zudem wird ermöglicht, auch zukünftig denkbare Phänomene aus dem Bereich des autonomen (Misch-)Verkehrs zu integrieren und zu untersuchen. Ohne auch nur annähernd alle Einsatzgebiete zu nennen, bietet diese Art der detaillierten Verkehrsmodellierung zahlreiche Vorteile und Möglichkeiten in verschiedensten Bereichen der Verkehrsentwicklung und -analyse.
Innerhalb der mikroskopischen Verkehrsmodelle sind für die Beschleunigungs- und Spurwechselvorgänge die Positionen[5] $x_\alpha(t)$, Geschwindigkeiten $v_\alpha(t)$ und Beschleunigungen $a_\alpha(t)$ der individuellen Fahrzeuge von großer Bedeutung. Die grundlegenden mikroskopischen Querschnittsdaten bei einer beispielhaften Messung (z. B. der Geschwindigkeit $v_\alpha(t)$) können anhand des Zeit-Weg-Diagramms aus Abbildung 2-3 erläutert werden.

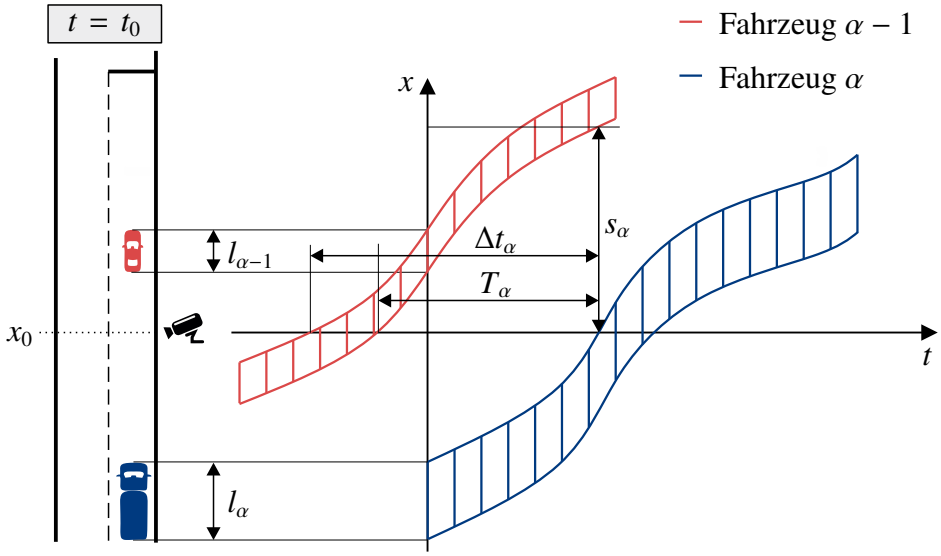


Abbildung 2-3: *Zeit-Weg-Diagramm zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge*

In der Grafik ist der PKW $\alpha-1$ Vorgänger des LKW α mit den jeweiligen Fahrzeuglängen $l_{\alpha-1}$ bzw. l_α. Durch Betrachtung des Messquerschnitts bei x_0 kann die Brutto-Zeitlücke Δt_α zwischen den Fahrzeugen über die Beziehung

$$\Delta t_\alpha = t_\alpha^0 - t_{\alpha-1}^0$$

ausgedrückt werden. Dabei ist t_α^0 der Zeitpunkt, zu dem die Fahrzeugfront von α den Messquerschnitt erreicht. Über die Definition von t_α^1 als analoger Überschreitungszeitpunkt des Hecks wird die Netto-Zeitlücke T_α mit

$$T_\alpha = t_\alpha^0 - t_{\alpha-1}^1 = \Delta t_\alpha - \frac{v_{\alpha-1}}{l_{\alpha-1}}$$

[5] Hier wird zumeist die Fahrzeugfront als Referenz genutzt.

ausgedrückt. Bzgl. des Weges werden der Bruttoabstand d_α mithilfe

$$d_\alpha = v_{\alpha-1}\Delta t_\alpha \tag{2-1}$$

und der Nettoabstand s_α nach Subtraktion der Vorgängerfahrzeuglänge über

$$s_\alpha = d_\alpha - l_{\alpha-1}$$

definiert.

In der Klasse der Mikromodelle existieren weitere Subkategorien, wobei die meisten den *Fahrzeugfolgemodellen* zuzuordnen sind. Auf die zellulären Automaten, die eine sehr berechnungseffiziente Modellierungsmöglichkeit bieten [Hel97], wird dagegen im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter eingegangen und es sei auf weitere Literatur wie [TK10] oder [Hel97] verwiesen.

Die bekanntesten Fahrzeugfolgemodelle basieren auf dem Sicherheitsabstand (*Safe-Distance Models*), dem Stimulus-Reaktions-Prinzip (*Stimulus-Response Models*) oder sog. Aktionspunkten (*Action Point Models*). Ohne detailliert auf jede der Klassen einzugehen (siehe dazu [Bar10b], [vvVH15] oder [Kes19]), sollen die ersten beiden hier kurz adressiert werden.

Die ersten Sicherheitsabstandsmodelle u. a. von Pipes [Pip53] haben als Prämisse, dass der Mindestabstand zum Vorderfahrzeug proportional zur Geschwindigkeit ist und wurden bereits in den ’60er Jahren um eine Verzögerung τ als Reaktionszeit erweitert [New61; KS61]. Diese Verzögerung ermöglicht es Fahrern, eine Kollision zu vermeiden, auch wenn der Vorgänger unvorhersehbar handeln würde. Deutlich später vereinfachte Newell selbst seinen Ansatz [New02] mit der Grundgleichung

$$x_\alpha(t+\tau) = x_{\alpha-1}(t) - s_{\text{jam},\alpha}$$

dazu, dass ein Fahrzeug der Trajektorie seines Vorgängers mit der Verschiebung verursacht durch τ und dem Stauungs- bzw. Stillstandsabstand $s_{\text{jam},\alpha}$ folgt. Neben diesem heuristischem Modell stellt bspw. Gipps in [Gip81] ein First-Principles-Modell mit der Grundgleichung

$$v_\alpha(t+\tau) = \min\left\{\begin{array}{c} v_\alpha(t) + 2{,}5\,\mathrm{a}_{\max,\alpha}\tau\left(1 - \frac{v_\alpha(t)}{v_{\text{des},\alpha}(t)}\right)\sqrt{0{,}025 + \frac{v_\alpha(t)}{v_{\text{des},\alpha}(t)}}, \\ a_{\min,\alpha}\tau + \sqrt{a_{\min,\alpha}^2\tau^2 - a_{\min,\alpha}\left(2s_\alpha^*(t) - v_\alpha(t)\tau - \frac{v_{\alpha-1}^2(t)}{\hat{a}_{\min,\alpha-1}}\right)} \end{array}\right\}, \tag{2-2}$$

vor. Die hier eingesetzte Hilfsgröße $s_\alpha^*(t)$ wird über

$$s_\alpha^*(t) = x_{\alpha-1}(t) - s_{\text{jam},\alpha-1} - x_\alpha(t)$$

definiert. In dem Modell aus Gleichung (2-2) wird die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs α mit Verzögerung τ abhängig von den Fahrzeuggrenzen sowie dessen Wunschgeschwindigkeit $v_{\mathrm{des},\alpha}(t)$ (erster Term der Minimumsbildung) und von der Sicherheit bezogen auf den Vorgänger (zweiter Term der Minimumsbildung) bestimmt. Des Weiteren bezeichnet $a_{\mathrm{min},\alpha}$ die minimale[6] und $a_{\mathrm{max},\alpha}$ die maximale Beschleunigung von α und $\hat{a}_{\mathrm{min},\alpha-1}$ die geschätzte maximale Bremsung des Fahrzeugs $\alpha - 1$. Ein weiteres Modell auf Basis des Sicherheitsabstands wird in Abschnitt 2.3.4 innerhalb der Beschreibung der verwendeten Simulationssoftware vorgestellt.
Das Grundprinzip der Stimulus-Reaktions-Modelle geht auf Chandler in [CHM58] zurück und kann nach [GHR61] über den einfachen Grundsatz der Reaktionsfolge auf das Produkt aus Sensitivität und Stimulus

$$\text{Reaktion}(t+\tau) = \text{Sensitivität} \cdot \text{Stimulus}(t)$$

beschrieben werden[7]. Damit folgt bezogen auf die Beschleunigung des betrachteten Fahrzeugs

$$a_\alpha(t+\tau) = \lambda \cdot (v_{\alpha-1}(t) - v_\alpha(t))\,,$$

mit der Geschwindigkeitsdifferenz zum Zeitpunkt t als Stimulus und der allgemein formulierten Sensitivität λ der Fahrzeugeinheit. Für diese Sensitivität existieren in der Literatur viele verschiedene Ansätze, wobei die meisten in die Beziehung

$$a_\alpha(t+\tau) = \gamma \frac{v_\alpha^m(t)}{[x_{\alpha-1}(t) - x_\alpha(t)]^l} (v_{\alpha-1}(t) - v_\alpha(t)) \tag{2-3}$$

des populären *GHR-Modells* (nach Gazis Herman Rothery (GHR) benannt [GHR61]) eingeordnet werden können. Es wird also eine Abhängigkeit von der eigenen Fahrzeuggeschwindigkeit sowie dem Vorgängerabstand angenommen. Dabei ist γ in Gleichung (2-3) der allgemeine Sensitivitätsparameter und die Exponenten m und l sind Kalibrierparameter zur Modellanpassung.

2.1.2 Makroskopische Verkehrsmodellierung

Makroskopische Modelle werden auch als *hydrodynamische Modelle* bezeichnet, da der Verkehrsfluss grundlegend wie ein strömendes Medium aufgefasst wird. Um den Verkehr auf makroskopischer Ebene zu beschreiben, werden u. a. die räumlich und zeitlich veränderlichen dynamischen Größen des *Verkehrsflusses* $Q(x,t)$, der *mittleren Flussgeschwindigkeit* $V(x,t)$ oder der *Verkehrsdichte* $\rho(x,t)$ genutzt. Die Größen resultieren aus

[6] Die minimale Beschleunigung entspricht der maximalen Abbremsung.
[7] Hier bereits dargestellt mit der integrierten Verzögerung τ.

lokalen Aggregierungen der im vorherigen Abschnitt 2.1.1 gezeigten Einzelfahrzeugdaten, was nach [TK10] zumeist vor Ort mit dem üblicherweise verwendeten Zeitintervall $\Delta t = 60\,\mathrm{s}$ geschieht. Als Konsequenz dieser Mittelung gehen die individuellen Daten verloren, allerdings ermöglicht die höhere Abstraktion auch eine vereinfachte Analyse des Verkehrsflusses hinsichtlich Staus und Störungen, da statt der diskreten einzelnen Teilchen mithilfe der Stromdarstellung ein Übergang zu kontinuierlichen Größen geschaffen wurde. Dementsprechend eignen sich makroskopische Modelle hervorragend zur Entstehungsanalyse derartiger Phänomene, aber auch um deren Ausbreitung und Auswirkungen in einem weitläufigen Verkehrsnetz beurteilen zu können. Ein besonders wichtiger Aspekt für die Verwendung von Makromodellen ist, dass sich durch den geringeren Detaillierungsgrad die Berechnungseffizienz steigert. Auf diese Weise kann entweder ein deutlich größerer Verkehrsraum als der bei mikroskopischen Modellen betrachtet oder das gleiche System schneller berechnet werden. Über das „Werkzeug“ der Aggregierung ist es zudem einfacher möglich, uneinheitliche oder inkonsistente Eingänge gleichzeitig zu nutzen und damit Messungen bzw. die Modellierung weiter abzusichern. Das bekannteste Einsatzgebiet ist wahrscheinlich die Verkehrslageschätzung, welche heutzutage bei nahezu jeder (kurzfristigen) Routenplanung genutzt wird, indem bspw. *Google Maps* für die Untersuchung verschiedener Streckenabschnitte der Route herangezogen wird.
Der Verkehrsfluss $Q(x,t)$ ist in diesen makroskopischen Verkehrsmodellen über die Anzahl an Fahrzeugen $N(t)$ definiert, die einen Messquerschnitt x zum Zeitpunkt t innerhalb eines definierten Zeitintervalls Δt durchqueren

$$Q(x,t) = \frac{N(t)}{\Delta t}.$$

Gemeinhin wird der Verkehrsfluss auf stündlicher Basis beurteilt, sodass in der Regel die Einheit Fahrzeuge pro Stunde ($\frac{\mathrm{veh}}{\mathrm{h}}$) Verwendung findet.
Bei der mittleren Flussgeschwindigkeit $V(x,t)$ wird zumeist das räumliche Geschwindigkeitsmittel[8] genutzt. Damit ergibt sich $V(x,t)$ für jeden Querschnittspunkt x eines festen Messstreckenabschnitts Δx und der sich zum Zeitpunkt t auf diesem befindlichen Fahrzeuganzahl $N(t)$ als das arithmetische Mittel der individuellen Fahrzeuggeschwindigkeiten $v_\alpha(t)$ zu

$$V(x,t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{\alpha=0}^{N(t)-1} v_\alpha(t).$$

Die Einheit ist üblicherweise analog zu den Einzelfahrzeugen in Kilometern pro Stunde ($\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$) angegeben.

[8] Oftmals wird die räumliche auch als lokale Messung an einem bestimmten Querschnitt und die zeitliche als momentane Messung zu einem bestimmten Zeitpunkt bezeichnet [Leu72].

Als dritte Basisgröße makroskopischer Modellierungen wird die Verkehrsdichte $\rho(x,t)$ über

$$\rho(x,t) = \left(\frac{1}{N(t)} \sum_{\alpha=0}^{N(t)-1} d_\alpha \right)^{-1} \tag{2-4}$$

definiert, wenn die Dichte aus Querschnittsdaten ermittelt wird. Dabei ist die Dichte der Kehrwert des mittleren Bruttoabstandes (siehe Gleichung (2-1)). Alternativ kann sie auch für einen beliebigen Streckenabschnitt Δx (um den Querschnitt x) als das Verhältnis der Fahrzeuganzahl $N(t)$ bezogen auf ebendiesen Abschnitt zu einem bestimmten Zeitpunkt t mit

$$\rho(x,t) = \frac{N(t)}{\Delta x} \tag{2-5}$$

beschrieben werden. Als Einheit wird für die Verkehrsdichte standardmäßig Fahrzeuge pro Kilometer ($\frac{\text{veh}}{\text{km}}$) verwendet. Da sowohl in (2-4) als auch (2-5) lediglich die Fahrzeuganzahl eingeht und nicht etwa eine Abhängigkeit zur Fahrzeuglänge besteht, kann der gleiche resultierende Wert einer Dichte sehr unterschiedlichen Verkehrssituationen und dementsprechend „Füllzuständen“ zugeordnet werden.
Aus diesem Beweggrund ist die einheitenlose Größe des *Belegungungsgrades* $O(x,t)$ für einen Querschnitt x zum Zeitpunkt t ein oftmals zusätzlich betrachteter Wert derartiger Modelle. Charakterisiert wird der Belegungsgrad (im Englischen Occupancy) als Anteil der Gesamtbelegungsdauer aller Fahrzeuge des Messquerschnitts am Intervall Δt zu

$$O(x,t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{\alpha=0}^{N(t)-1} (t_\alpha^1 - t_\alpha^0).$$

Die Fahrzeuglänge geht damit über den Zeitpunkt t_α^1, an dem das Heck eines Fahrzeugs α den Querschnitt passiert, in den Belegungsgrad ein. Um diese unterschiedlichen Definitionen zu verdeutlichen, soll das folgende Zahlenbeispiel dienen. Eine Straße der Länge 50 m wird einerseits von zwei Sattelzügen à 15 m und andererseits von zwei Motorrädern à 2,5 m Fahrzeuglänge belegt (siehe die nicht maßstabsgetreue Skizze in Abbildung 2-4). Die Dichten ρ_A und ρ_B belaufen sich dementsprechend jeweils auf 40 $\frac{\text{veh}}{\text{km}}$. Wenn am En-

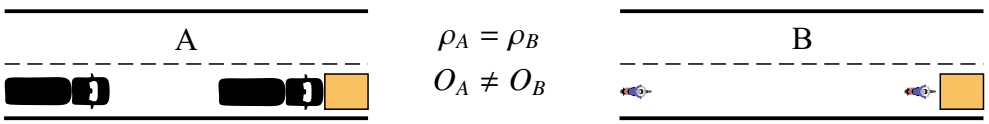


Abbildung 2-4: *Skizze des Beispiels zum Unterschied der makroskopischen Größen Dichte und Belegung*

de der gleichen Straße ein Messquerschnitt der Länge 5 m platziert ist und sowohl die Sattelzüge als auch die Motorräder jeweils mit einer konstanten Geschwindigkeit von $36\,\frac{\text{km}}{\text{h}} = 10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ fahren, dann wird die unterschiedliche Auslastung bei Betrachtung der

Zeitspanne $\Delta t = 5\,\mathrm{s}$ deutlich. Die Belegung des Beispielquerschnitts hervorgerufen durch die Sattelzüge beträgt $O_A = 80\,\%$ bzw. der Motorräder lediglich $O_B = 30\,\%$.
Analog zu den vielen verschiedenen mikroskopischen Verkehrsmodellen wurde mit der Zeit eine Vielzahl an Theorien und Modellen auf makroskopischer Ebene entwickelt und erforscht. Viele davon sind in [vvVH15] sowie [Kes19] übersichtlich dargestellt oder in [TK10] detaillierter eingeführt. Einige Grundlagen sollen auch in diesem Teil der Arbeit vorgestellt werden, um ein Grundverständnis der Theorie zu vermitteln.
Zwischen den drei wichtigsten Größen der Makromodelle kann ein funktionaler Zusammenhang hergestellt werden, der sich wie folgt darstellt

$$Q(x,t) = \rho(x,t) \cdot V(x,t)$$

und die Bezeichnung *hydrodynamische Flussbeziehung* oder *Fundamentalbeziehung* trägt. Wird diese Beziehung bei Annahme eines homogenen Verkehrs im Gleichgewichtszustand in Diagramme aufgetragen, so werden diese *Fundamentaldiagramme* genannt[9]. Abbildung 2-5 zeigt ein charakteristisches Fundamentaldiagramm, welches alle Relationen gebündelt in einer Darstellung zusammenfasst.

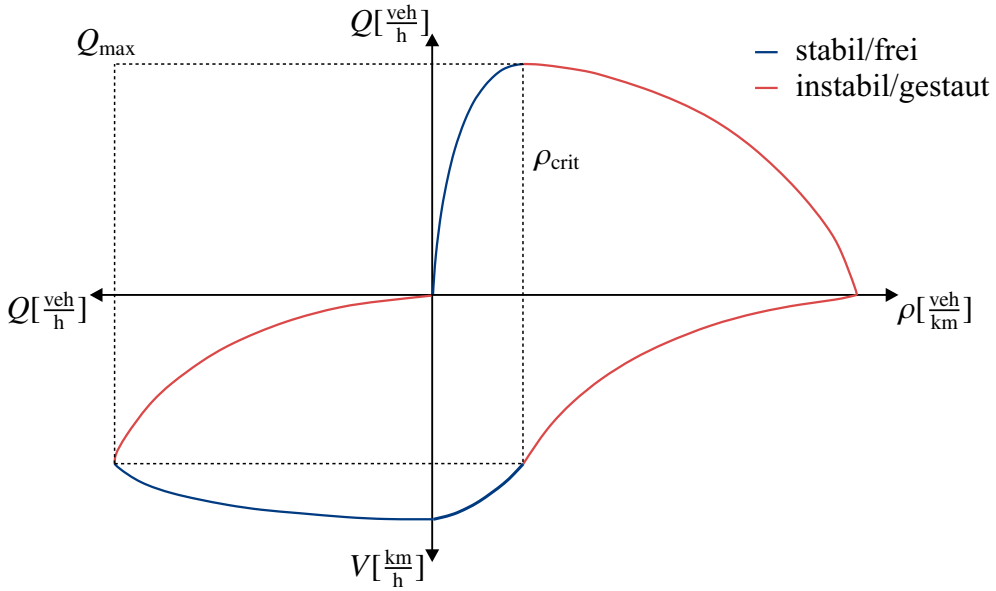


Abbildung 2-5: *Qualitative Verläufe eines exemplarischen Fundamentaldiagramms*

Jeder Punkt des Graphen im Fundamentaldiagramm stellt dabei den Zustand stationären Verkehrs ohne Änderung des Flusses dar, welcher als *Gleichgewichtszustand* oder *Equilibrium* bezeichnet wird. In der Abbildung 2-5 sind mit dem maximalen Fluss $Q_{\max}$ und der kritischen Verkehrsdichte ρ_{crit} zudem die kennzeichnenden Merkmale derartiger Diagramme skizziert. Über diese Größen wurde der Verlauf in die Bereiche des *stabilen* oder

[9] Der Begriff des Fundamentaldiagramms wird in der Literatur teilweise ausschließlich für das Diagramm des Zusammenhangs zwischen Verkehrsfluss und -dichte verwendet [BZBP13; TK10].

auch *freien* Verkehrsflusses in blau und des *instabilen* bzw. *gestauten* Flusses in rot eingeteilt. Außerdem sind in der beispielhaften Darstellung die Charakteristiken der einzelnen Subdiagramme zu erkennen. Die Graphen der Fluss-Dichte- und Fluss-Geschwindigkeits-Relation weisen jeweils eine typische konkave Ausprägung auf und das Geschwindigkeits-Dichte-Diagramm ist monoton fallend.
Zur Beschreibung des makroskopischen Verkehrsflusses und dessen Dynamik haben zunächst [LW55] und [Ric56] mithilfe der partiellen Differentialgleichung

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = 0. \tag{2-6}$$

eine Erhaltungsgleichung für Fahrzeuge auf homogenen Straßen formuliert, die oftmals auch *Kontinuitätsgleichung* genannt wird[10]. Die Bedingung der Straßenhomogenität entspricht offensichtlich einem sehr einfachen Fall und folglich kann die Kontinuitätsgleichung in (2-6) derart modifiziert werden, dass auch Heterogenitäten wie Zu- und Abfahrten oder variable Fahrstreifenanzahlen berücksichtigt werden können [BZBP13]. Durch die Annahme einer statischen Beziehung des Verkehrsflusses $Q(x,t)$ respektive der mittleren Flussgeschwindigkeit $V(x,t)$ von der Dichte $\rho(x,t)$

$$Q(x,t) = Q_e(\rho(x,t)), \quad \text{bzw.} \quad V(x,t) = V_e(\rho(x,t)),$$

wird die Kontinuitätsgleichung (2-6) zu einem vollständig lösbaren makroskopischen Verkehrsflussmodell

$$\left\{ \begin{array}{c} \dfrac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \dfrac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = 0, \\ Q(x,t) = Q_e(\rho(x,t)) = \rho(x,t) \cdot V_e(\rho(x,t)) \end{array} \right\}$$

ergänzt. Derartig beschaffene Makromodelle werden nach Lighthill, Whitham und Richards *LWR-Modelle* oder First-Order-Modelle genannt. Sie sind gerade dadurch gekennzeichnet, keine Dynamik der mittleren Geschwindigkeit zu formulieren, sondern eine statische Abhängigkeit von der einzig dynamischen Dichtefunktion zu berücksichtigen. Sehr bekannt ist bspw. die bereits von Greenshields [Gre34] beobachtete Beziehung

$$V_e(\rho(x,t)) = V_{\max}\left(1 - \frac{\rho(x,t)}{\rho_{\max}}\right),$$

bei der die Geschwindigkeit linear von $V_{\max}$ bei freiem Verkehr bis zum Stillstand bei maximaler Stauung $\rho_{\max}$ mit steigender Verkehrsdichte abnimmt[11]. Durch elementare Anpas-

[10] Auf die genaue Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet, kann aber z. B. in [Mer22], [TK10] oder [Kes19] nachvollzogen werden.
[11] In der Literatur wird teilweise lediglich dieses First-Order-Modell als LWR-Modell bezeichnet.

sungen können bestimmte Phänomene wie Mehrspurigkeit oder Heterogenität zusätzlich in den Modellen berücksichtigt werden [BZBP13; Hel97].
Die größten Nachteile dieser Modellierung sind in den Übergängen zwischen Gleichgewichtszuständen zu finden, da auf diese Weise eine unrealistische instantane Geschwindigkeitsänderung angenommen wird. Abhilfe schaffen dabei die sog. *Second-Order-Modelle*, die neben der dynamischen Verkehrsdichtefunktion eine weitere dynamische Funktion zur Berechnung der mittleren Flussgeschwindigkeit verwenden. Wird die Beschleunigung als substantielle Ableitung der Geschwindigkeit für Fluide [Ach90; Hel97; TK10]

$$\frac{DV(x,t)}{Dt} := \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + V(x,t)\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = A(\rho(x,t), V(x,t))$$

zusätzlich in die Modellklassendarstellung integriert, dann resultiert

$$\left\{ \begin{array}{c} \dfrac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \dfrac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = 0, \\ Q(x,t) = \rho(x,t) \cdot V(x,t), \\ \dfrac{DV(x,t)}{Dt} = A(\rho(x,t), V(x,t)) \end{array} \right\}.$$

Im Allgemeinen unterscheiden sich die Second-Order-Modelle nur von der gewählten Beschleunigungsfunktion, indem die unterschiedlichen Terme der folgenden zusammenfassenden Darstellung

$$\begin{aligned} \frac{DV(x,t)}{Dt} = & \underbrace{-\frac{1}{\rho(x,t)}\frac{\partial P(\rho(x,t))}{\partial x}}_{Druck} + \underbrace{\nu\left(\rho(x,t)\right)\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2}}_{Diffusion} \\ & + \underbrace{\frac{V_e(\rho(x,t)) - V(x,t)}{\tau(\rho(x,t))}}_{Relaxation} + \underbrace{A_{\text{rmp}}(x,t)}_{Rampe} \end{aligned} \tag{2-7}$$

verschieden einbezogen und formuliert werden. Dabei drückt der Druckterm in (2-7) die Antizipation der Fahrer als Reaktion auf die Verkehrssituation vor ihnen sowie die Inklusion einer endlichen Geschwindigkeitsvarianz aus. Der Diffusionsterm wird verwendet, um Übergänge und sog. *Schockfronten* zu glätten, die Relaxation beschreibt die Anpassung der Geschwindigkeit $V(x,t)$ an die dichteabhängige Gleichgewichtsgeschwindigkeit $V_e(\rho(x,t))$ und der letzte Term der Rampe den Einfluss von zu- und abfließenden Fahrzeugen. Das *Payne-Whitham-Modell*[12] nach [TK10], welches aus einem mikroskopischen Fahrzeugfolgemodell entwickelt wurde, dient an dieser Stelle als Beispiel. Bei dessen Beschleunigungsformulierung wurden die Terme der Relaxation mit festem Intervall τ als Zeitkonstante der Fahrerreaktion und des Drucks über $P = -\frac{V_e(\rho(x,t))}{2\tau}$ in der

[12] Benannt nach Payne [Pay71] und Whitham [Whi74].

dichteabhängigen Equilibriumsgeschwindigkeitsänderung beachtet. Dagegen wurden die Terme der Diffusion und Rampe jeweils vernachlässigt, sodass sich

$$\frac{DV(x,t)}{Dt} = \frac{V_e(\rho(x,t)) - V(x,t)}{\tau} + \frac{V_e'(\rho(x,t))}{2\tau\rho(x,t)} \cdot \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial x}$$

ergibt. Da $V_e(\rho(x,t))$ nicht weiter spezifiziert ist, kann die Gleichgewichtsgeschwindigkeit aus jedem Fundamentaldiagramm entnommen werden. Im Gegensatz zu First-Order-Modellen ist es mithilfe des Payne-Whitham-Modells möglich, Instabilitäten im Verkehrsdichtebereich zu erzeugen und damit bspw. *Stop-and-Go-Wellen* zu erklären [Hel97]. Generell können durch Second-Order-Modelle nicht nur Systeme mit homogenen Straßenabschnitten modelliert, sondern auch zusätzliche Modellelemente wie die Zu- und Abflüsse, aber auch Phänomene wie eine variierende Spuranzahl, Abbiegevorgänge oder LSA berücksichtigt werden. Vor allem in der Dissertation [Mer22] sind einige Inhomogenitäten in diesem Zusammenhang übersichtlich dargestellt.

2.1.3 Mesoskopische und weitere Verkehrsmodellierungen

Neben den beiden wichtigsten Modellierungsebenen der mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsmodelle können noch weitere Ebenen oder Modellklassen definiert werden. Mesoskopische Verkehrsmodelle sind in der folgenden Übersichtsabbildung 2-6, welche die Einordnung bzgl. der Modelltiefe sowie die Beziehungen der verschiedenen Modellierungsebenen aufzeigt, nicht explizit aufgelistet, da sie sich grundsätzlich als Verknüpfung von Mikro- und Makromodellen charakterisieren lassen.

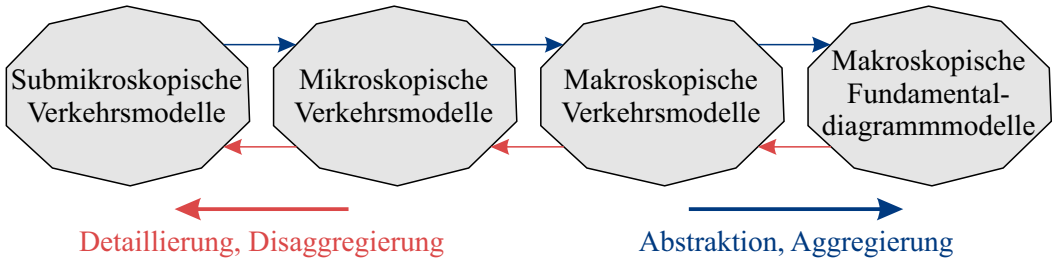


Abbildung 2-6: Darstellung der Beziehung der verschiedenen Modellierungsebenen von Verkehrsmodellen

Einerseits können sie derart gestaltet werden, dass Modelle abgeschlossene Teilmodelle mit mikroskopischen und makroskopischen Eigenschaften enthalten, andererseits aber auch deren Ansätze kombinieren, indem bspw. Parameter eines Mikromodells von makroskopischen Größen wie der Verkehrsdichte abhängen. Ein besonderes Augenmerk muss an dieser Stelle jeweils auf die Schnittstellen zwischen den Modellierungsebenen gelegt werden, damit diese konsistent sind [Kes19].
Die sog. *submikroskopischen Verkehrsmodelle* gehen noch detaillierter (rote Pfeile) auf

die Modellierung der Fahrer-Fahrzeug-Teilchen ein, beinhalten damit bspw. auch Fahrzeug- sowie Fahrdynamikmodelle und finden in Bereichen wie der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ihren Einsatz.Aufgrund des hohen Detailgrades der Einzelfahrzeuge ist daher auch eine flächendeckende Simulation größerer Verkehrsgebiete aus rechentechnischen Gründen begrenzt, sodass oftmals nur spezielle Fahrzeuge (wie das Ego-Fahrzeug) derartig modelliert werden und ansonsten auf der nächst gröberen mikroskopischen Ebene operiert wird. Die abstraktesten Modelle sind die *makroskopischen Fundamentaldiagrammmodelle*, die zumeist dazu verwendet werden, urbane Gebiete oder ganze Städte in einem einzigen Zusammenhang darzustellen [KHv12]. Sie beschreiben genau wie die bereits im vorherigen Abschnitt 2.1.2 gezeigten Fundamentaldiagramme die statische Fundamentalbeziehung, mit dem Unterschied, dass sie ganze Straßennetzabschnitte mit mehreren Straßen und Kreuzungen widerspiegeln. Es ist wichtig dabei zu beachten, dass sich die Aggregierung von Daten zumeist als unproblematisch darstellt, da z. B. über die Definition von räumlichen Bereichen mikroskopische zu makroskopischen Daten zusammengefasst werden können. Die Größe dieser Bereiche ist dahingehend entscheidend, dass sie groß genug sein müssen, um mehrere VTN zu enthalten, aber auch klein genug, um die zu beobachtenden Phänomene wie Stauausbreitungen abbilden zu können [TK10]. Bei der Disaggregierung besteht dagegen das Problem, dass aus einer vorhandenen zusammengefassten Information Einzelinformationen gewonnen werden sollen. Beim Übergang von Makro- zu Mikromodellen bietet dabei die Stochastik insofern eine Möglichkeit zur Detaillierung, als dass durch die Annahme einer gewissen Verteilung, wie der Gleichverteilung von Fahrzeugen innerhalb eines Straßenabschnitts, mit bekannter Dichte auf die individuellen Positionen geschlossen werden kann [Kes19].

2.2 Verkehrstechnik und deren Richtlinien

Gesetze und Richtlinien wandeln sich im Laufe der Jahre und Zeit, was sich bspw. an der Diskussion bezüglich des Tempolimits in Deutschland zeigt. Laut einer Umfrage des Umweltbundesamts aus dem Jahr 2021 befürworten mit 64 % mehr als die Hälfte der Befragten „eher“ diese Anpassung auf deutschen Autobahnen [Umw21]. Neue politische Leitbilder wie die allgemeine Emissionsreduktion oder die Priorisierung spezieller Verkehrsgruppen erfordern dabei sogar oftmals eine Anpassung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur. Dementsprechend sind die Grundlagen und derzeitigen Umsetzungen in der Verkehrstechnik besonders relevant, um in der Modellbildung sämtliche wesentlichen Aspekte des zu betrachtenden realen Verkehrssystems abbilden zu können.
Da sich diese Arbeit mit der Verbesserung der allgemeinen Verkehrssituation durch den intelligenten Eingriff in den Straßenverkehr an Kreuzungen und insbesondere deren LSA

beschäftigt, werden zunächst die wichtigsten Aspekte der LSA als Regulatoren bzw. deren spezifische Regeln und Eigenschaften thematisiert. Im Anschluss wird auf die entsprechend benötigte Sensorik zur Informationsgewinnung eingegangen ohne dabei einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

2.2.1 Lichtsignalanlagen und deren regulatorische Grundlagen

Die allgemeinen Verkehrsregeln in Deutschland sind durch die *Straßenverkehrs-Ordnung* [BRD21] festgelegt. Die Nutzung einer LSA in einem definierten Verkehrsbereich bzw. an einem Knotenpunkt eines Verkehrsnetzes ist nach den sog. *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)* [FGSV15b], dem wichtigsten deutschen Richtlinienwerk im Kontext von LSA, eben dann vorzusehen, wenn bspw. Gefahrenpotentiale oder Verkehrsüberlastungen existieren. Ebenso kann der Einsatz von LSA aber auch erfolgen, wenn eine Qualitätsverbesserung des Verkehrsablaufs bestimmter Verkehrsbereiche erwünscht ist. Dabei sind die entsprechenden Lichtsignale einer LSA priorisiert gegenüber anderen Vorrangregeln und Verkehrszeichen zu beachten, sodass auf diese lediglich zurückgegriffen werden muss, falls die zugehörige LSA nicht in Betrieb ist [BRD21]. Auch beim Entwurf von LSA helfen die Richtlinien, in denen von den Grundsätzen über die Planung von Signalprogrammen und Steuerverfahren bis hin zur technischen Umsetzung und dem Qualitätsmanagement viele Aspekte beschrieben werden [FGSV15b]. Von daher dienen die RiLSA somit auch als Grundlage und Quelle dieses Abschnitts, falls andere nicht explizit erwähnt werden. Der Aufbau von LSA kann über deren drei grundlegenden Komponenten *Signalgeber*, *Detektoren* und *Steuergerät* beschrieben werden. Die Detektoren werden im folgenden Abschnitt 2.2.2 über die Sensoren der Verkehrstechnik näher beschrieben und ein exemplarisches Steuergerät ist in Abbildung 2-7 dargestellt.
Die Signalgeber können den Freigabezustand einer (Fahr-)Spur taktil, akustisch oder optisch über die Lichtzeichen darstellen. In dieser Arbeit werden lediglich die optischen Signale behandelt, deren Wechsellichtzeichen in der Regel über die grundsätzlich festgelegten Farbfolgen *„Grün – Gelb – Rot – Rot/Gelb – Grün“* für den Straßenverkehr[13] und *„Grün – Rot – Grün“* für den Fußverkehr mit den VTN interagieren. Die Kopplung der taktilen und akustischen Signale erfolgt dabei über das bereits genannte Steuergerät. Nach [BRD21] haben die verschiedenen Lichtzeichen dabei folgende allgemein bekannte Bedeutung:

- *Grün*: „Der Verkehr ist freigegeben.“
- *Gelb* bzw. *Rot/Gelb*: „Vor der Kreuzung auf das nächste Zeichen warten.“
- *Rot*: „Halten vor der Kreuzung.“

[13] Es besteht dabei eine Abhängigkeit von der jeweiligen Signalgeberart und Farbfelderanzahl.

Abbildung 2-7: *Foto eines beispielhaften Steuergeräts der Firma Stührenberg mitsamt Schaltschrank [PPS22]*

Gilt eines dieser Signale für alle Fahrzeuge ist ein sog. Vollsignal zu verwenden. Dient ein Signal wiederum der Steuerung eines spezifischen Verkehrsstroms, bspw. dem Fuß-, Rad- oder Busverkehr, so ist dies durch ein kennzeichnendes Symbol darzustellen. Wird ein Pfeil als Symbol in das Lichtzeichen integriert, gilt das Signal lediglich für den hervorgehobenen Verkehrsstrom, welchem eine Priorität zugewiesen ist. Generell existieren sehr viele verschiedene Ausprägungen der Signalgeber, weshalb zur Verdeutlichung in der Abbildung 2-8 drei typische, bekannte Varianten und ein weniger geläufiges Bussignal dargestellt sind.

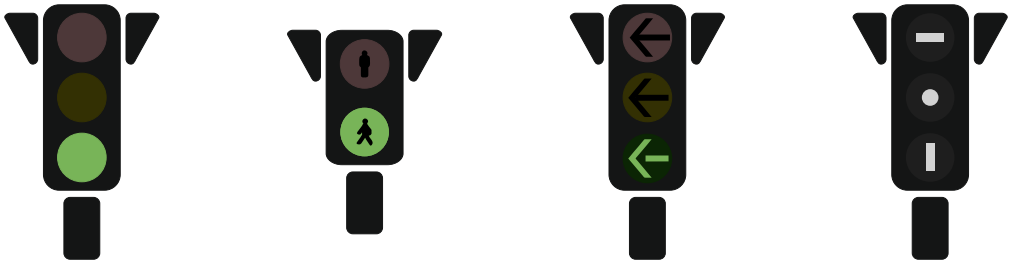


Abbildung 2-8: *Beispielausführungen von Signalgebern bei LSA: Vollsignal (links), Fußverkehrssignal (halblinks), dreifeldiges Richtungssignal (halbrechts) und ÖPNV-Signal (rechts)*

Sofern Signalgeber des Straßenverkehrs keine drei Felder besitzen, sind sie als Zusatz eines Hauptsignals zu verstehen. Auf diese Weise kann bspw. trotz roten Vollsignals ein Rechtsabbiegevorgang signalisiert und damit ermöglicht werden [FGSV15b]. Die bei einem spezifischen Knotenpunkt zum Einsatz kommenden Signalgeber einer LSA werden zumeist mit weiteren ortsspezifischen Daten in dem *(Straßen-)Lageplan* einer LSA zusammengefasst. Für die namensgebende Schlosskreuzung des PPS ist dieser maßstabsgetreue Lageplan in Abbildung A2-1 des Anhangs dargestellt und enthält neben den allgemeinen Lageinformationen die entsprechenden Signalgruppen mit verwendeten Signal-

gebern sowie u. a. die Positionen für den Schaltschrank inkl. LSA-Steuergerät und den fest installierten Sensoren.
Mehrere Signalgeber, die jeweils dieselben Fahrzeugströme steuern und jederzeit dieselben Lichtsignale geben, werden zusammengefasst als *Signalgruppe* bezeichnet. Die Kombination der Lichtzeichen aller Signalgruppen eines Knotenpunktes kann als *Phase* definiert werden. Für die korrekte Definition von Phasen, also deren Konformität, ist die Verträglichkeit der einzelnen Verkehrsströme zu beachten. Es wird zwischen *verträglichen*, *bedingt verträglichen* und *nicht verträglichen* Verkehrsströmen differenziert. Verträgliche Fahrzeugströme besitzen keinerlei Konfliktflächen, an denen die Beteiligten miteinander kollidieren könnten, weshalb sie stets gemeinsam in einer Phase freigegeben werden dürfen. Diese Situation ist in der linken T-Kreuzung[14] von Abbildung 2-9 skizziert. Bedingt verträgliche Verkehrsströme weisen, wie in Abbildung 2-9 mittig gezeigt, in Folge eines Abbiegevorgangs eine gemeinsame Konfliktfläche mit dem Gegen-, Fuß- oder Radverkehr auf. In dem rechten Teil der gleichen Abbildung ist indes ein Beispiel für nicht verträgliche Verkehrsströme skizziert, da sich beide Fahrtverläufe überschneiden, es also eine Konfliktfläche gibt.

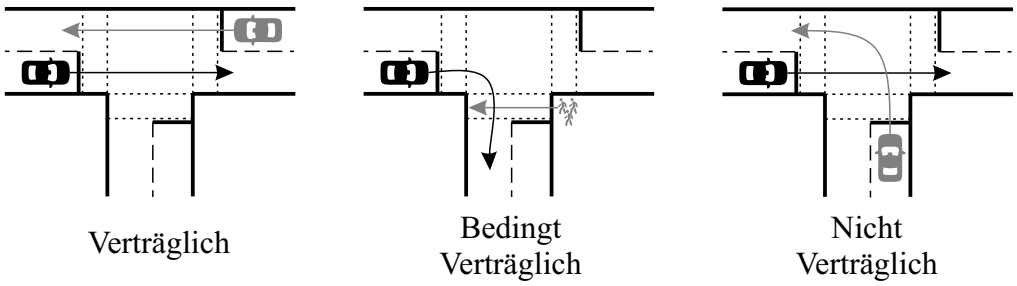


Abbildung 2-9: *Darstellung von Beispielen der verschiedenen Verträglichkeitsarten von Verkehrsströmen*

Die knotenspezifische Konzipierung einer LSA erfolgt durch die Festlegung zweckmäßiger Phasen und Phasenfolgen. Das heißt, dass nicht zwingend alle möglichen Phasen und Phasenfolgen berücksichtigt werden, sondern eine bewusste Auswahl derjenigen konformen getroffen wird. Auf diese Weise wird eine gewisse Übersichtlichkeit für den gesamten *Phasenfolgeplan* gewährleistet, für welchen ein rudimentäres Beispiel in Abbildung 2-10 dargestellt ist. Die einzelnen Phasen für diese LSA sind jeweils als Kreise skizziert und eindeutig im oberen Teil benannt, die freigegebenen Fahrzeugströme als Skizzen hervorgehoben und die Phasenübergänge über Pfeile zwischen den jeweiligen Phasen definiert. Auf diese Weise gibt in dem abgebildeten Beispiel die Phase 4 den gesamten aus Süden kommenden Verkehr sowie den vertikalen Fußverkehr frei und erlaubt Übergange in „Alles Rot“ (Phase 1) und in Phase 2. Dieses Beispiel dient der Einführung und Erläuterung der verschiedenen Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit LSA und

[14] Da eine derartige Kreuzungsgeometrie aus der Vogelperspektive wie der Buchstabe aussieht.

könnte u. a. für die in Abbildung 2-9 skizzierte Kreuzung genutzt werden. Dementsprechend soll es auch im weiteren Verlauf dieses Abschnitts weiter verwendet werden. Im Allgemeinen sind Phasenpläne jedoch komplexer und enthalten neben einer größeren Phasenanzahl ebenso weitere Phasenübergänge. Als Beispiele können beide im Anhang vorliegenden Abbildungen A2-5 und A2-6 herangezogen werden, die einerseits bereits deutlich komplexer als der hier dargestellte Phasenplan sind und andererseits sehr gut die mögliche Modifikation des Plans ohne hardwareseitige Änderung der LSA zeigt. Die Weiterentwicklung dieses Phasenplans ist ein Teil der infrastrukturellen Rahmenbedingungen, welche für die Realumsetzung des PPS in Kapitel 6 notwendig waren.

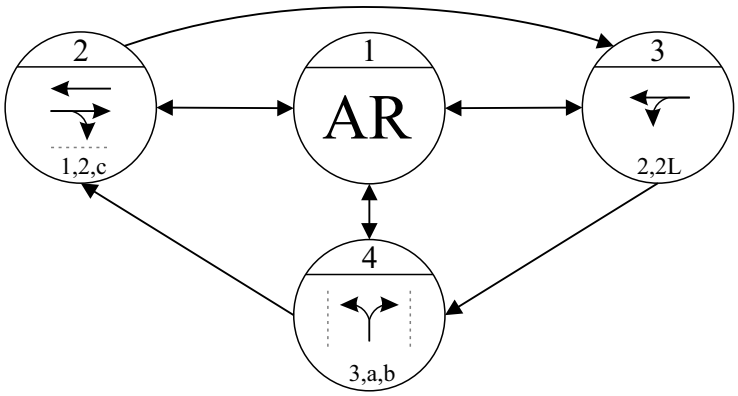


Abbildung 2-10: *Beispielhafter Phasenfolgeplan der Knotengeometrie aus Abbildung 2-9*

Die Schaltungslogik, also die Entscheidungstheorie und -findung für die deterministische Zuordnung eines Schaltvorgangs von einer jetzigen in die folgende Phase, ist der zentrale Aspekt einer LSA und wird vom Steuergerät umgesetzt. Vor der Betrachtung verschiedener Logikarten bzw. Steuerungstypen und -verfahren von LSA im nächsten Abschnitt 2.2.1 gilt es zunächst die wesentlichen Regeln und Gesetzmäßigkeiten für einen gewünschten Phasenübergang zu klären. Neben den Auswahleinschränkungen, die durch den Phasenfolgeplan bzw. die Festlegung von möglichen Phasenübergängen begründet sind, wird der eigentliche Phasenübergang durch definierte zeitliche Aspekte bestimmt. Es müssen dabei fest geregelte *Übergangs-* und *Zwischenzeiten* sowie *Mindestfreigabezeiten* berücksichtigt werden[15]. Die Steuergeräte von LSA gewährleisten die Einhaltung der im Folgenden erläuterten Zeiten und die Zulässigkeit der Phasenübergänge. Außerdem überwachen sie das System auch bezüglich technischer Störungen, erfassen und verarbeiten Sensorsignale und bewerkstelligen die Kommunikation mit dem übergeordneten Verkehrsrechner. In Deutschland arbeiten die Steuergeräte in der Regel mit einer Schritt-

[15] In der Regel existieren noch weitere Parameter wie bspw. maximale Sperrzeiten von Signalen, allerdings sollen an dieser Stelle lediglich die notwendigen bzw. elementaren Grundlagen beschrieben werden.

weite von $\Delta t = 1\,\mathrm{s}$[16], sodass auch alle bei der LSA-Planung relevanten zeitlichen Größen zu vollen Sekunden aufgerundet werden [FGSV15b]. Neben dem Wechselvorgang an sich wird in [FGSV15b] auch die Zeitspanne des Wechsels zwischen zwei Phasen des Signalprogramms als *Phasenübergang* bezeichnet. Detaillierter beschrieben, startet der Phasenübergang mit dem ersten Aufheben einer Signalfreigabe innerhalb der endenden Phase und endet mit der letzten Freigabe der beginnenden Phase. Die genaue Dauer eines Phasenübergangs ist dabei von den Übergangs- und Zwischenzeiten abhängig.
Die Übergangszeit oder auch Gelbzeit t_G beschreibt die Dauer des Übergangssignals Gelb und berechnet sich bei Ende der Freigabezeit für Kraftfahrzeuge im Allgemeinen in Abhängigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit v_{zul} der jeweiligen Zufahrtsstraße der LSA zu

$$t_G = \begin{cases} 3\,\mathrm{s}, & \text{falls } v_{\mathrm{zul}} = 50\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}, \\ 4\,\mathrm{s}, & \text{falls } v_{\mathrm{zul}} = 60\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}, \\ 5\,\mathrm{s}, & \text{falls } v_{\mathrm{zul}} = 70\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}. \end{cases}$$

Für den Fall des Übergangs von Sperrzeit zur Freigabezeit wird als Vorbereitung auf die folgende Freigabe $t_{RG} = 1\,\mathrm{s}$ festgelegt. Bei gesondert signalisierten Abbiegevorgängen oder für den ÖPNV können die Gelbzeiten wiederum variieren. Beim Fuß- und Radverkehr wird zumeist auf ein gelbes Lichtsignal verzichtet, sodass folgerichtig auch keine Übergangszeiten vorliegen [FGSV15b].
Wie bereits erwähnt, setzt sich die Dauer eines Phasenübergangs aus Übergangszeiten und Zwischenzeiten zusammen. Das Zeitintervall vom Ende der Freigabe eines Verkehrsstroms bis zum Beginn der Freigabe des nächsten nicht oder nur bedingt verträglichen Verkehrsstroms (entsprechend der sog. *Verriegelungsmatrix*) definiert die Zwischenzeit t_Z. Die Zwischenzeit selbst ist die Summe aus der Überfahrzeit $t_{ü}$, der Räumzeit t_r und der negativen Einfahrzeit t_e. Demnach gilt

$$t_Z = t_{ü} + t_r - t_e. \tag{2-8}$$

In den Richtlinien [FGSV15b] werden für die Berechnung der Überfahrzeiten und Räumzeiten insgesamt sechs Fälle mit variierenden Annahmen bzgl. Geschwindigkeiten, Wegen und Längen unterschieden:

Fall 1: Geradeaus fahrende Kraftfahrzeuge räumen.

Fall 2: Abbiegende Kraftfahrzeuge räumen.

Fall 3: ÖPNV räumt ohne Halt vor dem Knotenpunkt.

Fall 4: ÖPNV räumt bei Halt vor dem Knotenpunkt.

[16] Die Signalbaufirma Stührenberg (Projektpartner im PPS) nutzt nach eigenen Angaben in anderen Ländern bereits deutlich kleinere Schrittweiten von $\Delta t = 0{,}1\,\mathrm{s}$, wobei rein technisch mit den Steuergeräten sogar noch höhere Taktraten möglich sein sollen.

Fall 5: Radverkehr räumt.

Fall 6: Fußverkehr räumt.

Vor der Behandlung beispielhafter Situationen werden die dafür notwendigen Begrifflichkeiten und Definitionen geklärt, welche vor allem durch die Darstellung in Abbildung 2-11 besser ersichtlich werden. Dabei ist zunächst die Überfahrzeit $t_{ü}$ als das Zeitintervall zwischen dem Ende der Freigabe eines Verkehrsstroms und dem anschließenden Beginn der Räumzeit t_r definiert. Für die Berechnung der Räumzeit t_r wird über den Grundräumweg s_0, also den Weg von der Haltlinie des zuvor freigegebenen Verkehrsstroms bis zum sog. *Konfliktpunkt* mit dem einfahrenden Verkehrsstrom, der Räumweg s_r mithilfe der Vorschrift

$$s_r = s_0 + l_{\mathrm{FZ}} \tag{2-9}$$

bestimmt. Anhand der Räumgeschwindigkeit v_r ergibt sich infolgedessen die Räumzeit t_r zu

$$t_r = \frac{s_r}{v_r}.$$

In (2-9) wird dabei eine fiktive Fahrzeuglänge l_{FZ} der VTN des betrachteten Verkehrsstroms angenommen, welche in den entsprechenden Richtlinien je nach Fall unterschieden wird. Schließlich charakterisiert die Einfahrzeit t_e die benötigte Dauer eines Fahrzeugs, den Einfahrweg s_e zurückzulegen, der wiederum die Strecke von der Haltlinie des beginnenden Verkehrsstroms bis zum Konfliktpunkt ausmacht.
Die Abbildung 2-11 zeigt am Beispiel der bekannten T-Kreuzung die zuvor beschriebenen Zusammenhänge der Strecken und Längen zur Bestimmung der Zwischenzeiten für jeweils *Fall 1* und *Fall 6*.

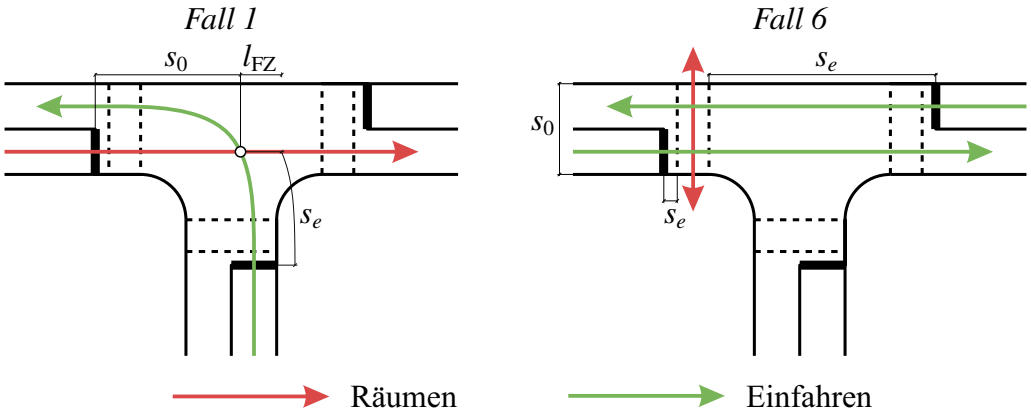


Abbildung 2-11: Zusammenhänge zur Bestimmung der Zwischenzeiten für ausgewählte Fälle in Anlehnung an [FGSV15b]

Wie auch in der Abbildung gekennzeichnet, wird der Fahrtverlauf für räumende Fahrzeuge rot bzw. einfahrende Fahrzeuge grün dargestellt. In *Fall 1* wird bspw. die Annahme

für Kraftfahrzeuge getroffen, dass die Räumgeschwindigkeit $v_r = 36\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ bzw. die Fahrzeuglänge $l_{\text{FZ}} = 6\,\text{m}$ betragen und sowohl die Überfahrzeit $t_{ü}$ mit 3 s als auch die Einfahrgeschwindigkeit v_e festgelegt auf $40\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ unabhängig von der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit sind. Dementsprechend kann die Einfahrzeit t_e über

$$t_e = \frac{s_e}{v_e}$$

berechnet werden und alle weiteren unbekannten Terme für die Zwischenzeitberechnung aus (2-8) hängen allein von der jeweiligen Kreuzungsgeometrie über die Wege s_0 und s_e ab. Entsprechende Annahmen werden für die weiteren Fälle spezifisch für den ÖPNV, Rad- und Fußverkehr getroffen, sodass exemplarisch für *Fall 6* des Fußverkehrs eine Räumgeschwindigkeit von $v_r = 1{,}2\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ festgesetzt ist[17] und die Fahrzeuglänge l_{FZ}, wie in Abbildung 2-11 gezeigt, vernachlässigt wird.
Die auf diese Weise zu ermittelnden Zwischenzeiten müssen für alle Kombinationen nicht vollständig verträglicher Verkehrsströme bestimmt und anschließend auf volle Sekunden aufgerundet werden. Um jene theoretischen Überlegungen abzusichern, werden diese zusätzlich nach der Inbetriebnahme einer LSA mithilfe von Beobachtungen überprüft und gegebenenfalls angepasst [FGSV15b]. Für die durch den Abschnitt begleitende T-Kreuzung kann auf diese Weise auch eine *Zwischenzeitmatrix* wie in Tabelle 2-1 erstellt werden, die für jede Abfolge zweier schaltbarer Signalgruppen die Zwischenzeiten differenziert nach Räumung oder Einfahrt widerspiegelt.

Tabelle 2-1: *Exemplarische Zwischenzeitmatrix für die bekannte T-Kreuzung aus Abbildung 2-11*

			Einfahren						
	Signal		1	2	3	4	5	6	7
			1	*2*	*2L*	*3*	*a*	*b*	*c*
Räumen	1	*1*		-	5	6	4	8	-
	2	*2*	-		-	7	8	5	-
	3	*2L*	7	-		4	-	2	9
	4	*3*	6	5	5		-	-	4
	5	*a*	12	9	-	-		-	-
	6	*b*	5	7	7	-	-		-
	7	*c*	-	-	10	12	-	-	

[17] Es sind auch leichte Variationen bei v_r von $1{,}0\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $1{,}5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ möglich.

Abhängig von dem Phasenfolgeplan kann die benötigte Zwischenzeit $t_{Z,i\to j}$ des Phasenübergangs von Phase i zu Phase j als maximaler Eintrag der Zwischenzeitmatrix der beteiligten Signale $S_i, S_j \subset S$, mit S als Gesamtsignalmenge der LSA, zu

$$t_{Z,i\to j} = \max_{k\in S_i,\ l\in S_j} \{t_{Z,kl}\} \tag{2-10}$$

abgeleitet werden. Für das bisherige Beispiel wird der Phasenübergang von Phase 2 zu Phase 3 (siehe Abbildung 2-10) und damit einhergehend die Zeilen 1, 2 und 7 sowie die Spalten 2 und 3 aus Tabelle 2-1 betrachtet. Als Folge des Linksabbiegungssignals *2L* resultiert für diesen Phasenübergang eine Zwischenzeit von

$$t_{Z,2\to 3} = \max\{t_{Z,12}, t_{Z,13}, t_{Z,22}, t_{Z,23}, t_{Z,72}, t_{Z,73}\} = t_{Z,73} = 10\,\text{s}.$$

Steuerung von Lichtsignalanlagen

Per Definition legt ein *Signalprogramm* die Dauer und Zuordnung der Signalzeiten einer LSA fest. Grundsätzlich kann dabei zwischen einer *signalgruppen-* oder *phasenorientierten* Gestaltung unterschieden werden. Bei der weniger verbreiteten Signalgruppenorientierung sind die einzelnen Signalgruppen das Bezugselement, welches im Fall der Phasenorientierung die Phase, also die Kombination von Signalgruppen, ist. Beide Formen haben Vor- und Nachteile, wobei grundsätzlich die Phasennutzung aufgrund der höheren Wiedererkennbarkeit dargestellter Lichtbilder eine größere Verkehrssicherheit suggeriert. Die Vorgehensweisen bei der Signalprogrammbildung unterscheiden sich im Detaillierungsgrad, sodass der Einfachheit halber und aufgrund der phasenorientierten Umsetzung im PPS die nachfolgenden Erläuterungen anhand von Phasen beschrieben werden.
Je nach Ausprägung und Eigenschaften der Signalprogramme sind die Phasendauer, Phasenanzahl eines Durchlaufs und/oder die Phasenreihenfolge fest oder nach bestimmten Regeln variabel, was in diesem Abschnitt genauer erläutert werden soll. Grundsätzlich können die Steuerungsverfahren für LSA nach [FGSV15b] in die beiden Hauptebenen der *makro-* und *mikroskopischen Steuerungsebenen* unterteilt werden, wobei sich an den Verkehrsmodellierungsarten und deren Größen aus Abschnitt 2.1 orientiert wird. In die mikroskopische Steuerungsebene sind die spezifischen Signalprogramme einzuordnen, während die makroskopische Steuerungsebene aufgrund der höheren Abstraktion als übergeordnet anzusehen ist. Hier werden entweder bestehende Signalprogramme nach Zeitplan bzw. verkehrsabhängig ausgewählt oder neue Rahmensignalprogramme über definierte Parameter gebildet sowie aktiviert. Diese übergeordneten Steuerungsverfahren legen demnach den Verlauf von Signalprogrammen fest und beeinflussen Art, Umfang und Zusammenwirken von veränderbaren Steuerungsgrößen und Signalprogrammelementen

[FGSV15b]. Als Reaktion auf verschiedene Belastungszustände oder politisch definierte Verkehrsziele können Signalprogramme und das Steuerungsverfahren während des Betriebs durch Umschaltvorgänge gewechselt werden. Ein zu beachtender Punkt ist, dass diese Umschaltungen zu verkehrstechnisch geeigneten Zeitpunkten durchzuführen sind, um Störungen des Verkehrsablaufs zu verhindern. In Paderborn (Schloß Neuhaus) haben sich bspw. die Umschaltzeitpunkte aufgrund des zu erwartenden Berufsverkehrs ergeben, da sich die generellen Verkehrsbelastungen dort stark unterscheiden. Falls das aktuelle und das anschließend gewünschte Signalprogramm keine identischen Signalbilder oder Phasen aufweisen, ist ein sog. *Umschaltprogramm* erforderlich, um die Programme ineinander zu überführen. Beinhalten zwei Signalprogramme dagegen bereits identische Signalbilder bzw. Phasen, so ist ein direkter Programmwechsel möglich [FGSV15b].
Für diese Arbeit sind gerade die mikroskopischen Signalprogrammelemente und Signalprogrammvarianten von herausragender Bedeutung, da sich das entwickelte LSA-Regelungssystem, welches in Kapitel 4 beschrieben wird, zu großen Teilen in die mikroskopischen Steuerungsverfahren eingliedert. Bevor jedoch auf die spezifischen Signalprogramme und deren Eigenschaften eingegangen wird, folgt zunächst eine Gesamtübersicht der Steuerungsverfahren in Tabelle 2-2.
Dabei existieren neben der hier dargestellten Einteilung noch weitere Charakteristika, sodass z. B. in [Kri17] die Steuerungsverfahren zusätzlich noch in *unkoordiniert* und *koordiniert* unterteilt werden. Unkoordinierte Verfahren beschränken sich auf eine Anlage und im koordinierten Fall agieren mehrere Anlagen abgestimmt und synchronisiert, sodass auf diese Weise bspw. Kolonnen strategisch geplant durch eine sog. Grüne Welle ohne Haltevorgänge über weitere Netzabschnitte geleitet werden können [FGSV15b; Kri17]. In der Übersicht der Steuerungsverfahren sind zudem die Zusammenhänge der beiden Steuerungsebenen nochmals klar aufgezeigt und es werden die nachfolgend genauer beschriebenen Signalprogrammvariationen anhand der wichtigsten Kriterien gegenübergestellt.

Tabelle 2-2: Übersicht der Einteilung von LSA-Steuerungsverfahren nach [FGSV15b]

	Steuerungsverfahren		Ordnungszahl	Aktivierung		Verkehrsabhängig veränderbare Elemente der Signalprogramme				
	Oberbegriff	Hauptmerkmal der Veränderbarkeit der Signalprogramme		Zeitplan-abhängig	Verkehrs-abhängig	Umlauf-zeit	Phasen-folge	Phasen-anzahl	Freigabe-zeiten	Versatz-zeit
A: Makroskopische Steuerungsebene	Signal-programm-auswahl	Zeitplanabhängige Auswahl der Signalprogramme	A1	✗		In Kombination mit einem Steuerungsverfahren der Gruppe B veränderbare Elemente des Signalprogramms				
		Verkehrsabhängige Auswahl der Signalprogramme	A2		✗					
	Bildung Rahmen-signalprogramm	Verkehrsabhängige Bildung der Rahmen-signalprogramme	A3		✗					
B: Mikroskopische Steuerungsebene	Festzeit-signalprogramm		B1	Aktivierung gemäß Steuerungsverfahren der Gruppe A						
	Signalprogramm-anpassung	Freigabezeitanpassung	B2						✗	
		Phasentausch	B3				✗			
		Phasenanforderung	B4					✗	✗	
		Versatzzeitanpassung	B5							✗
	Signalprogramm-bildung	Freie Veränderbarkeit	B6			✗	✗	✗	✗	✗

Festzeitsteuerung

Die einfachste Variante der Steuerungsverfahren, die *Festzeitsteuerung*, kann auch ohne Rückkopplung, somit auch ohne jegliche Sensoren betrieben werden. Diese Art der Signalprogramme ist vollkommen unflexibel, dafür aber aufgrund der genannten Unabhängigkeit von Sensoren sehr robust. Der Ablauf der vordefinierten Signalprogramme ist fest vorgegeben und nicht durch VTN beeinflussbar, weshalb Umschaltvorgänge in andere Signalprogramme die einzige Eingriffsmöglichkeit darstellen. Wenn das Signalprogramm bis zum Ende durchlaufen wurde, beginnt es ohne jegliche Veränderung wieder von vorne, sodass die zeitliche Abfolge der Schaltzeiten einzelner Signalgruppen exakt periodisch wiederholt wird [Kri17]. Die genannten Programmumschaltungen sind entweder direkt am Steuergerät oder über einen Verkehrsrechner (VR) durchzuführen. Mögliche Einsatzgebiete sind damit einerseits Knotenpunkte mit konstanten und vorhersehbaren Verkehrsbelastungen über längere Zeiträume oder andererseits die Bewertung der Leistungsfähigkeit einer LSA, da mit wenig Aufwand bspw. der zu erwartende Sättigungsgrad eines Knotenpunkts berechnet werden kann [FGSV15b; FGSV15a; Kri17].
Die Periode eines Festzeitprogramms wird als Umlaufzeit t_U bezeichnet. Allgemeiner beschreibt die Umlaufzeit die Dauer eines Durchlaufs aller Phasen des Signalprogrammplans. Dabei setzt sie sich bei einer definierten Phasenfolge von P Phasen durch

$$t_U = \sum_{i=1}^{P} t_{F,\text{maß},i} + \sum_{i=1}^{P} t_{Z,\text{erf},i}$$

aus den maßgeblichen Freigabezeiten $t_{F,\text{maß},i}$ der entsprechenden Signalgruppen und erforderlichen Zwischenzeiten $t_{Z,\text{erf}}$ der definierten Phasenwechsel analog zu (2-10) zusammen [FGSV15b]. Anhand dieser Definition ist offensichtlich, dass die Umlaufzeit einer Festzeitsteuerung stets konstant ist und lediglich durch einen Wechsel des Signalprogramms auf den zu erwartenden Verkehr angepasst werden kann. Die Auslegung der Umlaufzeit sowie der Freigabezeiten einzelner Signale und Phasen ist in Abhängigkeit verschiedener verkehrstechnisch relevanter Größen in [FGSV15b] detailliert beschrieben. Die Mindestfreigabezeit eines Signals beträgt dabei mindestens 5 s und ist abhängig von der Beschaffenheit des Verkehrsnetzes in der Umgebung der LSA. Während die minimale Sperrzeit stets auf 1 s festgelegt ist, variiert die maximale Sperrzeit abhängig von der Akzeptanz der VTN, dem verfügbaren Stauraum für Kraftfahrzeuge, der Warteflächen für Fuß- und Fahrradverkehr sowie der Gesamtreisezeit der ÖPNV-Fahrzeuge [FGSV15b].

Verkehrsabhängige Steuerungen

Verglichen mit der Festzeitsteuerung sind *verkehrsabhängige Steuerungen* von größerer Bedeutung für diese Arbeit. Wie bereits in Tabelle 2-2 gezeigt, können auch die verkehrsabhängigen Verfahren bzgl. ihrer Modifikationsmöglichkeiten weiterhin unterschieden werden. Verkehrsabhängige LSA-Steuerungen beeinflussen den Verkehr gezielt in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen, wobei die jeweils eingeleiteten Maßnahmen des Verfahrens von einer Signalprogrammanpassung bis hin zur vollständig freien Veränderbarkeit des Signalprogramms reichen. Je nach Ausprägung der Veränderung kann die Umlaufzeit t_U, also die Zeit eines gesamten Phasenumlaufs, noch als konstant definiert werden. Beispiele derartiger Anpassungen sind die reine Änderung der Phasenreihenfolge oder das Verlängern bestimmter Phasen bei gleichzeitiger Reduktion anderer Phasen des gleichen Umlaufs. Im Gegensatz dazu ist die Umlaufzeit bei der freien Signalprogrammbildung stets variabel, da reguläre Umläufe nicht mehr vorgesehen sind. Die Auswahl, Reihenfolge und Dauer von Phasen ergibt sich demnach erst abhängig von der jeweiligen Verkehrssituation auf Basis der eingesetzten Implementierung. Es ist besonders zu betonen, dass jederzeit die Rahmenbedingungen der LSA wie Freigabezeiten t_F durch Beachtung der Mindestfreigabezeiten sowie minimaler und maximaler Sperrzeiten eingehalten werden müssen.
Die verkehrsabhängigen Verfahren haben alle gemein, dass die genutzten Algorithmen die jeweiligen Verkehrssituationen anhand unterschiedlicher Kenngrößen identifizieren und bewerten, um dazu passende Signalgruppen oder Phasen freizugeben. Der Unterschied zur Steuerung durch ein Festzeitprogramm liegt demnach in der Rückkopplung verkehrstechnischer Kenngrößen begründet. Einerseits können die verkehrsabhängigen Ansätze *regelbasiert* sein, sodass die Logik durch Abfrage bestimmter Mess- bzw. Plausibilitätswerte (z. B. der Zeitlücke zwischen Fahrzeugen oder Trendzähler einer gewünschten Anforderung) Steuerungsentscheidungen durch bspw. Schwellenwertvergleiche und Bedingungsgleichungen ableitet. Andererseits können die Verfahren auch *modellbasiert* oder *adaptiv* gestaltet sein, sodass ein Optimierungsalgorithmus systematisch mögliche Steuerungseinstellungen eruiert und diese auf Basis der modellierten Wirkungen entsprechend der Zielfunktion auswertet. Die zugehörigen Ablaufdiagramme für die beiden Umsetzungsoptionen sind in der Abbildung 2-12 dargestellt [FGSV15b; Fri00]. In dem Zusammenhang der Kenngrößenermittlung sind direkt und indirekt messbare Kenngrößen zu unterscheiden. Beispiele für die mittels Detektoren direkt messbaren Kenngrößen stellen die Zeitdauer seit (Freigabe-)Anforderung, der Belegungsgrad sowie die bereits genannten Zeitlücken dar. Indirekt messbare Kenngrößen, wie mittlere Wartezeiten, Haltevorgänge oder Staulängen, werden dagegen anhand verschiedener Verkehrsmodelle (siehe Abschnitt 2.1) aus den gemessenen Größen bestimmt [FGSV15b].

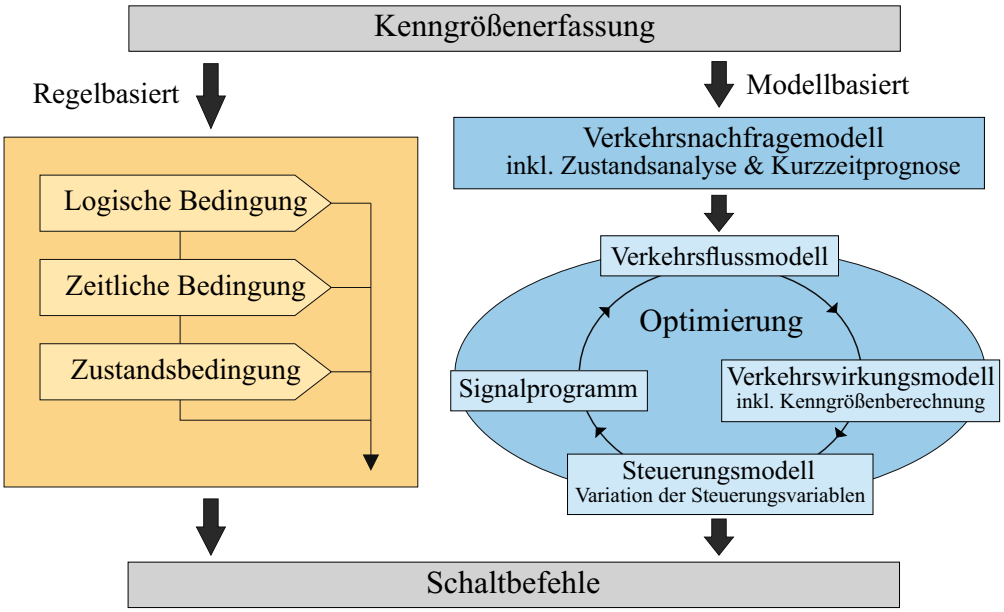


Abbildung 2-12: Regel- und modellbasierter Ablauf verkehrsabhängiger Steuerungsverfahren; angelehnt an [FGSV15b]

2.2.2 Sensoren in der Verkehrstechnik

Nur durch die Nutzung aktueller Sensordaten des Verkehrs kann eine verkehrsabhängige Steuerung von LSA realisiert werden. Bevor auf einige Beispiele der Sensoren eingegangen wird, sollten die Voraussetzungen für einen reibungslosen Betrieb einer verkehrsabhängigen Steuerung geklärt sein. Funktionstüchtige Detektoren sind erforderlich, damit die Steuerverfahren einen aktuellen und realitätsgetreuen Status der Verkehrssituation reproduzieren und anschließend verarbeiten können. Dementsprechend sind diese durch das Steuergerät hinsichtlich Störungen zu überwachen und, falls eine Anbindung besteht, etwaige Störungsmeldungen an den jeweiligen Verkehrsrechner zu übermitteln. Die Systemarchitektur von Verkehrssystemen mit LSA wird im folgenden Abschnitt 2.2.3 weiter erläutert. Die Störungsermittlung kann u. a. anhand von Überprüfungen und Auswertungen der

- minimalen und maximalen Belegzeiten,
- ermittelten Fahrzeuganzahlen pro Minute oder
- Flattern (mehr als drei Meldungen pro Sekunde)

durchgeführt werden. Die dafür benötigen Parameter sind, mit Ausnahme des Flatterns, in Abhängigkeit der Verkehrsnachfrage individuell einzustellen. Erkannte Fehler oder Ausfälle der Sensorik können teilweise über Anwenderschnittstellen zentral mithilfe des Verkehrsrechners ausfindig gemacht und, wenn sie softwarebedingt sind, direkt behoben werden. Die bei den Inbetriebnahmen gewählte Empfindlichkeit der Sensoren stellt

bspw. eine typische und anfällige Fehlerquelle dar, die häufig bei der nächsten Wartung nachjustiert werden muss. Im Gegensatz zum Ausfall eines Lichtsignals einer Signalgruppe stellt eine Detektorstörung kein sicherheitskritisches Problem dar, weshalb eine Abschaltung der gesamten Lichtsignalanlage in der Regel nicht notwendig ist. Dennoch sind bis zur Störungsbehebung und -überbrückung geeignete Maßnahmen erforderlich, die einen weiteren Betrieb sicherstellen. Einerseits können vorher definierte Ersatzwerte im Störungsfall eingesetzt werden und andererseits ist ein Programmwechsel auf eine vorgesehene Rückfallebene[18] denkbar. Bei Ersatzwerten ist zu entscheiden, ob eine Abschaltung, Mittelwerte oder sonstige stochastische Annahmen oder eine permanente Aktivierung der betreffenden Detektoren angenommen werden. Als Beispiel führt die Permanenz einer Anforderung in vielen Fällen zu einer starken Priorisierung der korrespondierenden Signalgruppe in jedem Umlauf. Ein Ausfall der Sensorik ruft dementsprechend eine Senkung der Steuerungsflexibilität hervor. Daher ist es vorteilhaft, Redundanzen bzgl. der Erfassung vorzusehen und Ausfälle u. a. durch die Detektoranordnung kompensieren zu können [FGSV15b; BA06]. Zur Erfassung des Verkehrs stehen unterschiedlichste Möglichkeiten zur Verfügung, die sich in Robustheit, Detaillierungsgrad, Erfassungsbereich und -eigenschaften sowie Montage und Installation unterscheiden [Mar10]. Neben klassischen Sensoren wie Induktionsschleifen finden immer mehr neue Technologien Einzug in die Verkehrsbranche. Zudem verbreitet sich die zusätzliche Nutzung der VTN selbst als Informationsquelle. Sog. Floating-Car-Daten (FCD) werden direkt aus Fahrzeugen, welche aktuell am Verkehrsgeschehen teilnehmen, generiert und über Vehicle-to-Everything (V2X)[19] an LSA, andere VTN oder weitere verarbeitende Einheiten wie Roadside Unit (RSU) übermittelt [FGSV19]. Damit ein gewisser Teil der Vielfalt abgedeckt und dargestellt wird, folgen kurze Beschreibungen der im PPS und damit auch in der Entwicklung des Systems dieser Arbeit eingesetzten Sensoren. Es handelt sich dabei um *Induktionsschleifen*, *Funktelegrammempfänger des ÖPNV* sowie die sog. *TOPO.box-Systeme*[20].

Induktionsschleifen

Induktionsschleifen sind in dem Bodenbelag der Straße integrierte Sensoren, die mithilfe des Funktionsprinzips von Induktionsspulen arbeiten. Ein die Schleife überquerendes Fahrzeug führt zu einer Änderung des magnetischen Flusses, wodurch eine messbare elektrische Spannung resultiert. Aus diesem Spannungssignal kann auf die Belegung der

[18] Es kann bspw. übergangsweise eine robuste Festzeitsteuerung gewählt werden.

[19] V2X bezeichnet die Vernetzung von Fahrzeugen. Diese kann allgemein untereinander oder zu beliebigen Akteuren innerhalb ihres näheren Umfelds ausgeprägt sein.

[20] Als weiteres Element wurden an einer Fußverkehrsfurt *NOSCO-Kameras* getestet, die neben der reinen Freigabeanforderung auch die Personenanzahl überliefern.

Induktionsschleife und anschließend auf weitere Kenngrößen des Verkehrs geschlossen werden. Die Detektionsrate liegt bei spurtreuer Überfahrung und ausreichendem Fahrzeugabstand, welcher größer ist als die Schleife selbst, bei bis zu 99, 9% [FGSV19].
Bereits seit Jahrzehnten existieren in der Literatur Ansätze, bei denen aus den Rohdaten des Spannungssignals bzw. deren Hüllkurven u. a. auf Längen, Klassen oder Geschwindigkeiten der querenden Fahrzeuge geschlossen werden kann. Dabei variieren die benötigten Anordnungen der Sensoren zwischen Einfach- und Doppelinduktionsschleifen, genau wie deren Auswertungsmethodiken von direkten Schwellenwertanalysen der Signale in [PK89] zu neueren Entwicklungen mit Fuzzy-Logiken in [KKLC01] und neuronalen Netzen [KB05] mit verbesserten Genauigkeiten[21].
In Paderborn sind Induktionsschleifen die am weitesten verbreiteten Sensoren der Verkehrstechnik und generell vielerorts auch die einzigen zur Gewährleistung verkehrsabhängiger Abläufe von LSA [PPS22]. Dementsprechend werden sie in der direkten Umgebung von LSA eingesetzt und können bei strategischer Anordnung sowohl Einzeldetektorausfälle kompensieren als auch fahrspurspezifische Informationen bei Abbiegevorgängen liefern. In dem beispielhaften Lageplan aus Abbildung A2-1 der namensgebenden Kreuzung des PPS sind die Positionen der verwendeten Induktionsschleifen als Grundbestandteil der LSA ebenfalls enthalten. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass hier wie im gesamten System des PPS keine Doppelanordnung zur Typenklassifizierung vorgesehen wurde.

ÖPNV-Telegramme

Durch die Nutzung von Funktelegrammen können besonders zu bevorrechtigende Verkehrsgruppen allgemein mit der Infrastruktur und im Speziellen mit LSA Informationen austauschen. Das Funktionsprinzip ist in der folgenden Abbildung 2-13 anhand eines bestimmten Ablaufplans des Funksystemherstellers ORIT angedeutet [ORIT20].
Die Umsetzung der Technik kann je nach Hersteller der Funkgeräte und Verkehrsnetze leicht von der gezeigten Darstellung abweichen. Alle Lichtsignalanlagen des innerhalb dieser Arbeit untersuchten Verkehrsgebiets sind mit Empfängern ausgerüstet, sodass über das Senden dreier verschiedener Telegrammsignale die aktuellen Positionen bestimmter Busse des ÖPNV rekonstruiert werden können (siehe Abschnitt 4.2). Dabei wird sich in Paderborn auf die *Erstanmeldung (E)*, *Hauptanmeldung* bzw. *Weiterleitung (W)* und *Abmeldung (A)* beschränkt, die in definierten Abständen zu den LSA von den Fahrzeugen an ebenjene übermittelt werden. Genau wie die Induktionsschleifen sind diese Telegrammmarkierungen auch jeweils im Lageplan aus Abbildung A2-1 markiert. Das Signal

[21] Die Grundlagen der Fuzzy-Logik sind in Abschnitt 2.4.2 erläutert, da sie auch für die Entwicklung des LSA-Regelungssystems dieser Arbeit von Bedeutung sind.

selbst enthält neben einer eindeutigen Kodierung der Telegrammart und LSA-Zuordnung zusätzlich die Linie des Busses sowie teilweise auch die momentan abgeschätzte Verspätung gegenüber des Fahrplans [PPS22; FGSV19].

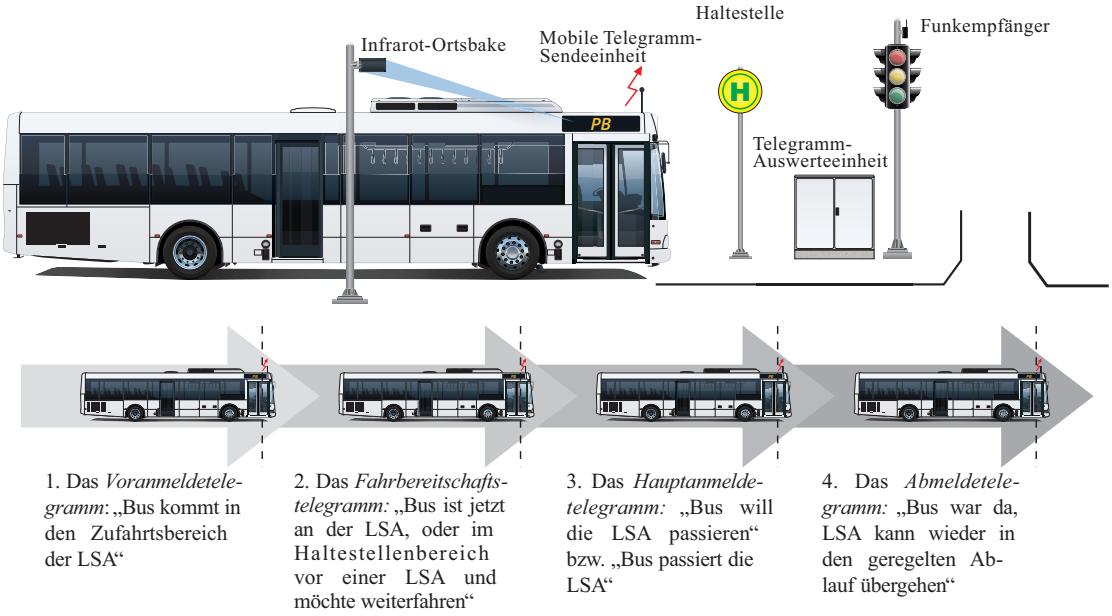
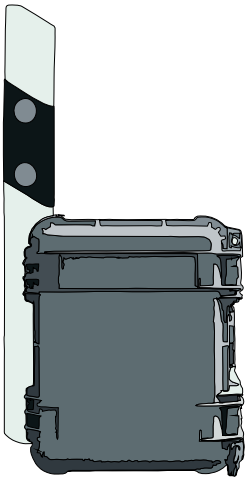


Abbildung 2-13: *Ablauf eines LSA-Telegrammaustausches mit einem ÖPNV-Bus; angelehnt an [ORIT20]*

TOPO.box-Systeme

Die TOPO.box, entwickelt von der Firma RTB GmbH aus Bad Lippspringe, ist ein Sensorsystem zur *Fahrzeugklassifizierung*, welches vor Beginn des PPS für unterschiedlichste (offline) Verkehrserhebungszwecke eingesetzt wurde. Neben der Radar-Sensorik beinhaltet das System gleichzeitig Komponenten zur Signalverarbeitung und eine Kommunikationseinheit für die Datenübertragung [RTB21]. Alle Elemente sind in einem Gehäuse untergebracht, von denen zwei Ausführungen (Box und Standardleitpfosten) in Abbildung 2-14 dargestellt sind. Durch diese Konzeption ist es möglich, die TOPO.box-Systeme sowohl innerhalb als auch außerhalb geschlossener Ortschaften an Mastsystemen zu installieren oder falls notwendig über Solarpanels bzw. Akkumulatoren für einen temporären Betrieb zu versorgen. Die genaue Klassifizierung, die von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zertifiziert wurde, erfolgt auf Basis verschiedener Merkmale wie u. a. der Länge, der Achsabstände und der Position des Motorblocks der Fahrzeuge. Neben der reinen Detektion eines Fahrzeugs werden durch die TOPO.box zusätzlich Informationen über die Fahrzeugklasse, die Geschwindigkeit, den Schallpegel und die Fahrtrichtung geliefert. In [RTB21] sind sämtliche Klassifizierungsklassen beschrieben, wobei Abbildung 2-14 die Unterscheidungen der hochaufgelösten *8+1+F*-Klasse im Vergleich zur Grundklassifizierung skizziert.



	Grundklassifizierung	8+1+F
Bezeichnung der Fahrzeugklassen (mit Code)	Nicht klassifiziertes KFZ (6)	✓
	Teilverdecktes KFZ (250)	
	Fahrrad (230)	✓
	Motorrad (10)	✓
	PKW (7)	✓
	Lieferwagen (11)	✓
	PKW mit Anhänger (2)	✓
	LKW (3)	✓
	Sattelzug (8)	✓
	Sattelauflieger (9)	✓
	Bus (5)	✓

Abbildung 2-14: *Darstellung der TOPO.box-Systeme nach [RTB21] und deren 8+1+F-Klassifikation; angelehnt an [RTB21]*

Diese genaue Auflösung der Klassen wurde im PPS gewählt, damit der aktuelle Verkehrszustand mithilfe dieser punktuellen Messungen an strategischen Querschnitten möglichst realistisch rekonstruiert werden kann. Um diese Informationen auch für den Realbetrieb der LSA-Regelung und nicht nur für die Kalibrierung des Verkehrsmodells nutzen zu können, wurde das System um eine *Live-Daten-Kommunikation* über das Client-Server Protokoll MQTT erweitert [PPS22]. Anwender können demnach bestimmte Inhalte abonnieren, die vom Server verteilt werden [IBM99].

2.2.3 OCIT-Kommunikationsstandard von Verkehrssteuerungssystemen

Ausgehend von Verkehrsanlagenbetreibern und der BASt wurde 1999 eine Arbeitsgemeinschaft von Signalbaufirmen, die OCIT Developer Group (ODG), gebildet, die es sich zur Aufgabe gemacht hat, mithilfe eines fortlaufenden Entwicklungsprozesses für die wichtigsten Schnittstellen von Verkehrssteuerungssystemen einen stets aktuellen Industriestandard zu schaffen. Dieser Standard für offene Schnittstellen der Straßenverkehrstechnik, mit der geläufigen englischen Bezeichnung Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems (OCIT), ist mit Einzug der vielseitigen Entwicklung kooperativer und örtlich verteilter Verkehrsregelungssysteme notwendig geworden. Der Aufbau derartiger Systeme erfordert dabei die Kommunikation der jeweils integrierten Komponenten verschiedener Steuerungsebenen. Die zentralen Recheneinheiten, etwaige externe Verkehrsmanagementsysteme (VMS), die LSA und verwendete Sensoren (siehe 2.2.2) müssen untereinander Informationen austauschen können. Durch eine Vereinheitlichung der Protokolle soll es möglich sein, Komponenten diverser Hersteller miteinander zu ver-

knüpfen und auf diese Weise ein systemweites Netzwerk herzustellen. Im OCIT-Standard sind folgende Schnittstellenbereiche aufgenommen und definiert [OCI18a]:

- *OCIT-Center to Center (OCIT-C)* als Schnittstelle zwischen zentralen Komponenten und Systemen (Bsp.: zentraler Verkehrsrechner ↔ externes VMS),
- *OCIT-Outstations (OCIT-O)* als Schnittstelle zwischen der Zentrale und Feldgeräten (Bsp.: zentraler Verkehrsrechner ↔ LSA),
- *OCIT-LED* als Schnittstelle zwischen LSA-Steuergeräten und LED-Signalgebermodulen

sowie zusätzlich

- *OCIT-O Profile* für Festlegungen zur Übertragungstechnik und
- *OCIT-O Car* als Integrationsmöglichkeit von RSU in VMS.

In Abbildung 2-15 sind die wichtigsten dieser verschiedenen Schnittstellenbereiche innerhalb der OCIT-Gesamtarchitektur dargestellt. Neben den genauen Einsatzspezifikationen sind ebenso die einzelnen Bestandteile der Gesamtlatenz aufgeführt und den jeweiligen Ebenen zugeordnet. Dabei setzt sich bspw. die Latenz hervorgerufen durch das übergeordnete VMS in grün aus den Teilen der Datenbereitstellung an die entsprechende Anwendung und des verwendeten OCIT-C Protokolls zusammen.
OCIT standardisiert und unterscheidet grundsätzlich Schnittstellen für die Bereiche der *Outstations* und *Instations*, je nachdem, ob Feldgeräte (Outstations) in das Kommunikationsnetzwerk eingebunden sind. Die OCIT-C Schnittstelle regelt dementsprechend die Kommunikation zwischen zentralen Verkehrsrechnersystemen und basiert als Austauschprotokoll auf dem Protokollstandard Simple Object Access Protocol (SOAP) [OCIT18c; BEK+00]. Diese zentralenseitige Schnittstelle schafft mithilfe der verschiedenen Kommunikationsbausteine die Voraussetzung für ein übergeordnetes Verkehrsmanagement. Der Datenabruf aktueller und historischer Signal- oder Sensorzustände einzelner LSA sowie das Senden verkehrstechnischer Meldungen ausgehend von der LSA-Zentrale wird über OCIT-C ermöglicht [OCIT18b]. Durch die Ausrichtung an praktischen Anforderungen und niedrige Implementierungskosten soll OCIT-C nach [OCIT18c] eine Lösung für Verkehrssteuerungen bis hin zum übergeordneten Verkehrsmanagement darstellen.
Damit die oben genannten Feldgerätdaten an die LSA-Zentrale angebunden und von dort Informationen bspw. durch ein VMS abgerufen werden können, wird OCIT-C über den Standard OCIT-O ergänzt. Auf diese Weise ist die externe Bedienbarkeit und Überwachung der Feldgeräte sichergestellt. Nach [OCI18b] wird sich am weit verbreiteten Open Systems Interconnection (OSI)-Referenzmodell mit dessen sieben Schichten orientiert, welches u. a. von der International Organization for Standardization (ISO) und der International Telecommunication Union (ITU) gemeinsam als Standard für offene Netzwerk-

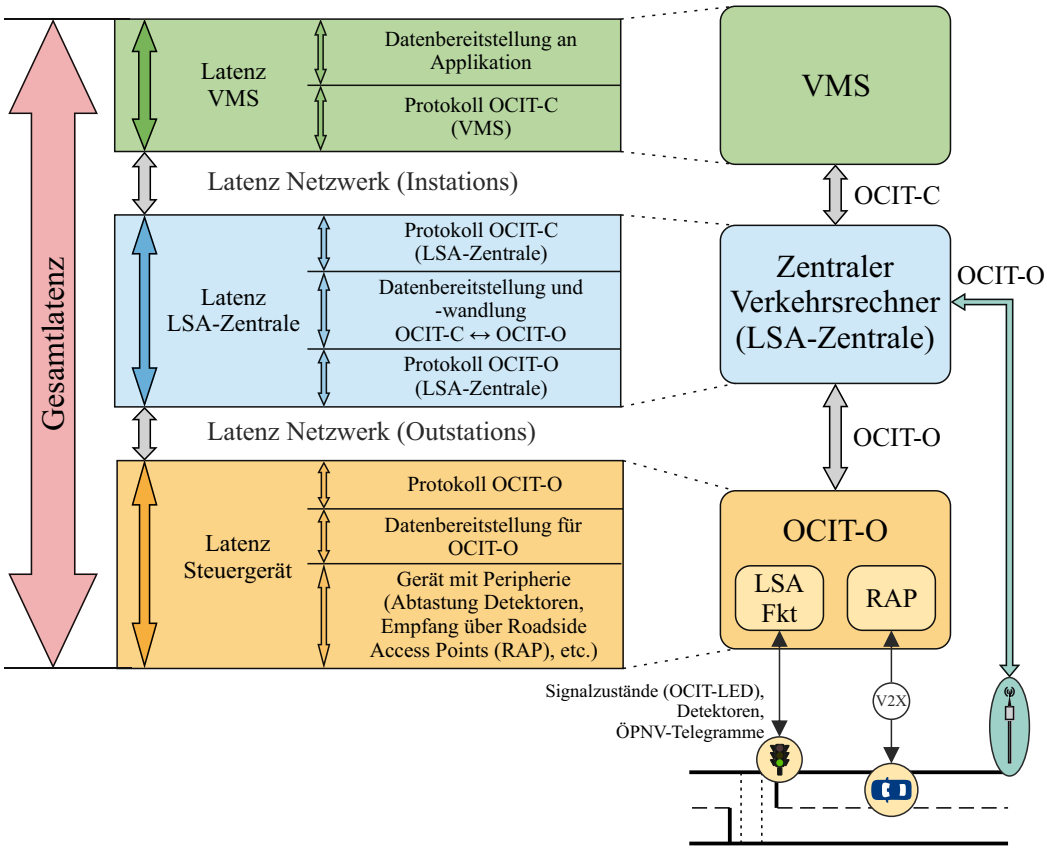


Abbildung 2-15: *OCIT-Referenzarchitektur mit Schnittstellenbereichen; angelehnt an [OCIT23]*

protokolle veröffentlicht wird [DIN94]. Die allgemeinen Schichten sowie der spezielle Aufbau bei OCIT-O können in Tabelle 2-3 nachvollzogen werden.

Tabelle 2-3: *OSI-Referenzmodell für OCIT-O; angelehnt an [OCI18b]*

		Allgemein	OCIT-O Protokolle
Schicht	7	Anwendung	BTPPL
	6	Darstellung	
	5	Kommunikationssteuerung	
	4	Transport	TCP/UDP
	3	Vermittlung	IP
	2	Sicherung	abhängig vom OCIT-O Profil[22]
	1	Physikalische Schicht	

Auffällig ist, dass bis auf das Protokoll Basis Transport Paket Protokoll Layer (BTPPL) in den OSI-Schichten von der Kommunikationssteuerung bis zur Anwendung ausschließ-

[22] Die Spezifikationsdokumente der OCIT-O Profile [OCIT12a; OCIT12b; OCIT19] enthalten die OSI-Schichten abhängig vom gewählten Übertragungsgerät.

lich Standardprotokolle eingesetzt werden. Das spezielle BTPPL-Protokoll ist dabei symmetrisch[23], kompakt und bandbreitenoptimiert gestaltet und damit an das Einsatzgebiet angepasst. Durch die Verwendung der Internetprotokolle in den Transport- und Vermittlungsschichten zur sicheren Datenübertragung zwischen Zentralen und Feldgeräten hängt die genaue Übertragungsgeschwindigkeit von den Wegen im Netz und vom Datenaufkommen ab. Dementsprechend können die Übertragungszeiten nicht exakt vorausgesagt werden, sodass ohne Vorliegen eines deterministischen Zeitverhaltens der Kommunikationsweg vor Überlastungen geschützt werden sollte. Die Empfehlung lautet daher, zeitkritische Steuerungsaufgaben dezentral von den Prozessoren der Feldgeräte ausführen zu lassen [OCI18b]. Der Austausch von Datensammlungen der Feldgeräte und umgekehrt Meldungen oder Befehle von der Zentrale werden über diesen Übertragungsweg unter Verwendung einer hierarchischen Master/Slave-Struktur, mit dem zentralen VR als einzigem Master-Objekt, umgesetzt. Alle Übertragungen sind dabei mit einem Zeitstempel der Systemzeit der Zentrale versehen, sodass eine einheitliche Zeitbasis aller Komponenten existiert [OCI18b].
Mithilfe der dritten Schnittstelle, OCIT-LED, wird die Kommunikation zwischen Lichtsignalsteuergerät und LED-Signalgebermodul festgelegt. Die dortigen Bestimmungen regeln einerseits die betreffenden Schaltvorgänge und etwaige Signalsicherungen, sodass die Umsetzung der möglichen Stellgrößen einer LSA-Steuerung inklusive deren Zwangsbedingungen standardisiert ist. Andererseits werden grundlegende elektrische Parameter wie Spannungen im Betrieb, beim Einschalten und Ausschalten sowie für Zwangsabschaltungen, aber auch mechanische und lichttechnische Größen definiert [OCIT04].
Um RSU in das Verkehrssystem integrieren zu können, wurde mit OCIT-O Car eine zusätzliche Möglichkeit geschaffen, RSU und VMS zu koppeln, sodass ein Datenaustausch auf diese Weise ermöglicht wird.
Die Störungs- und Ausfallerkennung erfolgt in den OCIT-Übertragungswegen über das Ausbleiben von Nachrichten bzw. deren Antworten. Dabei werden im Fall von OCIT-C zu lange Abfragen mit einem Störungscode quittiert und bspw. Schaltbefehle eines Schildes bei fehlender Antwort nach einer konfigurierbaren Verzögerung bis zu drei Mal wiederholt [OCIT18c]. Bei der Schnittstelle OCIT-O können defekte Systemkomponenten wie der zentrale VR, die Feldgeräte oder die Übertragungseinrichtung selbst durch Störungen im Netz zu einem Ausfall der Übertragung führen. Die Dauer der Störungsermittlung ist dabei von der Sendehäufigkeit von Befehlen oder Kontrollsignalen abhängig, wobei nur teilweise die Ursache der Störung ermittelt und ausgegeben werden kann [OCIT18b].
Für weitere technische Details der einzelnen Schnittstellen, deren Komponenten und Umsetzungen sei auf die veröffentlichten Dokumentationen der ODG verwiesen.

[23] Bei symmetrischen Protokollen existiert keine Unterscheidung zwischen Server und Client.

2.3 Verkehrssimulation

Im Bereich der Verkehrssimulation haben sich in den letzten Jahren sehr viele verschiedene Simulationstools entwickelt, die sich anhand der ausgewählten Verkehrsmodellierungsart von makroskopischen bis hin zu submikroskopischen unterscheiden lassen. Wie in Abschnitt 2.1 bereits angedeutet, haben makroskopische Tools dabei den Vorteil, sehr große Verkehrsbereiche aufgrund des hohen Abstraktionsgrades abdecken und berechnen zu können. Dabei verfolgen sie jedoch nicht den Anspruch, Phänomene von Einzelfahrzeugen detailliert zu beschreiben.
Genau bei diesen einzelnen VTN und deren Routen setzen die mikroskopischen Tools an, deren Untersuchung und gezielte Beeinflussung einen Kernaspekt dieser Arbeit darstellen, sodass eine derartige Softwarelösung für die durchzuführenden Verkehrssimulationen ausgewählt wurde. Die grundsätzlichen Stärken und Chancen bei der Nutzung von Verkehrssimulationen anstelle realer Experimente liegen dabei auf der Hand. Der größte Vorteil ist zunächst einmal die schlichte Umsetzbarkeit von Versuchen. Zusätzlich zu den allgemeinen Aspekten wie der Zeit- und Kostenersparnis sowie des Sicherheitsaspekts ist auch die exakte Reproduzierbarkeit der Verkehrsszenerie eines Versuchs mithilfe von Simulationen möglich, sodass genaue Einflussanalysen einzelner Modifikationen durch die Vergleichbarkeit innerhalb des Tools gewährleistet sind.
Neben der in dieser Untersuchung verwendeten und in den folgenden Abschnitten genauer beschriebenen Simulationssoftware SUMO [LBB+18] haben sich weitere Programme am Markt entwickelt und etabliert, die oftmals sehr ähnlich aufgebaut sind. So bietet als Beispiel das nach eigenen Angaben weltweit führende proprietäre Softwarepaket *PTV Vissim* [PTV24] eine gut unterstützte mikroskopische Verkehrssimulation, die neben einer benutzerfreundlichen Schnittstelle mit 3D-Visualisierung und detaillierten Bewegungsmodellen auch viele verschiedene Anbindungsmöglichkeiten zu externen Softwarediensten zur Verfügung stellt [Fel94; FV10]. Weitere Alternativen wie *AVENUE* oder *Paramics* und einige andere werden in dem Sammelwerk [Bar10a] vorgestellt, auf welche an dieser Stelle aber nicht detaillierter eingegangen werden soll.

2.3.1 SUMO – Softwarelösung und Frameworks

Als Open-Source Softwarepaket für die Simulation von mikroskopischem Verkehr wird SUMO seit 2001 federführend vom Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt[24] und erstmals in [KHRW02] vorgestellt. Mithilfe von SUMO können mikroskopische, im Raum kontinuierliche sowie *multi-* und *intermodale* Verkehrssimulationen sehr benutzerfreundlich durchführt werden. Die Multimodalität äußert sich durch die Inte-

[24] Außer dem DLR entwickeln auch andere Institutionen und Personen das Tool stetig weiter. Die große Community mit schneller Feedbackstruktur sorgt für zusätzliche Hilfestellung.

gration verschiedener Fahrzeugklassen wie in der Abbildung 2-14 beschrieben, aber auch durch die Umsetzung von Fuß- und Schienenverkehr. VTN können in SUMO intermodal ihre Route bestreiten, indem sie bspw. in einem PKW fahrend beginnen, eine gewisse Strecke zu Fuß zurücklegen und dann schließlich mit der Bahn das gewünschte Ziel erreichen. Die Benutzerfreundlichkeit dagegen zeigt sich neben dem guten Support in den zahlreichen Zusatzanwendungen und deren graphischen Benutzeroberflächen (Graphical User Interfaces (GUI)), von denen die zwei wichtigsten exemplarisch in Abbildung 2-16 dargestellt sind.

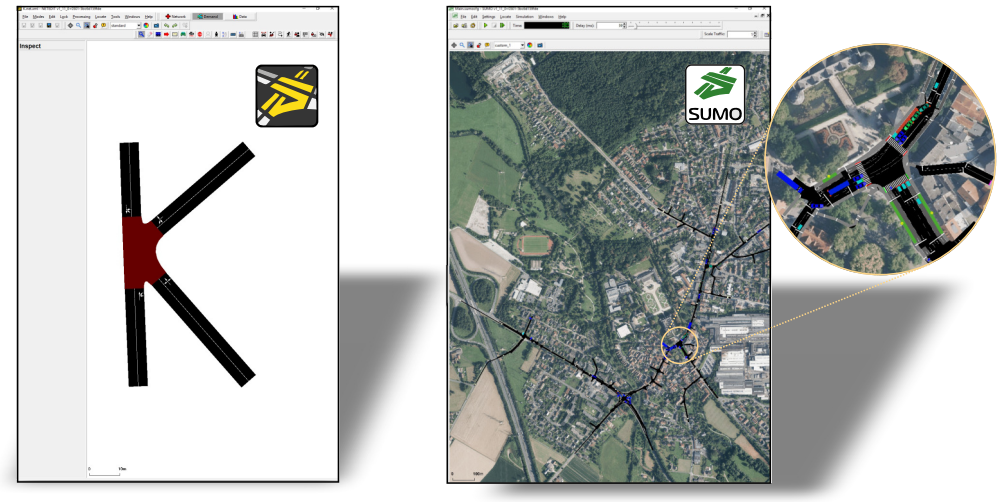


Abbildung 2-16: *Benutzeroberflächen von NETEDIT (links) mit einem händisch erstellten Verkehrsnetz und der SUMO-GUI (rechts) mit detailliertem Verkehrsnetz und Fahrzeugen in Paderborn, Schloß Neuhaus*

Zusätzlich zur benötigten Effizienz für die Berechenbarkeit von großen Verkehrsnetzen wurde bei der Entwicklung von SUMO ein besonderes Augenmerk auf die Übertragbarkeit und Erweiterbarkeit gelegt, um vor allem auch für wissenschaftliche Arbeiten eine Test- und Basis-Plattform zur Verfügung zu stellen. Daher rührt auch die Motivation der Bereitstellung von SUMO als Open-Source Software, damit eigene Modellansätze und Applikationen möglichst unkompliziert innerhalb eines Tools eingebettet werden können und so für die wissenschaftlichen Beiträge eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist [KHRW02; Kra10]. Als Beispiel wurden bereits im Jahr 2005 LSA-Regelungssysteme in SUMO implementiert und getestet [KBM+05].
Neben der reinen Verkehrssimulation liefert das SUMO-Framework eine Vielzahl weiterer Hilfsmittel, die u. a. zur Erstellung der Verkehrssimulationsszenarien genutzt werden können und damit mögliche Untersuchungen und Tests erleichtern. Einige davon wurden auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet und werden im nächsten Abschnitt 2.3.2 thematisiert. Ein großer Vorteil des Vorhandenseins dieser Hilfsmittel ist, dass die ausführliche Online-Dokumentation mit Tutorials [DLR24] den Nutzer schrittweise in

das System einführt und damit zusätzlich Bewusstsein für noch fehlende Aspekte der eigenen Forschung schafft, die selbst in SUMO nachzurüsten sind. Der letzte und sehr wichtige Aspekt, der zusammen mit den anderen Vorteilen ausschlaggebend für die Wahl von SUMO als Simulationssoftware war, ist, dass mithilfe des Traffic Control Interface (TraCI) eine Schnittstelle zur *Online-Anpassung der Verkehrssimulation* vorhanden ist [WPR+08]. Mithilfe von TraCI lassen sich unterschiedlichste Co-Simulationen realisieren, da weitere Programme über *Java*, *C/C++*, *Python* oder *MATLAB* an SUMO angebunden werden können. Die hauptsächlich verwendete Variante der Schnittstelle *TraCI4Matlab* wird in Abschnitt 2.3.3 kurz beleuchtet.

2.3.2 Verkehrssimulationsszenarien: Verkehrsnetz, -infrastruktur und -aufkommen in SUMO

In [BZBP13] werden Simulationen als „virtuelle Experimente“ bezeichnet. Für den Fall von Simulationen ausschließlich innerhalb von SUMO müssen Verkehrsszenarien modelliert werden, um ein ausgewähltes Verkehrssystem simulieren zu können. Diese Szenarien bestehen grundsätzlich aus drei Kernelementen. Das Erste ist eine Repräsentation des betrachteten Verkehrsnetzes bestehend aus Straßen inkl. der Sonderspuren, Fuß- und Fahrradwege. Als zweites sind wichtige Komponenten der Verkehrsinfrastruktur wie Lichtsignalanlagen, Sensoren oder sonstige Elemente wie RSU in die Modellierung miteinzubeziehen. Und zu guter Letzt muss eine Verkehrsnachfrage bzw. ein Verkehrsaufkommen eingestellt werden [LBB+18].
In SUMO werden Straßennetze durch die Nutzung von Graphen erstellt. Die Knoten und Kanten dieser Graphen stellen dabei die Kreuzungen und Straßen des jeweiligen Verkehrsnetzes dar. Die Kreuzungen enthalten die entsprechenden Informationen über Form, Position und geltende Verkehrsregeln, wie zum Beispiel das Vorhandensein einer LSA. Demnach verbinden die Kanten, bestehend aus den Fahrspuren, unidirektional jeweils zwei Knoten. Den Fahrspuren werden Indices von rechts nach links, Geometrie, die erlaubten Fahrzeugklassen und geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen zugewiesen [KEBB12; LBB+18].
Da Verkehrsnetze oftmals bereits in verschiedenen digitalen Formen vorliegen, stehen in SUMO verschiedene Möglichkeiten zum Import dieser Daten zur Verfügung. Generell kann aber auch ein zu untersuchendes Verkehrssystem mithilfe der Anwendung *NETEDIT*, deren GUI in Abbildung 2-16 links zu sehen ist, von Hand erstellt und modifiziert werden. Üblicherweise ist das Vorgehen anhand der Nutzung von *NETCONVERT* verschiedene Dateiformate zu importieren und diese Netze dann zu bearbeiten. Zu den Importmöglichkeiten zählen Verkehrsnetze aus anderen Verkehrssimulationen, wie zum Beispiel VISSIM, oder auch digitale Netzformate wie OSM [OSM24]. Als zusätzliche

Hilfe wird im Softwarepaket von SUMO die Anwendung *osmWebwizard* zur Verfügung gestellt, welche über eine GUI die Auswahl eines bestimmten Bilanzraums erleichtert. Ein wichtiger Punkt ist an dieser Stelle der Umgang mit fehlenden Daten, die über heuristische Verfeinerungen den notwendigen Detaillierungsgrad für die mikroskopische Simulation über die Synthese von LSA, Vorfahrtsregeln und Kreuzungsgeometrien herstellen [LBB+18]. Das Vorgehen zur realitätskonformen Erstellung von Verkehrsnetzen in SUMO kann wie folgt gegliedert werden [Kra10; LBB+18]:

- Ein vorhandenes Verkehrsnetz wird über bspw. osmWebwizard importiert und in eine SUMO-spezifische Datei im Extensible Markup Language (XML)-Format geschrieben. Diese Datei enthält u. a. Informationen über Knoten und Kanten des Netzes sowie deren Verbindungen.
- Dieses erstellte Verkehrsnetz wird anschließend manuell über die GUI von NETEDIT inspiziert und angepasst. Der Vorgang wird wiederholt bis alle Anforderungen an das Netz erfüllt sind. Vor allem bei LSA mit komplexen Kreuzungsgeometrien ist eine händische Nachbearbeitung zur Herstellung des benötigten Detaillierungsgrades unabdingbar.
- Nachdem die grundlegende Netztopologie feststeht, werden nach Möglichkeit die automatisch generierten Signalpläne der LSA durch Originalsignalpläne, welche der Realität entsprechen, ersetzt. Zusätzlich können über sog. *Additionals* etwaige Detektoren sowie sonstige Infrastrukturelemente wie Bushaltestellen bspw. anhand eines Lageplans wie in Abbildung A2-1 ergänzt werden.

Das dritte Kernelement der Modellierung des Verkehrsaufkommens innerhalb von SUMO besteht im Allgemeinen aus einer weiteren XML-Datei, in welcher die *Routen* aller VTN verknüpft mit Startzeitpunkt und Fahrzeugtyp (z. B. die sensierbaren Klassen aus Abbildung 2-14) aufgelistet sind. Einzelfahrzeugen können auf diese Weise zusätzliche Attribute wie spezielle Emissionsklassen oder eine besondere Spurnutzung zugewiesen werden. Die Emissionsberechnung innerhalb der Simulation[25] leitet sich aus der Datenbasis des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) ab [INF24]. Die Routen selbst definieren sich über die jeweils nacheinander zu benutzenden Kanten im Verkehrsnetz. Werden anstelle einer vollständigen Route lediglich Start- und Endkanten angegeben, so werden diese über ausgewählte kürzeste-Wege-Algorithmen wie den von Dijkstra [Dij59] oder den A^*-Algorithmus [HNR68] vervollständigt. Um ein realistisch verteiltes Verkehrsszenario bspw. im Nutzergleichgewicht *User Equilibrium (UE)* herzustellen, bietet SUMO verschiedene Möglichkeiten mittels iterativer Prozesse z. B. über das Tool *duarouter*, die Methoden der *Dynamic User Assignment (DUA)* anwenden.
Die händische Erstellung des Verkehrsaufkommens ist bereits bei kleinen Netzen trotz

[25] In SUMO ist Version 3.1 des HBEFA das aktuelle Standardmodell [DLR24].

der Erweiterung von NETEDIT als graphische Hilfe sehr aufwändig, weshalb insbesondere für große Netze zum Beispiel aus Messdaten individuelle Routenbeschreibungen aller VTN erzeugt werden können. Dazu existieren im Softwarepaket von SUMO ebenfalls bereits einige Anwendungen, die z. B. anhand von Origin-Destination (OD)-Matrizen das Verkehrsaufkommen zwischen jeweils zwei Verkehrsanalysezonen über den Verkehrsfluss beschreiben und Routen erzeugen (*od2trips*). Der sog. *flowrouter* nutzt gar Überfahrdaten von Einzeldetektoren, um ein maximales Durchflussproblem in dem gegebenen Netz zu lösen, wobei die verfügbaren Detektordaten dabei als Straßenkapazitäten verwendet werden und die Detektoren lediglich anhand ihrer Netzposition als Quelle, Senke oder Zwischenstation definiert werden müssen. Neben den vorgestellten Programmen stehen noch weitere zur Verfügung, sodass die Erzeugung vordefinierter Verkehrsnachfragen erleichtert werden kann, wobei je nach Anwendung verschiedene Lösungen Vor- und Nachteile mit sich bringen bzw. das Wunschergebnis liefern [LBB+18; DLR24; Kra10].
Nach der Definition eines Verkehrsszenarios ist es äußerst nützlich die Simulationsobjekte (Fahrzeuge, LSA, Detektoren) in einer visuellen Darstellung qualitativ zu untersuchen. Zu diesem Zweck bietet SUMO die *SUMO-GUI*, welche es ermöglicht, Simulationsgeschwindigkeiten zu variieren und Simulationen mit verschiedenen Einfärbungsoptionen festgelegter Kriterien wie Wartezeiten von Fahrzeugen oder Verkehrsdichten von Netzabschnitten durchzuführen. Ein exemplarischer Ausschnitt der SUMO-GUI ist in Abbildung 2-16 auf der rechten Seite angedeutet. Für die quantitative Analyse stehen eine Vielzahl von Ausgabedateien zur Verfügung, die selektiv aktiviert werden können. Die Daten beinhalten u. a.

- Fahrzeugtrajektorien (Positionen und Geschwindigkeiten),
- von modellierten Detektoren erfasste Verkehrsdaten,
- über Netzelemente aggregierte Verkehrsdaten (Kanten oder Fahrspuren),
- Verkehrsdaten gesamter Fahrten inkl. Wartezeiten und Emissionen,
- Protokolle von LSA-Schaltungen und vieles mehr.

Diese Ausgabedateien können mithilfe von SUMO-Tools visualisiert oder für andere Anwendungen exportiert werden und ermöglichen aufgrund der Vielseitigkeit sowie des Detailgrades eine aussagekräftige Untersuchung des jeweiligen Szenarios [LBB+18].

2.3.3 Benutzerschnittstelle in SUMO: TraCI/TraCI4Matlab

Mit den obigen Programmen und Methoden stellt SUMO verschiedenste und umfangreiche Verkehrssimulationen zur Verfügung, die viele Aspekte des realen Verkehrs widerspiegeln können. Dennoch gibt es Beschränkungen, die insbesondere im Bereich der Mo-

dellierung von LSA und der Kommunikation mit der Infrastruktur sowie zwischen Verkehrsteilnehmern untereinander liegen. Dementsprechend müssen bei Maßnahmen zur Regelung des Verkehrs externe Programme herangezogen werden [LBB+18]. Wie bereits erwähnt, existiert mit TraCI eine Schnittstelle zur Kopplung von SUMO mit anderen Simulationsprogrammen oder Software, die Zugriff auf Simulationsobjekte und deren Beeinflussung während einer laufenden Verkehrssimulation ermöglicht [LBB+18; Kra10]. Die Architektur von TraCI ist in [WPR+08] beschrieben und basiert auf dem Server/Client-Prinzip, sodass Verkehrssimulationen in SUMO extern gesteuert und einzelne Simulationsschritte über TraCI induziert werden können. Zwischen den Simulationsschritten in SUMO besteht dann die Möglichkeit, eigene Algorithmen oder Funktionen der externen Programme auf Basis von Informationen aus der Verkehrssimulation auszuführen. Dabei gliedern sich die Befehle klassischerweise in *get*-Kommandos zum Informationsabruf und *set*-Kommandos zur gezielten Simulationsbeeinflussung. Die auf diese Weise realisierbaren Maßnahmen reichen vom einfachen Abruf der aktuellen Geschwindigkeit v_α eines VTN α über dessen Routenanpassung bis hin zu Manipulationen der Verkehrsinfrastruktur wie bei Phasenwechseln der Lichtsignalanlagen. Für diese Entwicklung wird SUMO hauptsächlich mit MATLAB mithilfe von TraCI4Matlab [AEE15] verknüpft, wobei aufgrund der modifizierbaren Umsetzung verschiedene Nachrüstungen an der Schnittstelle eigens implementiert wurden. Allein aufgrund dieser Schnittstelle ist es möglich, eine digitale Repräsentation analog zum Konzept eines *digitalen Zwillings* [Gri14] über ständige Adaptation an aktuelle Messdaten anzupassen, sodass grundsätzlich ein Live-Abbild des betrachteten Verkehrssystems mit SUMO realisierbar ist. Im Rahmen dieser Arbeit soll genau diese Voraussetzung für die LSA-Regelung ausgenutzt werden, wobei die jeweiligen Manipulationen der Verkehrssimulation sowie Besonderheiten der Umsetzungen in Kapitel 4 der Systembeschreibung verdeutlicht werden.

2.3.4 SUMO Verkehrsmodell

Die separate Modellierung von Fahrzeugbewegungen bzgl. *longitudinaler und lateraler Bewegungsrichtung* wird sowohl in SUMO als auch in vielen anderen mikroskopischen Verkehrssimulationen umgesetzt [Kra10; Bar10a]. Dabei arbeitet SUMO mit einer Zeitdiskretisierung und gleichzeitig raumkontinuierlich. Für die longitudinale Fahrzeugbewegung werden Fahrzeugfolgemodelle genutzt, die entweder vom Anwender selbst implementiert oder u. a. aus folgender Auswahl von Fahrzeugfolgemodellen gewählt werden können [DLR24]:

- Modifiziertes Krauß-Modell (Standard in SUMO) [DLR24; Kra10],
- Originales Krauß-Modell [Kra98],

- Fahrzeugfolgemodelle nach Wiedemann (2- und 10-Parameter Version; Basis des Tools Vissim) [Wie74; Rei94],
- ACC- sowie Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)-Fahrzeugfolgemodell nach [MS14; XWv17; XWSv18] und
- Intelligent Driver Model [THH00].

Für die untergeordnete laterale Fahrzeugbewegung stehen in SUMO folgende Spurwechselmodelle zur Verfügung:

- Spurwechselmodell nach Erdmann (Standard in SUMO) [Erd14],
- Spurwechselmodell für die Simulation von Unterspuren [SEFW16; SEF18] und
- Spurwechselmodell nach Krajzewicz (ehemaliger Standard in SUMO) [Kra09].

Aufgrund der Verwendung als Standard in SUMO werden das *modifizierte Fahrzeugfolgemodell nach Krauß* sowie das *Spurwechselmodell nach Erdmann* nachfolgend detailliert beschrieben.

Modifiziertes Fahrzeugfolgemodell nach Krauß

Das modifizierte Fahrzeugfolgemodell nach Krauß basiert wie das Original auf der Prämisse der Kollisionsfreiheit beim Fahrverhalten aller VTN. Die Modifikationen beschränken sich dabei auf die Berücksichtigung unterschiedlicher Bremsfähigkeiten der Fahrzeuge und einer Anpassung der Sicherheitsgeschwindigkeit, die jeweils Kollisionen verhindern [DLR24].
Grundsätzlich wird das an dieser Stelle beschriebene diskrete Modell über den einzuhaltenden Sicherheitsabstand beim Haltevorgang eines Fahrzeugs α hinter einem Führerfahrzeug $\alpha - 1$ definiert. Es besticht durch seine effiziente Ausführbarkeit und wurde bereits anhand verschiedenster Modelle validiert [Kra10].
Umgesetzt wird die zuvor genannte Sicherheitsgeschwindigkeit v_{safe} in Abhängigkeit des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug s_α und dessen Geschwindigkeit $v_{\alpha-1}$ über

$$v_{\text{safe},\alpha}(k) = -\tau \cdot a_{\min,\alpha} + \sqrt{(\tau \cdot a_{\min,\alpha})^2 + v_{\alpha-1}(k - \Delta t) + 2a_{\min,\alpha} \cdot s_\alpha(k - \Delta t)},$$

wobei sich an der üblichen Approximation des Bremswegs d_b mit

$$d_b(v) = \frac{v^2}{2a_{\min}}$$

orientiert wird. Die Notation ist derer aus Abschnitt 2.1.1 angepasst, sodass bspw. τ der Reaktionszeit des betrachteten VTN und $a_{\min}$ der maximalen Abbremsung entspricht. Unter Berücksichtigung einer maximalen Beschleunigung $a_{\max}$, der Schrittweite Δt und der

maximalen Geschwindigkeit $v_{\max}$ resultiert die angestrebte Geschwindigkeit v_{des} des betrachteten Fahrzeugs als

$$v_{\text{des},\alpha}(k) = \min\left\{v_{\text{safe},\alpha}(k), v_{\alpha}(k - \Delta t) + a_{\max,\alpha} \cdot \Delta t, v_{\max}\right\}.$$

Die Berücksichtigung eines nicht perfekten Fahrverhaltens ist eine der Kernerrungenschaften des Fahrzeugfolgemodells nach Krauß, indem die gewünschte Geschwindigkeit infolge eines einfachen Zufallsprozesses reduziert wird. Die tatsächliche Geschwindigkeit der VTN ergibt sich demnach zu

$$v(k) = \max\left\{0, v_{\text{dawdle}}(k)\right\}. \tag{2-11}$$

Die durch das Trödeln (im Englischen Dawdling) ausgelöste Geschwindigkeitsreduktion wird dabei anhand der Gleichung

$$v_{\text{dawdle}}(k) = v_{\text{des}}(k) - r \cdot \sigma \cdot a_{\max} \cdot \Delta t$$

realisiert, in der eine Zufallszahl $r \in [0, 1]$ und der sog. Imperfektionsparameter σ verwendet werden. Zusätzlich zu den genannten Modifikationen des Fahrzeugfolgemodells nach Krauß wird in SUMO standardmäßig mit zwei Erweiterungen gearbeitet. Einerseits wird eine geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung

$$a(v) = a\left(1 - \frac{v}{v_{\max}}\right)$$

realisiert und andererseits das Trödeln für geringe Geschwindigkeiten mithilfe folgender Fallunterscheidung[26]

$$v_{\text{dawdle,new}}(k) = \begin{cases} v_{\text{des}}(k) - r \cdot \sigma \cdot v_{\text{des}}(k), & \text{falls} \quad v_{\text{des}}(k) < a\left(v_{\text{des}}(k)\right), \\ v_{\text{dawdle}}(k), & \text{sonst} \end{cases}$$

abgeändert, was letztlich den zweiten Term der Maximumsbildung von (2-11) substituiert.

Neben der Beeinflussung des Fahrermodells durch etwaige Führerfahrzeuge werden in SUMO weitere Berechnungen bzgl. der Fahrzeugdynamiken angestellt, die auf den infrastrukturellen Rahmenbedingungen des gegebenen Verkehrssystems beruhen. Die Geschwindigkeit aller VTN wird zusätzlich an die Gegebenheiten der Straßenführung und Verkehrsregeln, insbesondere an Kreuzungen, angepasst [Kra10; Kra98]. Aus diesem Grund führt [Erd14] den Begriff des *Kreuzungsmodells* ein.

[26] Nach [Kra10] und anhand der Implementierung [DLR24] korrigiert.

Spurwechselmodell nach Erdmann

Die lateralen Bewegungen in mikroskopischen Verkehrssimulationen werden durch Spurwechselmodelle bestimmt, welche die Spurwahl der VTN auf mehrspurigen Straßen regeln und gleichzeitig deren Geschwindigkeit den Umgebungsbedingungen anpassen. Voraussetzungen für einen Spurwechsel sind genügend Freiraum auf der Zielspur und ausreichender Abstand zu angrenzenden Fahrzeugen gemäß des Fahrzeugfolgemodells, sodass die verschiedenen Kernelemente der Bewegungsdynamik interagieren.
Das standardmäßige Spurwechselmodell in SUMO nach [Erd14], welches, falls nicht anders erwähnt, auch die Quelle dieses Abschnitts darstellt, unterscheidet vier Motive für einen Spurwechsel:

1. Strategischer Spurwechsel,
2. Kooperativer Spurwechsel,
3. Taktischer Spurwechsel und
4. Regulatorischer Spurwechsel.

Nachfolgend sollen alle genannten Beweggründe kurz erläutert werden, wobei die Architektur der Straßen bestehend aus Kanten mit indizierten Spuren aus Abschnitt 2.3.2 als Verständnisgrundlage dient und in Abbildung 2-17 verdeutlicht wird.

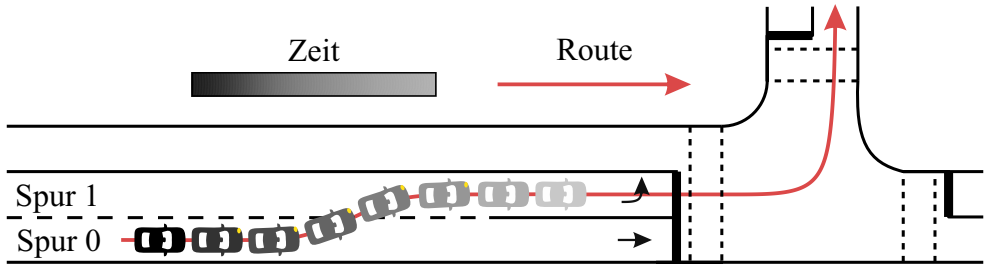


Abbildung 2-17: Beispielsituation eines strategischen Spurwechsels für einen gewünschten Abbiegevorgang

Für einen angestrebten Spurwechsel werden jeweils entsprechende Nachfolgespuren sowie Sicherheitsgeschwindigkeiten aller beteiligten Fahrzeuge bestimmt, die als Grundlage der weiteren Berechnungen der Wechselrichtungen und -anforderungen dienen.
Ein *strategischer Spurwechsel* soll durchgeführt werden, wenn sich ein Fahrzeug auf einer Fahrspur bewegt, von der aus die nächste Straße der eigenen Verkehrsroute nicht erreichbar ist, wie es exemplarisch in Abbildung 2-17 zu sehen ist. Diese Spur, im Beispiel Spur 1, wird in diesem Kontext auch als *Dead Lane* bezeichnet. Die Berechnungen eines strategischen Spurwechsels basieren auf den sog. *Best Lanes*, also den bevorzugten Nachfolgespuren der Route, die ausgehend von der derzeitig belegten Kante eine maximal zurückzulegende Distanz ermöglichen. Außerdem werden die Belegung entlang

dieser Best Lanes, welche mit o bezeichnet wird, und der Best Lane Offset ξ, mit ξ als aktueller Versatz zur Best Lane im Fahrspurindex, zur Entscheidung herangezogen. Bei Erfüllung der Bedingung

$$d_{\mathrm{DL}} - o < v_{\mathrm{LA}} \cdot |\xi| \cdot f \tag{2-12}$$

sollte demnach ein strategischer Spurwechsel durchgeführt werden. Hierbei beschreibt d_{DL} den Abstand des betrachteten Fahrzeugs bis zum Ende der Dead Lane und o reduziert diesen Abstand belegungsabhängig. Die Variable v_{LA} stellt die prädizierte Geschwindigkeit des Fahrzeugs am Ende der Dead Lane dar und f ist ein Anpassungsfaktor je nach Manöver. Ist die Bedingung aus Gleichung (2-12) erfüllt, ein Spurwechsel aber wegen eines anderen blockierenden Fahrzeugs (Vorgänger oder Nachfolger inbegriffen) nicht möglich, werden die Geschwindigkeiten der beteiligten VTN mithilfe von Fallunterscheidungen adaptiert. Die entsprechenden Berechnungen der Geschwindigkeitsanpassung hängen von dem verwendeten Fahrzeugfolgemodell ab. Sie beruhen auf den beiden Geschwindigkeiten des betrachteten und des blockierenden Fahrzeugs, deren Fahrzeuglücke und der verbleibenden Zeit bis das Ende der Dead Lane erreicht wird.
Genau für den obigen Fall eines blockierenden Fahrzeugs beim strategischen Spurwechsel wird ein *kooperativer Spurwechsel* von einem Vorgängerfahrzeug der blockierten Zielspur angestrebt. Der Vorgänger wechselt, wenn eine Geschwindigkeitsanpassung nicht genügt, selbst die Spur, um ausreichenden Raum auf der Zielspur zu schaffen.
Spurwechsel bspw. zur Durchführung von Überholmanövern werden im Modell nach Erdmann als *taktische Spurwechsel* bezeichnet. Als Voraussetzung wird geprüft, ob der Parameter zur Beschreibung der Geschwindigkeitserhöhungswahrscheinlichkeit auf der Zielspur vordefinierte Grenzwerte überschreitet. Dieser Parameter p_{SG} wird iterativ in jedem Simulationsschritt berechnet. Die leicht vereinfachte Vorschrift[27]

$$p_{\mathrm{SG}} = \begin{cases} \frac{p_{\mathrm{SG}}}{2}, & v_{\mathrm{KL}} - 5\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} > v_{\mathrm{LC}} \wedge p_{\mathrm{SG}} < 0, \\ p_{\mathrm{SG}} - \dfrac{v_{\mathrm{LC}} - v_{\mathrm{KL}}}{v_{\mathrm{LC}}}, & p_{\mathrm{SG}} < 0, \end{cases}$$

wird für den Spurwechsel nach rechts genutzt und

$$p_{\mathrm{SG}} = \begin{cases} \frac{p_{\mathrm{SG}}}{2}, & v_{\mathrm{KL}} > v_{\mathrm{LC}} \wedge p_{\mathrm{SG}} > 0, \\ \frac{4p_{\mathrm{SG}}}{5}, & v_{\mathrm{KL}} = v_{\mathrm{LC}} \wedge p_{\mathrm{SG}} > 0, \\ p_{\mathrm{SG}} + \dfrac{v_{\mathrm{LC}} - v_{\mathrm{KL}}}{v_{\mathrm{LC}}}, & \text{sonst} \end{cases}$$

für den Spurwechsel nach links. Dabei wurde die Beziehung aus [Erd14] anhand des Quellcodes von SUMO detailliert [DLR24]. Die Variablen v_{LC} und v_{KL} beschreiben die

[27] Die Fallunterscheidung verzichtet auf die zusätzliche Darstellung des Einflusses des regulatorischen Spurwechsels auf das rechtsseitige Überholen.

erwartbaren Geschwindigkeiten nach Spurwechsel (Lane Change) respektive bei Halten der aktuellen Fahrspur (Keep Lane). Bei jedem Spurwechsel wird die Berechnung neu initialisiert, sodass auf diese Weise und aufgrund asymmetrischer Schwellen (−2 für einen Wechsel nach rechts und 0,2 nach links) Oszillationen vermieden werden.
Regulatorische Spurwechsel sind in vielen Ländern gesetzlich vorgegeben. In Deutschland gilt das Rechtsfahrgebot mit der Prämisse, möglichst weit rechts zu fahren [BRD21], um u. a. schnelleren Fahrzeugen das Überholen zu ermöglichen. Im Spurwechselmodell nach Erdmann wird jedem VTN eine Rechtshaltewahrscheinlichkeit p_{KR} zugeordnet, welche mithilfe der Aktualisierung

$$p_{\mathrm{KR}} = p_{\mathrm{KR}} - \frac{t_{\mathrm{LC},v_{\mathrm{des}}} \cdot v_{\mathrm{zul}}}{v_{\mathrm{des}} \cdot v \cdot T_K}$$

unter der Voraussetzung $v_{\mathrm{KL}} < v_{\mathrm{LC}} + 5\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ erneuert wird. Dabei beschreibt $t_{\mathrm{LC},v_{\mathrm{des}}}$ die voraussichtliche Dauer, welche das Fahrzeug mit der maximalen Wunschgeschwindigkeit v_{des} auf der rechten Spur fahren kann, bevor dort ein Überholmanöver durchgeführt werden müsste. Zusätzlich beschreibt v_{zul} wiederum die geltende Geschwindigkeitsbegrenzung, v die aktuelle Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs und T_K ist ein fester Kalibrierungsfaktor. Unterschreitet p_{KR} einen definierten Grenzwert, wird ein regulatorischer Spurwechsel eingeleitet.
Die genaue Implementierung des Spurwechselmodells enthält noch weitere Feinheiten wie zur Prävention von *Pattsituationen* (engl. *Dead Locks*). In diesem Abschnitt sind also die Grundlagen des Modells beschrieben und hierarchisch nach ihrer Ausführungspräferenz sortiert[28]. Dementsprechend wird ein dringender strategischer Spurwechsel eher durchgeführt als derjenige zur Einhaltung des Rechtsfahrgebots [Erd14].

2.4 Regelungstechnische Grundlagen

Bevor im folgenden Kapitel 3 die aktuelle Forschung zu Umsetzungen verschiedener Konzepte und Theorien beleuchtet wird, dient dieser Abschnitt dazu, einige wesentliche regelungstechnische Prinzipien in einer kurzen Zusammenfassung grundlegend einzuleiten und vorzustellen. Auf diese Weise werden die Gemeinsamkeiten und Abgrenzungen der eigenen Entwicklungen ab Kapitel 4 und damit der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit verdeutlicht.
Um den Rahmen dabei nicht zu sprengen, werden einige grundsätzliche Prinzipien und Darstellungsweisen der Regelungstechnik vorausgesetzt, sodass bspw. nicht jede Systemdarstellung wie die Zustandsraumdarstellung für lineare zeitinvariante Systeme explizit hergeleitet bzw. erläutert wird.

[28] Es wird immer zunächst der Spurwechsel nach rechts geprüft.

2.4.1 Zustandsbeobachter

Ausgangslage bilden die Zustandsgrößen $x \in \mathbb{R}^n$ der Regelstrecke eines dynamischen Systems in *Zustandsraumdarstellung*

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u, \\ y &= C \cdot x + D \cdot u, \end{aligned} \tag{2-13}$$

die nicht zwangsläufig (vollständig) messbar sind oder deren Erfassung aus beliebigen Gründen zu kostenintensiv sein kann[29]. Um dem Abhilfe zu schaffen, wurde daher bereits von Luenberger in [Lue64; Lue66] die Theorie des *Beobachterentwurfs* für lineare Systeme entwickelt. Der Grundgedanke ist dabei die *Rekonstruktion* des Zustandsvektors x unter Einbringung des Modellwissens der Regelstrecke und Kenntnis des Systemeingangs $u \in \mathbb{R}^p$. Der zugehörige Anfangszustand x_0 der Regelstrecke muss dabei nicht notwendigerweise bekannt sein und die üblicherweise auftretenden Abweichungen zwischen realer Strecke und Modell werden über ein Rückkopplungssystem des Beobachters korrigiert. Für den Schätzwert $\hat{x}$ ergibt sich bei idealer Modellierung die folgende Dynamik

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A \cdot \hat{x} + B \cdot u + r, \\ \hat{y} &= C \cdot \hat{x} + D \cdot u. \end{aligned}$$

Bei der Korrektur $r \in \mathbb{R}^n$ der Zustandsgleichung wird die Abweichung vom tatsächlichen Ausgang $y \in \mathbb{R}^q$ über

$$r = L \cdot \Delta y = L \cdot (y - \hat{y})$$

bestimmt. Demnach kann mithilfe der Beobachtermatrix $L \in \mathbb{R}^{(n,q)}$ die Schätzfehlerdynamik

$$\Delta \dot{x} = (A - LC) \cdot \Delta x = A_B \cdot \Delta x$$

derart beeinflusst werden, dass Δx für $t \to \infty$ gegen Null strebt[30] [Föl22]. Die Übertragung des Beobachterkonzepts auf nichtlineare Systeme ist grundsätzlich möglich, jedoch ist die Anwendung und Auslegung nicht so trivial wie im linearen Fall, da unter anderem der Stabilitätsnachweis oftmals – wenn überhaupt – nur schwer zu führen ist [Ada18]. Die Gleichungen aus (2-13) wandeln sich zu

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u), \\ y &= g(x, u). \end{aligned} \tag{2-14}$$

[29] Der Übersichtlichkeit halber wird auf die Darstellung der Zeitabhängigkeit im Folgenden verzichtet, sodass u. a. $x := x(t)$ gilt.

[30] Bedingung ist, dass die Eigenwerte von A_B links der imaginären Achse liegen.

Zudem gilt auch das *Separatationstheorem* im Allgemeinen nicht, also ist die Möglichkeit zur unabhängigen Auslegung von Regler und Beobachter nicht notwendigerweise gegeben. Das entsprechende Blockschaltbild der Idee des nichtlinearen Regelkreises mitsamt Beobachter und beliebigem Zustandsregler $K(w, \hat{x})$ ist in Abbildung 2-18 dargestellt.

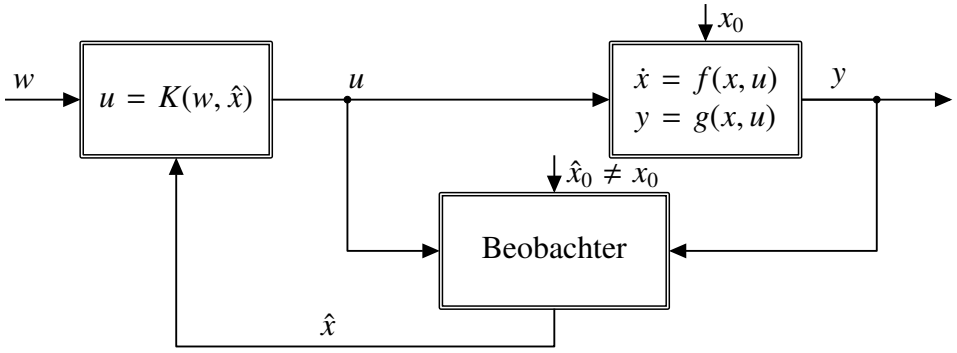


Abbildung 2-18: *Allgemeine Signalstruktur eines nichtlinearen Regelkreises mit Zustandsbeobachter nach [Ada18]*

Welcher Natur dabei der nichtlineare Beobachter im Speziellen ist, hängt stark vom System und dessen Beschreibung ab [Ada18].
Aufgrund der Verwendung von speziellen Formen des *Kalman-Filters* in einigen verwandten Anwendungsfällen wird das Konzept an dieser Stelle etwas näher erläutert. Das zu rekonstruierende System ist angelehnt an (2-14) und mit zusätzlich störenden Rauschprozessen $\mu \sim \mathcal{N}(0, Q)$ und $\rho \sim \mathcal{N}(0, S)$ erweitert zu

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) + \mu, \\ y &= g(x, u) + \rho. \end{aligned}$$

Als Entwurfsparameter dieses sog. *Erweiterten Kalman-Filters (EKF)* dienen die Kovarianzen Q und S der Rauschprozesse, wobei mithilfe der Matrix $P(t)$ als Lösung der algebraischen Riccati-Gleichung

$$A(t)P(t) + P(t)A^T(t) - P(t)C^T(t)S^{-1}C(t)P(t) = -Q \tag{2-15}$$

die Beobachtermatrix $L(t)$ über die Entwurfsgleichung des klassischen Kalman-Filters

$$L(t) = P(t)C^T(t)S^{-1}$$

bestimmt wird. Dementsprechend ergibt sich folgende Differentialgleichung

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + L(y - g(\hat{x}, u)),$$

aus der die aktuelle Schätzung $\hat{x}(t)$ berechnet werden kann. Die in der Riccati-Gleichung (2-15) benötigten zeitvarianten Matrizen $A(t)$ und $C(t)$ sind dabei die Linearisierungen der Zustandsfunktion $f(x, u)$ respektive der Ausgangsfunktion $g(x, u)$ um den Arbeitspunkt der derzeitigen Schätzung. Für die praktische Umsetzung sei zu erwähnen, dass die Wahl von Q und S ein iterativer Prozess ist und die Riccati-Gleichung (2-15) wie im Linearen durchgehend ($A(t)$ und $C(t)$ sind zeitvariante Jacobimatrizen) über die Riccati-Differenzialgleichung gelöst werden kann [Ada18].
In dieser kontinuierlichen Darstellung wird die *Prädiktor-Korrektor-Struktur* des Kalman-Filters durch das Rückkopplungssystem nicht sehr deutlich, da sämtliche Schätzungen für Zustände und Kovarianzen aus Differentialgleichungen resultieren. Im diskreten Zeitbereich, welcher in der Verkehrssimulation häufig Anwendung findet (insbesondere in der mikroskopischen Modellierung; siehe Abschnitt 2.1), kann ein zu System (2-14) entsprechendes Grundsystem mit der Systemdarstellung

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, u_k) + \mu_k, \\ y_k &= g(x_k, u_k) + \rho_k. \end{aligned} \tag{2-16}$$

beschrieben werden. Mit der Initialisierung des Systemzustands $\hat{x}_0 = \mathbb{E}[x_0]$ und der Fehlerkovarianz $\hat{P}_0 = \mathbb{E}[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]$ ergibt sich die Prädiktion, auch bekannt als *a priori-Schätzwert*, mit einer Approximation des Erwartungswertes zu

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1|k} &= \mathbb{E}[f(x_k, u_k) + \mu_k | k] \approx f(\hat{x}_k, u_k) \approx A_k \cdot \hat{x}_k, \\ \hat{P}_{k+1|k} &= A_k \hat{P}_k A_k^T + Q_k. \end{aligned}$$

Die anschließende Korrektur mit der zusätzlichen Kalman-Verstärkung $\mathcal{K}_k$ kann über die folgenden Vorschriften

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_k &= \hat{P}_{k+1|k} \cdot C_k^T (C_k \hat{P}_{k+1|k} C_k^T + S_k)^{-1}, \\ \hat{x}_{k+1} &= \hat{x}_{k+1|k} + \mathcal{K}_k (y_k - C_k \hat{x}_{k+1|k}), \\ \hat{P}_{k+1} &= (I - \mathcal{K}_k C_k) \hat{P}_{k+1|k} \end{aligned} \tag{2-17}$$

berechnet werden. Aufgrund des Vergleichs mit der Messung wird der obige Korrekturteil (2-17) auch als *a posteriori-Schätzwert* bezeichnet und führt dazu, dass die oben genannte Prädiktor-Korrektor-Struktur besser ersichtlich wird. An dieser Stelle sollte bemerkt werden, dass die Linearisierungen A_k und C_k, also die Berechnung der Jacobi-Matrizen, fortlaufend um den jeweils neuen Arbeitspunkt durchgeführt werden müssen und $(y_k - C_k \hat{x}_{k+1|k})$ als ein Maß für die a priori-Vorhersagegüte angesehen werden kann.
Die Linearisierungen und die reine Propagation des Mittelwertes der Schätzung sind sowohl wegen der Approximationsgüte als auch wegen der kostenintensiven Berechnung

der Ableitungen Schwächen des EKF. Diese können durch die sog. *Unscented Transformation* im Rahmen des *Unscented Kalman-Filters (UKF)* adressiert werden [JU97; Wv00; Sch17].
Da für die weitere Arbeit lediglich die Struktur der Kalman-Filter von größerem Interesse ist, soll an dieser Stelle der Vollständigkeit halber nur die Idee des UKF angedeutet werden. Wegen der Annahme, dass es leichter sei, eine gaussverteilte Zufallsvariable zu approximieren als eine Nichtlinearität jedweder Art, wird eine Menge ausgewählter Punkte (sog. *Sigma-Punkte*) verwendet, um auf diese direkt die nichtlineare Funktion anzuwenden. Diese Sigma-Punkte sind dabei anders als bei *Monte-Carlo-Methoden* auf eine feste Anzahl $2n+1$, abhängig von der Systemdimension n, beschränkt und derart gewählt, dass sie den tatsächlichen Erwartungswert sowie die Kovarianz des Zustandsvektors abbilden. Über die nichtlineare Transformation der Sigma-Punkte und eine ebenso fest definierte Gewichtung wird dann eine vorläufige Zustandsschätzung konstruiert. Das iterative Verfahren besitzt eine ähnliche Form wie das EKF, sodass diese a priori-Schätzung nochmals über die Messungen korrigiert wird. Für weitere Informationen und die genauen Vorschriften sei auf die Originalliteratur [JU97] oder auf [Sch17] verwiesen.

2.4.2 Reglerentwurfsverfahren

Da im Allgemeinen sehr viele verschiedene Strategien zur Reglerauslegung existieren und Ausgewählte auch im Rahmen der Bearbeitungszeit dieser Dissertation für den vorliegenden Anwendungsfall geprüft wurden, sollen in diesem Abschnitt die allgemeinen Grundprinzipien der letztlich angewandten Regelungskonzepte vorgestellt werden. Dabei handelt es sich um die Verfahren der *modellprädiktiven Regelung* (im Englischen *Model-Predictive Control (MPC)*), welche schließlich auch den Kern des entwickelten Regelungssystems darstellt (siehe Kapitel 4) und der *Fuzzy-Regelung*, welche im Rahmen einer studentischen Arbeit als mögliche Alternative getestet wurde [Ash20]. Neben der Fuzzy-Regelung wurde zusätzlich die Nutzung des *bestärkenden Lernens* (engl. *Reinforcement Learning (RL)*) als Methode des *maschinellen Lernens* (engl. *Machine Learning (ML)*) anhand einer studentischen Arbeit untersucht [Sim20], dessen Idee trotz eines vielversprechenden Ansatzes nicht in den Regelungsentwurf der vorliegenden Arbeit integriert wurde.

Modellprädiktive Regelung

Die Grundsätze der MPC sollen im folgenden Abschnitt detailliert erläutert werden, da der MPC-Ansatz die Basis der in Kapitel 4 vorgestellten Entwicklung darstellt. Neben dem allgemeinen Konzept und dessen Struktur sollen auch kurz die maßgeblichen Ele-

mente der Berücksichtigung von Systembeschränkungen sowie die notwendige Gütefunktion diskutiert werden. Dabei ist das Konzept an sich keineswegs neu, was in [QB97; QB03] übersichtlich dargestellt wird. Allein die Aktualisierung der Veröffentlichung zeigt den Fortschritt in diesem Bereich und zusätzlich zur Zusammenfassung vieler Anwendungen[31] wird gleichzeitig auch eine Brücke zu den Grundlagen und zu der Entstehung mitsamt des Beobachterkonzepts nach Kalman aus Abschnitt 2.4.1 geschlagen. Als ein aktuelles Anwendungsbeispiel kann die Verwendung der MPC am Fahrsimulator des Lehrstuhls für Regelungstechnik und Mechatronik dienen, wo das Immersionsempfinden durch *Motion-Cueing-Algorithmen* gesteigert werden konnte [Bie23]. Dabei fasst die bereits im Jahr 1967 ausgesprochene Erkenntnis das Prinzip der MPC hervorragend zusammen [LM67]:

> *„One technique for obtaining a feedback controller synthesis from knowledge of open-loop controllers is to measure the current control process state and then compute very rapidly for the open-loop control function. The first portion of this function is then used during a short time interval, after which a new measurement of the function is computed for this new measurement. The procedure is then repeated.“*

Generell handelt es sich bei der MPC um ein nichtlineares Regelungsverfahren, welches sich sowohl auf lineare als auch auf nichtlineare Regelstrecken, mit und ohne Beschränkungen im diskreten sowie kontinuierlichen Einsatzfall anwenden lässt. Ausgangspunkt der MPC ist ein internes Streckenmodell des Prozesses, was nicht direkt für den Reglerentwurf, sondern für die Prädiktion des zukünftigen Prozessverhaltens genutzt wird. Wie schon dem Zitat zu entnehmen, ist die Idee, *online* während des Prozessablaufs den Ausgangsverlauf anhand eines Teils der berechneten Stellgröße zu optimieren und anschließend dieses Vorgehen zu wiederholen. Die an dieser Stelle betrachteten diskreten Prozessmodelle haben dabei zumeist die aus Gleichung (2-16) bekannte Form ohne Rauschen

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k),$$
$$y_k = g(x_k, u_k),$$

mit äquidistanter Abtastung der Periodendauer T_s. Für die Struktur des geschlossenen Regelkreises ergibt sich das in Abbildung 2-19 gezeichnete Blockschaltbild.
Wie in der Darstellung zu erkennen ist, wird das Prädiktionsmodell genutzt, um den zukünftigen Verlauf der Ausgangsgrößen $y_{k+i} \in \mathbb{R}^{q \cdot n_p}$ vorherzusagen und mithilfe eines Abgleichs der Referenz w_{k+i} über eine Optimierung den gesamten Stellgrößenverlauf $u_{k+i} \in \mathbb{R}^{p \cdot n_c}$ zu bestimmen. Als Ausgang der MPC wird ausschließlich $u_{\text{opt},k} \in \mathbb{R}^q$ als

[31] Die MPC wird u. a. im Raffineriebetrieb seit den 1970er Jahren eingesetzt, hat sich aber auch durch den technologischen Fortschritt zur Regelung von hochdynamischer Systeme etabliert.

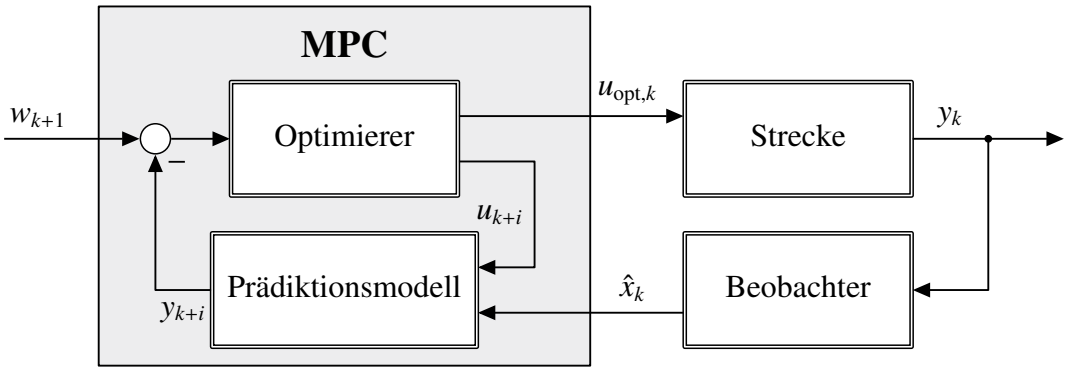


Abbildung 2-19: *Strukturbild des geschlossenen MPC-Regelkreises mit Beobachter*

erster Teil von u_{k+i} auf die Strecke geschaltet. Das Prädiktionsmodell verarbeitet in der gezeigten Struktur den aktuell beobachteten Zustand $\hat{x}_k$. Denn wenn nicht alle notwendigen Systemzustände zur Vorhersage durch Messungen bekannt sind, muss die Struktur noch um einen im vorherigen Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Zustandsbeobachter wie dargestellt ergänzt werden.

Die numerische Optimierung minimiert dabei zur Laufzeit über den Prädiktionshorizont $n_p \in \mathbb{N}$ ein zu definierendes Gütemaß[32] J über Variation der künftigen Stellgrößen u_{k+i} ab dem Zeitpunkt k für einen endlichen Stellhorizont $n_c \in \mathbb{N}$ mit $n_p \geq n_c$. Häufig findet ein quadratisches Gütefunktional der Art

$$J = \sum_{j=1}^{n_p} \|w_{k+i} - y_{k+i}\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{n_p} \|u_{k+i}\|_R^2 + \sum_{j=0}^{n_c} \|\Delta u_{k+i}\|_S^2, \tag{2-18}$$

Anwendung, wobei für die allgemeine quadratische Form

$$\|v\|_A^2 := v^T A v, \quad \text{für beliebige } v \in \mathbb{R}^n,\ A \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

genutzt wird [PLB15]. Die ersten beiden Terme in (2-18) bewerten über den gesamten Prädiktionshorizont n_p einerseits die Abweichung von der Solltrajektorie mit der positiv semidefiniten Matrix Q ($Q \geq 0$) und andererseits die Stellgröße mithilfe der positiv definiten Matrix R ($R > 0$). Der dritte Term dagegen beschränkt sich auf den Stellhorizont n_c und soll die schrittweise Stellgrößendifferenz anhand der Gewichtung mit $S > 0$ minimieren. Die Bedingungen an die Definitheit der Gewichtungsmatrizen sind zwingende Anforderungen zur Gewährleistung der sinnvollen Lösbarkeit des gestellten Optimierungsproblems. Die Nichtbeachtung einer Stellgrößenkomponente könnte bspw. zu exorbitanten Stellgrößen führen und so die Optimierung kompromittieren [PLB15].

[32] Die Begriffe Gütemaß und Kostenfunktional werden in dieser Arbeit als Synonym genutzt, obwohl wörtlich Güte eine Maximierung bzw. Kosten eine Minimierung innerhalb der Optimierung suggerieren.

Auf diese Weise können mithilfe des Gütefunktionals verschiedene Regelziele, wie gutes Folgeverhalten oder geringe Stellaufwände, gezielt beeinflusst werden. Der zeitliche Ablauf der MPC ist nachfolgend in Abbildung 2-20 skizziert.

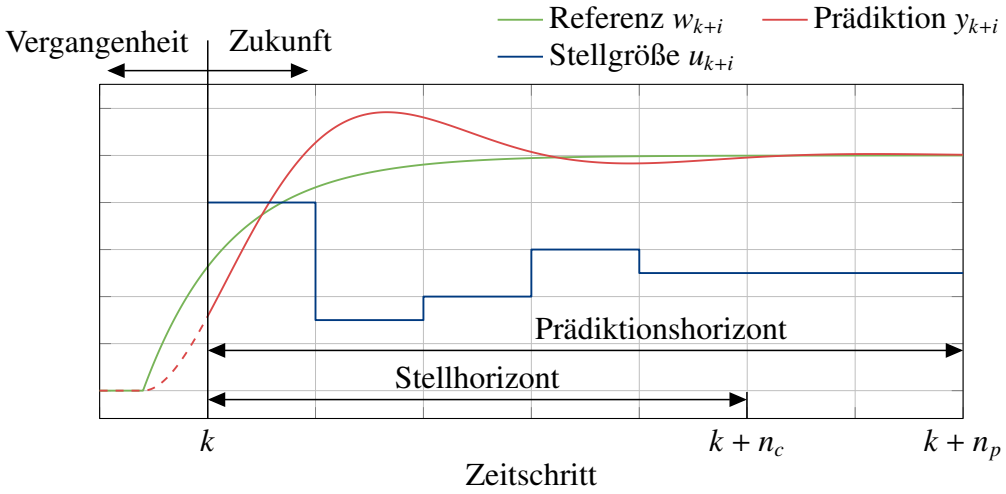


Abbildung 2-20: Ablauf einer MPC nach [Ada18]

Zum Berechnungszeitschritt k sind aktuelle und vergangene Ausgangsgrößen des Systems sowie die entsprechenden Stellgrößen, aufgrund derer diese Ausgangsgrößen resultieren, bekannt. Um obgleich der Bedingung $n_p \geq n_c$ anhand des Prädiktionsmodells den zukünftigen Ausgang auch bis zum Ende des Prädiktionshorizonts bestimmen zu können, wird die Stellgröße nach Ende des Stellhorizonts konstant gehalten ($u_{k+n_c-1} = u_{k+n_c} = ... = u_{k+n_p}$). Zusätzlich zum Gütemaß stellen also die beiden Horizonte wichtige Entwurfsfreiheitsgrade des MPC-Regelungskonzepts dar und beeinflussen maßgeblich die Berechnungseffizienz der Optimierung. Eine Möglichkeit zur Reduktion des Berechnungsaufwands bilden somit Begrenzungen der Betrachtungszeiträume der Vorhersage und/oder der Stellgrößenvariation. Nach einer Berechnung wird lediglich der zeitlich erste Teil $u_{\text{opt},k}$ der Stellgröße verwendet sowie der Prädiktions- und Optimierungsprozess um einen Schritt in die Zukunft mit neu beginnender Berechnungsphase verschoben. Der Grund ist, dass jede Prädiktion gewissen Modellunsicherheiten und Störungen obliegt. Bei Aufschaltung des gesamten Stellgrößenverlaufs, der auf Basis des derzeitigen Wissensstands innerhalb des Vorhersagezeitraums die optimale Lösung gemäß des definierten Gütemaßes bildet, würde es sich ohne aktualisiertes Feedback zwischenzeitlich um eine Steuerung des Prozesses handeln. Aufgrund dieser fortlaufenden Verschiebung des betrachteten Vorhersagezeitraums wird in der Literatur oft von einem *gleitenden Horizont* (im Englischen *Receding Horizon*) gesprochen [Ada18; Rau03].

Eine Stärke der MPC gegenüber konventionellen Regelstrategien ist die zusätzliche Einbeziehung vorhergesagter Regelabweichungen und Randbedingungen. Neben der Nutzung vergangener und aktueller Soll-/ bzw. Istwerte werden auf diese Weise Sollwert-

änderungen frühzeitig durch die Regelung erkannt und bei gleichzeitiger Einhaltung der jeweils geltenden Rahmenbedingungen berücksichtigt[33] [DP04; Rau03]. Die Beschränkungen sind sowohl im Prädiktionsmodell als auch innerhalb der Optimierung als Nebenbedingungen direkt in die Reglerformulierung integrierbar. Sie können dabei sowohl beliebige Stellgrößen, deren Änderungen, Zustände als auch Regelgrößen betreffen, sodass mit $u_{\min} \in \mathbb{R}^{p \cdot n_c}$ (restliche Größen analog) für alle Komponenten und Zeiten entsprechende Grenzen

$$\begin{aligned} u_{\min} \leq \quad & u_{k+i} \quad \leq u_{\max}, \\ \Delta u_{\min} \leq \quad & \Delta u_{k+i} \quad \leq \Delta u_{\max}, \\ x_{\min} \leq \quad & x_{k+i} \quad \leq x_{\max}, \\ y_{\min} \leq \quad & y_{k+i} \quad \leq y_{\max}, \end{aligned}$$

formuliert werden können. Klassische und einfache Beispiele derart beschränkter Systeme sind Elektromotoren o. Ä., wobei im Zusammenhang von Verkehrssystemen auch Straßenkapazitäten, Fahrzeugdynamiken. Besonders im Hinblick auf LSA als Stellglieder dienen die Restriktionen für Signaldauern von Lichtzeichen als Beispiele [Ada18; DP04; Rau03].

An dieser Stelle werden aber auch einige Nachteile der MPC deutlich. Im Gegensatz zu anderen Verfahren kann das Regelgesetz nur in Ausnahmefällen explizit angegeben werden. Folglich hängt von der Komplexität des Optimierungsproblems der entsprechende Lösungsrechenaufwand ab. Ebenso gestaltet sich der Stabilitätsnachweis bzw. deren generelle Untersuchung schwierig. Die Analyse ist ähnlich zum Beobachterentwurf für nichtlineare Systeme oft – wenn überhaupt – nur aufwändig durchführbar. Falls möglich, dann ist sie an Bedingungen für das implizite Regelgesetz, die (End-)Zustände und das Gütemaß geknüpft[34]. Weitere Details können bspw. in [MRRS00] und [Ada18] nachvollzogen werden.

Fuzzy-Regelung

Als Ergebnis der studentischen Arbeit [Ash20] hat sich eine reine *Fuzzy-Regelung* zwecks einer LSA-Regelung als nicht optimale Lösungsvariante erwiesen. Jedoch haben die Erkenntnisse der Arbeit dazu geführt, ein Fuzzy-System aufgrund der sehr positiven Eigenschaften der einfachen Umsetzbarkeit und Recheneffizienz als Filter abgewandelt in dem mehrstufigen Regelungskonzept zu verwenden. Die entsprechenden Grundlagen der momentan sehr häufig genutzten *Fuzzy-Systeme* hat L. A. Zadeh bereits 1965 mit der

[33] Die Analogie zum Sport, wie Fußball oder auch Schach, bei dem ein voraussehender Spieler seine Optionen unter Einbezugnahme des Gegners sowie der derzeitigen und künftigen Situation abwägt und entsprechend handelt, dient als anschaulicher Vergleich.

[34] Die Anforderungen können z. B. über zugehörige Lyapunov-Funktionen formuliert werden.

Einführung der *Fuzzy-Logik* entwickelt [Zad65]. Diese Logik beruht auf dem Versuch, durch einfache *Wenn-Dann-Regeln* menschliche Verhaltensweisen zu beschreiben. Es handelt sich um eine Verallgemeinerung der *booleschen Logik* und ermöglicht im Gegensatz zur vorher gezeigten MPC einen Regelungsentwurf ohne jegliches Prozessmodell. Die Regeln können dabei exemplarisch für den in Kapitel 2 vorgestellten LSA-Knotenpunkt und dessen Phasenplan (siehe Abbildung 2-10) wie folgt über unterschiedliche *Prämissen* und *Konklusionen* formuliert werden:

(R1) *Wenn der Belegungsgrad von Spur* 1 *– zu Signal* 1 *gehörige Spur – hoch oder die Wartezeit der Fahrzeuge von Spur* 1 *hoch ist, dann soll die Priorität von LSA-Phase* 2 *hoch sein.*

(R2) *Wenn eine Person den Taster M*11 *betätigt, dann soll LSA-Phase* 130 *gegenüber LSA-Phase* 140 *priorisiert werden.*

Für die konkrete mathematische Formulierung und Anwendbarkeit derartiger Vorschriften lässt sich ein allgemeines Fuzzy-System in die drei wesentlichen Aspekte der *Fuzzifizierung*, *Interferenz* und *Defuzzifizierung* einteilen. Die Ein-/Ausgangs-Grundstruktur eines Fuzzy-Systems ist in Abbildung 2-21 dargestellt, sodass zur Vervollständigung zu einer Regelung nur das zu regelnde System verknüpft werden müsste.

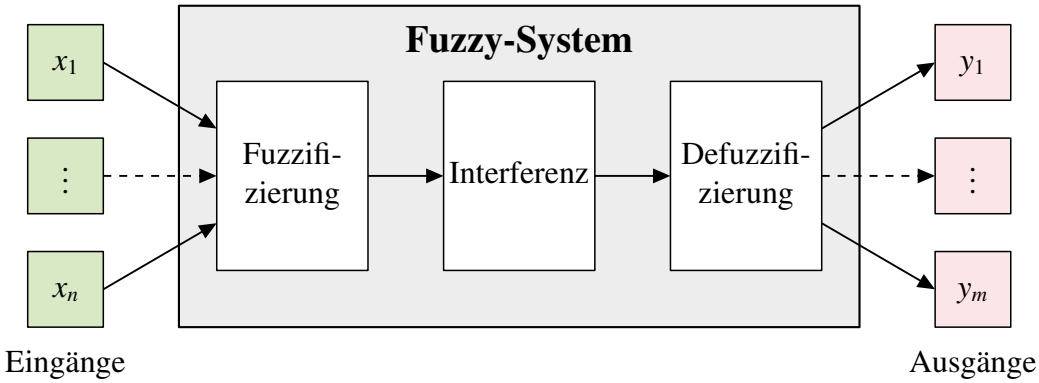


Abbildung 2-21: *Ein-/Ausgangs-Struktur eines Fuzzy-Systems*

In der Fuzzifizierungsphase werden die n scharfen physikalischen Eingangsgrößen eines technischen Prozesses durch unscharfe Definitionen mit linguistischen Begriffen quantifiziert. Die Anzahl der dabei entstehenden linguistischen Werte kann frei gewählt werden und beeinflusst die Komplexität der Fuzzy-Systementwurfs. Für den Belegungsgrad in Regel (R1) könnten neben dem verwendeten Literal „hoch“ auch „leer“, „niedrig“ und „mäßig“ genutzt werden. Bei Regel (R2) bzgl. der Betätigung des Tasters ist die Einteilung dagegen boolesch. Zur Festlegung der unscharfen Werte werden die sog. *Zugehörigkeitsfunktionen* μ (engl. *Membership Functions*)

$$\mu : G \rightarrow [0, 1]$$

eingesetzt, um die Quantifizierung eines Elements x der Grundmenge G durchzuführen. Es resultieren *Fuzzy-Mengen*

$$F = \{(x, \mu(x))|\ x \in G \text{ und } \mu(x) \in [0, 1]\}$$

bestehend aus Tupeln der Grundmengenelemente x und der ermittelten Zugehörigkeitsgrade $\mu(x)$. Als Beispiel soll an dieser Stelle die Wartezeit auf einer definierten Fahrspur dienen. Es sei angenommen, dass sich auf der auszuwertenden Spur zwei Fahrzeuge mit einer Gesamtwartezeit von $t_w = t_{w,1} + t_{w,2} = 40\,\text{s}$ befinden. Wenn die Zugehörigkeitsfunktionen für Wartezeiten, wie in Abbildung 2-22 skizziert, definiert werden, dann resultiert ein Zugehörigkeitsgrad einer niedrigen Wartezeit von $\mu_{\text{niedrig}} = \frac{1}{3}$. Für weitere Beispiele und hilfreiche mengentheoretische Definitionen im Fuzzy-Zusammenhang sei auf das Grundlagenwerk [Nis14] verwiesen.

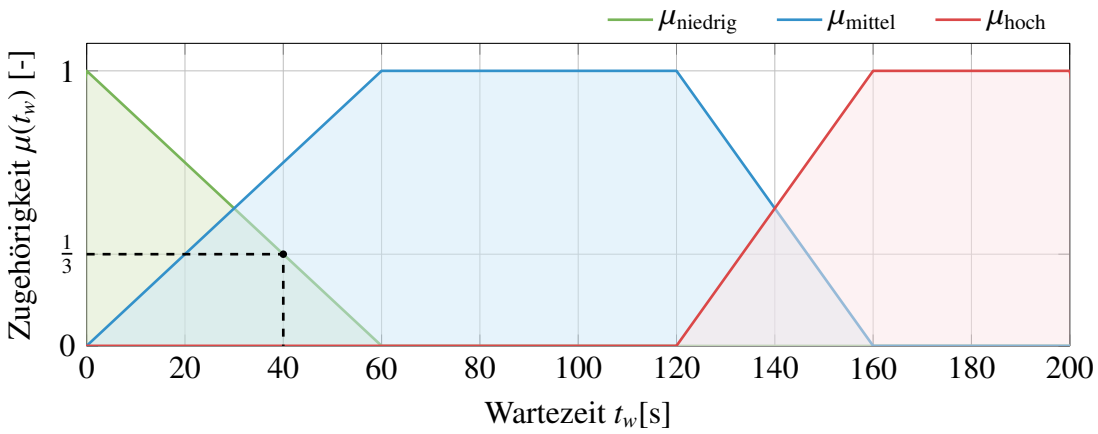


Abbildung 2-22: Exemplarische Zugehörigkeitsfunktionen der Wartezeit t_w

Auf die derart gewonnenen Mengen werden im Interferenzschritt alle definierten Regeln zunächst einzeln über die *Aggregation* (Auswertung der Prämissen) und *Implikation* (Auswertung der Konklusionen) angewandt. Die Gesamtheit der Ergebnisse wird in der anschließenden *Akkumulation* zum Interferenzergebnis $\mu_{\text{res},i}$ mit $i = 1, \ldots m$ verknüpft. Um aus diesen entarteten Fuzzy-Mengen (eine Menge für jede der m Ausgangsvariablen) wiederum mathematisch greifbare Ausdrücke zu generieren, wird die Defuzzifizierung genutzt. Jeder resultierenden Fuzzy-Menge wird dabei ein repräsentativer Zahlenwert zugeordnet, wobei dieser bspw. über den Flächenschwerpunkt, die Mitte des Maximums (*Middle of Maximum (MoM)-Methode*) o. ä. Verfahren bestimmt werden kann. Nicht nur bei der Defuzzifizierung, sondern auch bei der Aggregation und Akkumulation können verschiedene mathematische Operatoren als Verknüpfungen herangezogen werden (z. B. min für *Und*-Verknüpfungen und max für *Oder*-Verknüpfungen), da sich sowohl Prämissen als auch resultierende Fuzzy-Mengen aus mehreren Teilen zusammen-

setzen können. Mithilfe dieser Gestaltungsmöglichkeiten kann die jeweils gewünschte Imitation des menschlichen Verhaltens hergestellt werden [Ada18].
Für die genaue Umsetzung eines Fuzzy-Systems und vor allem die Anbindung an das System, um die Resultate entsprechend weiter zu verwenden, sei an dieser Stelle auf Abschnitt 4.3 verwiesen, wo die eingesetzte Variante des Fuzzy-Systems detaillierter erläutert wird.

2.4.3 Vernetzte Regelungssysteme

Vernetzte Regelungssysteme bzw. im Englischen *Networked Control Systems (NCS)* stellen Regelungssysteme dar, deren Regelkreise aufgrund der örtlichen Verteilung über mindestens ein digitales Kommunikationsnetzwerk geschlossen werden. Aufgrund der hohen Verfügbarkeit, stetigen Weiterentwicklung und der geringen Kosten werden sog. *General-Purpose-Netzwerke* wie Ethernet, Internet oder WLAN vermehrt für Zwecke der Regelung trotz vorhandener Nichtdeterminismen verwendet. Ohne für Echtzeitanforderungen entworfen zu sein, sind große Vorteile wie hohe ermöglichte Regelungsdistanzen, eine oftmals einfache Umsetzung und wenig physische Erweiterungen des Systems gegeben. Als Nachteile müssen allerdings auch die Netzwerksicherheit, unvermeidbare *Netzwerkverzögerungen* oder *Latenzen* (im Englischen *Delays*) sowie etwaige Probleme mit Bandbreiten und Daten-Scheduling genannt werden [LGGG08; AW15]. Nach [Lun14] können grob drei Kategorien von NCS unterschieden werden:

- Die Kommunikationstopologie ist ein definiertes Entwurfsziel.
- Die Kommunikationsbeschränkungen sind bei der geplanten Regelung zu berücksichtigen.
- Das Regelungssystem sieht koordinierte Aktionen von Teilsystemen vor.

In der Literatur existieren mit [AW15], [GC10] oder [Sie17] viele weitere Veröffentlichungen, die einen guten Überblick über NCS geben, wobei [Lun14] aufgrund der Überschneidungen mit der MPC besonders empfehlenswert ist. Während die erstgenannte Kategorie unter der Bezeichnung *Control of Networks* die Herausforderungen des Netzwerks selbst wie Datengeschwindigkeiten oder -routing behandeln, finden sich die letzten beiden oft unter dem Sammelbegriff *Control over Networks* mit Fokus auf Regelungsstrategien und deren Robustheit gegenüber Störungen wieder. Die Themen rund um die Regelungsstrategien werden in diesem Abschnitt weiter beschrieben und als einführendes Beispiel soll neben dem Vorhaben dieser Arbeit der aktuelle Forschungsgegenstand des Kreuzungsmanagements von autonomen Fahrzeugen dienen. Mithilfe der V2X-Technologie wird dabei eine sichere, flüssige und effiziente Verkehrssituation eingestellt, was einer Koordination der einzelnen VTN bedarf. Das autonome Kreuzungsmanagement mithilfe

des Konsensalgorithmus in [MML+20] müsste dabei lediglich um die Netzwerkstrukturen der koordinierenden Kreuzungen erweitert werden, was in SUMO über Zusatzanwendungen wie *Veins* möglich ist [SGD11].

Datenübertragung und Systemstruktur vernetzter Regelungssystemen

Die herkömmlichen Strukturen zentraler und dezentraler Regelungen lassen sich mit zusätzlichem Kommunikationsnetzwerk ebenso in NCS feststellen. Bei der *direkten Struktur* werden die Übertragungswege von der Sensorik zur Regelung und von dieser weiter zu den Aktoren über das Kommunikationsnetzwerk geschlossen. Die Systemmessgrößen werden von den Sensoren erfasst und über das Kommunikationsnetz an die Informationsverarbeitung geleitet. Wiederum über das Kommunikationsnetzwerk empfangen die Aktoren berechnete Stellgrößen direkt von der Regelung und setzen die entsprechenden Größen um. Der grundsätzliche Aufbau ist dabei im Strukturbild von Abbildung 2-23 auf der linken Seite aufgezeichnet [TC03].

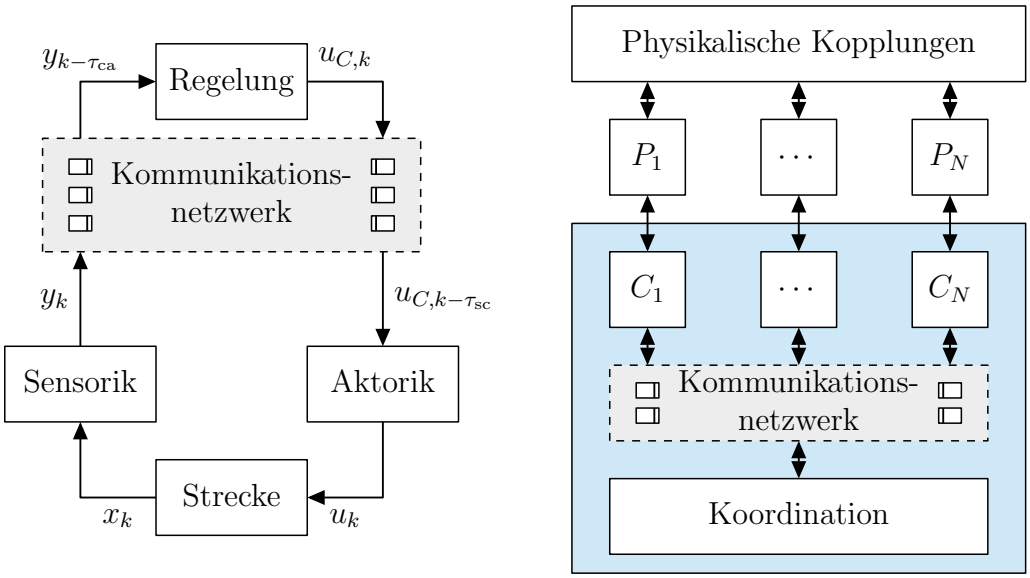


Abbildung 2-23: *Darstellung der direkten Struktur von NCS (links) und eines koordinierten NCS (rechts) in Anlehnung an [TC03] und [Lun14]*

Anders werden in *hierarchischen Strukturen* mithilfe übergeordneter Informationsverarbeitungen Signale verarbeitet und über das Kommunikationsnetzwerk unter den lokalen Subsystemen $\mathcal{S} = \{1, ..., N\}$ verteilt. Dabei können bspw., wie in Abbildung 2-23 rechts dargestellt, lokale Regler $(C_i)_{i\in\mathcal{S}}$ mit einem übergeordneten Koordinator (auch als *koordiniertes System* bezeichnet) eingesetzt werden, welche auf die einzelnen (Teil-)Strecken $(P_i)_{i\in\mathcal{S}}$ einwirken. Aufgrund der physikalischen Kopplung hilft ein übergeordnetes Element dabei, die einzelnen Subsysteme hinsichtlich der Gesamtdynamik zu koordinieren. Die hierarchische Struktur von NCS ist rechts in Abbildung 2-23 dargestellt [CT01;

Lun14]. Wird dagegen auf den Koordinator verzichtet und die lokalen Regler organisieren sich über das Kommunikationsnetzwerk selbst, so wird von *verteilten Regelungssystemen* gesprochen [Lun14; Sie17].
Neben der Netzwerktopologie sind sowohl die Datenübertragung und Zeitsynchronisation als auch die Arbeitsweise des Kommunikationsnetzes eines NCS besonders relevant für die angewendeten Regelungskonzepte. Die Realisierung der Datenübertragung mithilfe von Datenpaketen über das Kommunikationsnetzwerk stellt eine wesentliche Eigenschaft von NCS dar und unterscheidet sie von konventionellen Regelungssystemen [BA07; Sie17]. Die Umsetzung kann dann dabei entweder als *Mehrfachpaket-* oder *Einpaket-Übertragung* realisiert werden. Bei der Mehrfachpaket-Übertragung existiert für alle Sensoren und Aktoren ein eigener Netzwerkzweig. Im Gegensatz dazu werden bei der Einpaket-Übertragung alle Sensorinformationen bzw. Stellgrößensignale gebündelt. Der sich daraus ergebende Vorteil ist, dass sich Netzwerkstörungen auf alle Daten gleich auswirken und nicht unterschiedliche Netzwerkstörungen berücksichtigt werden müssen.
Verzögerungen durch *netzwerkinduzierte Totzeiten*, *Datenverluste* und die *Vertauschung der Paketreihenfolge* sind zum Teil unvermeidbare Phänomene eines digitalen Kommunikationsnetzwerks, die in NCS berücksichtigt werden müssen und vor allem bei Nichtberücksichtigung zu einer Verschlechterung der Regelgüte führen [Sie17]. Die netzwerkinduzierte Totzeit τ_T ist als Übertragungsdauer eines Datenpakets definiert. Allgemein setzt sie sich aus spezifischen Anteilen abhängig vom Kommunikationsnetzwerk nach [LGGG08; Sie17] über

$$\tau_T = \tau_{\text{pre}} + \tau_{\text{MAC}} + \tau_{\text{phy}} + \tau_{\text{route}} + \tau_{\text{post}} \tag{2-19}$$

mit

$\tau_{\text{pre}}, \tau_{\text{post}}$:	Dauer der Vor- und Nachbearbeitung,
τ_{MAC} :	Dauer des Medienzugriffs (Medium Access Control (MAC)),
τ_{phy} :	Dauer der physikalischen Datenübertragung,
τ_{route} :	Dauer des Datenpaketroutings durch das Kommunikationsnetz,

zusammen. Anhand der Übertragungswege wird diese netzwerkinduzierte Totzeit τ_T weiter unterschieden. Dabei steht τ_{sc} für netzwerkinduzierten Totzeit der Übertragungsrichtung vom Sensor zur Regelung und analog τ_{ca} für diejenige von der Informationsverarbeitung zur Aktorik, wie bereits im Strukturbild der Abbildung 2-23 links angedeutet. Genau wie die Einzelanteile in Gleichung (2-19) sind die Eigenschaften der Totzeiten vom Kommunikationsnetzwerk abhängig. Ihre Ausprägungen können annähernd konstant oder deutlich variierend und begrenzt oder unbegrenzt sein. Für Systeme mit variieren-

den Übertragungsdauern ist die Bestimmung einer minimalen Übertragungsdauer $\tau_{T,\min}$ oftmals möglich, wohingegen eine obere Grenze $\tau_{T,\max}$ zumeist unbestimmt bleibt oder in der Praxis geschätzt wird [Sie17; PPS22].

Die Arbeitsweise eines NCS kann entweder *zeit-* oder *ereignisbasiert* gestaltet sein. In zeitbasierten NCS wird isochron mit einer Abtastzeit T gearbeitet [CT01; Sie17]. Die zeitbasierte Umsetzung erfolgt, indem Methoden angewandt werden, bei denen bspw. die zeitliche Verzögerung stets als ein Vielfaches der Abtastzeit angesehen wird. Nachteilig können sich die dabei zusätzlich durch Rundung erzeugten Verzögerungen im Regelkreis auswirken [LGGG08; Sie17]. Zur Gewährleistung einer zeitbasierten Arbeitsweise von NCS existieren neben der einfachen Rundung elaborierte *Warteschlangenmethodiken* (im Englischen *Queuing Mechanisms*), die variable netzwerkinduzierte Totzeiten zwecks einer zeitinvarianten Betrachtungsweise der NCS kompensieren. In [TC03] werden dabei zwei Kompensationsansätze für NCS mithilfe von Warteschlangen beschrieben, die als *deterministische* respektive *wahrscheinlichkeitstheoretische prädiktionsbasierte Methodik* angelehnt an [LR94] bzw. [CÖ95] bezeichnet werden. Die jeweils angestellten Prädiktionen zur Zustandsvorhersage unterscheiden sich dabei ebenso wie die Warteschlangenmodellierung. Der deterministische Ansatz ist dabei bspw. konservativ einer Warteschlangenlänge der jeweils maximalen Totzeit. Im Gegensatz dazu beginnen ereignisbasierte Systeme mit der Verarbeitung direkt bei Eintreffen eines Datenpakets. Das Kommunikationsnetz kann daher ohne fest geregelte Abtastung durch weniger Kommunikationsübertragungen entlastet werden. Oftmals bietet sich auch eine kombinierte Arbeitsweise an, bei welcher Sensoren zeitbasiert agieren und die Regelung ereignisbasiert Stellgrößen an die Aktoren übertragt. Abhängig von der Anwendung ist es dementsprechend möglich, Reaktionszeiten zwischen Sensorik und Aktorik zu minimieren [LGGG08; Sie17].

Bei variierenden netzwerkinduzierten Totzeiten kann es zu besonderen Erscheinungen bei zeitgesteuert arbeitenden Systemen kommen, die sich bei Nichtbeachtung negativ auf das Regelungsverhalten auswirken. Falls die Übertragungszeiten hinreichend abweichen und daher ein bereits gesendetes Datenpaket erst innerhalb eines folgenden Zeitschritts empfangen wird, entsteht im vorgesehenen Abtastintervall eine Vakanz. Dieses Phänomen ist in Abbildung 2-24 des Paketübertragungswegs vom Sensor über den Regler zum Aktor skizziert und wird als *vakante Abtastung* bezeichnet. Analog können während eines Abtastvorgangs unter Umständen mehrere Datenpakete zur Verfügung stehen, sodass Teilinformationen vom Regler verworfen werden und es zu Paketzurückweisungen kommt. Dieser Vorgang ist genau wie der gewünschte Normalfall in der Darstellung enthalten, in welcher τ_c die vom Regler benötigte Berechnungszeit symbolisiert [CT01; Sie17].

Neben Verzögerungen und deren Auswirkungen kann es in NCS ebenso vorkommen, dass infolge von Netzwerkstörungen Datenpakete vollends verloren gehen. Diese Art der Netz-

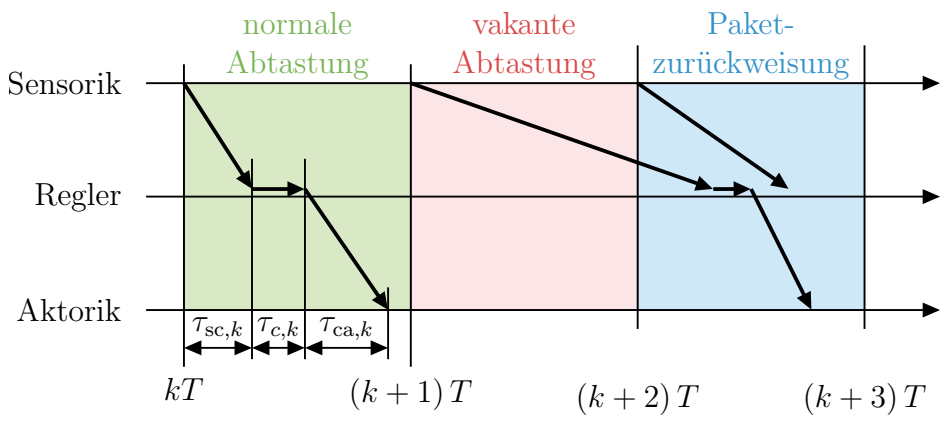


Abbildung 2-24: *Vakante Abtastung und Paketzurückweisung bei zeitgesteuerter Arbeitsweise in Anlehnung an [CT01]*

werkstörung wird als *Datenpaketverlust* (im Englischen *packet loss* oder *packet drop*) bezeichnet. Je nach Anwendung werden in NCS unterschiedliche Protokolle für die Netzwerkkommunikation verwendet, die unterschiedlich mit auftretenden Störungen umgehen. Für eine garantierte Übertragung eingehender Datenpakete sorgt bspw. das Transmission Control Protocol (TCP), welches bereits auch im OSI-Referenzmodell in Abschnitt 2.2.3 genutzt wird. Nachteilig sind allerdings die netzwerkinduzierten Totzeiten einzelner Datenpakete, die sehr groß werden können. Eine Alternative stellt ein (situationsbedingt gewollter) vollständiger Verlust von Datenpaketen zur Vermeidung zu großer Übertragungszeiten in Protokollen wie dem User Datagram Protocol (UDP) dar [Sie17]. Im Gegensatz zu den netzwerkinduzierten Totzeiten sind Datenpaketverluste in der Realität häufig nicht stochastisch unabhängig und treten aufeinanderfolgend in sog. *Bursts* auf, die bspw. durch Markov-Ketten modelliert werden können [CT01; LGGG08].
Als letztgenannter Punkt ist die Zeitsynchronisation der Regelungskomponenten bei NCS besonders wichtig. Aufgrund variabler Übertragungsverzögerungen hervorgerufen durch das Kommunikationsnetz müssen Regelungskonzepte diese fehlende *Synchronität* berücksichtigen. Die Kompensation anhand der Nutzung von *Zeitstempeln* der übertragenen Datenpakete stellt eine mögliche und verbreitete Lösung dar, wobei etwaige Versätze der lokalen Uhren zu beachten sind [Lun14; LGGG08; Sie17].

Regelungsentwurf von vernetzten Regelungssystemen

Für den Regelungsentwurf bei NCS können nach [Sie17] *phänomenologische* und *modellbasierte* Ansätze unterschieden werden. Die erste Bezeichnung resultiert aus der Festlegung des Hauptaugenmerks auf die durch das Kommunikationsnetzwerk in den Regelkreis eingebrachten Phänomene. Daran orientiert werden Modellierungskonzepte und -verfahren wie Totzeitsysteme, ereignisbasierte Abtastungen oder schaltende Systeme ge-

nutzt[35]. Diese Ideen beruhen auf den Netzwerkeigenschaften wie bspw. den unvermeidlichen Totzeiten, sollen an dieser Stelle aber nicht weiter betrachtet werden. Unter modellbasierten Ansätzen werden dagegen diejenigen Konzepte verstanden, deren Grundlage bestehende Modelle sind und diese entsprechend zur Stellgrößenberechnung verwenden. Zumeist ist das verwendete Modell dabei eine Repräsentation der Regelstrecke und erlaubt eine Prädiktion zukünftiger Systemzustände, damit Einflüsse von Netzwerkstörungen kompensiert werden können [Sie17].
Die bekannte Idee der MPC kann bei Berücksichtigung eines Kommunikationsnetzes in die modellbasierten Ansätze eingegliedert werden und wird folglich als *Networked Model-Predictive Control (NMPC)* bezeichnet. Variable netzwerkinduzierte Totzeiten und Datenpaketverluste können zumindest teilweise dadurch kompensiert werden, dass anstelle einzelner Stellgrößen ganze Sequenzen inklusive Zeitstempel von der Regelung an den Aktor übertragen werden. Der von der MPC zum Zeitschritt k berechnete Stellgrößenverlauf u_{k+i} als Lösung des Optimierungsproblems wird genutzt, um mit

$$u^*_{\mathrm{opt},k} = \begin{bmatrix} u_{k,1} \\ u_{k,2} \\ \vdots \\ u_{k,m^*} \end{bmatrix}$$

die *optimale Stellgrößensequenz* $u^*_{\mathrm{opt},k} \in \mathbb{R}^{q \cdot m^*}$ zu bestimmen. Die Länge der Stellgrößensequenz m^* als Teil des zum Zeitschritt k durch die MPC bestimmten Stellgrößenverlaufs hängt von den Grenzen der netzwerkinduzierten Totzeiten und der maximalen Anzahl konsekutiver Datenpaketverluste ab. Dementsprechend muss auch die MPC parametriert werden, indem der Stellhorizont n_c und der Prädiktionshorizont n_p der MPC mindestens so groß wie die Länge der Stellgrößensequenz, also

$$n_p \geq n_c \geq m^*,$$

gewählt werden [Lun14; Sie17]. Bzgl. der Stabilitätsuntersuchungen der NMPC kann nach [Lun14] sogar die stochastische Stabilität des geschlossenen Regelkreises nachgewiesen werden, sobald die Horizonte hinreichend groß definiert sind.
In Abbildung 2-25 ist die Struktur der NMPC mit der Integration zweier Warteschlangen dargestellt. Die Warteschlange Q_1 zur Pufferung der Stellgrößensequenzen u^*_{opt} übergibt dabei dem Aktor die vorgesehene Stellgröße zum passenden Zeitpunkt, sodass die restlichen Elemente als Backup fungieren. Die Warteschlange Q_2 puffert entsprechend die Messdaten. In der gleichen Abbildung ist zusätzlich ein Beispiel der Warteschlange Q_1

[35] Entsprechende Grundlagen zu Totzeit- und Abtastsystemen sowie schaltenden Systemen sind in [Föl22] bzw. [Ada18] zu finden.

vor der Aktorik auf der rechten Seite illustriert. Angenommen im zeitbasierten NCS betrage die aktorseitige Totzeit $\tau_{\text{ca}} = 4\,\text{s}$ und bei sekündlicher Kommunikation gehen maximal drei aufeinanderfolgende Pakete verloren. Dementsprechend ist die Länge der Warteschlange $l_{Q_1} \geq m^* \geq 4$ zu wählen. In dem skizzierten Beispiel findet im k-ten Zeitschritt ein Paketverlust statt, sodass demnach $u^*_{\text{opt},k-4}$ als Eingang fehlt (in der Abbildung jeweils rot gekennzeichnet). Als Folge kann die Warteschlange ohne neuen Eingang nicht aktualisiert werden und der Aktorik wird $u_{k-5,2} \in \mathbb{R}^q$ als folgende Stellgröße der vergangenen Stellgrößensequenz übergeben. Es bleibt anzumerken, dass sofern $u_{k-5,2} = u_{k-4,1}$ gilt, also die zum Zeitpunkt $k-5$ berechnete Stellgröße zumindest im Folgeschritt noch optimal ist, der Paketverlust auf diese Weise ideal kompensiert werden kann.

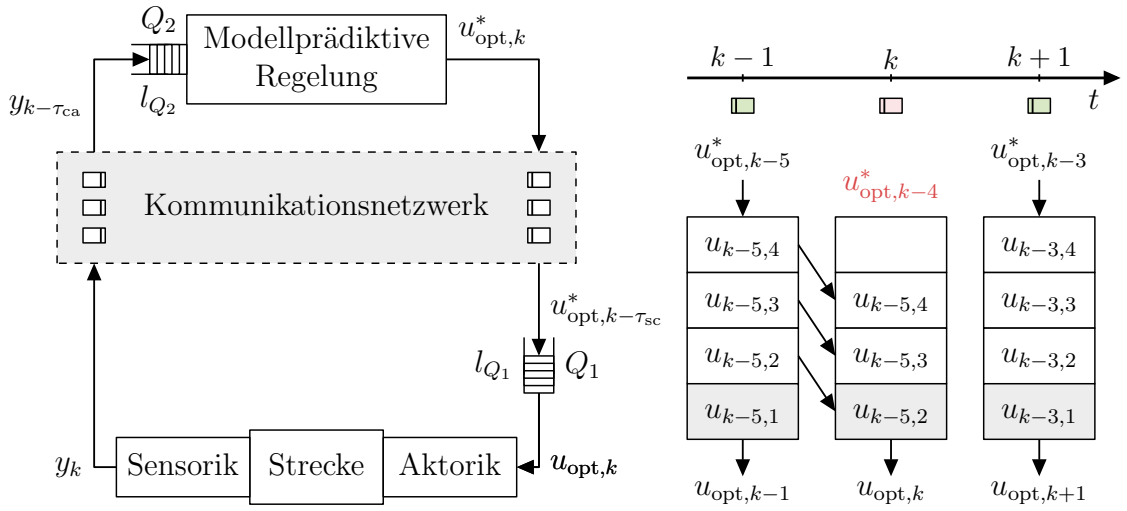


Abbildung 2-25: *Struktur der NMPC in Anlehnung an [Lun14] (links) und die exemplarische Arbeitsweise der Warteschlange Q_1 (rechts)*

3 Stand der Wissenschaft und Technik

In den nachfolgenden Abschnitten liegt der Fokus auf einer Analyse und Einordnung der in der Literatur auftretenden Beobachter- und Regelungsansätze für LSA. Diese Ansätze bauen auf den in Kapitel 2 diskutierten Richtlinien, Konzepten und teilweise bereits genannten Herausforderungen auf, welche für die Regelung eines realen Verkehrssystems durch deren LSA üblicherweise auftreten.
Die grundsätzlichen Anforderungen und Eigenschaften eines Verkehrsregelungssystems im Kontext von LSA werden erläutert und anschließend bereits veröffentlichte Konzepte mit diesen verglichen. Gemäß des zugrundeliegenden Regelungskonzepts wird bei den betrachteten Regelungen bspw. zwischen den klassischen, auf künstlicher Intelligenz oder Daten basierenden sowie modellprädiktiven Ansätzen differenziert. Dabei erfolgt eine Bewertung der bisherigen Strategien im Hinblick auf verschiedene Kriterien wie deren Übertrag- oder Umsetzbarkeit in einer Realumgebung und speziell der Anwendung im PPS. Daraus abgeleitete offene Fragen ergeben den Handlungsbedarf und legen das Lösungskonzept der vorliegenden Arbeit fest.

3.1 Regelungstechnische Konzepte im Themenfeld von LSA

Bei dem zuvor im Zusammenhang der NCS erwähnten autonomen Kreuzungsmanagement in [MML+20] wird auf LSA verzichtet und der Verkehr direkt über die Kommunikation des jeweiligen Verkehrsmanagementsystems zu den VTN beeinflusst. Im Gegensatz zu diesem bislang unrealistischen Szenario bietet das PPS mit dem Ziel der gezielten Beeinflussung des Verkehrs durch die bereits vorhandenen LSA eine kurzfristig umsetzbare und realistische Möglichkeit, mit regelungstechnischen Methoden und Verfahren den aktuellen Problemen des täglichen Verkehrs zu begegnen (siehe Abschnitt 1.2). Derzeit sind in Paderborn und auch in Deutschland zumeist verkehrsabhängige LSA-Steuerungsverfahren im Einsatz, die im Bereich der Signalprogrammanpassung aus Tabelle 2-2 anzusiedeln sind. Die Verkehrsabhängigkeit, die auf Basis von Zählungen mittels Induktionsschleifen erzielt wird, drückt sich durch Freigabezeitanpassung und gezielte Phasenanforderungen für den ÖPNV aus. Die Planungen sind über Logikabfragen im Steuergerät realisiert, deren Auslegung und Parametrierung von Verkehrsingenieuren speziell an die Gegebenheiten der jeweiligen Kreuzungssituation angepasst werden. Eine exemplarische Umsetzung ist durch den Logikauszug der Abbildung A2-7 im Anhang gegeben, welcher mithilfe des proprietären Tools *LISA*[36] angefertigt wurde.
Zweckgebunden werden die allgemeine Systemdarstellung und die Zustände von Ver-

[36] Ein von der Schlothauer & Wauer GmbH vertriebenes Softwaresystem zur Planung, Bewertung, Steuerung und Versorgung von LSA [Sch24].

kehrssystemen unterschiedlich definiert und variieren demnach je nach Einsatz. Sofern die Zustandsraumdarstellung für die Systembeschreibung eines Verkehrssystems gewählt wird, ist diese abhängig von der jeweiligen Modellierung und deren Detaillierungsgrad (siehe Abschnitt 2.1) sowie von den etwaigen Stellgrößen, mit deren Hilfe direkt oder indirekt Einfluss auf das System genommen werden kann. Nichtlineare zeitabhängige Systeme mit Störgrößen d können in klassischen Regelungsaufgaben zumeist in der geschlossenen Form

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, d, t), \\ y &= g(x, u, d, t), \end{aligned}$$

bzw. bei zeitdiskreten Systemen als

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, u_k, d_k), \\ y_k &= g(x_k, u_k, d_k), \end{aligned} \tag{3-1}$$

formuliert werden [Ada18]. Der Zustand x sowie der Ausgang y derartiger Systeme sind oftmals durch Messungen oder anhand von Beobachterkonzepten (siehe 2.4.1) ermittelbar. Bei der mikroskopischen Modellierung ist es möglich, jeden VTN des betrachteten Systems individuell durch derartige Gleichungen wie in (3-1) auszudrücken, sodass über ausgewählte Beschleunigungsgleichungen wie in Abschnitt 2.1.1 die Zustände der Position und Geschwindigkeit dargestellt werden können. Diese individuelle Betrachtungsweise erlaubt einerseits die Interpretation von weiteren VTN des Gesamtverkehrssystems und andererseits deren gegenseitige Interaktion. Sonstige Einflüsse wie die LSA-Zustände können wahlweise als Eingangs- oder als Störgrößen aufgefasst werden. Gerade für die Betrachtung realer LSA ist die mikroskopische Betrachtungsweise besonders wichtig, um bspw. relevante Elemente wie die maximalen Sperrzeiten korrekt modellieren und berücksichtigen zu können. Wenn dabei wiederum das gesamte Verkehrssystem in einer geschlossenen Form dargestellt werden soll, dann können die LSA-Zustände auch als diskrete Teilsystemzustände x_i angesehen werden, die andere Zustände wie bspw. die Dynamik der Einzelfahrzeuge direkt beeinflussen.

3.1.1 Verkehrsbeobachter

Grundsätzlich ist bei dem erklärten Ziel einer Realumsetzung eines LSA-Regelungssystems zu diskutieren, ob und in welcher Form ein Verkehrsbeobachter gebraucht wird sowie welche Eigenschaften und Voraussetzungen für diesen bestimmten Einsatz erfüllt werden sollten. Offensichtlich wird für das übergeordnete Ziel der intelligenten Echtzeit-LSA-Regelung die Kenntnis des aktuellen Verkehrszustands und demnach eine Art Verkehrsbeobachter benötigt. Der auf diese Weise erfasste Zustand ist für die folgende Verarbeitung innerhalb des Reglers notwendig, da auf dessen Basis die Berechnungen der

jeweiligen Stellgrößen angestellt werden. Als wichtigste Komponente des Beobachters beinhaltet dieser eine Modellierung der Verkehrsdynamik, welche die Fahrzeugbewegungen im betrachteten Verkehrssystem beschreibt. Als Grundlage für das System muss daher eine Repräsentation des Verkehrsnetzes und der entsprechenden Infrastruktur in dem Konzept integriert sein. Als nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Aktualität des Verkehrszustands zu gewährleisten, indem auf Basis von Echtzeitmessungen die Verkehrsnachfrage stets aktuell gehalten und die Verkehrssituation an die Messdaten angepasst wird.

Der aktuelle Stand der Technik bildet die Gesamtheit eines Echtzeit-Beobachtersystems nicht in dem für das Vorhaben benötigten Detaillierungsgrad ab. Daher sollen die notwendigen Hauptaspekte in den folgenden Abschnitten weiter spezifiziert werden. Der Begriff des Beobachters und der (Zustands-)Schätzung fällt dabei typischerweise im Zusammenhang mit der Verkehrsnachfragemodellierung wie bspw. in [ABK07] oder [BC04]. In diesem Themengebiet wird zudem häufig von der *Verkehrsmodellkalibrierung* oder der *dynamischen Verkehrszuweisung* (im Englischen *Dynamic Traffic Assignment (DTA)*) gesprochen. Mit der *Verkehrsprädiktion* und *Routenauswahl* (engl. *Route Choice*) z. B. innerhalb der Verkehrsführung sind weitere wichtige Themenbereiche zu nennen (u. a. [FBN11]). Die grundsätzliche Struktur von derartigen DTA-Konzepten ist in Abbildung 3-1 dargestellt und zeigt als Anwendung bspw. die Erstellung einer Verkehrsführung und -regelung.

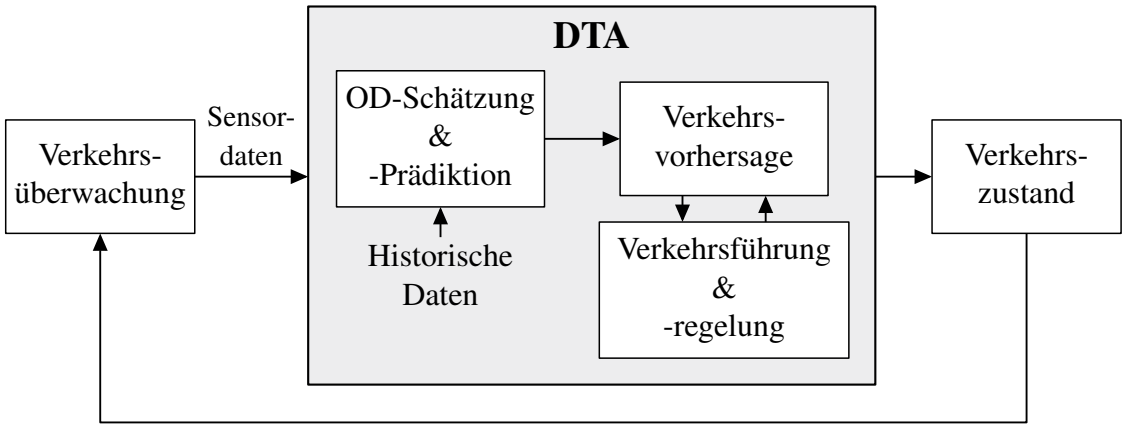


Abbildung 3-1: *Genereller Aufbau von DTA-Konzepten; angelehnt an [Ash96]*

Gute und umfangreiche Übersichten dieses Forschungsschwerpunkts existieren bspw. in [Oso19b] und [LDVV18]. Außerdem findet der von Grieves im Jahr 2002 eingeführte Begriff des digitalen Zwillings [Gri14] immer mehr Einzug in die Verkehrsthematik (u. a. [WLZ+20]).

Beobachterkonzepte und Modellierung der Verkehrsdynamik

Die erste Frage bezüglich des Beobachterkonzepts ist, welche Form und Genauigkeit der zu rekonstruierende Verkehrszustand haben sollte. In der Einleitung dieses Kapitels wurde ein integraler Teil dieser Frage aufgrund der Zielformulierung bereits indirekt beantwortet. Dem Bestreben nach soll auf einzelne Fahrzeuge und deren spezifischen Fahrzeugtypen an LSA situationsbedingt optimal reagiert werden, um die Gesamtverkehrssituation in dem jeweiligen Verkehrsgebiet zu verbessern, sodass eine mikroskopische Modellierungsweise des Gesamtsystems Grundvoraussetzung ist. Auf diese Weise können die maßgeblichen Interaktionen der verschiedenen VTN untereinander, aber vor allem auch mit der Infrastruktur reproduziert werden. Des Weiteren stellt diese Art der Modellierung sicher, Fahrzeugklassen unterscheiden sowie den Fußverkehr integrieren zu können und dabei deren jeweils charakteristischen Eigenschaften zu modellieren. Da heutzutage, wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, viele sehr ausgereifte Simulationsumgebungen diese detaillierte Modellierung anbieten, ist es eine Option, beim Beobachterentwurf auf diese entwickelten und validierten Bausteine zurückzugreifen. Innerhalb der folgenden Literaturauswahl dieses Abschnitts existieren Ansätze, die sich der Verkehrssimulation bedienen, aber oftmals eigene Entwicklungen anstelle der verbreiteten Software nutzen. Der Vorteil ist, dass die wesentlichen Aspekte der Untersuchung bzw. Anwendung abgebildet werden, mit dem Nachteil des Aufwands der Implementierung und der oftmals einhergehenden fehlenden Detaillierung der Modellierung.
Es existiert eine Vielzahl an Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit der Schätzung und Prädiktion von sog. *OD-Strömen*, wobei sich ein Großteil an den Ideen von [AB93] und [CIM93] orientieren. Ziel derartiger Untersuchungen ist es, die Systemkenntnisse zu verbessern, um diese im Verkehrsmanagement einsetzen zu können. Dabei ist die beabsichtigte Anwendung nicht unbedingt die LSA-Steuerung, sondern meist die übergeordnete Verkehrsplanung. Die Genese inklusive einiger Benchmarks ist in [ABB$^+$16] zusammengefasst und nennt Kriterien wie die Modellierung der Nichtlinearität, die verwendeten Messgrößen und die *Onlinefähigkeit*, welche für das im Rahmen dieser Arbeit beschriebene Vorhaben wichtig sind. Als Beispiel nutzen Antoniou und Ben-Akiva [ABK07] verschiedene Kalman-Filter-Methoden, deren Grundlagen aus Abschnitt 2.4.1 bekannt sind, um bei der dynamischen Verkehrszuweisung ihren Verkehrszustand zur Systembeschreibung *online*, also zur Laufzeit, zu kalibrieren. Der dort definierte Zustandsvektor X_h enthält diejenigen Parameter, die im Zeitintervall h kalibriert werden sollen. Es wurden dabei die OD-Ströme, Parameter der Geschwindigkeits-Dichte-Beziehung und Straßensegmentkapazitäten ausgewählt. Unter Nutzung der Δ-Schreibweise

$$\Delta X_h := X_h - X_h^H,$$

wobei das Superskript H jeweils die historischen Daten kennzeichnet, kann mit η_h, v_h und ν_h als zufällige Fehlerterme und M_h als Messwerte des entsprechenden Zeitschritts ein Kalibrierungsmodell entwickelt werden. Mithilfe eines nicht weiter spezifizierten autoregressiven Prozesses[37] $\mathcal{F}_q^{h+1}$,der den Einfluss vergangener Zustände auf den aktuellen Zustandsvektor beschreibt, und des eingesetzten Simulationsmodells $\mathcal{S}$ wird das Modell zu

$$\begin{aligned} \Delta X_{h+1} &= \sum_{q=h-p}^{h} \mathcal{F}_q^{h+1} \cdot \Delta X_q + \eta_h, \\ \Delta X_{h+1}^a &= \Delta X_h + v_h, \\ \Delta M_h &= \mathcal{S}(X_h^H + \Delta X_h) - M_h^H + \nu_h \end{aligned} \tag{3-2}$$

definiert. Der Ansatz wurde anhand des folgenden einfachen Netzes einer Schnellstraße aus Abbildung 3-2 getestet.

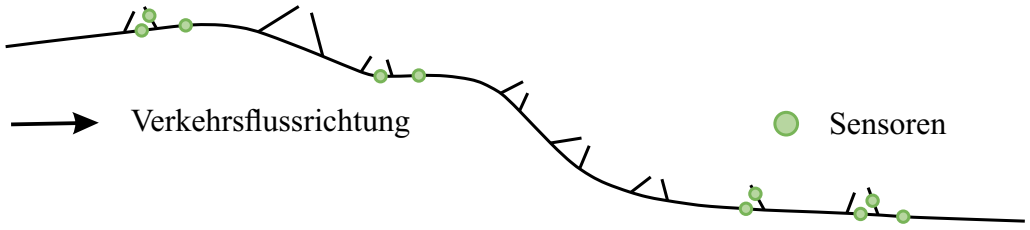


Abbildung 3-2: *Mit Kalman-Filter-Methoden analysiertes Verkehrsnetz einer mit Sensoren ausgerüsteten Schnellstraße nach [ABK07]*

Dabei sind ausschließlich an den spezifizierten Stellen der Sensoren die Geschwindigkeiten und Verkehrszählungen über den Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) bei N Messungen mit

$$NRMSE = \frac{\sqrt{N \cdot \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sum_{i=1}^{N} y_i} \tag{3-3}$$

ausgewertet worden [ABK07]. Das in dieser Studie verwendete Simulationsmodell *DynaMIT* ist mesoskopisch und enthält bspw. mikroskopische Elemente der Warteschlangentheorie. Auch Sonderereignisse wie Unfälle können in die Simulation eingebunden werden [BBKM00; BBB+01]. Es unterscheidet jedoch nicht zwischen den VTN und diese Art der Zustandsschätzung zielt bislang hauptsächlich auf die Beobachtung vereinzelter OD-Ströme ab. Erweiterungen durch Berücksichtigung der Multimodalität von VTN oder eine spursensitive Rekonstruktion würden mit einer deutlichen Anpassung der Zu-

[37] Ein stochastischer Prozess heißt autoregressiver Prozess p-ter Ordnung, wenn sein Zustand zum Zeitpunkt t nur linear von seinen p gewichteten Vergangenheitswerten und einem weißen Rauschen abhängt [Sch90].

standsdefinition einhergehen, sind jedoch als Grundlage für eine anspruchsvolle LSA-Regelung elementar. Eine Art der Disaggregierung makroskopischer OD-Ströme mit dem Ziel der Betrachtung individueller VTN wird bspw. in [FBN11] thematisiert. Neben der Überprüfung des Ansatzes auf die Übertragbarkeit komplexerer System- und Zustandsdarstellungen sind ergänzende Auswertungsmetriken zur Qualitätsbemessung zu entwickeln, da die Güte bislang lediglich durch Übereinstimmungen an ausgewählten Messstellen bewertet wurde.

Auch heutzutage sind vergleichbare Verkehrsvorhersagen aufgrund der breiten Anwendungsfelder der Verkehrsplanung noch Forschungsgegenstand, wobei die bekannten Modelle um aktuelle, oftmals datengetriebene Methoden wie ML [NVG22] oder neuartige Technologien wie z. B. FCD [KMv20] ergänzt wurden.

Zusätzlich zur Schätzung der OD-Ströme mit a priori-Routen der VTN werden bei der dynamischen Routenauswahl online Routen manipuliert. In [HTLC18] stellt diese gezielte Manipulation der Fahrzeugrouten eines definierten Verkehrsanteils eine Stellgröße dar, mit welcher der Verkehrszustand verbessert werden soll. Eine ähnliche Idee verfolgen wir im Anwendungsfeld von [LMGT23] als eine mehrerer Stellgrößen eines Mischverkehrs autonomer Fahrzeuge. Bei der Verkehrsschätzung, die an dieser Stelle betrachtet werden soll, dienen die VTN jedoch nicht als Stellgrößen. Im Beobachtungsprozess sind derartige Manipulationen von Individualrouten als Korrekturen des Systemzustands auf Basis von Messungen zu verstehen. Der Verkehrszustand soll möglichst aktuell widergespiegelt und wahrscheinliche Folgerouten auf Basis der Vergangenheit geschätzt/prädiziert werden. Der Grundgedanke stetiger Aktualisierungen des simulierten Verkehrssystemabbilds zeigt die Parallelen zur Theorie des digitalen Zwillings. Nach [IDR22] kann ein digitaler Zwilling als virtuelle Darstellung von Verkehrssystemen definiert werden, die ein digitales Abbild physischer Verkehrssystemelemente wie Fahrzeuge, Fahrbahnen und Fußverkehr enthalten. Es ist eine Echtzeitdarstellung der entsprechenden physischen Verkehrselemente notwendig, um die Eigenschaften, das Verhalten und die Interaktionen zwischen den verschiedenen Verkehrselementen nachzuahmen. Die Autoren in [MTS21] erstellen auf Basis einer Kameradirektübertragung einen digitalen Zwilling von physischen Straßenabschnitten, wobei in dieser Studie lediglich das Verkehrsaufkommen abgeglichen wird. Die Motivation des Konzepts zeigt sich bspw. in den Anwendungen des kooperativen Fahrens V2X-ausgestatteter Fahrzeuge von [WLZ+20] und [WHT22]. An dieser Stelle ist allerdings zu bemerken, dass die Rekonstruktion des Verkehrszustands, also die Erstellung des digitalen Zwillings, vernachlässigt wird.

Verkehrsnetz und Infrastruktur

Die Genauigkeit bei Modellierung des Verkehrssystems variiert, wie die grundlegende Modellierungsart, anwendungsbezogen. Um bspw. die zuvor beschriebenen OD-Ströme spezifisch beobachten zu können, wird grundsätzlich eine Repräsentation des Verkehrsnetzes und der relevanten Infrastruktur benötigt. Viele der Umsetzungen verwenden Graphentheorie, wie bereits bei der Verkehrssimulation mit SUMO in Abschnitt 2.3.2 gesehen. Dementsprechend wird in der Grundlagenliteratur [AB93] der gerichtete Graph $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{L})$ definiert. Dabei steht die Knotenmenge $\mathcal{N}$ stellvertretend für alle möglichen OD-Standorte und $\mathcal{L}$ repräsentiert die Kantenmenge aller Straßenverbindungen. Die Anzahl der betrachteten OD-Ströme n_{OD} erfüllt

$$n_{\mathrm{OD}} \leq |\mathcal{N} \times \mathcal{N}|,$$

da zumeist nur ein gewisser Teil aller Kombinationen des Gesamtnetzes betrachtet wird. Darüber hinaus sind n_l aller Straßenabschnitte mit Sensoren ausgerüstet, sodass sich

$$n_l \leq |\mathcal{L}|$$

ergibt. An diesen Kanten liegen die Messwerte zum Abgleich vor (vgl. Gleichung (3-3)). Die Definition mehrspuriger Straßen ist in dieser Formulierung nicht eindeutig geklärt. Eine Möglichkeit zur Erweiterung ist eine zusätzliche Indizierung der Kanten wie in [BRP17] oder das Einführen einer zusätzlichen Menge $\mathcal{L}_S$ der Fahrspuren [KEPT21]. Die Anwendung in[ABK07] beschränkt sich bspw. auf ein wenig komplexes Netzwerk, welches bereits in der Abbildung 3-2 mit den spezifizierten Sensorpositionen skizziert wurde. Auch in der vergleichbaren Forschung von [BC04], welche vor allem die Effektivität der Kalman-Filter-Umsetzungen analysiert und verbessert, werden die gleichen Netzvereinfachungen getroffen. Eine in der Realität umzusetzende LSA-Regelung für komplexe urbane Netze mit heterogenen Straßen bzgl. Geometrie, Spuranzahl oder zulässiger Geschwindigkeit und Nutzer verlangt eine bisweilen nicht umgesetzte Detaillierung. Die nicht vorhandenen Routingoptionen im Beispiel von [ABK07] werden dagegen in dem sehr weitläufigen Testgebiet von [FBN11] behandelt. Ebenso stellt die genaue Berücksichtigung des Fußverkehrs eine notwendige Anforderung dar, welche in früheren Beobachterkonzepten vernachlässigt wurde. In Simulationsumgebungen wie SUMO wurde diese Lücke durch deren Modellierung bereits geschlossen [EOW15; DLR24]. Zudem wird der LSA-Einfluss als wichtiges Element der Forschung dieser Arbeit bei der Verkehrszustandsbeobachtung zumeist nur rudimentär berücksichtigt. In der Einführung des Nachfragemodells [ABBM97] werden die LSA-Signale als Einflussgrößen des Reiseverhaltens genannt ohne dabei eine genaue Umsetzung zu spezifizieren. Anders jedoch in der

Forschung von Osorio (u. a. [Oso19a; OC15; ON15]), die LSA miteinbezieht und als exogene Parameter der Simulation integriert. Das Anwendungsgebiet der dortigen Verkehrszustandsschätzung ist bspw. die Entwicklung verbesserter Festzeitprogramme großer Verkehrsgebiete (600 Straßenverbindungen, 200 Gesamtkreuzungen und 99 Signalphasen bei 17 signalisierten Kreuzungen) durch simulationsbasierte Optimierung und die Betrachtung dabei verursachter Emissionen. Aufgrund der genannten Vereinfachungen vieler Ansätze ist deren Übertragbarkeit auf verwandte Anwendungsszenarien, die nicht exakt gleiche Voraussetzungen bieten, unklar. Demnach definiert diese Übertragbarkeit auf beliebige Verkehrssysteme ein wichtiges Kriterium, welches nicht nur für den Beobachterentwurf, sondern auch für den anschließenden LSA-Regelungsentwurf in Abschnitt 3.1.2 Priorität haben soll.

Datenverarbeitung und -integration

Eine substanzielle Unterscheidungsmöglichkeit der vorgestellten Methoden zur Beobachtung eines ausgewählten Verkehrssystemzustands ist die Datenverarbeitung bei dessen Rekonstruktion. Der ständige Datenaustausch wird im Aufbau der DTA-Anwendungen aus Abbildung 3-1 deutlich. Neben der dargestellten direkten Einspeisung online ist ebenso die Verarbeitung historischer Daten *offline* möglich, um nachträglich die Verkehrssituation zu approximieren und als mögliche Anwendung auf diese Weise eine Vorabschätzung für aktuelle Situationen zu generieren. In [ABB+16] wird die Verkehrsprognose anhand des übergeordneten Zusammenspiels der resultierenden OD-Schätzung mit einer Verkehrssimulation genauer beschrieben, wobei ebenso die Simulationsaktualisierung angedeutet wird. Generell bilden historische Daten die Basis von DTA, welche über die modellierte Topologie des Systems mit aktuellen Daten – falls vorhanden – verknüpft werden. Ein wesentlicher Punkt ist weiterhin die Genauigkeit der genutzten Daten, da auch auf Grundlage makroskopischer Messdaten mikroskopische Informationen geschätzt werden können und für deren Abgleich wiederum eine Aggregierung notwendig ist.
Des Weiteren kann die Onlineverarbeitung über den Begriff der *Echtzeit* weiter differenziert werden. Unter einem Echtzeitbetrieb ist dabei der Betrieb eines Rechensystems zu verstehen, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind und damit die Bearbeitung einer Aufgabe innerhalb einer definierten Zeitspanne garantieren [Sch05; DIN88]. Bei Echtzeit handelt es sich um eine variable Größe, die sich an den jeweiligen Echtzeitanforderungen der spezifischen Einsatzgebiete und deren zeitlichen Rahmenbedingungen orientiert. Als Beispiel ist das Online-Konzept von [ABK07] in kleinen Szenarien echtzeitfähig, wobei OD-Schätzungen mit Zeitspannen von 15 Minuten aktualisiert werden. Im Gegensatz dazu sind die Ansätze [Oso19a] und [FBN11]

Offline-Verfahren, sodass die Netzwerkkomplexität genauso wie die Berechnungsdauer für diese Betrachtungsweise eine untergeordenete Rolle spielen bzw. detaillierter und aufwändiger gestaltet werden können. Im Anwendungsbereich der OD-Schätzungen sind Zeitspannen von 15 Minuten oder einer Stunde üblich, sodass zur Berechnung in Echtzeit wesentlich mehr Zeit zur Verfügung steht als in anderen vergleichbaren Applikationen. Zur Einordnung einiger verwendeter Zeitspannen listet [LDVV18] Veröffentlichungen ausgewählter Jahre (2014-2016) auf, in denen die Aktualisierungsintervalle von 30 Minuten bis hin zu 30 Sekunden reichen. Zusätzlich zum zeitlichen Aspekt und dem Beobachtungsgegenstand werden in der selben Veröffentlichung u. a. die verwendeten Datenquellen gegenübergestellt. Die dort referenzierten Verfahren nutzen u. a. aus Abschnitt 2.2.2 bekannte Sensoren wie Induktionsschleifen. Darüber hinaus werden allerdings mit Kameras oder FCD teilweise auch Quellen und Informationen verwendet, die im Rahmen dieser Arbeit bzw. des Projekts nicht zur Verfügung stehen. Das klassische Beispiel der Nummernschildverfolgung (im Englischen Automatic Number Plate Recognition (ANPR)), die andernorts bereits verbreitet ist und mittlerweile eine hohe Erkennungsrate von zumeist über 90% aufweist [LMS21], konnte im PPS aufgrund der Datenschutzbestimmungen nicht umgesetzt werden. In dem detaillierter vorgestellten Konzept von [ABK07] wird die Sensorik bspw. nicht weiter spezifiziert, da nicht die Art der Erhebung, sondern die Daten selbst sowie deren ständige Aktualisierung und Integration ausschlaggebend sind. Die flexible Anpassung des Beobachterentwurfs an die jeweils vorhandene Sensorik ermöglicht die Nutzung verschiedener Datenquellen, sodass durch deren Kombination einerseits eine robustere Datenlage besteht [KLCL09] und andererseits optionale Zusatzinformationen generiert werden können [KKLC01].

3.1.2 LSA-Regelungsstrategien

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben, ist das Konzept des LSA-Regelungsansatzes in starkem Maße abhängig von dem Anwendungsfall und den gegebenen Voraussetzungen. Da diese Dissertation sich mit dem Gesamtsystem zur Realumsetzung einer LSA-Regelung befasst, wurde der Aspekt des zur Verfügung stehenden Verkehrszustands in dem vorherigen Abschnitt bereits diskutiert. In der Literatur wurden eine Vielzahl von Ansätzen für LSA-Regelungen veröffentlicht, die teilweise auf komplett unterschiedlich definierten Verkehrszuständen beruhen. So gehören die sehr bekannten Verfahren *Split Cycle Offset Optimisation Technique (SCOOT)* [HDB+81] und *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS)* [SD80] zu den ersten adaptiven Signalsteuerungssystemen, die Anfang der 1980er entwickelt wurden. Der gemeinsame Gedanke beider Systeme ist die Auswahl des am besten geeigneten Signalplans aus einer Umsetzungstabellen (engl. Look-up Table) entsprechend der festgestellten Verkehrslage.

Dementsprechend soll im folgenden Abschnitt zunächst ein Überblick über verwendete Ideen und Methoden gegeben werden, um anschließend auf die wesentlichen Charakteristika einzugehen, die für eine gegenwärtige Realumsetzung notwendig sind. Das Themenfeld der LSA-Regelung bietet ein breites Spektrum an Verbesserungsmöglichkeiten. Allgemein stellen LSA für VMS eine Möglichkeit dar, um aktiv in den Verkehrsablauf einzugreifen. An dieser Stelle sollen anders als bspw. bei *Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA)*-Verfahren [BBEG14], welche den Verkehr durch Geschwindigkeitsanpassungen der Fahrzeuge optimieren, die Lichtsignale selbst als Stellgrößen eingesetzt werden. Aufgrund der Forschungsbreite in diesem Bereich (siehe z. B. die Übersicht in [QGÖ20]) kann hier lediglich ein ausgewählter Teil betrachtet werden, sodass kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht. Die dabei verwendeten Ansätze reichen von modellbasierten Ideen wie der MPC [TVKB08; WWXW13; KIH+15] über Fuzzy-Logiken [JMK17; CLP15; Ge14] und ML-basierten Konzepten [WZYL18; HLCH19a] bis hin zu anspruchsvollen Heuristiken sowie weiteren Überlegungen (u. a. [GOA13]).
Wie bereits beim Beobachter stellt das jeweilige Verkehrssystem ein grundlegendes Unterscheidungsmerkmal dar, indem einerseits einzelne isolierte Kreuzungen oder andererseits zusammengefasste Verkehrsnetze betrachtet werden. Gleiches gilt für die zu Anfang des Kapitels diskutierte Zustands- und Regelgrößendefinitionen, die stets unterschiedlich ausgelegt werden. Daher sollen zwei der oben genannte Ansätze an dieser Stelle etwas detaillierter beschrieben werden, die sich abgewandelt auch in dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept wiederfinden.

MPC-basierte LSA-Regelung

Das erste Beispiel ist der modellprädiktive Ansatz zur *Grünzeitenoptimierung* von LSA nach [TVKB08; TVP10], dessen Grundmodellierung auf dem sog. *Store-and-Forward*-Prinzip basiert [DG76]. Als Grundlage zeigt die folgende Abbildung 3-3 das Verhältnis zweier benachbarter Knotenpunkte M und N im Verkehrsnetz, welches wiederum als Graph repräsentiert wird.

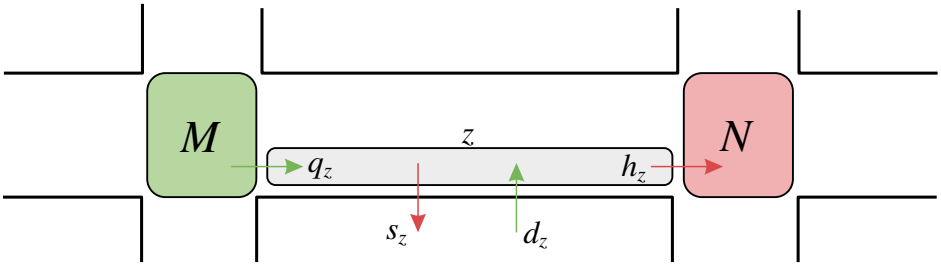


Abbildung 3-3: Kreuzungsmodell nach dem Store-and-Forward-Prinzip; angelehnt an [TVKB08]

Jeder Knotenpunkt der Knotenmenge $j \in \mathcal{J}$ verfügt über assoziierte Eingangs- und Ausgangsverbindungen $\mathcal{I}_j$ bzw. $\mathcal{O}_j$. In der Darstellung bezeichnet $q_{z,k}$ den Zufluss zur und $h_{z,k}$ den Abfluss über die Kreuzung N für den betrachteten Zeitabschnitt. Dementsprechend ist der gesamte Abfluss des vorangehenden Knotens M ursächlich für den Zufluss $q_{z,k}$ der Verbindung z. Die Größen $d_{z,k}$ und $s_{z,k}$ werden zur Modellierung der Nachfrage bzw. des Ausgangsstrom über Verbindung $z \in \mathcal{I}_N \cap \mathcal{O}_M$ genutzt, sodass u. a. Auswirkungen von Parkplätzen oder nicht geregelte Kreuzungen zwischen den Knoten berücksichtigt und bei hinreichender Messung als bekannte Störungen interpretiert werden können. Mithilfe der Zustandsdefinition von $x_{z,k}$ als Fahrzeuganzahl jeder geregelten Verbindung z zum Zeitpunkt k wird die diskrete Erhaltungsgleichung der dargestellten Situation über

$$x_{z,k+1} = x_{z,k} + T\left[q_{z,k} - h_{z,k} + d_{z,k} - s_{z,k}\right] \tag{3-4}$$

formuliert. In diesem Beispiel von [TVKB08] stimmt die fixierte Schrittweite T als Vereinfachung mit der Umlaufzeit T_c aller im System befindlichen LSA überein. Als Konsequenz sind für den betreffenden Knoten alle Grünzeiten des Umlaufs als Stellgröße zu bestimmen. Bei einem Netzausschnitt mit mehreren Verzweigungen und zu regelnden Kreuzungen kann diese Dynamik entsprechend erweitert werden. Für das gesamte System resultiert die Zustandsraumdarstellung

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Ed_k, \\ y_k &= Cx_k. \end{aligned} \tag{3-5}$$

Anhand von $A = I$ werden vergangene Zustände direkt berücksichtigt und der Eingang u_k enthält die verbindungsbezogenen Grünzeiten sämtlicher Phasen des k-ten Umlaufs. Mithilfe der Eingangsmatrix B können die Zu- und Abflüsse abhängig von den jeweiligen Abbiegeraten $t_{w,z}$ von Verbindung $w \in \mathcal{I}_M$ zu $z \in \mathcal{I}_N \cap \mathcal{O}_M$ und dem konstant angenommenen Sättigungsfluss S_z berechnet werden. Der Sättigungsfluss S_z stellt dabei die Abflusskapazität der Verbindung z während ihrer Grünzeit dar, sodass die Matrix B den Einfluss der Stellgrößen auf die assoziierten Verbindungen über

$$b_{ij} = \begin{cases} -S_i, & i = j, \\ S_j t_{j,i}, & i \neq j, \end{cases}$$

bemisst. Folglich entspricht der obige Abfluss $h_{z,k}$ dem Produkt $S_z u_{z,k}$. Zudem ist zu beachten, dass $t_{j,i} = 0$ gilt, wenn Verbindung j keinen direkten Einfluss auf Verbindung i nimmt. In Gleichung (3-5) resultiert der dritte Term Ed_k mit $E = I$ aus dem verbliebenen Teil von Gleichung (3-4) als gemessener Störung zwischen geregelten Knoten und der gemessenen Nachfrage am Rand des Verkehrsnetzes. Demnach kann auf diese Weise

der Zufluss für Verbindungen ohne geregelten Vorgängerknoten (am Rand des betrachteten Verkehrsnetzes) modelliert werden. Für die Ausgangsgleichung des Gesamtsystems wird zudem die Vereinfachung $C = I$ angenommen. In diesem Konzept sind ebenso Beschränkungen für die Zustandsgrößen über

$$0 \leq x_{z,k} \leq x_{z,\max}$$

als maximale Kapazitäten der Straßen und für die Eingangsgrößen über

$$u_{z,\min} \leq u_{z,k} \leq u_{z,\max}$$

als Anforderungen an die jeweiligen Grünzeiten gegeben. Zur Gewährleistung der maximal möglichen Gesamtgrünzeit wird zusätzlich für alle $j \in \mathcal{J}$

$$\sum_{z \in O_j} u_{z,k} \leq T_{j,\max}$$

gefordert. Die entsprechenden Gesamtgrünzeiten $T_{j,\max} = T - L_j$ ergeben sich knotenspezifisch anhand der festen geometrieabhängigen Zeitverluste[38] L_j und sind durch den definierten Phasenablauf unabhängig vom Umlauf. Die Zeitverluste resultieren u. a. aus den Phasenübergängen und den damit verbundenen Zwischenzeiten, welche bereits in Abschnitt 2.2.1 erläutert wurden. Die Verknüpfung dieser Systemdarstellung mit dem MPC-Grundgedanken, der in Abschnitt 2.4.2 beschrieben wurde, führt unter Vernachlässigung von Schätzfehlern zur Darstellung

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_{k+1|k} \\ \vdots \\ x_{k+n_p|k} \end{bmatrix}}_{\tilde{x}_{k+1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_k + d_k \\ \vdots \\ x_k + n_P \cdot d_k \end{bmatrix}}_{c_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} B & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ B & \cdots & B \end{bmatrix}}_{\tilde{B}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} u_{k|k} \\ \vdots \\ u_{k+n_p-1|k} \end{bmatrix}}_{g_k}. \tag{3-6}$$

Aus diesen Überlegungen kann das Optimierungsproblem

$$\min_{g_k} J_k$$
$$\text{u. B. v.} \quad F g_k - \eta \leq 0$$

abgeleitet werden.

[38] Nicht zu verwechseln mit den später noch auftretenden Verlustzeiten, die einen wartezeitähnlichen Kennwert für VTN darstellen (siehe dazu Abschnitt 5.2.2).

Für die dabei verwendete quadratische Kostenfunktion gilt

$$J_k = \frac{1}{2}\left\{\tilde{x}_{k+1}^T Q \tilde{x}_{k+1} + g_k^T R g_k\right\}$$
$$\overset{\text{Gl. (3-6)}}{=} \frac{1}{2}\Big\{g_k^T \underbrace{(q\tilde{B}^T\tilde{B} + rI)}_{:=\,\Phi} g_k + \underbrace{qc_k^T c_k}_{=\text{ konstant}}\Big\} + \underbrace{qc_k^T\tilde{B}}_{:=\,\beta_k^T} g_k,$$

wobei die Konstanten q und r aus den verwendeten Diagonalelementen der skalaren Gewichtungsmatrizen Q und R resultieren. Die Matrix Φ ist per Definition konstant, β_k variiert dagegen zustandsabhängig und der Term $qc_k^T c_k$ hat wegen der Unabhängigkeit vom Eingang in der Optimierung keinen Einfluss. Als Resultat wurde demnach ein einfach berechenbares nichtlineares System entwickelt, dessen Lösung unter Berücksichtigung definierbarer Rahmenbedingungen effizient ermittelt werden kann [TVP10].
Ein besonderes Merkmal der Veröffentlichung [TVKB08] ist, dass sich die Autoren mit der weiteren Anbindung des entwickelten Ansatzes bzgl. einer möglichen Realumsetzung auseinander gesetzt haben. Die dabei angedeutete Systemarchitektur ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

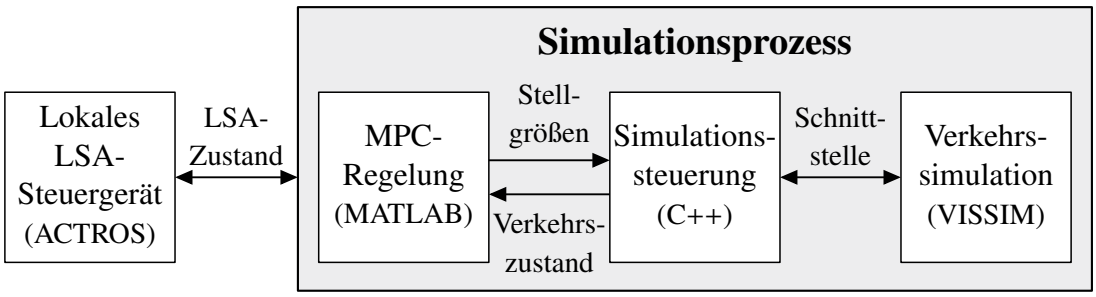


Abbildung 3-4: *Idee zur Systemarchitektur einer MPC-basierten LSA-Regelung; angelehnt an [TVKB08]*

Vor allem die Berücksichtigung der Kopplung des Simulationsprozesses an das lokale LSA-Steuergerät stellt einen Aspekt dar, der in vergleichbaren Veröffentlichungen nicht behandelt wird. Angepasst an die jeweils verwendeten Tools der Verkehrssimulation und des LSA-Steuergeräts sind daher spezifische Schnittstellen implementiert worden, welche die notwendige Kommunikation für mögliche Realumsetzungen gewährleisten. In der Abbildung ist in Klammern die verwendete Umsetzungssoftware der einzelnen Bausteine angegeben.

Fuzzy-System zur LSA-Regelung

Als zweites Konzept soll die LSA-Regelung mithilfe einer mehrstufigen Fuzzy-Regelung nach [JMK17] vorgestellt werden. Die Grundlagen von Fuzzy-Systemen sind bereits in

Abschnitt 2.4.2 erläutert worden und der hier vorgestellte Ansatz erweitert den im Rahmen des *FUSICO*-Projekts entwickelten mehrstufigen Fuzzy-Regler für isolierte LSA von [NP00]. Die Idee der Regelung basiert auf einem hierarchischen Prinzip mit absteigender Priorität. In der obersten Ebene wird das Verkehrsaufkommen mithilfe einfacher Fuzzy-Regeln wie:

> *„Wenn das Verkehrsvolumen der letzten fünf Minuten niedrig und die Belegung der Detektoren Null ist, dann wird das Verkehrsaufkommen als niedrig angesehen.“*,

bewertet. Es folgen die Ebenen der Phasenfolgenauswahl und abschließend der Evaluation einer Grünzeitverlängerung. Lediglich bei als normal klassifiziertem Verkehr werden die beiden unteren Ebenen bemüht, sodass bei geringem Verkehrsaufkommen bspw. das First-In-First-Out (FIFO)-Prinzip angewendet wird. In der signalgruppenorientierten (siehe Abschnitt 2.2.1) Phasenauswahl wird ein sog. *Multi-Agenten-Modell* der einzelnen Signalgruppen genutzt, um die Zeiten zwischen den Grünphasen zu reduzieren. Die unterste Ebene trifft die Entscheidung der Grünzeitverlängerung bzgl. der aktuellen Grünphase auf Basis der verfügbaren Verkehrsinformationen.
Ein wesentliches Merkmal dieser Entwicklung ist, dass sich in den unteren beiden Ebenen explizit mit den Vorgängen bei Phasenwechseln auseinander gesetzt wurde. Bei der Phasenauswahl werden vorzugsweise diejenigen Phasen gewählt, welche bereits eine aktive Signalgruppe in der aktuellen Phase besitzen, sodass nicht zwangsläufige klassische Umläufe produziert werden. Dieser Ablauf wird als Verhandlung der einzelnen Agenten bezeichnet und ist exemplarisch in Abbildung 3-5 dargestellt.

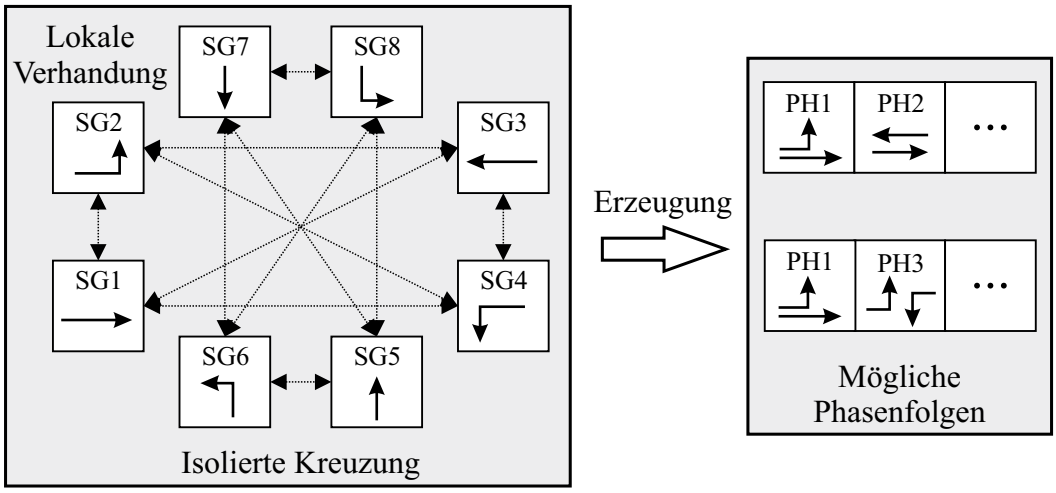


Abbildung 3-5: *Multi-Agenten-Modell zur signalgruppenorientierten Phasenauswahl; angelehnt an [JMK17]*

Die vorhandenen Beschränkungen aus entsprechenden Zwischenzeiten werden ebenso wie vorgegebene Gelbzeiten und die Mindest-/Maximalgrünzeiten berücksichtigt und stel-

len folgerichtig in der untergeordneten Verlängerungsebene harte Randbedingungen dar. Neben diesen wichtigen Details in den Umschaltvorgängen von Phasen werden in der Veröffentlichung elementare Operationen zur Robustheitssteigerung umgesetzt, die vor allem bei Realumsetzungen zu beachten sind. Einerseits wird die Schätzungsabweichung mit der Zeit adressiert, indem der vorliegende Zustand durch eine Selbstkalibrierung an die Messungen angepasst wird. Andererseits ist durch die Identifizierung fehlerhaft arbeitender Detektoren eine Selbstdiagnosefunktion des Systems entwickelt worden, die über eine konfigurierbare Zeitspanne die Funktionalität überprüft.

3.2 Handlungsbedarf für LSA-Regelungskonzepte

In den beiden vorherigen Abschnitten zum Stand der Technik der Beobachter- und LSA-Regelungskonzepte für Verkehrssysteme lassen sich einige Möglichkeiten zur Erweiterung und Verbesserung identifizieren, die an dieser Stelle aufgeführt werden sollen. Deren Umsetzungen werden im folgenden Kapitel 4 schrittweise vorgestellt. Das Ziel ist die Entwicklung eines LSA-Regelungssystems, welches die genannten bisherigen Schwachstellen möglichst vollständig kompensiert und gleichzeitig eine ganzheitliche Lösung zur Realumsetzung liefert.

Zunächst sei das große Potential eines Gesamtkonzepts mit gemeinsamer Entwicklung von Beobachter und Regelung aufgeführt, welches bspw. bereits beim Beobachterentwurf die Berücksichtigung notwendiger Spezifikationen des Regelungsentwurfs zulässt und auch Aspekte der Beobachtung in die Regelung integriert. Diese zumeist vernachlässigte gegenseitige Abstimmung fördert das Zusammenspiel der Einzelkomponenten und erleichtert die Realumsetzung. Denn auch im Beobachterkonzept sollen die berechneten und damit aktuellen LSA-Signale unmittelbar umgesetzt werden, sodass deren Einfluss auf den Verkehr in der folgenden Zustandsschätzung direkt rückgekoppelt wird. Der geschlossene Regelkreis für die Regelung eines Verkehrssystems auf Basis der zugehörigen LSA ist in der folgenden Abbildung 3-6 dargestellt. Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Regelungssystem soll dabei den gesamten Bereich der Informationsverarbeitung abdecken.

Aufgrund des Vorhabens der Realumsetzung existieren gewisse Anforderungen an den Beobachter zur Rekonstruktion des aktuellen Verkehrszustands. Um schnell und vielfältig auf den Verkehr reagieren zu können, muss der Beobachter einerseits stets aktuell und andererseits möglichst genau sein. Die Unterscheidung der Fahrzeugtypen ist dabei eine Voraussetzung, damit diese gezielt anhand der spezifischen Eigenschaften berücksichtigt werden können. Die Aktualisierungsrate der Schätzung sollte daher an die Stellgrößen der Regelung angepasst sein. Da die meisten LSA in Deutschland, so auch die im PPS, sekündlich agieren, gilt es, auch den Verkehr mindestens im Sekundentakt auf Basis der

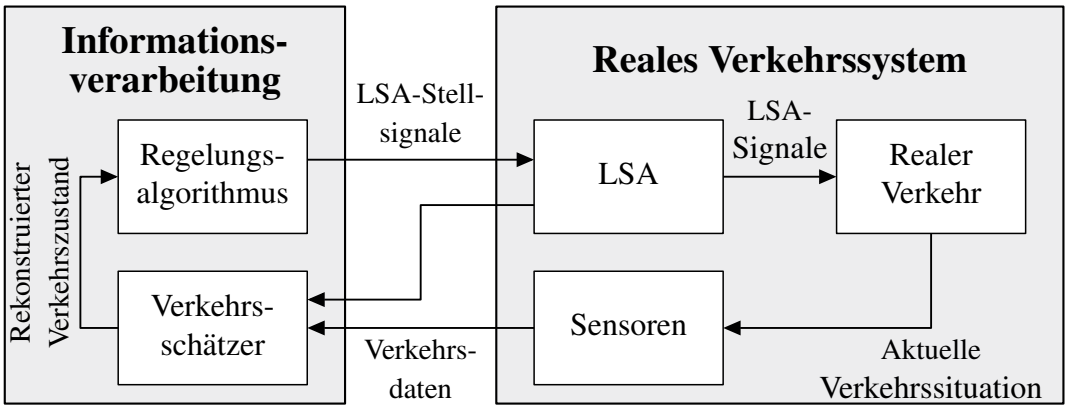


Abbildung 3-6: *Geschlossener Regelkreis des betrachteten Verkehrsregelungssystems*

Sensordaten anzupassen. Die grundsätzliche Struktur der DTA aus Abbildung 3-1 bleibt dabei erhalten, wobei die Sensordaten eine entscheidende Rolle einnehmen. Innerhalb des Konzepts ist eine vollumfängliche und schnelle Verarbeitung besonders wichtig. Die Verschiedenheit der Datenausprägungen, wie z. B. die Fahrzeugtypunterscheidung bestimmter Sensoren, soll durch geeignete Kombination der Daten berücksichtigt werden. Damit eng verknüpft ist ebenso der Gesichtspunkt der Robustheit, welcher sowohl in der Zustandsbeobachtung als auch in der Regelung zu beachten ist. Die Verwendung historischer Daten als plausible Datenbasis, ähnlich wie in Abbildung 3-1, hilft bei der Einordnung aktueller Sensordaten, sodass bspw. Störungen detektiert werden können. Dementsprechend notwendig ist das Vorsehen von Ausfallkonzepten und Rückfallebenen zur Robustheitssteigerung in der Realumsetzung. Diese können u. a. mithilfe von Redundanzen der Sensorik realisiert werden, sodass in diesem Fall bestimmte Fehlfunktionen, (temporäre) Störungen oder Totalausfälle von Sensoren direkt kompensierbar sind.

Zudem sollte die LSA-Regelung auch bei Abweichungen des geschätzten und prognostizierten Verkehrszustands vom tatsächlichen Zustand weiterhin leistungsfähig bleiben. Um die Unsicherheit in der Zustandsschätzung auszudrücken, wird daher z. B. in den zuvor vorgestellten Kalman-Filter-Methoden weißes Rauschen in Gleichung (3-2) als Fehlerterm genutzt. Bei getrennter Entwicklung von Zustandsschätzung und LSA-Regelung wird der Einfluss dieser Unsicherheitskomponente oftmals vernachlässigt, wie auch im vorgestellten MPC-Ansatz nach [TVKB08; TVP10]. Dieser wurde jedoch in [TLK$^+$14] mithilfe eines Konzepts zur Unsicherheitsberücksichtigung ergänzt. Die MPC benötigt für jede Optimierung stets die aktuellen Zustände, d. h. bei dieser Formulierung die genaue Kenntnis der Fahrzeuganzahlen, sodass in [TLK$^+$14] die kompakte Darstellung aus Gleichung (3-6) um entsprechende Terme der Unsicherheit erweitert wurde. Ein bei Prädiktionen wichtiger Punkt ist der betrachtete Zeithorizont selbiger, da mit zunehmender Dauer die Schätzungsunsicherheit eine bedeutendere Rolle einnimmt und dieser Umstand daher im Konzept beachtet werden sollte. Neben den bereits genannten Aspekten

der Detailtreue bzgl. der Zustandserfassung sind für die Planung von LSA-Regelungen weitere wichtige Bedingungen zu erfüllen, die es vor allem bei geplanter Realumsetzung zu beachten gilt. Das offensichtlichste Element stellen dabei die von der Regelung verwendeten Stellgrößen und dementsprechend die zu erzeugenden Lichtzeichen der LSA dar. In vielen Konzepten der Literatur wird eine geringe Phasenkomplexität betrachtet, sodass bspw. lediglich Rot- und Grünphasen von gesamten Verkehrsrichtungen ohne spezifische Richtungssignale für mehrspurige Fahrbahnen Verwendung finden [vO16; HLCH19b]. Bei wiederum anderen Konzepten ist der Phasenplan (siehe bspw. Abbildung 2-10) fixiert und lediglich der Schaltzeitpunkt wird durch die Regelung bestimmt (u. a. in [WZYL18]). Schon in Tabelle 2-2 wird zusätzlich zu dieser Idee der Freigabezeitanpassung auch die Möglichkeit zur freien Veränderbarkeit genannt, sodass Signalprogramme verkehrsabhängig neugebildet werden. Als Basis sollen dabei vorher definierte Phasenmengen der jeweiligen LSA dienen. Damit folgerichtig in der Stellgrößenbestimmung auch Umschalteffekte und Zwangsbedingungen, die in der Realität vom LSA-Steuergerät gehandhabt werden, Berücksichtigung finden, sind detaillierte Phasenübergänge inkl. der Zwischenzeiten (siehe Abschnitt 2.2.1) und weitere Nebenbedingungen wie minimale Sperrzeiten von Einzelsignalen zu integrieren. Zwangsläufig ergibt sich daraus auch der Handlungsbedarf zur Abstimmung der Entwicklung mit der vorliegenden Infrastruktur wie dem Steuergerät. Als Beispiel sollten die gleichen bzw. vergleichbare Schwellenwerte wie maximale Sperrzeiten von Fahrspuren implementiert werden, um die Robustheit des Gesamtregelungssystems zu steigern.

4 System zur modellprädiktiven LSA-Regelung

Im vorangehenden Kapitel 3 zum derzeitigen Stand der Technik wurden bekannte Ideen und Methoden im Kontext der Erfassung und Regelung von Verkehrssystemzuständen beschrieben. Ausgerichtet auf das Ziel, ein reales Verkehrssystem anhand der enthaltenen LSA bzgl. unterschiedlicher Kriterien zu regeln, wurde schließlich aus bisherigen Insuffizienzen und Potentialen der Handlungsbedarf abgeleitet. Aus diesem Handlungsbedarf und praktischen Umsetzungsnotwendigkeiten resultiert die Entwicklung eines ganzheitlichen Regelungssystems, welches in diesem Kapitel vorgestellt wird. Einen wichtigen Entwicklungsaspekt stellt die generelle Übertragbarkeit der Methodik auf vergleichbare Verkehrssysteme zu den hier gezeigten Beispielen dar, auch wenn die Anwendungen in dieser Arbeit stets aus dem PPS stammen.
Als Ausgangslage der Entwicklung dient der geschlossene Regelkreis aus Abbildung 3-6, in dem der gesamte linke Teil der Informationsverarbeitung an dieser Stelle behandelt werden soll. Zunächst wird dabei auf den verwendeten Modellierungsansatz eingegangen, bevor anschließend die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte der Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion und der mehrstufigen modellprädiktiven LSA-Regelung adressiert werden. Dabei identifizierte Potentiale und abgeleitete Maßnahmen zur Robustheitssteigerung werden im letzten Abschnitt dieses Kapitels kurz behandelt. Ausgewählte Elemente zur Implementierung und den Schnittstellen zum realen Verkehrssystem (rechte Seite des Strukturbilds) folgen mit der simulativen Analyse in Kapitel 5.

4.1 Grundidee und Modellbildung

Die Vorteile von Verkehrssimulationen wurden bereits in Abschnitt 2.3 hervorgehoben und harmonieren sehr gut mit den gegebenen Anforderungen und Voraussetzungen dieser Forschungsarbeit. Dementsprechend werden Simulationen für die erste Erprobung der Entwicklungen dieses Vorhabens genutzt, wobei als verwendetes Tool SUMO ausgewählt wurde (siehe Abschnitt 2.3.1 und folgende). Die Gründe dieser Wahl waren neben der genauen Abbildung des Verkehrs ebenso die freie Verfügbarkeit als Open-Source Softwarepaket mit vielen eingebetteten Hilfsmitteln. Des Weiteren war die einfache externe Anbindungsmöglichkeit über TraCI zur Erweiterung der Funktionalität und die breite Anwendung im Forschungskontext ausschlaggebend.
Mikroskopische Verkehrssimulationen können die Dynamiken von Einzelfahrzeugen sowie vor allem deren Interaktionen untereinander und mit der Infrastruktur sehr detailliert abbilden. Daher beruht das Grundkonzept dieser Entwicklung auf der Erzeugung einer digitalen Repräsentation des realen Verkehrssystems auf mikroskopischer Basis, was auch als digitaler Zwilling des Systems bezeichnet werden kann [Gri14]. Die geplante LSA-

Regelung soll anhand der ermittelten Verkehrszustände dieses digitalen Systemabbilds, welches auf Grundlage der neuesten Sensorinformationen aktualisiert wird, entwickelt und die optimalen Stellgrößen der LSA berechnet werden. Wie zuvor ausführlich erörtert, ist dazu eine möglichst genaue Darstellung des Verkehrsnetzes inklusive der zugehörigen Infrastruktur notwendig. Aufgrund der reinen Größe und Komplexität beliebiger Verkehrsnetze mit mehreren LSA beginnt das übliche Vorgehen der Generierung zunächst mit dem Aufbau der maßgeblichen Systemtopologie. In diesem Fall wurden von OSM bezogene Daten importiert, anschließend manuell angepasst und Details ausgestaltet. Die Plattform OSM liefert dabei Straßengeometrien sowie Positionen von Lichtsignalanlagen, die anhand spezifischer Planungsinformationen, wie in Abbildung A2-1 am Beispiel der Schlosskreuzung gezeigt, verfeinert werden können. Dabei sind im Lageplan die exakten Signalisierungen der LSA ebenso wie die Lage und Art der eingesetzten Sensorik gegeben.
Aus dieser genauen Verkehrsabbildung leitet sich die Idee ab, einen digitalen Zwilling als Echtzeit-Beobachtung zu verwenden, welcher während des realen Betriebs parallel zur Laufzeit simuliert wird. Als anschließender Teil der Informationsverarbeitung folgt die modellprädiktive Propagation des erzeugten Verkehrszustands innerhalb der Regelung, sodass die optimalen Stellgrößen aller LSA aus der rekonstruierten Situation abgeleitet werden. Auf diese Weise greifen die Bausteine der Informationsverarbeitung direkt ineinander und bilden zusammen das entwickelte Regelungssystem.

4.2 Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion

Die Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion[39] wurde im Rahmen des PPS entwickelt, um den aktuellen Verkehrszustand zur Laufzeit zu rekonstruieren. Dieser detaillierte Zustand erlaubt es, im Anschluss eine anspruchsvolle und multikriterielle LSA-Regelung auszulegen. Die damit einhergehenden Herausforderungen leiten sich neben der Zielsetzung u. a. aus der begrenzten zur Verfügung stehenden Datenqualität ab. Diese äußert sich durch unterschiedliche stationär positionierte Sensoren, die fortlaufend Daten aufzeichnen, aber keine direkte Routennachverfolgung wie durch ANPR ermöglichen. Der Verzicht auf bspw. Kameras liegt in den Datenschutzrichtlinien Deutschlands und innerhalb des Forschungsprojektes PPS begründet [PPS22]. Dennoch soll eine allgemeine Übereinstimmung von Realität und simuliertem Abbild des betrachteten Verkehrsraumes gewährleistet werden. In diesem Abschnitt werden zunächst die wesentlichen Aspekte des Konzepts zur Verkehrsrekonstruktion erläutert, welches in Deutschland patentiert [MLGT23] und bereits in [MLM+21a] vorgestellt wurde. Darauffolgend wird kurz auf die Validierung der Verkehrsrekonstruktion eingegangen, welche in [MLM+21b] veröffentlicht wurde.

[39] Der Zusatz „Echtzeit“ wird im Folgenden der Einfachheit halber gekürzt.

4.2.1 Konzept und Aufbau der Verkehrsrekonstruktion

Die Idee dieses DTA-Algorithmus besteht darin, ein mikroskopisches Simulationsmodell mit Sensormessungen in Echtzeit zu „füttern“, um als ereignisbasierter Beobachter für den aktuellen Verkehrszustand zu fungieren. Viele Operationen können im Voraus offline durchgeführt werden, andere, wie die Verarbeitung der Messdaten, müssen jedoch online, während das mikroskopische Verkehrsszenario simuliert wird, erfolgen. Das Stichwort „Echtzeit“ ist in diesem Konzept entscheidend, da für die gleichzeitig zu entwickelnde LSA-Regelung, die in Deutschland generell im Sekundentakt agiert [FGSV15a], ausreichend Rechenzeit zur Verfügung stehen muss. Um die Verkehrssituation zwischen den lokalen Detektorpositionen zu rekonstruieren und permanent über einen aktuellen Verkehrszustand zu verfügen, müssen prädiktive Routingentscheidungen vergangene und zukünftige Messungen verknüpfen. Die Struktur der vorgestellten simulationsbasierten Methode ist dabei in Abbildung 4-1 skizziert.

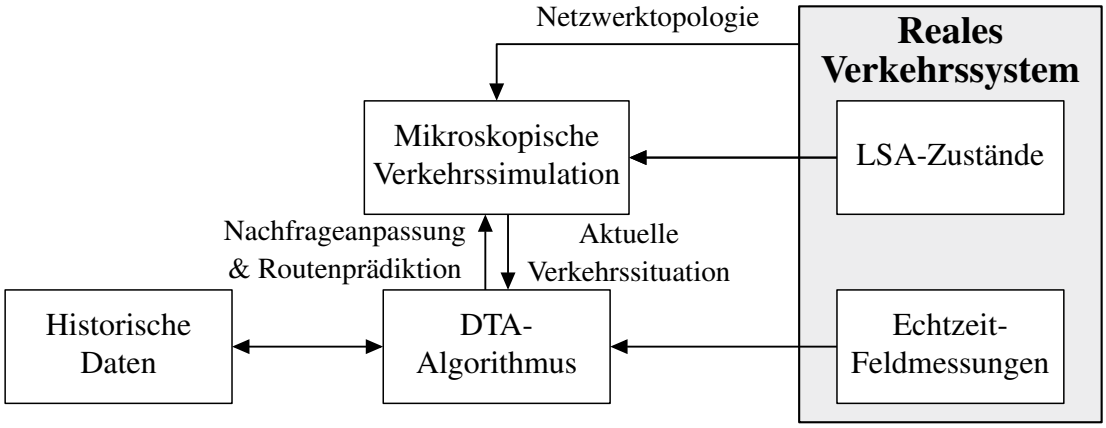


Abbildung 4-1: *Strukturbild der Verkehrsrekonstruktion*

Das Blockdiagramm zeigt den Einfluss des realen Verkehrsszenarios auf die Simulation und auf die Verkehrsnachfrageanpassung sowie deren wechselseitige Interaktion. Außerdem wird dargestellt, dass neben den aktuellen Messungen auch historische Daten die Verkehrsnachfrage beeinflussen. Verschiedene Berechnungen werden dabei vor der eigentlichen Simulation als Initialisierungsprozess durchgeführt. Darunter fallen zum Beispiel die Ermittlung der durchschnittlichen Fahrzeiten spezifisch für verschiedene LSA-Zustände und Fahrzeugtypen oder auch aus historischen Daten abgeleitete Abbiegewahrscheinlichkeiten. Die Online-Anpassungen beschränken sich auf das Einpflegen der Echtzeitdaten in die laufende Simulation, sodass sekündliche Aktualisierungsintervalle dieser Online-Zustandsschätzung im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen aus dem vorherigen Kapitel 3 ermöglicht werden. Im Folgenden wird der DTA-Algorithmus genauer erläutert, der wiederum gebündelt Anweisungen zur Verkehrsbedarfsanpassung sowie zur Routenwahl und -vorhersage an die Verkehrssimulation zurückspielt.

DTA-Algorithmus

Der DTA-Algorithmus beruht auf einem hierarchischen Prinzip. Abhängig von der Datenqualität bzw. dem -umfang passen die entworfenen Routingebenen die aktuell simulierte Verkehrssituation untereinander abgestimmt an. Die oberste Ebene bildet dabei das sog. *TOPO.box-Routing*. Die mittlere Ebene umfasst das *Induktionsschleifen-Routing* und die unterste Ebene das *ÖPNV-Routing*. Die Bezeichnungen sind jeweils an die im PPS eingesetzten charakteristischen Sensoren mit der entsprechenden Datenqualität angelehnt, wobei nicht der Einsatz oder die Art spezieller Sensoren für die Umsetzung entscheidend ist, sondern der resultierende Informationsumfang. Die gegenseitigen Einflussmöglichkeiten der einzelnen Routingebenen sind in der nachfolgenden Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: *Eigenschaften und Interaktionen der Routingebenen des entwickelten DTA-Konzepts*

		Routingebene		
		TOPO.box-Routing	Induktionsschleifen-Routing	ÖPNV-Routing
Routingstatus[40] des Fahrzeugs	Stochastisches Anschlussrouting	Position und Route	Position und Route	Position und Route (Beschränkt auf ÖPNV)
	TOPO.box-Routing	-	Position	Position (Beschränkt auf ÖPNV)
	Induktionsschleifen-Routing	Position und Route	-	Position und Route (Beschränkt auf ÖPNV)
	ÖPNV-Routing	Position	Position	Position (Beschränkt auf Signalfortsetzung)

Als Beispiel kann das Induktionsschleifen-Routing lediglich die Position eines funkfähigen Busses auf Basis einer Überfahrt anpassen, welcher hervorgerufen durch das ÖPNV-Routing derzeit eine festgelegte Route abfährt. Das stochastische Anschlussrouting wird im Folgenden erläutert und bedeutet an dieser Stelle, dass keine andere Routingebene für den betreffenden VTN aktiv ist. Daher kann neben der Position auch die Route derartiger Fahrzeuge beliebig modifiziert werden, um auftretende Messungen einer Routingebene zu erfüllen.

Alle Ebenen basieren auf einer zeitinvarianten und gerichteten Graphenrepräsentation $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{L})$ des leeren Verkehrsnetzes angelehnt an [AB93; BC04]. Dabei stellen die Knoten $\mathcal{N}$ entweder Kreuzungen oder andere geometrisch bzw. infrastrukturell motivierte

[40] Der Routingstatus beschreibt die derzeit maßgebliche Routingebene.

Diskretisierungspunkte wie Sensorpositionen dar, um das gegebene Verkehrssystem abzubilden. Die Straßenabschnitte des komplexen Verkehrssystems werden durch die Verbindungen $\mathcal{L}$ modelliert. Mit der zum Zeitpunkt t sich im betrachteten System befindlichen Anzahl an Fahrzeugen $N_{\text{veh}} := |V|$ kann der Belegungszustand $\xi(t)$ des Verkehrsnetzes definiert werden. Dieser setzt sich dabei für Einzelfahrzeuge $i \in V$ anhand von

$$\xi_i(t)^T : \begin{cases} \textit{Fahrzeugtyp} \in \left\{1, \ldots, N_{\text{vehtype}}\right\}, \\ \textit{Straßenabschnitt} \in \{1, \ldots, |\mathcal{L}|\}, \\ \textit{Fahrzeugposition auf Straßenabschnitt} \in \mathbb{R}, \\ \textit{Fahrzeuggeschwindigkeit} \in \mathbb{R}, \end{cases}$$

zusammen, wobei N_{vehtype} die Anzahl der unterschiedenen Fahrzeugtypen darstellt.
Der grundsätzliche algorithmische Ablauf der Verkehrsrekonstruktion soll anhand des folgenden Schritt-für-Schritt Vorgehens verdeutlicht werden:

Schritt 0: Pre-Simulation: Laden und Verarbeiten historischer Daten zur Berechnung notwendiger Reisezeiten und Wahrscheinlichkeiten von Folgerouten sowie Initialisierung der Verkehrssimulation.

Schritt 1: Einpflegen aktueller LSA-Signale und Anpassung der geschätzten Reisezeiten abhängig von den Signalen und der Verkehrsbelastung.

Schritt 2: Überprüfung des aktuellen Routingstatus jedes Fahrzeugs.

Schritt 3: TOPO.box-Routing.

Schritt 4: Induktionsschleifen-Routing.

Schritt 5: ÖPNV-Routing.

Schritt 6: Entfernung von Fahrzeugen, die eine nicht vorhandene Messung in der Simulation bedingen würden.

Schritt 7: Rückkehr zu *Schritt 1*, falls die Verkehrsrekonstruktion weiterhin betrieben werden soll, andernfalls wird die Simulation beendet und alle Aufzeichnungen abgelegt.

Die Vorbereitungen in *Schritt 0* gewährleisten durch die Offline-Berechnungen der Reisezeiten sämtlicher Straßenabschnitte zu den implementierten Sensoren abhängig von verschiedenen Faktoren wie LSA-Signalisierung oder Verkehrsaufkommen die Effizienz des Algorithmus. Durch diese Maßnahme hält die Online-Verkehrsrekonstruktion für das umgesetzte Verkehrssystem von Schloß Neuhaus den geforderten Echtzeitbedingungen stand (siehe Kapitel 5 & 6). Die Überprüfung des aktuellen Routingstatus in *Schritt 2* ist eng mit Tabelle 4-1 verknüpft, weil auf diese Weise u. a. die frei routingfähigen Fahrzeuge $V_{\mathbb{P}} \subseteq V$, die sich im stochastischen Anschlussrouting befinden, identifiziert wer-

den. *Schritt 6* ist dahingehend besonders wichtig, um Phänomene wie das Parken am Seitenrand oder Abbiegen in eine nicht beobachtbare Straße genau wie falsche Routenprädiktionen auszugleichen. Damit wird der Systemzustand stets aktuell an die Messdaten der Realität angeglichen.

TOPO.box-Routing

Damit eine LSA-Regelung auf unterschiedliche Fahrzeugtypen reagieren kann, ist die Integration typsensitiver Sensorik notwendig, weil nur so die benötigten Informationen zur Zustandsschätzung verfügbar sind. Bzgl. der Positionierung derartiger Sensoren empfehlen sich Straßenabschnitte an den definierten Systemgrenzen und jene zwischen LSA-geregelten Kreuzungen. Auf diese Weise kann die resultierende Beobachtung in Kreuzungsnähe abgeglichen werden und die erhaltenen Sensorinformationen ergänzen die zumeist vorhandenen Induktionsschleifen bestmöglich.
Das TOPO.box-Routing basiert auf typsensitiven Daten und ist mit einer detaillierten Herleitung der Problemstellung ausführlich in [MLM+21a] beschrieben. Die Grundidee des dabei verwendeten Zuordnungsproblems ist die Entscheidung, ob ein Fahrzeug zu einem nahegelegenen Sensor geleitet werden soll und damit die Übereinstimmung der Fahrzeugroute mit entsprechenden Sensormessungen hergestellt werden kann. Abhängig von den bestimmten Reisezeiten jedes Fahrzeugs zu nahegelegenen Sensoren werden drei Fälle zum diskreten Zeitschritt k unterschieden.
Der erste Fall ist, dass ein betrachtetes Fahrzeug aufgrund der Reisezeit eine vorliegende Messung nicht erfüllen kann. Der zweite Fall des *deterministischen Routings* besteht darin, dass ein Fahrzeug nur einen Sensor kurzfristig erreichen kann. Als Folge wird die Route angepasst, sodass der Straßenabschnitt der Messstelle von dem VTN passiert wird. Der letzte Fall tritt ein, wenn mehr als zwei Messstellen mit mindestens einer Detektion für Fahrzeug i erreichbar sind. Das übergeordnete Ziel ist eine realistische Zuordnung derartiger Fahrzeuge zu vorliegenden Messungen[41] herzustellen, sodass die derzeitige Route zur Laufzeit erweitert oder ggfs. aktualisiert wird.
Zur mathematischen Beschreibung der Lösung des Zuordnungsproblems wird $q_{i,k}$ als Anzahl erreichbarer Sensoren des Fahrzeugs i eingeführt, wobei $\mathbb{N} \ni q_{i,k} \geq 2$ folgt. In dieser Situation muss demnach eine *Routingentscheidung* getroffen werden, sodass für alle $n_k \leq N_{\text{veh},k}$ Fahrzeuge dieses Falls ein binäres Optimierungsproblem formuliert wird. Dazu wird über die Anzahl der Routingoptionen

$$N_{a,k} = \sum_{i=1}^{n_k} q_{i,k}$$

[41] Durch das deterministische Routing bislang nicht erfüllte Messungen.

die Optimierungsvariable $x_{a,k}$ definiert, welche die binären Routingentscheidungen aller Fahrzeuge zu maximal einer der $n_{S,k}$ Messstellen[42] widerspiegelt. Das resultierende Problem kann über

$$\begin{aligned} \min_{x_{a,k}\in\{0,1\}^{N_{a,k}}} J\left(x_{a,k}\right) &= \min_{x_{a,k}\in\{0,1\}^{N_{a,k}}} \left(w_t t_{t,k} - w_a \mathbb{1}\right) \cdot x_{a,k} \\ \text{u. B. v.} \quad \underbrace{\begin{bmatrix} A_{1,k} \\ A_{2,k} \end{bmatrix}}_{\in\{0,1\}^{(n_k+n_{S,k})\times N_{a,k}}} x_{a,k} &\leq \underbrace{\begin{bmatrix} b_{1,k} = \mathbb{1} \\ b_{2,k} \end{bmatrix}}_{\in\mathbb{Z}^{(n_k+n_{S,k})}} \end{aligned} \tag{4-1}$$

beschrieben werden. Dabei berücksichtigt die Gütefunktion J in Problem (4-1) einerseits die betreffenden aktuellen Reisezeiten $t_{t,k}$ zu den Sensoren mit Gewichtung w_t und andererseits wird die Zuordnung mit Gewichtung w_a maximiert. Der erste Teil der Nebenbedingungen ergibt sich aus der Prämisse, dass jedes Fahrzeug nur zu einem Sensor geroutet werden kann. Die Matrix $A_{1,k}$ ordnet hierbei die Optimierungsvariablen den entsprechenden Fahrzeugen zu. Der zweite Teil der Nebenbedingungen resultiert aus der Limitierung durch die Anzahl an tatsächlichen Messungen im betrachteten Zeitintervall. Während $b_{2,k}$ die verbliebenen Messungen nach dem deterministischen Routing enthält, so sorgt $A_{2,k}$ für die Zuordnung der korrespondierenden Sensoren. Zur Berücksichtigung des Fahrzeugtyps wird das Problem parallel für jede der verschiedenen Klassen gelöst.
Sobald ein Fahrzeug in der Simulation einem Detektor zugewiesen wurde, enthält die zugewiesene Route bereits eine auf Wahrscheinlichkeiten basierende Folgeroute für die Zeit nach Passieren des Sensors (stochastisches Anschlussrouting). Diese wird aus der jeweiligen Position und den historischen Daten abgeleitet, sodass das Fahrzeug weiterhin eine valide Route verfolgt. Damit bleibt der VTN für etwaiges sukzessives Routing verfügbar, um nach dem Grundgedanken des Konzepts vergangene und zukünftige Messungen zu verknüpfen.
Wenn die aktuelle Nachfrage eines bestimmten Sensors nicht durch die Zuweisung im Netz verfügbarer Fahrzeuge befriedigt werden konnte, ist der zweite Teil der Ungleichheitsbedingungen in Problem (4-1) nicht mit Gleichheit erfüllt. Zur allgemeinen Konsistenz der Verkehrszahlen müssen zusätzliche Fahrzeuge in der Simulation initialisiert werden. Da abhängig von den Messungen auch die Fahrzeugklasse verfügbar ist, werden entsprechende Fahrzeuge an den jeweiligen Sensorpositionen in das System eingefügt. Diese Neuinitialisierungen entsprechen einfahrenden Fahrzeugen aus unbeobachteten Seitenstraßen bzw. von außerhalb der Systemgrenzen oder korrigieren z. B. zuvor fehlerhafte Prognosen.

[42] Es werden lediglich die $n_{S,k}$ Messstellen beachtet, die durch mindestens ein Fahrzeug des hier betrachteten Falls erreichbar sind und zum Zeitpunkt k mindestens eine durch das deterministische Routing nicht erfüllte Messung vorweisen.

Induktionsschleifen-Routing

Das Induktionsschleifen-Routing ist als sekundäre Ebene aus mehreren Gründen ein entscheidender Teil des Gesamtkonzepts dieser Verkehrsrekonstruktion. Die Positionierung in Kreuzungsnähe ermöglicht ein genaues Nachbilden der realen Überfahrten, sodass der Verkehr in Umgebung der entsprechenden LSA modelliert werden kann. Gerade die Lage an Haltlinien ist für die Auslegung und den Betrieb von LSA-Regelungen besonders wichtig, da in Verbindung mit der Messung auf Wartezeiten der VTN geschlossen werden kann. Zur Verdeutlichung einer Kreuzungssituation dient Abbildung 4-2, die als Ausschnitt eine Fahrtrichtung der Schlosskreuzung des PPS skizziert. In der Grafik werden die *Haltlinien-* von den *Bemessungsinduktionsschleifen* unterschieden. Bemessungsinduktionsschleifen werden in einigem Abstand zur Haltlinie, in diesem Beispiel 50 m, bspw. zur Rückstauabschätzung eingesetzt. Der Vorteil der Haltlinienschleifen dieser dargestellten Situation ist, dass sie separat pro Fahrspur angeordnet sind. Damit liefern sie einerseits Informationen über weitere Fahrtrichtungen und geben andererseits an dieser Stelle sogar Teilauskunft über den Fahrzeugtyp aufgrund der Spurrestriktionen (in rot hervorgehoben). Zudem ist die Verbreitung und Abdeckung derartiger Sensorik hoch, sodass ein zu beobachtendes Verkehrssystem nicht zwingend eine mit Mehraufwand verbundene Aufrüstung benötigt, damit die Zustandsschätzung angewendet werden kann.

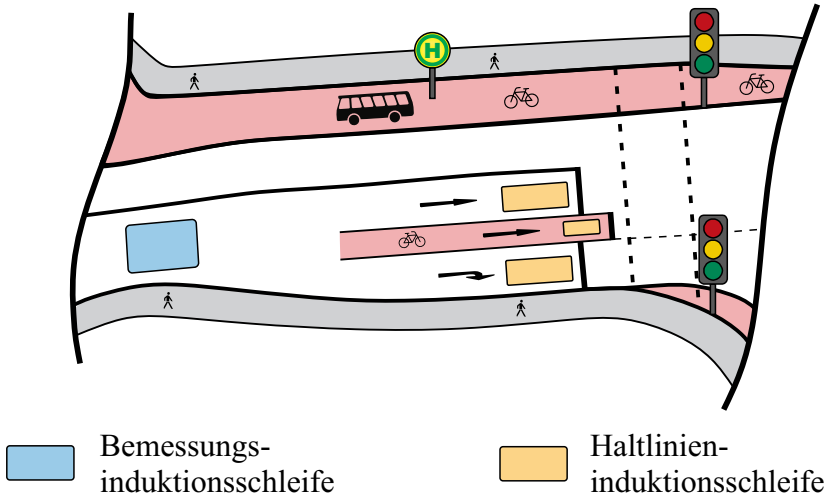


Abbildung 4-2: *Skizze zur Unterscheidung von Induktionsschleifen in Kreuzungsnähe*

Das Prinzip des Routings hat gewisse Ähnlichkeiten zum TOPO.box-Routing, da einige Elemente in abgewandelter Form angepasst an die vorhandene Datenqualität der binären Überfahrtinformation genutzt werden. Neben der Graphrepräsentation werden erneut die geschätzten Reisezeiten der Straßenabschnitte zu den Detektoren aus der Initialisierung verwendet, um so individuelle *Einzugsgebiete* für Fahrzeuge bzgl. der Induktionsschleifen zu definieren. Die Begrenzung der Gebiete erfolgt dabei zum einen durch den definierten

Grenzwert $t_{t,\text{th}}$ der Reisezeit und zum anderen durch die Positionen vorgelagerter Sensoren $\mathcal{S}_S$[43]. Formal definiert sich die Menge der Fahrzeuge im Einzugsgebiet der Schleife S als

$$E_S = \{i \in V \mid t_{t,i,S} \leq t_{t,\text{th}}\} \cap \left\{i \in V \mid \mathcal{N}_{r_{i,S}} \cap \mathcal{S}_S = \varnothing\right\} \tag{4-2}$$

mit $\mathcal{N}_{r_{i,S}}$ als Menge der Knoten, die bei der kürzesten Route $r_{i,S}$ des Fahrzeugs i zu Schleife S passiert werden. Auf diese Weise wird die Konsistenz der Messungen gewahrt, indem Einzugsgebiete nicht über vorgelagerte Messstellen hinausgehen. Es können also keine Sensoren fälschlicherweise übersprungen werden. Das Einzugsgebiet für die Haltlinienschleifen aus der vorherigen Abbildung 4-2 ist in der nachfolgenden Abbildung 4-3 grün markiert. Zusätzlich ist eine beispielhafte Belegung der Induktionsschleifen hervorgerufen durch die binären Überfahrtinformationen zusammen mit einem Fahrzeugaufkommen von drei VTN angedeutet.

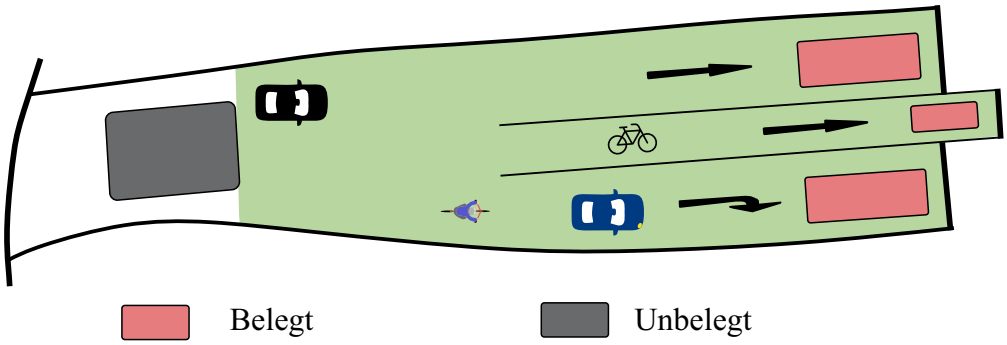


Abbildung 4-3: *Exemplarisches Einzugsgebiet für Haltinienschleifen mit Belegungsindikation im Induktionsschleifen-Routing*

Durch die parallele Anordnung der Schleifen an den Haltlinien besitzen alle das gleiche Einzugsgebiet. Ob alle dieser VTN auch für das Routing in Frage kommen, hängt von weiteren Fallunterscheidungen bzgl. des Fahrzeugtyps und dessen Routingstatus ab. Angenommen der blaue PKW befindet sich derzeit im TOPO.box-Routing und die anderen beiden VTN sind frei routingfähig, also in $V_{\mathbb{P}}$. Dann resultiert eine eindeutige Zuweisung durch das Induktionsschleifenrouting. Die derzeitige Route des blauen PKW darf nicht geändert werden, sodass dieses Fahrzeug zur Erfüllung der Detektion der obersten Schleife nicht infrage kommt. Ebenso ist es nicht erlaubt, die PKW über die mittlere Schleife zu routen, da der Fahrzeugtyp nicht mit der Fahrspurzulassung übereinstimmt. Derartige Einschränkungen reduzieren die routingfähigen Fahrzeuge im Einzugsgebiet zu $\tilde{E}_S \subseteq E_S$. Als ausschlaggebendes Kriterium für die Auswahl eines VTN $i^* \in \tilde{E}_s$ zur Belegungserfüllung wird die minimale Reisezeit zum entsprechenden Sensor über

$$i^* = \arg\min_{i \in \tilde{E}_S} \{t_{t,i,S}\}$$

[43] Die Menge $\mathcal{S}_S$ schließt sowohl die Induktionsschleifen als auch die typsensitiven Sensoren ein.

genutzt. Im gezeigten Beispiel würde die Position des blauen PKW dementsprechend auf die untere Schleife angepasst werden, das Fahrrad würde zur mittleren und der schwarze PKW zur oberen Schleife geroutet werden. Falls die vorherigen Routen nicht mit diesen neu bestimmten Zielen übereinstimmen (wie z. B. beim Fahrrad), werden zusätzlich neue stochastische Anschlussrouten festgelegt. Bei fehlenden Fahrzeugen im Einzugsgebiet wäre erneut eine Fahrzeuginitialisierung notwendig, wobei der wahrscheinlichste zulässige Fahrzeugtyp der Spur dafür ausgewählt wird.
Generell ist diese Ebene des DTA-Konzepts für die genaue Rekonstruktion des Verkehrszustands in unmittelbarer Nähe der LSA essentiell, da vor allem die Wartezeitberechnung abhängig von den entsprechenden Haltevorgängen ist. Etwaige Warteschlangen können durch die Kombination des Routings mit den aktuellen LSA-Signalen detailliert reproduziert werden, was wiederum eine gezielte Reaktion durch die LSA-Regelung ermöglicht. Außerdem führt die hohe Netzabdeckung der Induktionsschleifen dazu, dass der Einfluss unbeobachtbarer Straßenabschnitte frühzeitiger einbezogen werden kann und damit geringere Schätzungsabweichungen resultieren.

ÖPNV-Routing

Als letzte Routingebene wurde das ÖPNV-Routing entwickelt. Es beschränkt sich auf bestimmte ÖPNV-Fahrzeuge, die über eine gesonderte V2X-Kommunikation zur Übertragung spezifischer Informationen verfügen. Demnach werden, wie in Abschnitt 2.2.2 und mit Abbildung 2-13 angedeutet, definierte Telegramme ausgetauscht, sodass den Fahrzeugen auf Basis der Daten Routen zugeordnet werden. Die Sendungsauslöser der (E/W/A)-Signale sind an festgelegten Positionen im Verkehrsnetz verortet. Daher kann eine Signalübertragung als Messung aufgefasst werden, weshalb sich eine ähnliche Art von Einzugsgebieten wie in Gleichung (4-2) für sich in der Nähe befindliche ÖPNV-Fahrzeugtypen definieren lässt. Die Fallunterscheidung des Routings ist ebenso verwandt und orientiert sich an den erlaubten Interaktionen aus Tabelle 4-1. Ein Sonderfall ist die Signalfortsetzung, also wenn bspw. eine Erstanmeldung durch die zugehörige Weiterleitung bestätigt wird. Die Position dieses Fahrzeugs wird angepasst, aber die Route bleibt unangetastet. Auf diese Weise wird die genaue Position im Netz adjustiert. Dieser Eingriff ist nur bei Signalkompatibiltät zugelassen, sodass bei anderer Routeninformation ein weiteres ÖPNV-Fahrzeug in die Simulation integriert wird.
Im Vergleich zu den anderen beiden Routingebenen agiert das ÖPNV-Routing aufgrund der geringeren Vorkommensdichte an ausgerüsteten Fahrzeugen mit der notwendigen Technik relativ selten. Dennoch kann die genaue Schätzung der Fahrzeugzustände einen enormen Nutzen für das Gesamtkonzept dieser Zustandsrekonstruktion haben. Einerseits beeinflussen bspw. Busse aufgrund ihrer charakteristischen Fahrdynamik den Verkehr

erheblich, sodass über deren gezielte Integration die Heterogenität des Verkehrs besser abgebildet wird. Andererseits kann durch die genauere Kenntnis von Position und Fahrzeugroute innerhalb der Regelung dediziert auf diese Fahrzeugklasse reagiert werden. Vor dem Hintergrund, dass gegenwärtig aufgrund der starren (und oftmals totalen) ÖPNV-Priorisierung zumeist sehr disruptiv in die Schaltlogiken eingegriffen wird, besteht hier ein großes Verbesserungspotential. Ein weiterer Aspekt wird im Zusammenhang mit der Beurteilung der Zustandsschätzung deutlich, was im nächsten Abschnitt thematisiert wird. Dank der genauen Kenntnis der jeweiligen Routen und zwischenzeitlich auch der Positionen, können die Fahrzeuge als eine Art *Testfahrzeuge* (im Englischen *Probe Vehicles*) angesehen werden und so bei möglichen Auswertungen von Kriterien wie Reisezeiten unterstützen.

4.2.2 Kalibrierung und Validierung der Verkehrsrekonstruktion

Beim Aufbau der Verkehrssimulation wurden u. a. die Netzgeometrien sowie die infrastrukturellen Rahmenbedingungen nachgebildet (wird detaillierter in Kapitel 6 behandelt). Ein Beispiel sind die zulässigen Geschwindigkeiten des Verkehrssystems. Zur Kalibrierung dienen simulierte Einzelfahrttrajektorien, die mit aufgezeichneten Messdaten abgeglichen und auf Plausibilität geprüft werden, um eine hohe Übereinstimmung mit der Realität herzustellen. Vorhandene Stellschrauben der erstellten Verkehrssimulation wie Fahrzeugdynamiken oder Verkehrsnetzparameter ermöglichen anschließend im Zuge der *Verkehrsrekonstruktionsvalidierung* die iterative Feinabstimmung des Konzepts.
Aufgrund der begrenzten verfügbaren Daten stellt der allgemeine Realitätsvergleich die größte Herausforderung bei der Validierung von DTA-Konzepten dar. Abhängig von der Sensorabdeckung und deren Ausprägungen kann lediglich an ausgewählten Orten des Verkehrsgebiets die Übereinstimmung definierter Kriterien anhand der Messungen geprüft werden. Vor allem wenn jedoch die Verkehrszustandsrekonstruktion als Gesamtes oder an beliebigen Stellen im Netz bewertet werden soll, können nur bedingt Aussagen über die Qualität des approximierten Verkehrszustandes getroffen werden. Daher wird in [MLM+21b] eine Möglichkeit beschrieben, die Validierung teilweise von der Datenerfassung zu trennen, indem ein weiteres Simulationsmodell als *Ground Truth (GT)* für die Zustandsschätzung dient. In Anlehnung an [Av13] wird daher nicht der *Absolute Ground Truth (AGT)* zur Validierung genutzt, sondern stattdessen mit dem weiteren Simulationsmodell eine *Ground Truth Referenz (GTR)* verwendet. Die auf dieser Unterscheidung basierenden Validierungskonzepte sind in dem Strukturbild von Abbildung 4-4 dargestellt. Grundsätzlich kann eine derartige Nutzung einer GTR für beliebige Systeme hilfreich sein, deren AGT nur bedingt zur Verfügung steht. Im gezeigten Strukturbild ist der spezielle Fall der entwickelten Verkehrsrekonstruktion abgebildet.

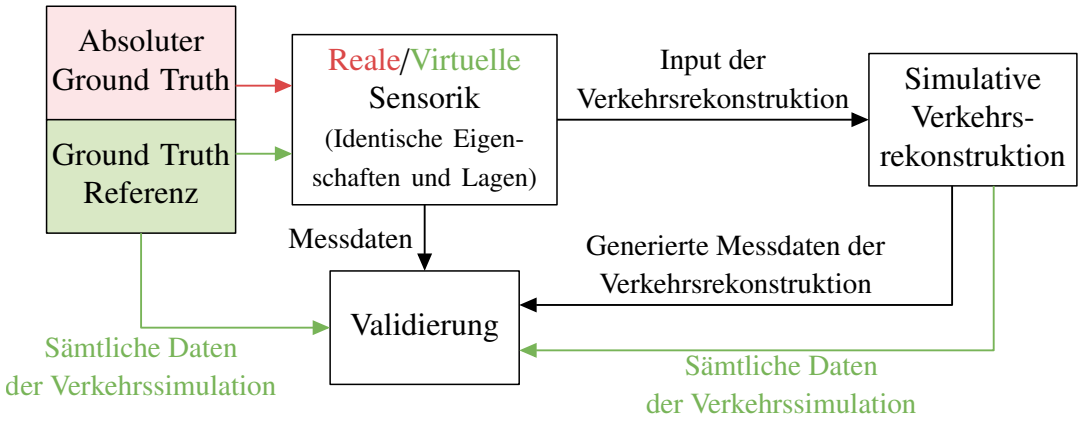


Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der Validierungskonzepte auf Basis des AGT gegenüber einer GTR

Bei dieser Methodik ist es wichtig zu beachten, dass in den parallelen Konzepten als Grundlage die gleichen Eingangsdaten verwendet werden. Die anstelle der realen Sensoren genutzten virtuellen Messungen müssen daher an der gleichen Position im Verkehrsnetz und mit der gleichen Qualität Daten erheben. Das Ziel der GTR-Validierung ist wie bei der AGT-Validierung die Feststellung der Güte der Verkehrsrekonstruktion und nicht etwa die Untersuchung der Leistungsfähigkeit bei besserer Datenverfügbarkeit. Dementsprechend muss die Entwicklung nicht angepasst werden, sodass der einzige Unterschied in der Anwendung darin besteht, dass beim Vergleich des Ground Truth zusätzliche Kriterien bewertet werden können. Der große Vorteil ist, dass der GTR-Zustand jederzeit und überall im Netz bekannt ist und mit der entwickelten Schätzung verglichen werden kann. In [MLM+21b] sind bereits einige Auswertungen zur Validierung der entwickelten Schätzung gegeben, weshalb an dieser Stelle lediglich Beispieldarstellungen folgen. Die nächsten beiden Grafiken beziehen sich daher auf ein Beispielszenario des anschließenden Kapitels. Einerseits soll die geschätzte Auslastung im gesamten betrachteten Verkehrssystem mit derjenigen der GTR übereinstimmen, weshalb die jeweiligen Fahrzeuganzahlen des Gesamtsystems in Abbildung 4-5 gegenübergestellt sind[44]. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Auslastung und vorhandene Abweichungen werden stets innerhalb kürzester Zeit korrigiert. Neben der vergleichbaren Gesamtbelegung ist ebenso eine grundsätzliche Übereinstimmung bzgl. der Typenverteilung beobachtbar. Die jeweilige PKW-Belastung ist durch die gestrichelten Linien ohne Füllung im gleichen Diagramm dargestellt.

Andererseits stellen sich für den speziellen Anwendungsfall der LSA-Regelung u. a. die Belegungen der Fahrspuren in direkter LSA-Umgebung als besonders entscheidend heraus, sodass Abbildung 4-6 die spezifischen Belegungen einer einzelnen Fahrspur von GTR und Schätzung aufgezeigt. Exemplarisch wurde die zur Fahrtrichtung 2 zugehörige

[44] Für die Übersichtlichkeit sind die Werte über einen gleitenden Horizont leicht geglättet.

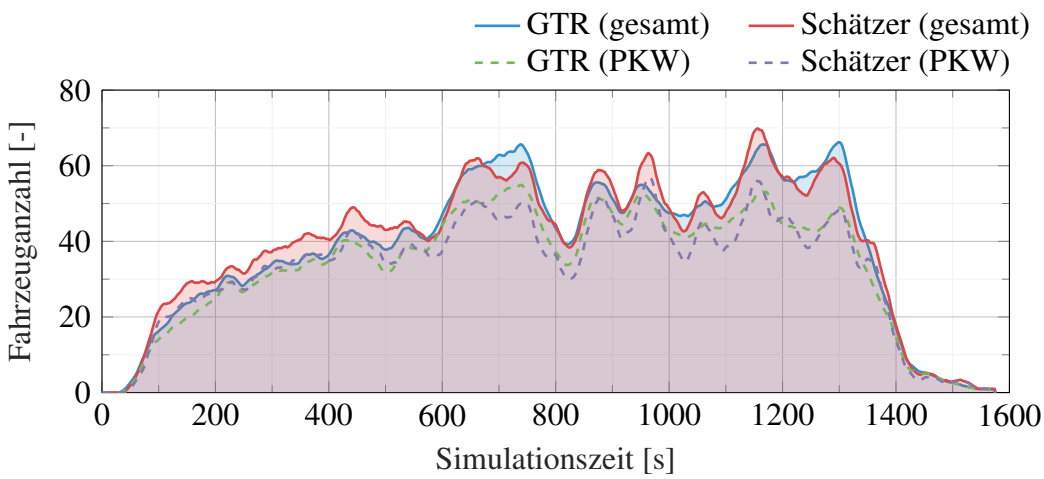


Abbildung 4-5: *Exemplarischer Vergleich der Fahrzeuganzahlen im Gesamtsystem zwischen GTR und Schätzung*

Fahrspur der Schlosskreuzung (siehe Abbildung A2-1: Bereich von Induktionsschleife *D2* zu *D2G*) ausgewählt. Zur besseren Vergleichbarkeit wird lediglich ein kürzerer Ausschnitt des gesamten Testintervalls dargestellt. Das Diagramm zeigt noch deutlicher als beim Gesamtsystem aus Abbildung 4-5, dass die beiden Verkehrszustände auf der betrachteten Spur gut übereinstimmen. Mit Ausnahme von kurzen Zeitabschnitten gleichen sich die Fahrzeuganzahlen größtenteils, was als Grundlage für die fahrzeugtypspezifische LSA-Regelung notwendig ist.

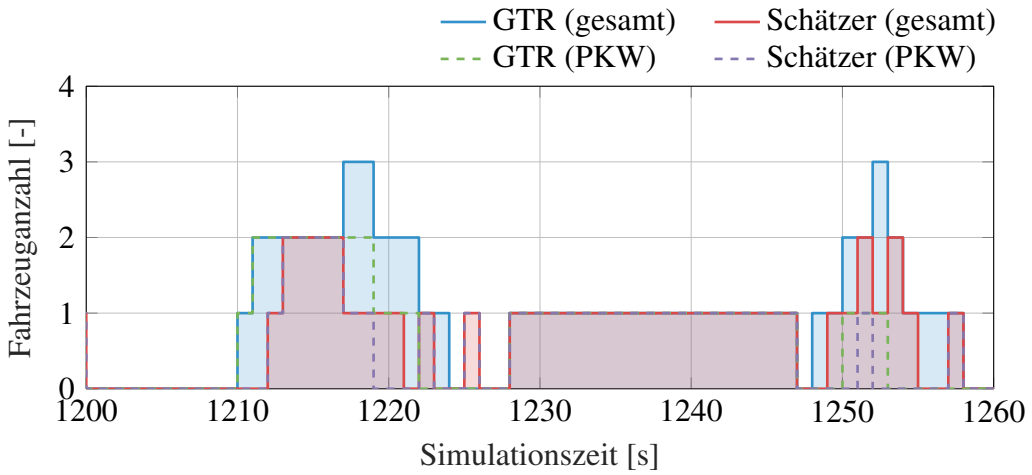


Abbildung 4-6: *Spezifische Fahrspurbelegungen von GTR und Schätzung einer ausgewählten Fahrspur in LSA-Umgebung*

Eine zusätzliche Darstellung der auftretenden Abweichungen ist im Anhang in Abbildung A3-1 aufgeführt.

4.3 Mehrstufiges modellprädiktives LSA-Regelungskonzept

Das Herzstück dieser Dissertation bildet die an die Verkehrsrekonstruktion angepasste LSA-Regelung. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit befindet sich das entwickelte mehrstufige modellprädiktive Konzept im Patentierungsverfahren [MLGT21] und viele der wichtigsten Aspekte sind bereits im Buchkapitel [MLB+22] veröffentlicht. Dementsprechend soll dieser Abschnitt vorhandene Lücken füllen, ohne dabei alle Eigenschaften zu wiederholen.
Die Zielsetzung der LSA-Regelung ist es, vorausschauend auf komplexe Verkehrssituationen multifaktoriell und fahrzeugtypspezifisch zu reagieren. Dazu ermittelt die Regelung in Echtzeit und anhand definierbarer Kriterien die bestmöglichen Folgephasen und Schaltzeiten der betreffenden LSA des Verkehrssystems. Durch Berücksichtigung der Umsetzbarkeit als wesentliches Entwicklungsmerkmal konnte diese LSA-Regelung implementiert und zunächst simulativ sowie anschließend in der Realität getestet werden, was Gegenstand der nachfolgenden beiden Kapitel ist. Als Basis wird daher in diesem Abschnitt die Idee und der grundlegende Aufbau der Regelung erörtert. Anschließend wird auf die dabei eingesetzten Komponenten der Phasenvorauswahl, des verwendeten Prädiktionsmodells zur Verkehrsvorhersage und die Bewertung der prädizierten Verkehrszustände näher eingegangen.

4.3.1 Grundgedanke, Aufbau und Umsetzung der LSA-Regelung

Eine zentrale Frage, die sich bei der Bestimmung optimaler Phasenfolgen von phasenorientierten LSA-Regelung stellt, ist, welche der jeweils LSA-spezifisch möglichen Phasen Π als nächstes geschaltet werden soll. Sofern nicht nur der aktuelle Verkehrszustand sondern auch Prognosen dessen zukünftiger Entwicklung in dieser Überlegung Berücksichtigung finden sollen, können modellprädiktive Regelungsmethoden herangezogen werden. Im gezeigten MPC-Beispiel aus Abschnitt 3.1.2 wird die obige Frage dadurch beantwortet, dass die Phasenreihenfolge festgelegt ist und stattdessen lediglich der Schaltzeitpunkt des Phasenübergangs optimiert wird. Die hier vorgestellte LSA-Regelung widmet sich der Auswahl der besten Folgephasen genau wie der dazugehörigen optimalen Schaltzeitpunkte. Auf diese Weise ist nicht nur für einen Phasenübergang der Verkehrszustand für die zeitlich verschieden geplanten Phasenwechsel vorherzusagen und zu untersuchen. Stattdessen sind für sämtliche Folgephasen mögliche Kombinationen von Phasen und Umschaltzeitpunkten im Prädiktionshorizont t_p zu evaluieren. Da die reale Umsetzbarkeit ein wichtiges Entwicklungskriterium darstellt, muss folglich der Aufwand derartiger Berechnungen beachtet und nach Möglichkeit minimiert werden, um bspw. Echtzeit-

bedingungen vorgegeben durch die realen LSA-Steuergeräte einzuhalten[45]. Daraus leitet sich der folgende mehrstufige Aufbau der LSA-Regelung in Abbildung 4-7 ab.

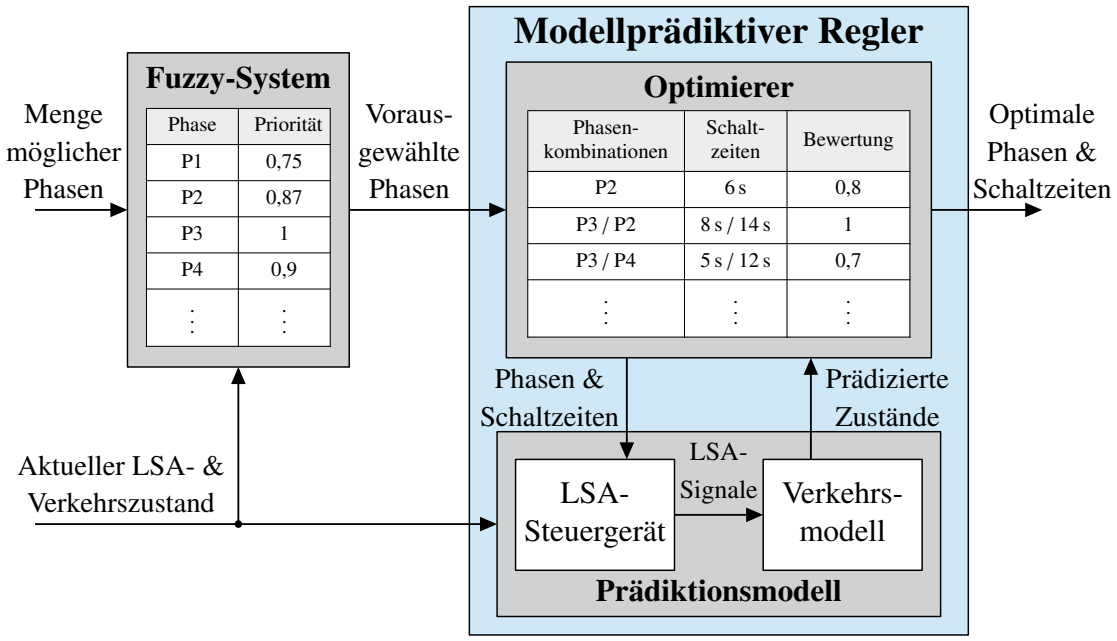


Abbildung 4-7: *Reglerstruktur der entwickelten mehrstufigen LSA-Regelung einer einzelnen LSA*

Der u. a. über die Verkehrsrekonstruktion ermittelte derzeitige Systemzustand dient üblicherweise als Zustandsrückführung und Ausgangssituation des Prädiktionsmodells. Zusätzlich wird er in diesem Konzept jedoch auch für einen *Fuzzy-Regler* zur Phasenvorauswahl verwendet. Diese Vorauswahl, die im folgenden Abschnitt mithilfe eines Beispiels genauer beschrieben wird, widmet sich dem zuvor genannten Problem der zahlreichen zu untersuchenden Kombinationen von Phasen und deren Schaltzeitpunkten. Auf diese Weise werden im *Modellprädiktiven Regler*, im weiteren Verlauf auch mit MPC bezeichnet, nicht sämtliche n_{Π} Phasen untersucht, sondern lediglich diejenigen, die vom Fuzzy-Regler als geeignet identifiziert wurden. Das Ergebnis des Fuzzy-Reglers ist, wie in der Tabelle angedeutet, eine zugewiesene Priorität jeder Phase, sodass eine definierte Anzahl an die anschließende MPC übergeben wird. Die MPC selbst setzt sich aus dem bereits genannten Prädiktionsmodell und einem Optimierer zusammen. Das im Anschluss an die Phasenvorauswahl in Abschnitt 4.3.3 erläuterte Prädiktionsmodell besteht grundsätzlich aus einer Repräsentation des LSA-Steuergerätes, welches die vorhandenen Richtlinien der LSA-Schaltvorgänge umsetzt, sowie einem entwickelten reduzierten Verkehrsmodell. Der Optimierer bestimmt und bewertet die Schaltzeitpunkte der ausgewählten Phasenkombinationen, indem das *nichtlineare Prädiktionsmodell* mit den jeweiligen Phasen und

[45] Die Taktung Δt der LSA-Steuergeräte im PPS beträgt eine Sekunde, in welcher die Zustandsrekonstruktion und die Berechnung der Steuersignale der LSA-Regelung durchgeführt werden müssen.

Schaltzeiten gespeist wird und die darauf basierenden prädizierten Zustände ausgewertet werden. Einzelheiten dazu werden ebenso im Abschnitt 4.3.3 aufgeführt. Abhängig von der Anzahl ermöglichter Schaltvorgänge n_{splits} innerhalb des Prädiktionshorizonts t_p werden dabei die Phasenkombinationen mitsamt den jeweils optimalen Schaltzeiten ermittelt und anhand der resultierenden Verkehrszustände gegenübergestellt. Eine exemplarische Bewertung ist in der rechten Tabelle innerhalb des Optimierers in Abbildung 4-7 für maximal zwei Phasenwechsel ($n_{\text{splits}} = 2$) dargestellt.
In dieser LSA-Regelung werden sowohl *optimale Folgephasen* als auch deren *Umschaltzeitpunkte* ermittelt, sodass sich ein besonderer zeitlicher Ablauf bzgl. der Applikation der berechneten Stellgrößen ergibt. Im Gegensatz zu nicht-prädiktiven Konzepten können auch verzögerte spätere Schaltwünsche berücksichtigt werden, sodass ohne vorhandenen Puffer oder Zeitschaltung im LSA-Steuergerät das Stellsignal nicht unmittelbar an die Stellglieder übertragen werden kann. Um das Prinzip zu verdeutlichen, sind drei aufeinanderfolgende MPC-Ausführungen im zeitlichen Abstand von T_{MPC} in dem nachfolgenden Diagramm der Abbildung 4-8 exemplarisch dargestellt.

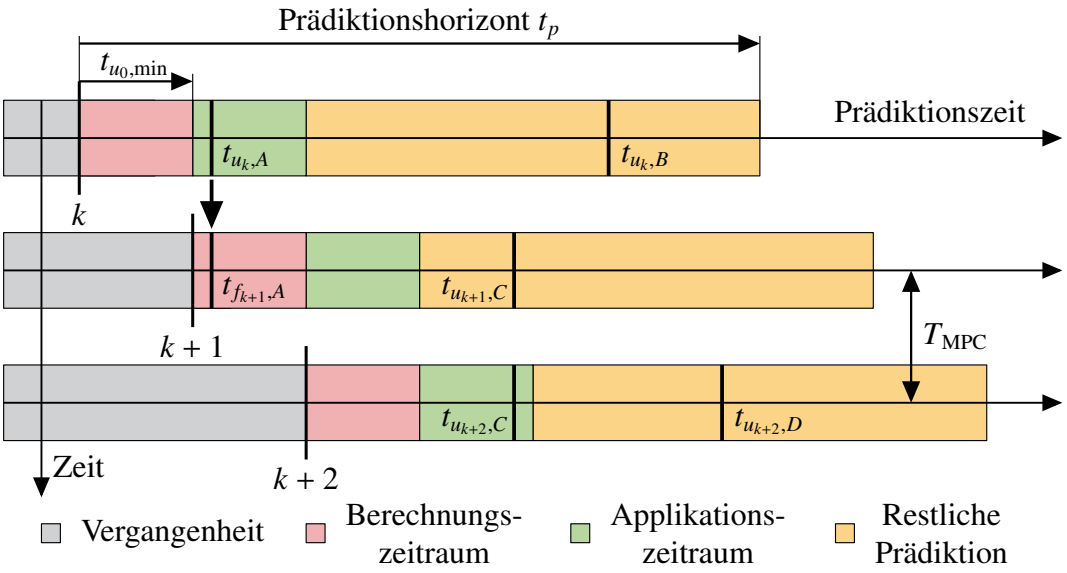


Abbildung 4-8: Beispielhafte Anwendungszeitleiste für maximal zwei Schaltvorgänge innerhalb der Prädiktion

In dem gezeigten Beispiel stimmt die Dauer des Berechnungszeitraums mit der des sog. Applikationszeitraums überein und beide Perioden zu Anfang des Prädiktionshorizonts sind in der Darstellung vom Rest des Vorhersagezeitraums farblich abgehoben. Neben der bereits genannten Berechnungsdauer des Gesamtregelungskonzepts müssen bei Realumsetzungen unvermeidliche Latenzen der Kommunikation ebenso in diesem Berechnungszeitraum (in rot) berücksichtigt werden. Vor Ablauf der Dauer $t_{u_k,\min}$ ist es nicht möglich, berechnete Schaltwünsche des Zeitschritts k umzusetzen. Erst im Anschluss

folgt der Applikationszeitraum (grün gekennzeichnet), in welchem die optimierten Stellgrößen $t_{u_k,P}$ für alle $P \in \Pi$ des folgenden Berechnungsschritts fixiert werden. In dem abgebildeten Beispiel ist dieser Vorgang bei Schritt k anhand der Phase A mit $t_{u_k,A} \rightarrow t_{f_{k+1},A}$ angedeutet. Ein Schaltzeitpunkt ist generell in diesem Zusammenhang als gewünschter Start des Phasenübergangs zu verstehen. Alle Phasenwünsche innerhalb des restlichen Prädiktionsbereichs können im Zuge weiterer MPC-Ausführungen modifiziert werden, sodass sich sowohl die ausgewählte Folgephase als auch deren Schaltzeitpunkt fortlaufend in Abhängigkeit des Verkehrsgeschehens ändern können. Diese Entwicklung ist im dargestellten Beispiel zum Zeitpunkt $k + 1$ angedeutet, indem anstelle der Phase B die neue Folgephase C zu einem früheren Zeitpunkt von der Regelung vorgeschlagen[46] und im nächsten Schritt auch fixiert wird. Als Gründe können neue Messdaten und folglich aktualisierte Verkehrssituationen mitsamt den darauf aufbauenden Prädiktionen herangezogen werden.

4.3.2 Fuzzy-Regler zur Phasenvorauswahl

Die Funktion der Phasenvorauswahl wurde bereits im Aufbau der Regelung erläutert und wird auch bei Betrachtung der Kombinatorik möglicher Folgephasen deutlich. Die Anzahl an Phasenkombinationen beträgt

$$\sum_{i=0}^{n_{\text{splits}}} (n_\Pi - 1)^i \,, \tag{4-3}$$

für welche jeweils t_p Prädiktionsschritte in jeder Optimierungsiteration[47] notwendig sind. Für das Zahlenbeispiel eines Prädiktionshorizonts t_p von 20 s und $n_{\text{splits}} = 2$ möglichen Umschaltvorgängen innerhalb der Vorhersage entspricht dies bei einer moderat komplexen Kreuzung mit $n_\Pi = 12$ Phasen (vgl. die Schlosskreuzung im Anhang A2) und konservativen sechs Optimierungsiterationen bereits über 15 000 Prädiktionsschritten.
Die verwendete Fuzzy-Regelung ist der des Stands der Technik aus Abschnitt 3.1.2 in den Ansätzen ähnlich. Anstatt jedoch über verschiedene Ebenen zunächst das Verkehrsaufkommen zu klassifizieren und im Anschluss die etwaige Phasenauswahl und Grünzeitverlängerung zu bestimmen, bewertet diese Vorauswahl der LSA-Regelung stets die Priorität aller Phasen. Als Ergebnis wird nicht nur eine Phase, sondern eine definierte Anzahl an Phasen $n_{\Pi,\text{Fuzzy}}$ ausgewählt und an die folgende MPC weitergegeben. Außerdem werden bei dieser Ermittlung der Phasenprioritäten $R_P, \forall P \in \Pi$, die vorhandenen Klasseninformationen ausgenutzt. Eingänge der Fuzzy-Regelung stellen dabei die spur-

[46] Wird als Vorschlag der Regelung bezeichnet, da sich $t_{u_k,B}$ und $t_{u_{k+1},C}$ mit $t_{u_k,B} > t_{u_{k+1},C}$ jeweils im Zeitbereich der restlichen Prädiktion befinden.

[47] Jede Iteration stellt die Simulation einer Schaltzeitkombination der jeweiligen Phasenkombination dar, wobei als Beispiel die Abfolgen $A \rightarrow B \equiv A \rightarrow A \rightarrow B \equiv A \rightarrow B \rightarrow B$ als äquivalent gelten.

spezisfischen Daten zur aktuellen Belegung x_{Fuzzy} und Wartezeit $t_{w,\text{Fuzzy}}$ in unmittelbarer LSA-Nähe sowie die Fußverkehrbelegung $x_{\text{Ped,Fuzzy}}$ und -wartezeit $t_{w,\text{Ped,Fuzzy}}$ aus der Verkehrszustandsrekonstruktion dar. Außerdem wird für jede Fahrtrichtung der Kreuzung der sog. Eingangsfluss $q_{\text{in,Fuzzy}}$ (im Englischen Inflow) definiert, der Informationen über kurzfristig eintreffende Fahrzeuge enthält. Der dabei relevante Zeitraum ist frei konfigurierbar und hier mit t_p auf die anschließende MPC abgestimmt. Mithilfe von je zwei Zugehörigkeitsfunktionen (in Abbildung 2-22 sind drei dargestellt) und deren festlegbaren Schwellen werden aus den Eingängen die Fuzzy-Mengen generiert. Als Literale dienen dabei „niedrig“ und „hoch“ für die fahrzeugspezifischen Eingänge der Belegung, der Wartezeiten und des Eingangsflusses. Analog werden die gleichen Literale für die Phasenprioritäten als Ausgang eingesetzt. Zur Begrenzung werden jeweils unterschiedliche Schwellenwerte verwendet. Bei der Belegung des Fußverkehrs wird dagegen lediglich eine boolsche Unterscheidung mit „leer“ und „belegt“ genutzt. Eine festlegbare Gewichtung der Fahrzeugklassen p_{Prio} integriert die Bevorrechtigung der unterschiedlichen VTN in diesen Prozess.

Aus den vorhandenen Phasenplänen der jeweiligen LSA werden für die Interferenz entsprechende Fuzzy-Regeln definiert. Die Grundlage der Regeln bilden die freigegeben Fahrzeugströme der einzelnen Phasen, sodass mithilfe der erstellten Regelbasis ähnlichen Phasen auch vergleichbare Prioritäten zugewiesen werden. Die Basis baut sich dabei aus unterschiedlich gewichteten Regeln auf, die sich sowohl positiv als auch negativ auf die Prioritätsbewertung auswirken. Exemplarisch soll die Phase 140 der namensgebenden Schlosskreuzung (vgl. Anhangskapitel A2) als Beispiel bzgl. der Regelerstellung dienen. Obwohl in dieser Phase mit Richtung 1 lediglich eine Fahrtrichtung freigegeben wird, werden generisch auf Basis der zugehörigen drei Fahrspuren insgesamt elf Regeln erstellt. Vergleichbar mit den Beispielen im Grundlagenabschnitt 2.4.2 lautet eine der zusammengesetzten Regeln in Kurzschreibweise

$$(x_{\text{Fuzzy},1} \models \text{hoch}) \vee (t_{w,\text{Fuzzy},1} \models \text{hoch}) \vee (q_{\text{in,Fuzzy},1} \models \text{hoch}) \Rightarrow (R_{140} \models \text{hoch})$$

und analog eine Einzelregel, die negativen Einfluss auf die Phasenpriorität hat,

$$(q_{\text{in,Fuzzy},1} \models \text{niedrig}) \Rightarrow (R_{140} \models \text{niedrig}).$$

Das Symbol $\models$ deutet an dieser Stelle die entsprechende Fuzzy-Zugehörigkeit an und der weitere Variablenindex verweist jeweils auf die korrespondierende Fahrspur. Nach Anwendung aller Regeln auf eine Eingabe und der Akkumulation einzelner Zugehörigkeiten folgt die Defuzzifizierung, welche in der folgenden Abbildung 4-9 für den Ausgang der Phasenpriorität R_{140} mit der verwendeten Schwerpunktmethode gezeigt ist. Es resultiert in

diesem Fall eine Phasenpriorität $R_{140} = 0{,}62$. Dieser Wert wird mit den errechneten Prioritäten aller anderen Phasen verglichen. Als Ergebnis der Vorauswahl werden zusätzlich zur aktuellen Phase die $n_{\Pi,\text{Fuzzy}}$ besten Phasen innerhalb der anschließenden MPC genauer untersucht.

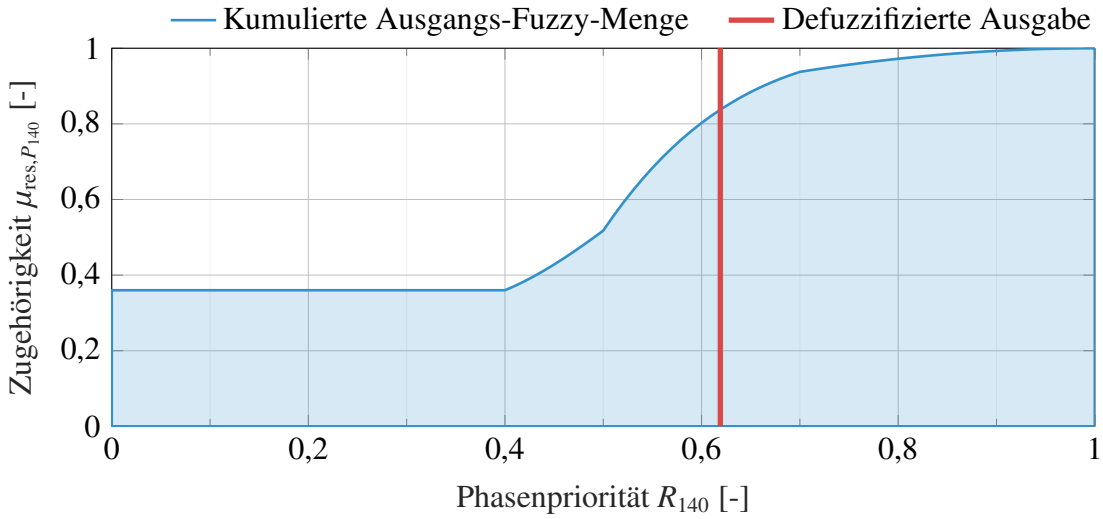


Abbildung 4-9: *Exemplarische Darstellung einer Defuzzifizierung des Ausgangs der Phasenpriorität* R_{140}

4.3.3 Modellprädiktive LSA-Regelung

Im Aufbau aus Abbildung 4-7 sind mit dem Optimierer und dem Prädiktionsmodell $\mathcal{P}$ die zwei Kernbestandteile der MPC bereits eingeführt worden, sodass in diesem Abschnitt deren Erläuterungen folgen. Dabei befinden sich die beiden Elemente in einer Wechselwirkung. Bei einer vorgegebenen Phasenkombination $u_k \in \Pi_{\text{Fuzzy}}^{n_{\text{splits}}}$ mit entsprechenden Schaltzeiten $t_{u_k} \in \mathbb{N}^{n_{\text{splits}}}$ des Optimierers führt das Vorhersagemodell eine Verkehrssimulation auf Grundlage des aktuellen Systemzustands s_k zu einem beliebigen Zeitschritt $k \in \mathbb{N}_0$ durch. Dieser Zustand, welcher mithilfe der Verkehrsrekonstruktion gewonnen wird, beinhaltet dabei u. a. Informationen über den aktuellen LSA-Zustand und die spezifischen Verkehrszusammensetzungen an der betrachteten LSA, worauf im folgenden Abschnitt detaillierter eingegangen wird. Die Prädiktionssimulation des k-ten Zeitschritts liefert die geschätzten zukünftigen Systemzustände als *Zustandsprognose*

$$\boldsymbol{s}_k = \begin{bmatrix} s_{k+1} \\ \vdots \\ s_{k+t_p} \end{bmatrix} = \mathcal{P}(s_k, u_k, t_{u_k})$$

für die Dauer des Prädiktionshorizonts t_p, die sich aus der Stellgrößenkombination (u_k, t_{u_k}) ergeben. In der Optimierung wird im Anschluss wiederum diese Zustandsprognose $\boldsymbol{s}_k$ verwendet, um die getesteten Steuersignale anhand der Zielfunktion $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{s}_k)$ zu bewerten und ggfs. weitere Stellgrößenkombinationen zu erproben.

Prädiktionsmodell

Das Prädiktionsmodell $\mathcal{P}$ dieser MPC beinhaltet einerseits eine Nachbildung des LSA-Steuergerätes (vgl. Abschnitt 2.2.1) und andererseits ein Verkehrsmodell. In jedem Simulationsschritt der Prädiktion wird sequentiell zunächst das interne Steuergerät propagiert und im Anschluss die resultierende Verkehrssituation vorhergesagt. Dabei sind in der Repräsentation des LSA-Steuergerätes durch Einblicke in die realen Umsetzungen [PPS22] und in Übereinstimmung mit [FGSV15a] alle wesentlichen Elemente berücksichtigt, um die zukünftigen Umschaltprozesse auf Signalebene bestmöglich nachzubilden. Die Notwendigkeit einer genauen Modellierung ist in den erheblichen Auswirkungen auf die Verkehrsentwicklung zu begründen und wird dennoch in der bisherigen Forschung mitunter vernachlässigt.
Bspw. ist bei [TVP10] im Applikationsprozess ein LSA-Steuergerät vorgesehen, aber in der Verkehrsmodellierung dagegen nicht. Im Gegensatz dazu sind in dieser Umsetzung alle relevanten Übergangszeiten wie bspw. Gelb- und Zwischenzeiten konfigurierbar und für die verschiedenen Signalarten implementiert. Dementsprechend werden die signalspezifischen Besonderheiten des Fußverkehrs über Fallunterscheidungen ebenso speziell behandelt wie die für Busse. Aufgrund der Ausführungshäufigkeit stellt die Effizienz dieser Logikumsetzung einen essentiellen Entwicklungsaspekt dar, weshalb verstärkt Bitoperationen eingesetzt wurden. Zur Verdeutlichung der Steuergerätlogik ist der generelle Ablauf in der Vorveröffentlichung [MLB+22] mit verschiedenen Fallunterscheidungen für einen Simulationsschritt dargestellt.
Analog zur Repräsentation des Steuergerätes beeinflusst der Effizienzgedanke auch die Verkehrsmodellierung der Prädiktion, sodass eine Detailliertheit wie bspw. in SUMO vorhandene Berechnungsressourcen (vgl. Abbildung 4-8) ausreizen bzw. überschreiten würde. Dementsprechend wurde eine eigene Modellierung entwickelt, die sich als Basis wie [TVP10] am makroskopischen Store-and-Forward-Prinzip aus [DG76] und den dort eingeführten Bezeichnungen in Kreuzungsnähe der Fahrzeugschlangen x und Flussraten q orientiert.
Um u. a. die oben bereits angedeuteten Aspekte des Steuergeräts in die Modellierung direkt zu integrieren, wird für jeden Zeitschritt k der aktuelle Zustand in Kreuzungsnähe anhand des komplexen Zustandsvektors s_k beschrieben. Dieser Zustandsvektor fasst alle

für die entwickelte LSA-Regelung wesentlichen Elemente des Knotenpunkts zusammen und enthält

$$s_k : \begin{cases} \textit{LSA-Einzelsignalzustände mit Historie}, \\ \textit{Spurbelegungen und -wartezeiten}, \\ \textit{Typsensitive Eingangsflüsse}, \\ \textit{Fußverkehrssituation der Kreuzung (Richtung, Anzahl und Wartezeit)}. \end{cases}$$

Diese qualitative Darstellung erspart die Einführung zusätzlicher Variablen, welche zum grundlegenden Verständnis des Konzepts nicht zwingend erforderlich sind und erlaubt gleichzeitig wichtige Aspekte über Teilkomponenten detailliert darzustellen.
Mit der Verkehrsrekonstruktion als Ausgangssituation wird das bekannte makroskopische Gerüst der MPC aus Abschnitt 3.1.2 modifiziert und um weitere Elemente ergänzt. Abhängig von der Kreuzungsgeometrie werden dabei einzelne Zustandsspuren begrenzter Länge anstelle der Verbindungen modelliert, deren Belegungen um die Dimensionen der Fahrzeugklassen erweitert werden. Der zu erwartende *Eingangsfluss* $q_{\text{in},l,k}$ bleibt jedoch basierend auf der Verkehrsrekonstruktion fahrzeugspezifisch, um den Übergang in die *Zustandsspuren* $l \in \mathcal{L}$ zeitlich besser einordnen zu können. Dies wird über die prognostizierten Reisezeiten zu den Zustandsspuren realisiert. Es geht ein mesoskopisches Modell hervor, welches in der folgenden Abbildung 4-10 skizziert ist.

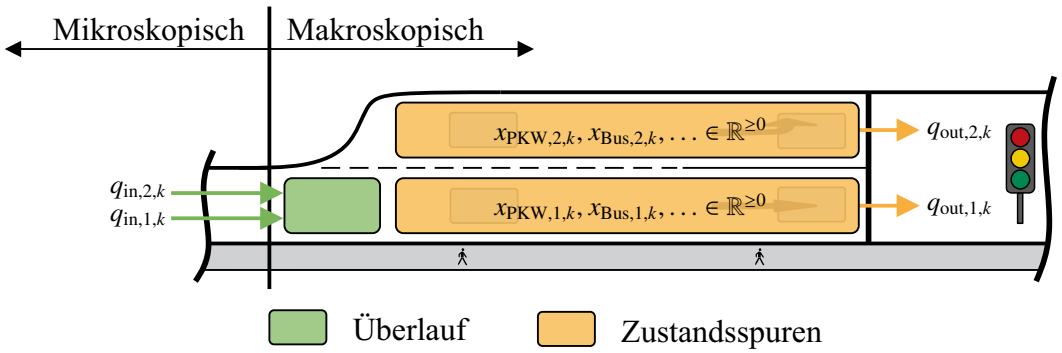


Abbildung 4-10: *Verwendete mesoskopische Kreuzungsmodellierung des Prädiktionsmodells zum Zeitpunkt k*

Die Variable $x_{\text{PKW},2,k}$ beschreibt dabei bspw. die makroskopische PKW-Belegung innerhalb der Fahrzeugschlange der zweiten Zustandsspur ($l = 2$) und kann über die Funktion $\boldsymbol{x}_{\text{PKW},2}$ mit $\boldsymbol{x}_{\text{PKW},2}(s_k) = x_{\text{PKW},2,k}$ aus dem Gesamtzustand s_k extrahiert werden. Dank dieser Modellierungsart kann zum einen eine spurbezogene Kapazität c_l gemeinsam für alle Fahrzeugklassen einer Spur l definiert und zum anderen weitere typspezifische Charakteristika wie Beschleunigungsverhalten u. a. in der Abflussdynamik realisiert werden, ohne auf eine mikroskopische Modellierung zurückgreifen zu müssen. Der in der obigen Abbildung 4-10 grün markierte Bereich des Überlaufs ist dabei im Gegensatz zu den Zu-

standsspuren bzgl. der Größe nicht fixiert und stellt ein variables Erweiterungskonstrukt ebenjener Zustandsspuren bei Auslastung der Kapazität dar. Fahrzeuge, die räumlich hinter den Zustandsspuren aufgrund der Verkehrssituation zum Stehen kommen, nehmen so Einfluss auf den Belegungszustand und ermöglichen eine Verlängerung der Warteschlangen.
Der zusammengefasste Folgebelegungszustand aller Fahrzeuge einer Fahrspur kann vektoriell über die klassische Erhaltungsgleichung

$$x_{l,k+1} = x_{l,k} + q_{\text{in},l,k} - q_{\text{out},l,k}$$

berechnet werden. In dieser Vorschrift wird der Abfluss $q_{\text{out},l,k}$ u. a. abhängig von der Belegungszusammensetzung anhand von $\boldsymbol{m}(x_{l,k})$ bemessen, sodass bspw. LKW aufgrund ihres Beschleunigungsvermögens eine geringere Abflussrate als PKW bewirken (für Details siehe [MLB+22]). Die gesamte *Abflussdynamik* des Prädiktionsmodells wird dann über den Zusammenhang

$$q_{\text{out},l,k} = \boldsymbol{m}(x_{l,k}) \cdot \boldsymbol{r}_l(s_k) \cdot \min(q_{\text{out,max},l}, \varphi_l \cdot \boldsymbol{d}_{l,k}(x_{l,k})\mathbb{1})$$

modelliert, indem der Abfluss zusätzlich mithilfe des zustandsabhängigen Faktors $\boldsymbol{r}_l(s_k)$ geregelt und anhand $q_{\text{out},l,\text{max}}$ beschränkt wird. Wie eine Verzögerung sichert die Funktion $\boldsymbol{d}_{l,k}$, dass einfahrende Fahrzeuge unmittelbar den Belegungszustand $x_{l,k}$, aber nicht den Abfluss $q_{\text{out},l,k}$ beeinflussen. An dieser Stelle unterscheidet sich der verwendete Belegungszustand der Spuren also deutlich von der einfachen Zustandsdefinition der Warteschlangen aus [DG76]. Der Proportionalitätsfaktor φ_l skaliert dabei zusätzlich diesen „abflussrelevanten“ Anteil für den momentanen diskreten Zeitabschnitt. Zur weiteren Veranschaulichung der Abflussrestriktionen $\boldsymbol{r}_l(s_k)$ dient die folgende Abbildung 4-11.

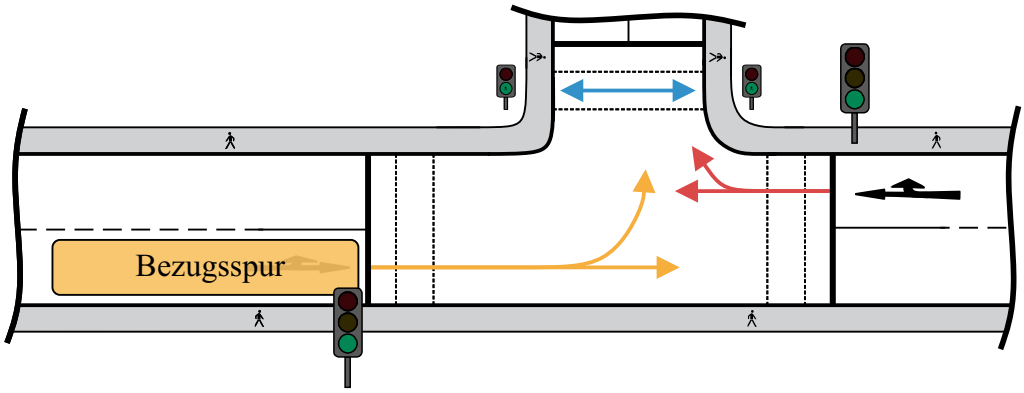


Abbildung 4-11: Fahrzeugstrominterferenzen des Prädiktionsmodells

Als wichtigste Beeinflussung ist die Signalgebung der betreffenden LSA zu nennen, welche über die Regelung direkt beeinflusst werden. Die resultierenden Lichtsignale werden

dabei über eine interne Repräsentation des Steuergerätes abhängig von der Phasenvorgabe und den vorliegenden Signalzuständen bestimmt. Demzufolge werden sämtliche Phasenübergange u. a. anhand von parametrierten Zwischenzeiten und Gelbzeiten, wie in Abschnitt 2.2.1 zusammengefasst, detailliert berücksichtigt. Des Weiteren kann der betrachtete Verkehrsstrom in orange durch etwaigen Gegenverkehr (rot) oder Fußverkehr (blau) und infolgedessen auch durch sich selbst gehemmt werden. In [MLB+22] sind diese optionalen Bestandteile der Gesamtbeeinflussung $\boldsymbol{r}_l(s_k)$ formalisiert, indem die separaten Unterscheidungen der Einflüsse sowie deren Zusammenfassung beschrieben werden.
Weitere Komponenten des Verkehrszustands s_k wie Wartezeiten für Fahrzeuge und Fußverkehr werden auf Basis des LSA-Signals in Zusammenspiel mit den jeweils aktuellen Belegungen propagiert. Die Wartezeit $t_{w,\mathrm{Ped},l,k}$ des Fußverkehrs auf Spur l entwickelt sich daher bspw. über

$$t_{w,\mathrm{Ped},l,k+1} = \begin{cases} t_{w,\mathrm{Ped},l,k} + x_{\mathrm{Ped},l,k} \cdot \Delta t, & \text{Spur } l \text{ nicht freigegeben,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases}$$

Da innerhalb des Prädiktionsmodells Parametrierungen festzulegen sind, um das Modell an die simulierte Verkehrsentwicklung anzupassen, wurde in [Pol21] eine umfassende Sensitivitätsanalyse und Parameterstudie durchgeführt. Auf diese Weise konnte die grundsätzliche Übereinstimmung der verwendeten Verkehrssimulationen hergestellt sowie u. a. die wichtigsten Kennwerte und gleichzeitig Richtwerte für deren Festlegung ermittelt werden. Das Vorgehen ist ähnlich zu der bereits vorgestellten Ground Truth Validierung aus Abschnitt 4.2.2. Mithilfe der Definition

$$\zeta(k) := \frac{1}{t_p} \sum_{i=k+1}^{k+t_p} (x_{\mathrm{Ref},i} - x_i)^2$$

konnten Abweichungen des Prädiktionsmodells von der SUMO-Referenz quantifiziert und beurteilt werden. Als ein wichtiges Kriterium entspricht $\zeta(k)$ ausgehend von Zeitpunkt k den durchschnittlichen quadratischen Belegungsabweichungen eines Zeitschrittes aller Spuren und Fahrzeugklassen innerhalb des gesamten Prädiktionshorizonts t_p.

Optimierung und Gütefunktion

Die Reglerstruktur aus Abbildung 4-7 deutet die Ausgangslage der Optimierung bereits an, indem die $n_{\Pi,\mathrm{Fuzzy}}$ vorausgewählten Phasen des Fuzzy-Reglers der MPC als Eingang zur Verfügung gestellt werden. Ein besonders einflussreicher Parameter für die zweistu-

fige Optimierung ist dabei die Anzahl maximal[48] zu untersuchender Umschaltvorgänge n_{splits}. Für jede zu testende Phasenkombination $u_k \in \Pi_{\text{Fuzzy}}^{n_{\text{splits}}}$ wird das *ganzzahlige nichtlineare Optimierungsproblem* in der allgemeinen Form

$$\begin{aligned} &\min_{t_{u_k} \in \mathbb{N}^{n_{\text{splits}}}} \boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{\mathcal{P}}(s_k, u_k, t_{u_k})\right) \\ &\text{u. B. v.} \begin{cases} A \cdot t_{u_k} \leq b \\ t_{u,\min} \leq t_{u_k} \leq t_c \end{cases} \end{aligned} \tag{4-4}$$

aufgestellt. Dabei sichern die Ungleichungsbedingungen mittels

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \in \mathbb{Z}^{(n_{\text{splits}}-1)\times n_{\text{splits}}} \quad \text{und} \quad b = -\mathbb{1} \in \mathbb{Z}^{n_{\text{splits}}-1}$$

die Einhaltung der *Schaltvorgangsreihenfolge*. Die frühestmögliche Schaltzeit $t_{u,\min}$ ist u. a. von der Kommunikationsstruktur abhängig (genauer in Abschnitt 4.4) und die obere Grenze entspricht dem einstellbaren Stellhorizont t_c der MPC. Dementsprechend steigt mit Erhöhung von n_{splits} die Komplexität jedes einzelnen Optimierungsproblems selbst. Aufgrund der höheren Dimension der Optimierungsvariablen werden mehr Schaltzeitpunkte evaluiert und außerdem sind zusätzlich auch mehr Phasenkombinationen (vgl. Gleichung (4-3)) möglich, sodass die Anzahl zu lösender Optimierungsprobleme ebenso steigt. Die letztlich optimale Stellgrößenkombination ergibt sich als

$$(u_k^*, t_{u_k}^*) = \underset{(u_k, t_{u_k}^*) \in L_{\boldsymbol{J}}}{\arg\min} \boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{\mathcal{P}}\left(s_k, u_k, t_{u_k}^*\right)\right)$$

und demnach als bestes Tupel der Menge

$$L_{\boldsymbol{J}} \coloneqq \left\{(u_k, t_{u_k}^*) \in \Pi_{\text{Fuzzy}}^{n_{\text{splits}}} \times \mathbb{N}^{n_{\text{splits}}} |\ t_{u_k}^* \text{ löst Problem (4-4) für } u_k \in \Pi_{\text{Fuzzy}}^{n_{\text{splits}}}\right\}.$$

Im Fall von $n_{\text{splits}} = 1$ gilt bspw. $|L_{\boldsymbol{J}}| = 1 + n_{\Pi,\text{Fuzzy}}$, da neben der aktuellen Phase noch die vorausgewählten Folgephasen betrachtet werden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Optimierung ist die Definition der verwendeten Gütefunktion zur Beurteilung der prädizierten Verkehrszustände. Diese setzt sich aus den $n_K = 11$ Kriterien zusammen, die nachfolgend aufgelistet sind:

(*K1*) Fahrzeugklassengewichtete Spurbelegungen,

[48] Wie bereits bei der Phasenvorauswahl gelten die Abfolgen $A \rightarrow B \equiv A \rightarrow A \rightarrow B \equiv A \rightarrow B \rightarrow B$ als äquivalent.

(*K2*) Kumulierter Ausgangsfluss der Kreuzung,

(*K3*) Fahrzeugklassengewichtete Wartezeiten,

(*K4*) Fahrzeugklassengewichtete maximale Wartezeiten,

(*K5*) Spurbelegungen des Fußverkehrs,

(*K6*) Wartezeiten des Fußverkehrs,

(*K7*) Frühzeitiger Abwurf von Fußverkehrssignalen,

(*K8*) Anzahl an Phasenwechseln,

(*K9*) Anzahl freigegebener Signale innerhalb der gewählten Phasen,

(*K10*) Frühe Schaltzeitpunkte,

(*K11*) Bewertung aus vorangehender Optimierung.

Um die unterschiedlichen Wichtigkeiten der Kriterien umzusetzen und das Entwurfsziel einer ausgewogenen LSA-Regelung zu realisieren, werden die absoluten Einzelwerte der Kriterien über Referenzwerte zu $\boldsymbol{j}_i(\boldsymbol{s}_k)$ normiert[49] und anschließend anhand einer Priorisierung g_K gewichtet. Es resultiert daher die folgende Verknüpfung des Gesamtgütemaßes

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{s}_k) = \sum_{i=1}^{n_K} \boldsymbol{j}_i(\boldsymbol{s}_k) \cdot g_{K,i}. \tag{4-5}$$

Wegen der vermutlich fortschreitenden Abweichung der Prädiktionen mit jedem weiteren Zeitschritt vom tatsächlichen zukünftigen Systemverhalten wird für die verkehrsentwicklungssabhängigen[50] Kriterien zusätzlich eine Gewichtungsfunktion g_t verwendet, um den Einfluss späterer Simulationsschritte zu reduzieren. Am Beispiel der Spurbelegungen (Kriterium *K1*) verdeutlicht, werden die Simulationsergebnisse für jeden Zeitschritt über

$$\boldsymbol{j}_1(\boldsymbol{s}_k) = \left\| \sum_{i=1}^{t_p} \underbrace{(\boldsymbol{x}(s_{k+i}) \cdot p_{\text{Prio}})}_{\in\mathbb{R}} \cdot g_t(i) \right\|_{K_1} \tag{4-6}$$

individuell im gesamten Prädiktionshorizont t_p gewichtet. Eine derartige Gewichtung ist in Abbildung 4-12 beispielhaft skizziert.

Die einzelnen Bewertungsfunktionen der Kriterien wie $\boldsymbol{j}_1$ in Gleichung (4-6) sind dabei unterschiedlich aufgebaut. Zur Prävention großer Einzelwerte, wie bei fahrzeugklassengewichteten Wartezeiten (Kriterium *K3*) möglich, kommen daher bspw. auch Exponentialfunktionen zum Einsatz. Neben den dargestellten Eigenschaften des Optimierungspro-

[49] Die Normierung wird in Abhängigkeit des Kriteriums K mit $\|\cdot\|_K$ bezeichnet.

[50] Die Spurbelegungen sind direkt von der Verkehrsentwicklung abhängig, wohingegen bspw. die Anzahl freigegebener Signale durch die bekannten Stellgrößen festgelegt ist.

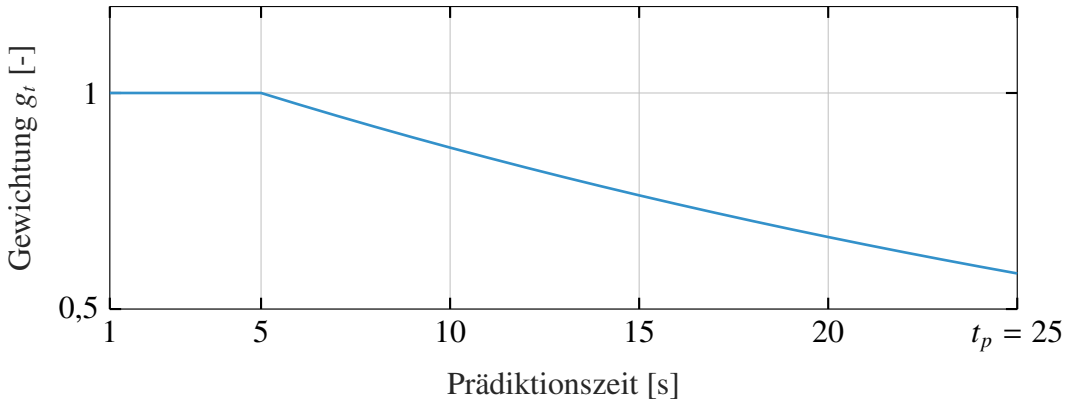


Abbildung 4-12: *Exemplarischer Gewichtungsverlauf von g_t im Prädiktionshorizont t_p*

blems ist es möglich, weitere Nebenbedingungen oder Komponenten zu integrieren. Aufgrund der Spurauflösung der Daten können bspw. bestimmte Hauptrichtungen besonders begünstigt werden, was vor allem im Hinblick auf zuvor bekannte Hochbelastungszonen eine Möglichkeit zur Einbringung von Expertenwissen darstellt. Zusätzliche Erweiterungen stellen die direkte Integration von etwaigen (behördlichen) Vorgaben und technischen Rahmenbedingungen des LSA-Steuergerätes dar. Darunter fallen Implementierungen wie maximale Wartezeiten für den Straßen- und Fußverkehr je Knotenpunkt oder die Berücksichtigung maximaler Sperrzeiten des LSA-Steuergeräts (siehe Abschnitt 6.1).
Als abschließendes Beispiel soll die Wirkung der Schranken des Fußverkehrs erläutert werden, da diese immensen Einfluss insbesondere auf die Simulationsergebnisse in Abschnitt 5.2.2 nehmen. Für die individuellen Knotenpunkte werden Schwellenwerte $t_{w,\mathrm{th,Ped}}$ definiert, sodass, sobald die Bedingung

$$t_{w,\mathrm{Ped,max}} = \max_{i \in \{1,\ldots,n_{\mathrm{Ped}}\}} \{t_{w,\mathrm{Ped},i}\} \geq t_{w,\mathrm{th,Ped}}$$

erfüllt ist, innerhalb der Folgephase zwangsläufig die zu $t_{w,\mathrm{Ped,max}}$ passende Furt zum nächstmöglichen Zeitpunkt freigegeben wird[51]. Umgesetzt bedeutet diese Maßnahme, dass sich sowohl die Anzahl zu lösender Optimierungsprobleme (4-4) als auch die Schaltzeit des ersten Umschaltvorgangs auf das Minimum $t_{u,\min}$ reduziert. Es werden daher lediglich Phasenkombinationen

$$\{u \in \Pi^{n_{\mathrm{splits}}} \mid u_1 \text{ gibt zu } t_{w,\mathrm{Ped,max}} \text{ passende Furt frei}\}$$

[51] Aus Übersichtsgründen wird auf den Index k des diskreten Zeitschritts verzichtet.

untersucht, wobei u_1 die erste zu schaltende Phase bezeichnet. Hinsichtlich der Schaltzeiten ist die Lösung also auf folgende Menge

$$\{t_u \in \mathbb{N}^{n_{\text{splits}}} \mid t_{u_1} = t_{u,\min}\}$$

beschränkt. Dementsprechend gewährleistet diese Art der Umsetzung einen Schaltvorgang zur Freigabe der „dringlichsten“ Fußverkehrsfurt zum nächstmöglichen Zeitpunkt bei gleichzeitig andauernder Berücksichtigung der restlichen Verkehrssituation.

4.4 Robustheitssteigernde Maßnahmen

Die wichtigste theoretische Maßnahme zur Steigerung der Robustheit dieses LSA-Regelungssystems ist der Einbezug von prognostizierten Latenzen. Das Wissen über voraussichtliche Totzeiten des Systems kann einerseits für die Verkehrsrekonstruktion und andererseits für die LSA-Regelung ausgenutzt werden. Die grundsätzlichen Ideen zur Robustheitssteigerung sind dabei direkt in das entwickelte Regelungssystem integriert.
In der Verkehrsrekonstruktion wird die abgeschätzte Verzögerung für die Synchronisation verschiedener Datenquellen verwendet. Mithilfe von Zeitstempeln der Datenpakete lassen sich die jeweiligen Totzeiten einordnen, sodass ein etwaiger Versatz kompensiert werden kann. Dabei wurde in [Buß21] gezeigt, dass die reine Verzögerung früher eintreffender Datenpakete auf eine einheitliche Zeitbasis die Regelgüte nicht verbessert. Der rekonstruierte Verkehrszustand liegt auf diese Weise zum Zeitpunkt der größten Latenz vor, weshalb die Regelung erst verspätet auf diesen reagieren kann. Der Nutzeffekt einer genaueren Verkehrsrekonstruktion wird durch diese zusätzliche Verzögerung abgeschwächt. Stattdessen wird die Straßennetzkenntnis bzw. die Zeitinvarianz der Netztopologie über einen vergleichbaren Ansatz zum deterministischen Routing ausgenutzt. Der Fahrtverlauf des detektierten VTN wird auf Basis der netzwerkinduzierten Totzeit auf einen prognostizierten Verlauf angepasst und die jeweilige Position im Verkehrsnetz modifiziert. Als Beispiel wird ein VTN mit einer Geschwindigkeit von $10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ und einer bekannten Latenz von 2 s um 20 m auf seiner Route verschoben. Dementsprechend wird die Verkehrsrekonstruktion derart verbessert, dass der geschätzte Verkehrszustand zum frühestmöglichen Zeitpunkt mit synchronisierten Sensordaten zur Verfügung steht und schließlich zu einer Steigerung der Regelgüte führt.
Bei der Komponente der MPC-basierten LSA-Regelung ist der Grundgedanke, die berechneten Stellsignale frühzeitig zur Umsetzung an die Stelleinheit zu übertragen, um die Totzeit zu kompensieren. Innerhalb der MPC werden dabei die unteren Grenzen des Op-

timierungsproblems an die totzeitbehaftete Situation angepasst. Es resultiert als untere Grenze der n_{splits} Schaltzeiten von Problem (4-4)

$$t_{u,\min} = 1 + \tau_{\text{sc}} + \tau_{\text{ca}} \leq \underbrace{t_{u_1}}_{\in\mathbb{N}} < \underbrace{t_{u_2}}_{\in\mathbb{N}} < \cdots \leq t_c \tag{4-7}$$

innerhalb des Stellhorizonts t_c. In der Prädiktionssimulation wird auf diese Weise der zeitliche Ablauf aus Abbildung 4-8 berücksichtigt, sodass bis auf zuvor fixierte Phasen keine erneute Phasenänderung in der Berechnungsphase umgesetzt werden kann. Damit das Datenpaket eines bestimmten Stellsignals zum Zeitpunkt $k + \tau_{\text{ca}}$ bei der Stelleinrichtung eintrifft, wird es vom Regelungssystem demnach zum Zeitpunkt k übertragen. Dieses Vorgehen wird anhand des vorgesehenen Puffers $\tau_{\text{sc}} + \tau_{\text{ca}}$ in Gleichung (4-7) ermöglicht. Als Folge kann der negative Einfluss der Stellsignalverzögerung reduziert werden [Buß21]. Theoretisch würde sich bei idealer Beobachtung und Verkehrsprognose analog zu Abschnitt 2.4.3 sogar eine vollständige Kompensation ergeben.
Zudem muss zur Gewährleistung der Funktionalität des MPC-Prinzips der Prädiktionshorizont t_p ebenso auf die vorliegende Latenzsituation angepasst werden. In [Buß21] wurde die Annahme eines notwendigen Minimalhorizonts bestätigt, sodass

$$t_p > t_{u,\min} + \max_{i,j\in S} \left\{ t_{Z,ij} \right\}$$

gewährleistet sein muss. Nur so kann innerhalb der Prädiktion auch die Reaktion auf den Schaltwunsch bewertet werden, da der Phasenwechsel ansonsten nicht vollständig vollzogen sein könnte. Nichtbeachtung kann ein dauerhaftes Verharren in der jeweils vorliegenden Phase hervorrufen. Als Konsequenz würde diese Situation ohne zusätzliche Rückfallebenen wie die Integration der maximalen Sperrzeiten zur Instabilität der Regelung führen.
Neben diesen theoretischen robustheitssteigernden Maßnahmen wurden für die praktische Feldumsetzung weitere implementiert, die genau auf die Rahmenbedingungen des PPS abgestimmt sind, weshalb sie gesondert in Kapitel 6 behandelt werden.

5 Implementierung und simulative Analyse des LSA-Regelungssystems

Nachdem im vorherigen Kapitel 4 das Prinzip des LSA-Regelungssystems beschrieben wurde, folgen in diesem Kapitel die Ausführungen zur simulativen Umsetzung des Konzepts am Beispiel des Verkehrssystems aus dem PPS. Dazu wird zunächst das genutzte Simulationsframework eingeführt, bevor die Verkehrsgenerierung der Testszenarien und die Integration von etwaig auftretenden Netzwerkstörungen erläutert werden. Das Kapitel schließt mit den Ergebnissen verschiedener Simulationsstudien, die sowohl perspektivisch unter Betrachtung von idealen als auch unter derzeit realitätsnahen Voraussetzungen gewonnen wurden. Anhand von Vergleichen mit der momentan umgesetzten LSA-Schaltung des Bestands wird dabei das große Potential der Entwicklung deutlich. Neben einer möglichen allumfassenden Verbesserung der Verkehrssituation können ebenso ausgewählte Regelungskriterien oder behördliche Vorgaben gezielt evaluiert werden.

5.1 Aufbau der Simulationsumgebung

Bereits im Handlungsbedarf wurde grundsätzlich der geschlossene Regelkreis für die Entwicklung des LSA-Regelungssystems eingeführt. Dieses bekannte Strukturbild aus Abbildung 3-6 wird in diesem Abschnitt zur Beschreibung der Simulationsumgebung um die Komponente der Netzwerkkommunikation erweitert und die jeweils verwendete Software zur Umsetzung gekennzeichnet. In der folgenden Abbildung 5-1 sind die entsprechenden Änderungen vorgenommen. Aus Übersichtsgründen sind die Signalflüsse vernachlässigt worden und entsprechen denen aus Abbildung 3-6 bzw. Abbildung 4-1 für den komprimiert dargestellten Teil des Verkehrsschätzers. Als grundlegende Programmiersprache und Entwicklungstool neben SUMO hat sich MATLAB für diese prototypische Umsetzung u. a. aufgrund der Benutzerfreundlichkeit sowie der Anbindbarkeit externer Programme und Schnittstellen wie das in Abschnitt 2.3.3 beschriebene Protokoll TraCI4Matlab angeboten. Dementsprechend ist mit dem Regelungsalgorithmus und der Informationsverarbeitung des Verkehrsschätzers die Kernentwicklung des Systems zur modellprädiktiven LSA-Regelung aus Kapitel 4 in MATLAB umgesetzt worden. Die ergänzte Netzwerkkommunikation wurde auf rein phänomenologischer Basis direkt in dieses System integriert und die generelle Ablaufsteuerung der Simulationen wird mithilfe von MATLAB koordiniert. Die detaillierten mikroskopischen Verkehrssimulationen des zu regelnden Verkehrssystems und der Verkehrsrekonstruktion werden dagegen domänenspezifisch mit SUMO realisiert. Die Testumgebung soll einerseits zur Analyse der entwickelten LSA-Regelung verwendet werden und andererseits einen Vergleich zur bisher umgesetzten LSA-Steuerung ermöglichen, weshalb die wichtige Komponente der

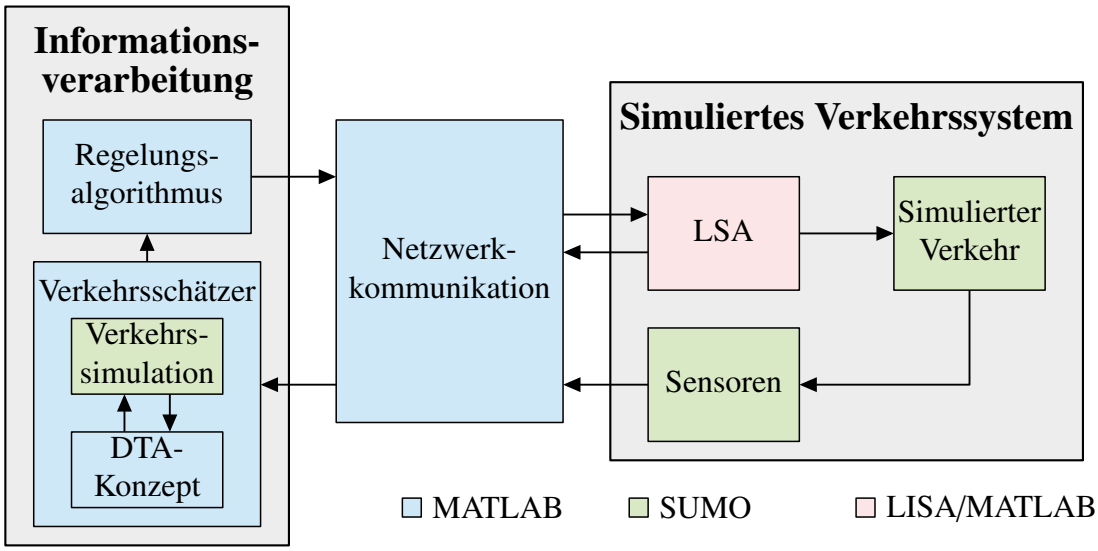


Abbildung 5-1: *Geschlossener Regelkreis des betrachteten Verkehrsregelungssystems mit zusätzlicher Integration der Netzwerkkommunikation und Kennzeichnung der für die Implementierung genutzten Software*

LSA als Stellglied im Strukturbild besonders gekennzeichnet ist und abhängig vom Anwendungsfall agiert. Für die Simulation des Bestandsverfahrens mit dessen Originallogik ist wiederum das verkehrstechnische Planungstool LISA genutzt worden, mit dem die Steuerung auch in erster Instanz umgesetzt wurde (siehe Abschnitt 3.1). Die Anbindung von LISA an das restliche Framework kann wahlweise über MATLAB in Verbindung mit einer Python-Middleware [PPS22] oder wie in diesem Fall mit *LiSuM* [BTT+17] als Middleware durchgeführt werden. Dabei müssen die sog. LISA-Controller (die Logiken der einzelnen LSA) exportiert und in die Simulationsumgebung eingebunden werden.

5.1.1 Testgebiet und Modellierung des Verkehrsaufkommens

Für die Anfertigung von Simulationsstudien zu LSA-Regelungsverfahren bedarf es der Definition von verschiedenen Verkehrsszenarien (vgl. Abschnitt 2.3.2), mit denen die Entwicklungen getestet und die Verfahren gegenübergestellt werden können. Dementsprechend dient dieser Abschnitt der Erläuterung eingesetzter Methoden zur Generierung derartiger Szenarien. Im Gegensatz zu DIN[52]- oder ISO-spezifizierten Open- und Closed-Loop Manövern im Bereich der Fahrsimulatoren wie dem doppelten Fahrspurwechsel nach DIN ISO 3888-1 [DIN18] existieren dabei keine einheitlichen Standards oder Benchmark-Tests. Erste Ansätze für Standards im Bereich von Verkehrssimulationen werden in [ABB+14] genannt oder konkreter in [LMGT23] für den Aufbau realistischer Simulation aufgezeigt.
Das in dieser Arbeit betrachtete Testgebiet ist in der folgenden Abbildung 5-2 als topo-

[52] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN).

grafische Karte mit Hervorhebung der im PPS durchgeführten Um- und Nachrüstungen dargestellt [OSM24].

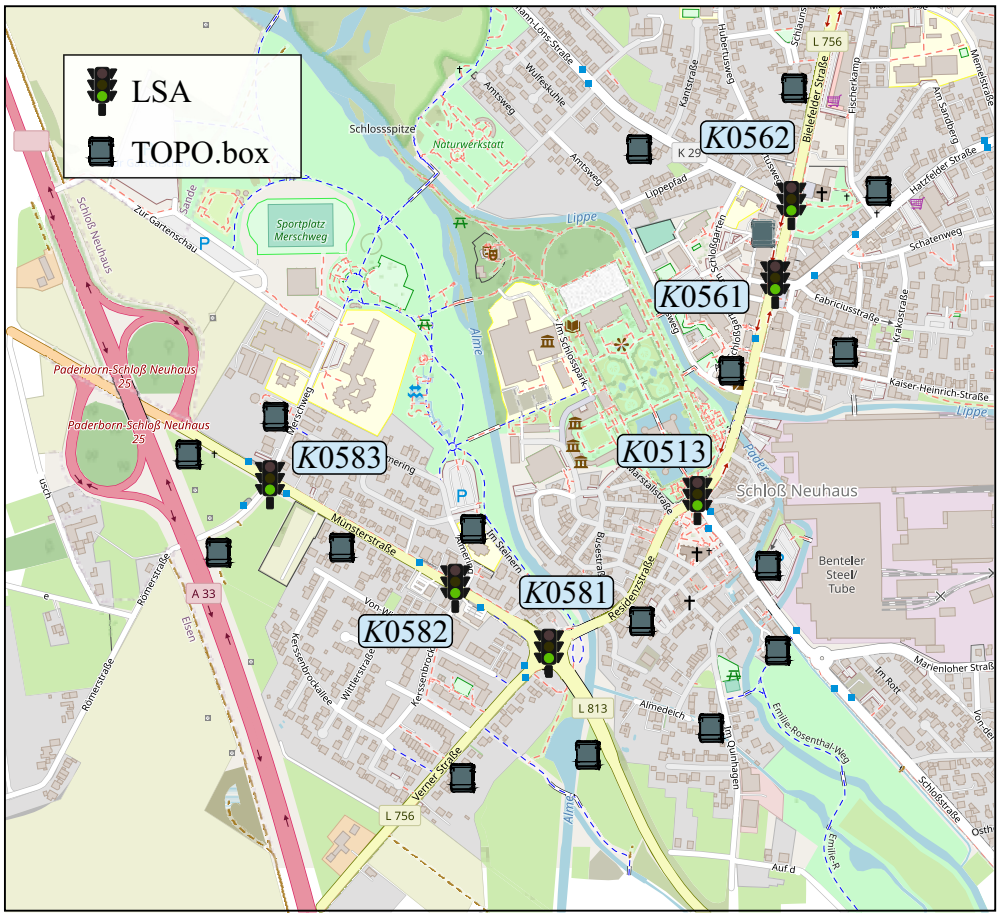


Abbildung 5-2: Topografische Karte des Testgebiets [OSM24] mit Kennzeichnung der umgerüsteten LSA und zusätzlich installierten TOPO.box-Systemen

Für die Erstellung eines Verkehrsszenarios festgelegter Verkehrsbereiche inkl. Infrastruktur ist besonders die jeweilige Verkehrsnachfrage festzulegen. Neben der reinen Anzahl an VTN kann dabei die Routenverteilung variieren, sodass grundsätzlich beliebige Kombinationen von Anzahlen und Verteilungen denkbar sind. Begleitend zum Fortschritt der MPC-basierten LSA-Regelung haben sich die Testszenarien ebenso weiterentwickelt, sodass in diesem Abschnitt anstelle des Tests einer isolierten Kreuzung direkt das gesamte obige Verkehrsgebiet des PPS behandelt wird. Angefangen mit Einzelfahrzeugen und -kolonnen für die grundsätzliche Funktionsüberprüfung der Regelung wurde das Potential zunächst anhand Zufallsverteilungen und manuell definierten Szenarien abgeschätzt. Um das Verkehrsgebiet mit realistischen Verkehrsszenarien zu belasten und die LSA-Regelungen realitätsnah zu testen, wurde anschließend ein Ablauf zur Verkehrsgenerierung konzipiert. Die Modellierung des Verkehrsaufkommens basiert daher auf realen Messdaten aller TOPO.box-Systeme und generiert für charakteristische Tagesabschnitte entsprechende Einzelfahrzeugrouten zur Untersuchung. Wird bspw. die folgende Abbil-

dung 5-3 betrachtet, die für eine einzelne Kreuzung in Schloß Neuhaus das Verkehrsaufkommen eines Tages darstellt (Kreuzung *K*0583 am 01.03.2022), so wird sofort die inhomogene Verteilung der Tageszeitbelastung, aber auch der Fahrzeugtypenverteilung deutlich. Dementsprechend wichtig ist die Auswahl der charakteristischen Testabschnitte, um die LSA-Regelungen bzgl. unterschiedlicher Anforderungen spezifisch zu untersuchen.

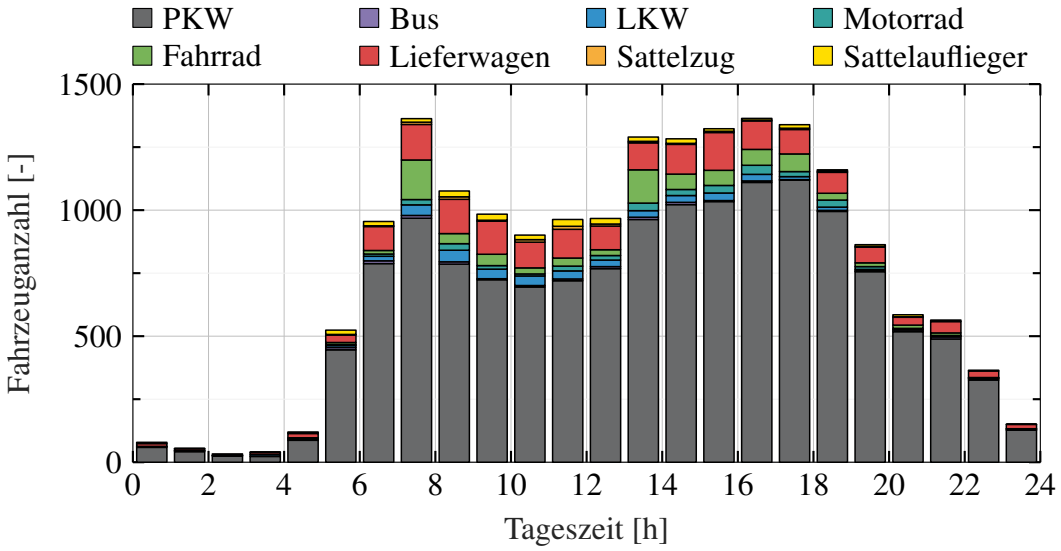


Abbildung 5-3: *Tageshistogramm der einfahrenden Fahrzeuge einer Kreuzung im PPS*

Die Darstellung nur einer Kreuzung in dieser Abbildung liegt darin begründet, dass ein Fahrzeug mehrere Sensoren im Verkehrsgebiet passieren kann, sodass die tatsächlichen Verkehrszahlen nur für eine Kreuzung ohne weitere Annahmen direkt ersichtlich werden. Im Vergleich zur Online-Zustandsschätzung aus Abschnitt 4.2 besteht in diesem Vorgehen der Vorteil, dass zusammenhängende Tagesdatensätze als Datenbasis verwendet und somit offline die Routen der einzelnen VTN rekonstruiert werden können. Anstatt Messdaten mit wahrscheinlichen Folgerouten instantan zu verknüpfen, existieren Folgemessungen, die auch iterativ bestmöglich zugeordnet werden können. Eine alternative Nutzungsmöglichkeit der Daten stellen dabei einige der Offline-Methoden aus dem Stand der Technik aus Abschnitt 3.1.1 dar, welche bspw. zur Erstellung von zeitabhängigen OD-Matrizen herangezogen werden könnten, um daraus die jeweiligen Testszenarien abzuleiten. In dieser Arbeit wurde ein ähnliches Verfahren verwendet, welches nicht den Umweg der OD-Matrizen geht, sondern direkt Fahrten mit Einzelrouten erstellt. Das gesamte Vorgehen zur Testszenariengenerierung ist in der folgenden Abbildung 5-4 zusammengefasst. Mithilfe des SUMO-internen Python-Tools flowrouter werden die Messdaten derart verarbeitet, dass ein aus der Graphentheorie bekanntes *maximales Durchflussproblem* (siehe *Max-Flow-Min-Cut-Theorem* und deren Lösungsalgorithmen in [FF56; Bol98]) im gegebenen Verkehrsnetzwerk unter Verwendung der gemessenen Flüsse als Kapazitäten gelöst

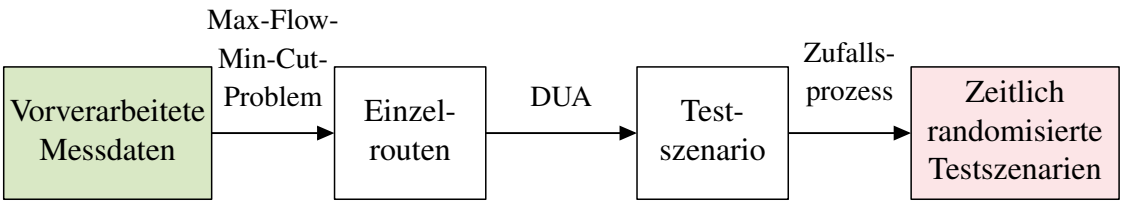


Abbildung 5-4: *Ablauf zur Generierung der Testszenarien*

wird [DLR24]. Dabei bedarf es neben einer minütlichen Eingangsdatenaggregation der Deklaration vorhandener Messstellen als wahlweise Quellen, Zwischenmessstellen und Senken. Angemerkt sei, dass hier die Verwendung des eigens entwickelten Beobachters ebenso möglich wäre, wobei diese Art der Szenariengenerierung als unabhängige Methode zur Gewährleistung gleicher Voraussetzungen der untersuchten Methoden genutzt wurde. Da das SUMO-Tool bislang nicht auf verschiedene Fahrzeugtypen reagieren konnte, wurde es um diese Komponente erweitert, sodass für jeden Fahrzeugtyp ein Durchflussproblem gelöst wird. Mit den resultierenden fahrzeugtypspezifischen Routen können mithilfe des DUA-Programms duarouter plausible Szeanrien mit abgestimmten Routen inkl. Kolonnenbildungen erstellt werden. Zur umfassenden Leistungsanalyse der zu prüfenden LSA-Regelungsstrategien werden demnach bestimmte Zeitabschnitte aus den Messdaten extrahiert und für die Szenarienerstellung verwendet. Bei der Auswahl gilt es einerseits eine ausreichende Dauer des Szenarios einzuhalten, sodass innerhalb dieses Szenarios diverse Verkehrssituationen z. B. Unterschiede der Fahrzeugverteilungen und Fahrtrichtungen auftreten können. Andererseits sollten auch grundsätzlich verschiedene Verkehrsbelastungen im Hinblick auf das Verkehrsvolumen berücksichtigt werden. Als Beispiel unterscheidet sich das Grundszenario des Pendlerverkehrs bzgl. Anzahl und Zusammensetzung von 7-8 Uhr deutlich von dem der Randzeiten von 22-23 Uhr (siehe Abbildung 5-3). Um innerhalb dieser tageszeitabhängigen Grundszenarien den Einfluss von Zufallsphänomenen zu reduzieren, werden hier zusätzlich die Startzeiten der individuellen Fahrzeuge zufällig innerhalb festgelegter Grenzen verändert, ohne Abwandlung der identifizierten Fahrzeugrouten. Anhand dieser Randomisierungen können bspw. über Mittlungen aussagekräftige Bewertungen der jeweils untersuchten Regelungsstrategien getroffen werden.

5.1.2 Integration von Netzwerkstörungen

Die grundsätzliche Erweiterung des Aufbaus der Simulationsumgebung mit integrierten netzwerkinduzierten Totzeiten[53] orientiert sich an [Buß21]. Zusätzlich zur erstmaligen Integration verschiedener Netzwerkstörungen wurden in dieser Masterarbeit grundsätzliche

[53] Der Begriff Latenz wird synonym verwendet.

Voraussetzungen an den MPC-basierten Ansatz untersucht und erste Maßnahmen als Strategie zum Umgang mit netzwerkbedingten Störungen untersucht. Die Gesamtarchitektur des Regelungssystems entspricht derjenigen des begleitenden PPS, welches eine zentrale Regelungsstruktur vorsieht. Der gesamte Teil der Informationsverarbeitung aus Abbildung 5-1 wird dabei gebündelt auf einer Hardware umgesetzt.
Für die Integration der Netzwerkstörungen müssen alle über ein Kommunikationsnetzwerk geschlossenen Übertragungswege des vorliegenden Regelungssystems betrachtet werden. Die Komponenten der LSA und unabhängigen Sensoren kommunizieren aufgrund der örtlichen Verteilung im Verkehrsnetz über digitale Kommunikationsnetzwerke mit der Informationsverarbeitung. Auf diese Weise werden neben den erfassten Verkehrsdaten auch die von der Regelung berechneten Stellgrößen der Wunschphasen an die jeweiligen LSA ausgetauscht. Als Störungen werden in diesem Abschnitt lediglich die netzwerkinduzierten Totzeiten betrachtet und deren Auswirkungen unter Variation der Verzögerung auf die entwickelte Regelung abgeschätzt. Datenpaketverluste werden an dieser Stelle vernachlässigt, da [Buß21] bereits gezeigt hat, dass unter den gegebenen Voraussetzungen einzelne Paketverluste ohne Bursts aufgrund der Redundanz aufeinanderfolgender Datenpakte kompensiert werden können.
Wie in den regelungstechnischen Grundlagen in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, werden die Totzeiten als Warteschlangen modelliert, ohne jedoch den Aspekt der Entstehung selbst weiter zu betrachten. Eintreffende Datenpakete durchlaufen zunächst die Warteschlangen, deren Länge von den netzwerkinduzierten Totzeiten abhängen, und werden im Anschluss daran weitergegeben. Bei definierter Abtastzeit T erfolgt zum Zeitpunkt kT die Verarbeitung aller im zugehörigen Intervall $((k-1)T, kT]$ eingegangenen Datenpakete, sodass die netzwerkinduzierten Totzeiten als Vielfache der Abtastzeit vereinfacht werden. Aufgrund der sekündlichen Abtastzeiten aller beteiligten Komponenten wie der LSA (vgl. Abschnitt 2.2.1) werden ausschließlich Totzeiten ganzer Sekunden betrachtet. Die modellierten Warteschlangen folgen dem FIFO-Prinzip (siehe Abschnitt 2.4.3) mit Vernachlässigung von Vertauschungen, da die Datenpakete im PPS mit Zeitstempeln versehen sind, wodurch die Einhaltung der Reihenfolge gewährleistet werden kann.
In weiterer Anlehnung an diese real auftretenden Rahmenbedingungen ist es möglich, für die Signale der LSA und die der separaten Sensoren (TOPO.box-Systeme) unterschiedliche Verzögerungen zu testen (vgl. Abschnitt 6.1.1). Innerhalb der jeweiligen Komponenten und des entsprechenden Tests sind die Totzeiten zur Reduktion der Untersuchungen konstant. Als Beispiel orientiert sich die umgesetzte Totzeit $\tau_{\mathrm{sc,TOPO}}$ der Zusatzsensorik in den folgenden Tests an den real gemessenen Werten der TOPO.box-Systeme. Zur Veranschaulichung können die exemplarischen Messungen von vier zufällig ausgewählten

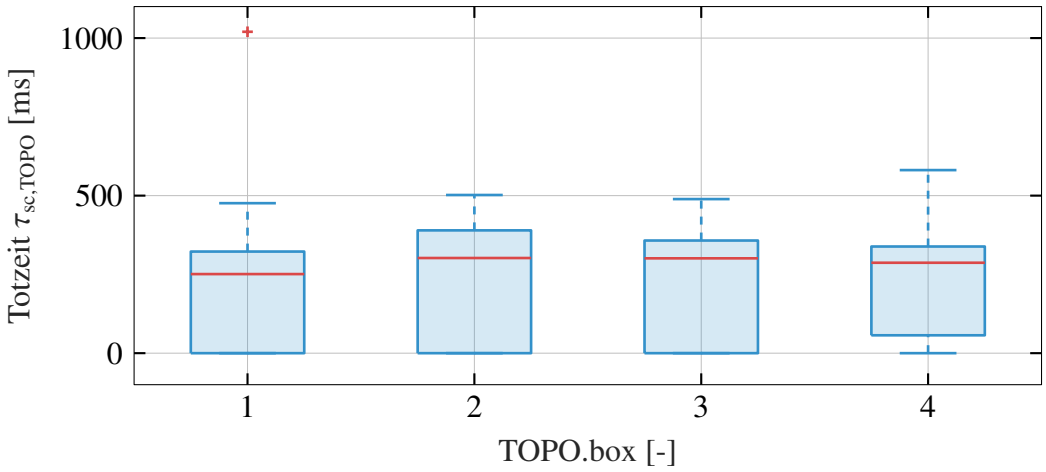


Abbildung 5-5: Ausgewählte Messungen netzwerkinduzierter Totzeiten zufälliger TOPO.box-Systeme des PPS

TOPO.box-Systemen in den Boxplots[54] aus Abbildung 5-5[55] nachvollzogen werden. In dieser Darstellung der Latenzen ist zu erkennen, dass bis auf einen einzigen Ausreißer der ersten Box alle Datenpakete deutlich weniger als eine Sekunde für die Übertragung benötigen, sodass bei Beachtung des Sekundentakts die Untersuchung von $\tau_{sc,TOPO} = 1\,s$ zur Abbildung des Verhaltens geeignet erscheint.

5.2 Ergebnisse und Auswertung der Simulationen

Die entwickelte MPC-basierte LSA-Regelung ermöglicht es, durch Variation implementierter Parameter gezielt auf bestimmte Regelungsziele wie bspw. die Buswartezeit einzuwirken. Dieser Abschnitt dient daher der Auswertung von Simulationsergebnissen verschiedener Parameterkonfigurationen der entwickelten Regelung und deren Vergleich mit dem aktuellen Bestandsverfahren. Bei dem Bestandsverfahren handelt es sich um knotenspezifisch ausgelegte Steuerungsverfahren, die in Tabelle 2-2 unter den Ordnungszahlen B2 bis B5 einzuordnen sind. Die durch die Induktionsschleifen ermöglichte Verkehrsabhängigkeit ist bspw. im Phasenplan der Schlosskreuzung in Abbildung 2-10 über variable Phasenfolgen ablesbar, wobei auch die Rückfallebene der Festzeitsteuerung dargestellt ist. Im Zuge des PPS ist außerdem deutlich geworden, dass netzwerkinduzierte Totzeiten großen Einfluss auf die Verkehrsrekonstruktion und -regelung haben. Daraus resultiert der folgende Aufbau dieser Simulationsstudien.
Zunächst wird die derzeitige Bestandsschaltung der MPC-basierten LSA-Regelung unter idealen Verhältnissen gegenübergestellt, um das Potential der Entwicklung herauszustel-

[54] Die wichtigsten statistischen Grundlagen zu Boxplots sind im Anhang in Abschnitt A1.1 zusammengefasst.
[55] Die Dauer der Messungen betrug jeweils fünf Minuten mit mehr als 50 Messwerten pro Sensor (aufgenommen am 08.05.2023).

len. Ideal heißt an dieser Stelle, dass die vollständige Zustandsinformation zur Regelung direkt aus dem simulierten Ground Truth bezogen wird und auch sonst störungsfreie Verhältnisse ohne bspw. Latenzen bestehen. Dabei werden drei verschiedene Parametersätze (Konfigurationen) bzgl. der VTN-Gewichtung untersucht, welche die Modifizierbarkeit des Ansatzes zeigen. Die Untersuchung wird mithilfe von vier Szenarien unterschiedlicher Verkehrsaufkommen durchgeführt, die wie zuvor in Abschnitt 5.1.1 beschrieben generiert wurden. Im Anschluss folgen Studien zum Einfluss der Integration der Verkehrsrekonstruktion sowie netzwerkinduzierter Totzeiten auf das Regelungsergebnis. In diesem zweiten Teil einer realitätsnahen Situation wird zusätzlich ein reales Fußverkehrsaufkommen appliziert, damit auch diese wichtige Komponente Berücksichtigung findet. Für alle Simulationsstudien dieser Arbeit gilt, dass jedes Verkehrsszenario anhand von fünf zeitlichen Randomisierungen getestet wurde, wobei die Abfahrtszeiten innerhalb von einer Minute variieren.

5.2.1 Analyse bei idealisierten Verhältnissen

Die Ergebnisse dieses Abschnitts basieren auf einer idealen Beobachtung des gesamten Verkehrszustandes, sodass bspw. alle Fahrzeugstandorte exakt und direkt aus der zu regelnden Verkehrssimulation entnommen und keinerlei Störungseinflüsse wie Latenzen oder Paketausfälle bei der Datenübertragung von sensierten Fahrzeugen modelliert sind. Für die Untersuchung der verschiedenen Ansätze wurden vier unterschiedliche Szenarien ausgewählt, die auf den Realdaten der folgenden Zeiträume basieren:

(*VS 1*) 7:00 - 7:20 Uhr: insgesamt 595 VTN mit 88% PKW-Anteil,

(*VS 2*) 11:00 - 12:20 Uhr: insgesamt 512 VTN mit 90% PKW-Anteil,

(*VS 3*) 16:00 - 16:20 Uhr: insgesamt 688 VTN mit 89% PKW-Anteil,

(*VS 4*) 22:00 - 22:20 Uhr: insgesamt 177 VTN mit 96% PKW-Anteil.

Diese Zeiträume wurden aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsstärken und -zusammensetzungen ausgewählt, was bereits durch Abbildung 5-3 angedeutet wurde. Neben dem Pendlerverkehr sollen auch ein mäßiger Verkehr zur Mittagszeit und ein niedrigeres Aufkommen am Abend betrachtet werden. Die Startzeiten aller VTN im jeweiligen Szenario sind in Abbildung 5-6 minütlich aggregiert aufgetragen. Die Basis der Szenarien bilden jeweils die Daten eines zwanzigminütigen Zeitintervalls, dessen Dauer einen Kompromiss zwischen langen und sehr kurzen Untersuchungszeiträumen darstellt. Zwanzig Minuten gewährleisten eine ausreichende Dauer, um komplexe Verkehrssituationen herzustellen und Auswirkungen umgesetzter LSA-Entscheidungen nicht nur kurz- sondern auch mittelfristig zu analysieren. Zudem ist die Zeitspanne kurz genug, damit ver-

[56] Es wurde jeweils die erste Randomisierung für diese Darstellung genutzt.

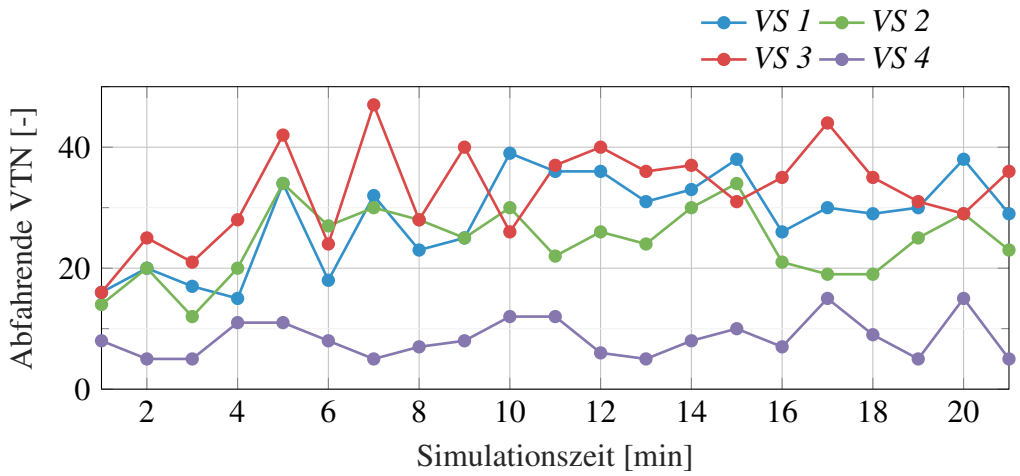


Abbildung 5-6: *Startzeiträume aller VTN der betrachteten Verkehrsszenarien*[56]

schiedene Phänomene wie geringere Gesamtbelastungen oder hohe Belastungen von Straßenzügen die Ergebnisse des betrachteten Szenarios merklich beeinflussen. Falls die Untersuchungsperioden zu lang gewählt werden, gleichen sich die Resultate gegenübergestellter Szenarien an. Ein wichtiger Punkt ist außerdem der Simulationsaufwand angestellter Studien. Die Mehrfachauswertungen der Einzelszenarien aufgrund der jeweils fünf Randomisierungen erhöht diesen Aufwand, ist jedoch zur Kompensation der Simulationsartefakte sowie von Zufallseffekten notwendig. Die exakte Szenariendauer hängt dabei stets von der umgesetzten LSA-Regelungsstrategie ab. Die Simulation wird in dieser Studie erst beendet, wenn alle VTN des entsprechenden Szenarios ihre Route vollständig abgeschlossen haben, damit eine maximale Vergleichbarkeit aller individueller VTN hergestellt wird. Bei einer Begrenzung der Simulationsdauer würde ein Teil der VTN abhängig von der getesteten Regelung keinen Einfluss mehr auf das Regelungsergebnis nehmen, da nicht die jeweils gleich Route realisiert wurde. Abhängig von der regelungsbedingten Verkehrsbewältigung ergeben sich zusammen mit einer Initialisierungsphase von 40 s, die notwendig ist, um die Logik des Bestandsverfahrens zu initialisieren, Simulationszeiten von teilweise über 25 Minuten. Die Befüllung sowie Entleerung des Systems mit VTN ist bereits übersichtlich in Abbildung 4-5 dargestellt.

Zur Beurteilung der Simulationsergebnisse des MPC-basierten LSA-Regelungsverfahren werden drei Konfigurationen dieser MPC dem Bestandsverfahren gegenübergestellt. Diese Konfigurationen unterscheiden sich lediglich durch ihre Gewichtungen p_{Prio} der VTN (vgl. Gleichung (4-6)). Zur Veranschaulichung dieser Unterschiede sind in Abbildung 5-7 die VTN-Gewichtungen gezeigt sowie deren Zahlenwerte in Tabelle A3-1 im Anhang aufgetragen. Die Gewichtung der verschiedenen Kriterien (vgl. g_K aus Gleichung (4-5)) ist dagegen konstant.

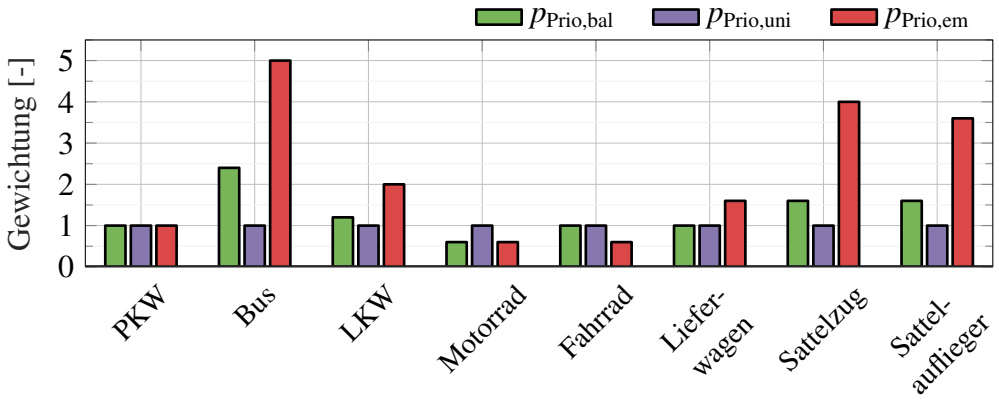


Abbildung 5-7: VTN-Gewichtungen der getesteten MPC-Konfigurationen

Der erste Parametersatz $p_{\text{Prio,bal}}$ stellt eine moderate Berücksichtigung der möglichen Fahrgastzahl sowie der Emissionsraten und Fahrzeugdimensionen der jeweiligen Fahrzeugtypen dar. In dieser balancierten Gewichtung werden ausgehend von PKW bspw. Busse deutlich höher, aber LKW im Gegensatz dazu nur geringfügig höher priorisiert. Wie im Bestandsverfahren, welches keine Fahrzeugtypunterscheidung kennt und nutzt, werden in der zweiten MPC-Konfiguration $p_{\text{Prio,uni}}$ alle VTN gleich bemessen. Die letzte getestete Priorisierung $p_{\text{Prio,em}}$ legt ein noch größeres Augenmerk auf stärker emittierende VTN[57]. Als Beispiel werden Sattelzüge um ein Vielfaches höher gegenüber PKW gewichtet, sodass ein Sattelzug gleichwertig zu vier PKW auf den Zustandsspuren ist.
Zur Auswertungen der verschiedenen Simulationsergebnisse werden stets die Kriterien der Wartezeiten, Emissionen[58], zugehörigen Reisezeiten und Anzahl an Haltevorgängen der gesamten Fahrt aller VTN herangezogen. Neben diesen Durchschnittswerten aller VTN wird ebenso die Wartezeit des Schwerverkehrs gesondert bewertet sowie in Szenarien mit Fußverkehr auch deren Wartezeiten. Aufgrund der mikroskopischen Verkehrssimulation lassen sich weitere Merkmale und deren Verteilung, Maximalwerte etc. zur weiteren Analyse der LSA-Regelungsstrategien verwenden.
Die folgende Tabelle 5-1 zeigt die Durchschnittswerte der verschiedenen LSA-Regelungen über alle Randomisierungen des morgendlichen Pendlerverkehrs *VS 1* für das gesamte betrachtete Verkehrssystem. Im Anhang sind in Tabelle A3-2 sämtliche Ergebnisse für die restlichen Verkehrsszenarien analog aufgezeichnet zu finden. Eine bessere Übersicht dieser Werte bietet das folgende Spinnendiagramm in Abbildung 5-8. Wichtig bei dieser Art der Darstellung ist die Skalierung der Achsen, die im Verlauf dieser Arbeit auf die jeweilige Situation angepasst wird, also nicht für alle Spinnendiagramme gleich ist.

[57] Busse werden als besonders relevanter Fahrzeugtyp des ÖPNV am höchsten priorisiert.
[58] In allen folgenden Auswertungen werden stellvertretend für alle berechneten Emissionsarten die Daten der Feinstaubemissionen PM_x gezeigt.

Tabelle 5-1: *Wertetabelle zur Gegenüberstellung der LSA-Regelungsverfahren aus Abbildung 5-8*

		Bewertungskriterium				
		$\bar{t}_t$ [s]	$\bar{t}_w$ [s]	$\overline{m}_{E,\mathrm{PM}_x}$ [mg]	$\overline{n}_H$ [-]	$\bar{t}_{w,\mathrm{Schwer}}$ [s]
LSA-Regelung	Bestand	115,9	25,9	16,9	1,42	25,4
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,bal}}$)	104,4	17,5	15,3	1,25	17,7
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,uni}}$)	103,2	16,6	15,2	1,18	22,7
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,em}}$)	103,8	17,0	15,0	1,22	14,5

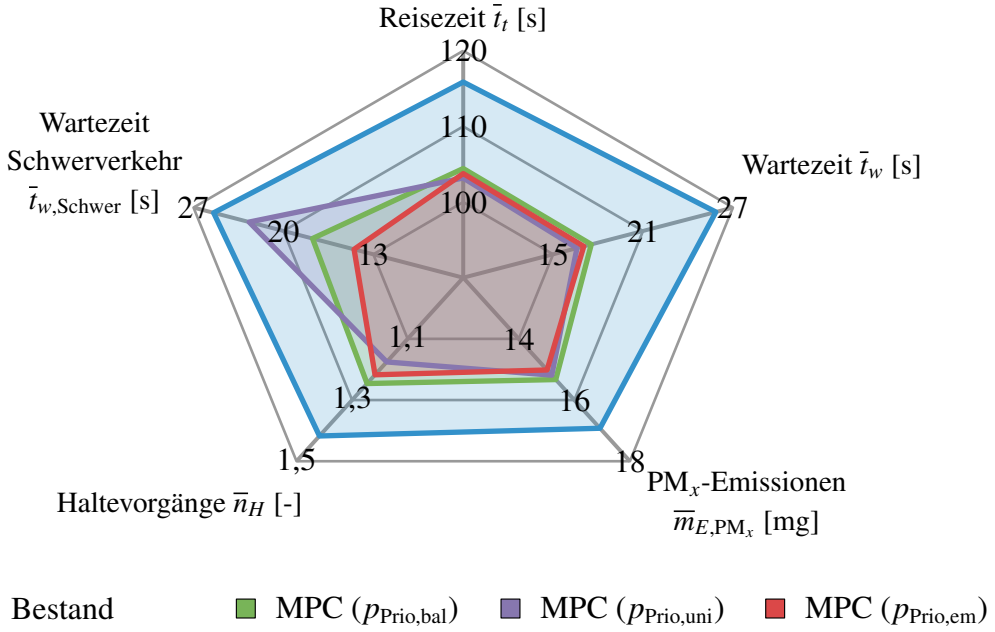


Abbildung 5-8: *Gegenüberstellung des Bestandsverfahrens und der MPC in unterschiedlichen Konfigurationen für das morgendliche Verkehrsszenario VS 1*

Die erste Beobachtung anhand der Durchschnittswerte ist, dass die entwickelte MPC-basierte LSA-Regelung unabhängig von der Konfiguration dem Bestandsverfahren in allen Kriterien deutlich überlegen ist. In den wichtigsten Kriterien der durchschnittlichen Wartezeit und Emissionen aller VTN können die erzielten Werte des Bestandsverfahrens deutlich verbessert werden. Die Einsparungen um über 30 % bzgl. der Wartezeit, was mehr als 8 s pro VTN entspricht, bzw. um 10 % bzgl. der Emissionen sind auffallend. Alle VTN müssen durchschnittlich weniger oft anhalten und erreichen wesentlich schneller ihr Ziel. An den durchschnittlichen Wartezeiten des Schwerverkehrs $\bar{t}_{w,\mathrm{Schwer}}$ ist das gezielte Einwirken der entwickelten Regelung zu erkennen, da durch die Parametervariation bzw. durch die unterschiedliche Priorisierung das Ergebnis der uniformen VTN-Gewichtung nochmals um mehr als 36 % reduziert werden konnte. Dementsprechend

kann die entwickelte Regelung präzise auf bestimmte Verkehrsgruppen reagieren, indem diese innerhalb der MPC-Bewertung priorisiert werden. Von Natur aus ist der Wert der maximalen Wartezeit in gewisser Weise sensitiver als die restlichen Durchschnittswerte, da selbst bei mehreren betrachteten Randomisierungen einzelne Ausreißer diesen extrem beeinflussen[59]. Außerdem werden die kumulierten Wartezeiten für die gesamte Fahrt analysiert, weshalb die dabei auftretenden maximalen Wartezeiten schwer vergleichbar sind. Dennoch ist es hilfreich, auch die Verteilung der Wartezeiten zu betrachten, welche in der folgenden Abbildung 5-9 dargestellt ist.

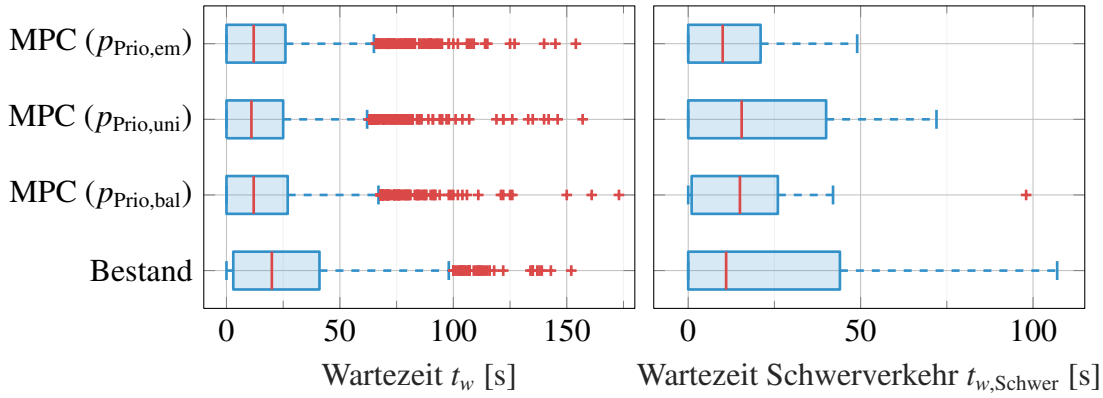


Abbildung 5-9: *Wartezeitverteilung mithilfe von Boxplots[54] aller betrachteten LSA-Regelungsverfahren des Verkehrsszenarios VS 1 für den Gesamtverkehr links und den Schwerverkehr rechts*

Auf der Hochachse sind die verschiedenen Regelungsverfahren aufgetragen und die Wartezeit auf den Abszissen. In dem Diagramm auf der linken Seite erklärt der Median der MPC-Konfigurationen mit 11 s und 12 s im Gegensatz zu 20 s des Bestandsverfahrens die bereits gezeigten Durchschnittswerte der Wartezeiten aus Abbildung 5-8. Außerdem ist die Verteilung bei den MPC-Konfigurationen enger, was an den Quartilen und Whiskern abzulesen ist. Obwohl die Streuung bei der entwickelten LSA-Regelung generell also geringer ist, weisen die vorhandenen Ausreißer größere Werte als beim Bestandsverfahren auf. Diese Ausreißer bestimmen dementsprechend maßgeblich die maximalen Wartezeiten. Verglichen mit der Wichtigkeit für den Fußverkehr sind maximale Wartezeiten der Straßenteilnehmer für die Bewertung von LSA eher untergeordnet [PPS22] und werden bspw. auch in [FGSV15b] nicht verwendet. Falls dieser Aspekt der maximalen Wartezeit oder auch ein anderer weiter in den Fokus gerückt werden soll, wie bspw. durch behördliche Vorgaben, so kann wiederum innerhalb der MPC die Kriteriengewichtung g_K (siehe Kriterienaufzählung in Abschnitt 4.3.3) angepasst werden.

Neben den festgestellten Verbesserungen der MPC gegenüber des Bestandsverfahrens ist

[59] Der Durchschnittswert wird hier auf Basis von 5 Maximalwerten im Vergleich zu $2975 = 5 \cot 595$ Werten aller VTN erstellt.

auch innerhalb der MPC-Konfigurationen eine Varianz festzustellen, was dem Zusammenspiel aus unterschiedlichen VTN-Gewichtungen und der Szenariozusammensetzung geschuldet ist. Eindeutig kann dieser Einfluss dem rechten Teil der Abbildung 5-9 entnommen werden. Die höhere durchschnittliche Wartezeit des Schwerverkehrs der uniformen Gewichtung $p_{\text{Prio,uni}}$ aus Abbildung 5-8 resultiert aus dem wesentlich breiteren oberen Quartil der dargestellten Verteilung. Insgesamt ist die Streuung der MPC bzgl. der Wartezeit $t_{w,\text{Schwer}}$ jedoch stets geringer als die des Bestandsverfahrens, wobei eine erhöhte Priorisierung des Schwerverkehrs die Quartilbreite beeinflusst. Dieser Einfluss hängt wie angedeutet von der VTN-Zusammensetzung des Szenarios ab, weshalb in den folgenden Boxplots der Abbildung 5-10 die Wartezeitenverteilungen für das abendliche Verkehrsszenario *VS 4* ohne Schwerverkehr mit überwiegend PKW dargestellt ist, in denen sich die Grafiken der MPC-Varianten sehr ähnlich sind.

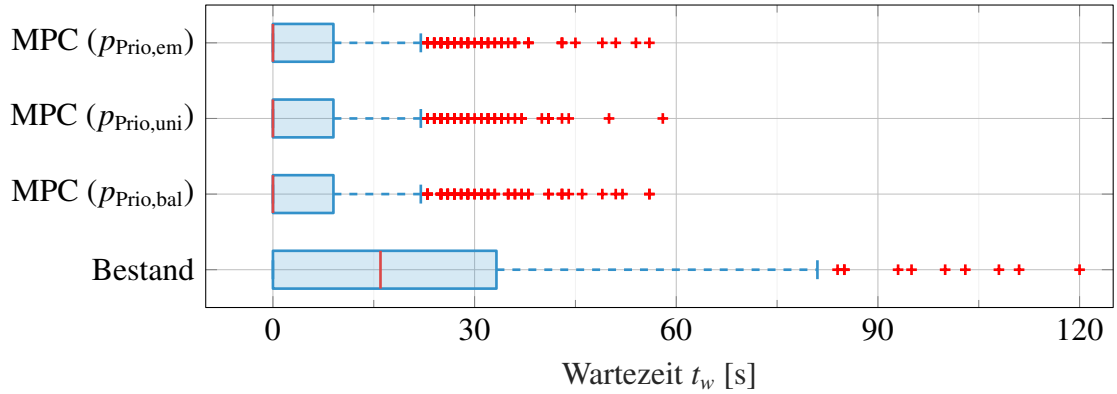


Abbildung 5-10: *Boxplots der Wartezeiten der betrachteten LSA-Regelungsverfahren des Verkehrsszenarios VS 4 für den Gesamtverkehr*

Wie auch in der Gesamtübersicht im Anhang für sämtliche Kriterien zu erkennen (siehe Tabelle A3-2), weist die entwickelte LSA-Regelung eindeutige Vorteile gegenüber dem Bestandsverfahren auf. Bei *VS 4* ist am Median zu erkennen, dass bei der MPC jeweils mindestens die Hälfte aller VTN überhaupt nicht warten müssen, da die LSA präzise auf einzelne Fahrzeuge reagieren kann. Derartige Ergebnisse haben sich bereits in den Untersuchungen isolierter Kreuzungen gezeigt [MLB+22] und können auf gesamte Verkehrsnetze, wie an dieser Stelle untersucht, übertragen werden. Verglichen mit der MPC besitzt das Bestandsverfahren nicht die Flexibilität für gezielte Eingriffe, welche genau an die übermittelte Verkehrslage angepasst sind. Neben der freien Veränderbarkeit der Signalprogrammbildung der MPC liegen die Gründe auch in der unterschiedlichen Zustandserfassung der Verkehrssituation. Innerhalb der MPC-Prädiktion wird dieser komplexe Zustand anhand ausgewählter Folgephasen propagiert und die Reaktionen auf den resultierenden Verkehrszustand können genauer abgeschätzt werden. Um diesen Sachverhalt besser an einem Beispiel zu erläutern, dient die dreiteilige Abbildung 5-11.

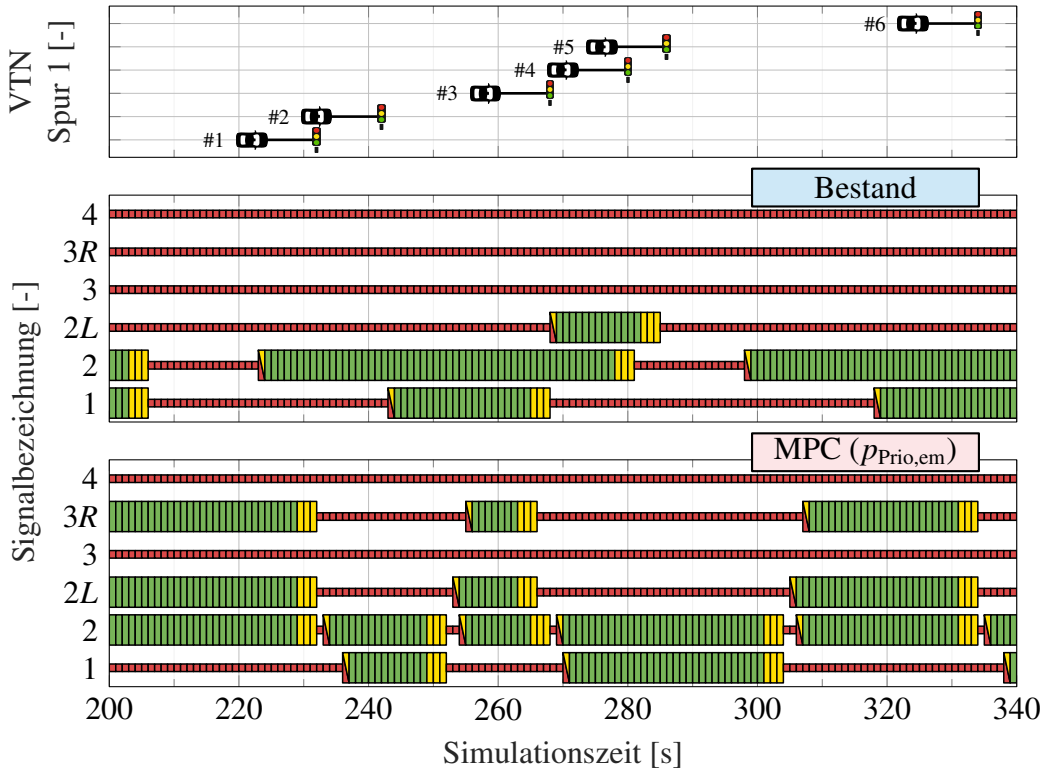


Abbildung 5-11: *Zeitlicher Verlauf von LSA-Schaltungen einer ausgewählten Kreuzung in Verkehrsszenario VS 4*

Die Grafik basiert auf einem Auszug der zu Szenario *VS 4* gehörigen Verkehrssimulationen, wobei die Situation der LSA *K*0583[60] skizziert wird. Im oberen Teil ist dabei das festgelegte Fahrzeugaufkommen für Spur 1 (zu Signal 1 gehörende Spur) über der Zeit dargestellt. Aufgrund der Komplexität der Anlagengeometrie und des Netzwerks von LSA ist es an dieser Stelle wichtig, eine Spur am Systemrand zu untersuchen und einen Zeitausschnitt zu Beginn der Simulation zu wählen. Auf diese Weise sind die Belegungen unabhängig von der betrachteten Regelung besser vergleichbar[61]. Das jeweils nummerierte Fahrzeug deutet den Detektionszeitpunkt und das Symbol der LSA die erwartete Ankunftszeit an der Haltlinie zu Signal 1 an, wobei #1 das erste Fahrzeug des betrachteten Szenarios *VS 4* dieser Fahrspur darstellt. Die beiden unteren Teildiagramme zeigen das von der Bestandsschaltung und MPC mit $p_{\text{Prio,em}}$ erzeugte und sekündlich aufgelöste Signalbild. Damit auch der Zusammenhang verschiedener Signalgruppen bzgl. Zwischenzeiten etc. deutlich wird, sind alle Signale der Fahrzeugspuren aufgetragen. Die Lichtzeichen sind den grundsätzlichen Signalfarben folgend eingefärbt (bekannt aus Abschnitt 2.2.1). Eingangs lässt sich als grundsätzliche Beobachtung die deutliche Diskre-

[60] An der Autobahn im Westen des Bilanzraumes gelegene LSA der Kreuzung Münsterstr. / Merschweg (vgl. Abbildung 5-2 und den Lageplan in Abbildung A2-2).

[61] Zu Beginn der MPC-Entwicklungsphase wurden u. a. Schaltbilder von isolierten Kreuzungen verglichen und analysiert, welche analoge Unterschiede der Regelungen zeigten.

panz der beiden Signalbildverläufe feststellen. Zunächst reagiert die MPC durch die Freigabe von Signal 1 wesentlich früher (7 s) auf die ersten beiden eintreffenden Fahrzeuge ab Sekunde 222 und beendet die Freigabe bedarfsgerecht. Auf diese Weise können Linksabbieger der anderen Hauptrichtung (Signal 2*L*) kurzzeitig freigegeben werden. Die entsprechende Freigabe des Schaltbilds der Bestandsschaltung dauert insgesamt länger und ist schlechter abgestimmt, was sich u. a. an den folgenden Fahrzeugen #3 bis #5 zeigt. Während diese Fahrzeuge bei der MPC nahezu keine Wartezeiten erfahren, müssen sie beim Bestandsverfahren mit bis zu 51 s für Fahrzeug #3 vergleichsweise lange an der LSA warten. Dass die Bestandsschaltung überhaupt belastungsabhängig handelt, ist in diesem Ausschnitt bspw. anhand der wiederholten Freigabe der Hauptrichtungssignale 1 und 2 zu erkennen, ohne zwischenzeitliche Freigaben der Nebenrichtungen.
Die zuvor gezeigten großen Vorteile der eingesetzten Prädiktion der entwickelten LSA-Regelung werden in dieser detaillierter analysierten Beispielsituation sehr deutlich. Durch die präzise Vorhersage der Verkehrssituation kann die LSA-Schaltung genau auf ebendiese abgestimmt werden, um, wie beschrieben, u. a. die Wartezeiten der Fahrzeuge zu minimieren (siehe Übersicht aller Ergebnisse in Tabelle A3-2 im Anhang).
Besonders anschaulich kann dies mithilfe der folgenden beiden Grafiken belegt werden, die jeweils der selben Simulation (Szenario *VS 4*) wie der obigen LSA-Schaltungen entstammen. Die erste Abbildung 5-12 zeigt die Wartezeiten der einzelnen VTN aufgetragen über deren Abfahrtszeiten, wobei die zweite Abbildung 5-13 den Füllstand des Verkehrssystems anhand der VTN-Anzahlen über die gesamte Simulationszeit darstellt.

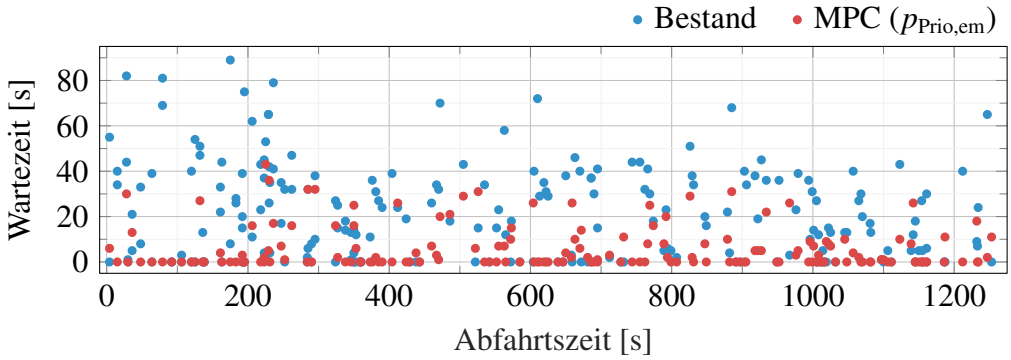


Abbildung 5-12: *Individuelle Wartezeiten der VTN abhängig von der Abfahrtszeit*

Die Grafik mit den individuellen Wartezeiten hebt nochmals hervor, dass vor allem bei einer geringeren Verkehrslast durch die MPC deutlich mehr Fahrzeuge ohne jegliche Wartezeit reisen. Erhöhte Wartezeiten jenseits der 20 s ergeben sich fast ausschließlich in Verbindung mit Spitzen des Füllstands, wie bspw. in der Zeitspanne von 200 s bis 300 s zu beobachten.

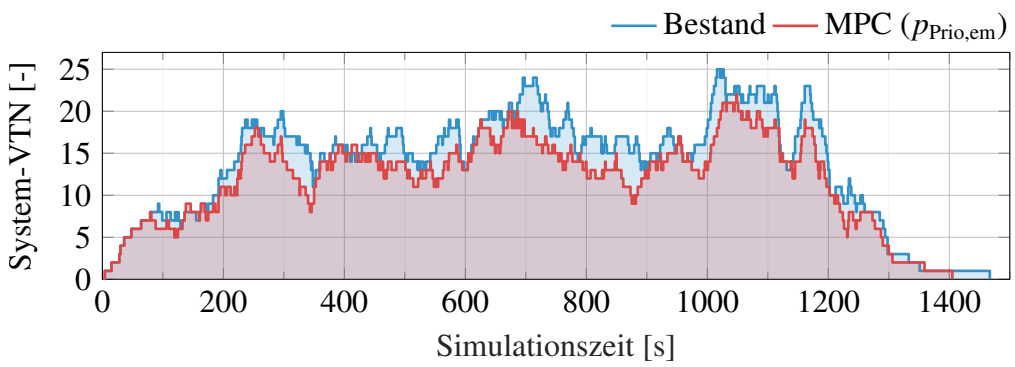


Abbildung 5-13: *Gegenüberstellung der Systemfüllstände abhängig von der verwendeten LSA-Regelung*

Diese direkte Abhängigkeit vom Füllstand des Systems ist beim Bestandsverfahren weniger ausgeprägt, da über den gesamten Zeitraum der Abfahrten Wartezeiten im Bereich von 40 s resultieren. Es wird deutlich, dass durch die schnellere Reaktion der MPC eine reduzierte Systemauslastung folgt. Dementsprechend werden etwaige Konfliktsituationen an den Kreuzungen begrenzt oder sogar vermiedenen, die sonst durch Kompromisse der jeweiligen LSA-Regelung zu bewältigen sind und zwangsläufig zu hohen Wartezeiten führen. Der vorteilhafte Prädiktionsaspekt ist am deutlichsten in der Befüllungsphase des Systems zu beobachten. Während die Reaktion des Bestandsverfahrens mit maximalen Wartezeiten von über 80 s die schlechtesten Werte der gesamten Simulation produziert, müssen bei Verwendung der MPC die Fahrzeuge lediglich in Ausnahmefällen überhaupt halten.

Zusammenfassend lässt sich eine deutliche Überlegenheit der MPC in allen wesentlichen Aspekten gegenüber dem Bestandsverfahren festhalten. Nicht nur in den wichtigsten untersuchten Kriterien der Wartezeiten und Emissionen zeigt sich die MPC unabhängig von der genutzten Konfiguration als eindeutig leistungsfähiger. Sondern auch am Beispiel der Priorisierung höher emittierender Fahrzeuge konnte nachgewiesen werden, dass anhand von Parametervariationen der manipulierbaren Zielfunktion gezielt ausgewählte Eigenschaften beeinflusst werden können. Das Ergebnis der Verbesserung aller betrachteten Kriterien hebt dabei noch einmal die grundsätzlichen Vorteile der MPC und insbesondere im Vergleich zum Bestandsverfahren hervor.

5.2.2 Analyse der realitätsnahen Situation

Die im vorherigen Abschnitt diskutierte Simulationsstudie beruht auf den Vereinfachungen der idealen Verkehrszustandsbeobachtung und Kommunikation. Außerdem wurde der Fußverkehr vernachlässigt, da die simulierte Bestandsschaltung keine entsprechenden Meldesignale umsetzen und auf die damit verbundene Verkehrslage situativ reagieren

kann. Dem Ziel der Realumsetzung folgend, werden jene Komponenten in diesem Abschnitt ergänzt, sodass die vollständige Ausgangslage aus Abbildung 5-1 umgesetzt wird. Um dabei die Übersichtlichkeit der betrachteten Simulationen zu wahren, wird sich exemplarisch auf das Verkehrsszenario *VS 1* als vielseitiges Simulationsszenario beschränkt. Die nachfolgende Tabelle 5-2 zeigt die daraus resultierenden Simulationsvarianten, die im weiteren Verlauf untersucht werden.

Tabelle 5-2: *Simulationsvarianten der realitätsnahen Verkehrssituation*

		Simulationsvariante						
		#0	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Merkmal	Verkehrsrekonstruktion	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Netzwerkkommunikation optimal (o) oder realistisch (r)	o	o	o	o	r	r	r
	Fußverkehr	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓
	MPC Priorisierung des Fußverkehrs Standard (s) oder hoch (h)	s	s	s	h	s	s	h

Bzgl. der Netzwerkkommunikation werden die beiden Optionen *optimal* und *realistisch* unterschieden, wobei die Bezeichnung optimal in diesem Fall

$$\tau_{\mathrm{sc}} + \tau_{\mathrm{ca}} \leq T = 1\,\mathrm{s}$$

bedeutet sowie die Bezeichnung realistisch die separaten netzwerkinduzierten Totzeiten

$$\tau_{\mathrm{sc,LSA}} = 3\,\mathrm{s}, \quad \tau_{\mathrm{sc,TOPO}} = 1\,\mathrm{s} \quad \text{und } \tau_{\mathrm{ca}} = 3\,\mathrm{s} \tag{5-1}$$

umfasst. Die Werte der als realistisch gekennzeichneten Kommunikation sind angelehnt an die infrastrukturellen Rahmenbedingungen des PPS, was im folgenden Kapitel in Passage 6.1.1 adressiert wird. Das wahlweise applizierte Fußverkehrsaufkommen ist einer realen Aufzeichnung passend zum verwendeten Szenario *VS 1* nachempfunden. Um ebenso das gezielte Beeinflussen des Fußverkehrs zu untersuchen, wird optional eine Priorisierung der Kriterien *K5* und *K6* (Spurbelegungen bzw. Wartezeiten des Fußverkehrs) durch Erhöhung von $g_{K,5}$ und $g_{K,6}$ aus Gleichung (4-5) genutzt. Die relativen Kriteriengewichte des *Standards* und der *hohen Fußverkehrspriorisierung* sind im Anhang in Tabelle A3-3 zu finden. Außerdem wird in allen Simulationsvarianten für die Gewichtung der VTN des Straßenverkehrs die ausgewogene MPC-Konfiguration $p_{\mathrm{Prio,bal}}$ aus dem vorherigen Abschnitt herangezogen. Aus diesen Merkmalen resultieren nach Tabelle 5-2 sechs neue Simulationsvarianten, die im Folgenden untereinander sowie mit der zuvor aufgezeigten optimalen Situation verglichen werden.

Bei derartigen Gegenüberstellungen muss ein vergleichbares Prinzip wie in der Ground-Truth-Validierung (vgl. Abbildung 4-4) auf die Regelung ausgeweitet werden. Im Speziellen bedeutet die Vorgehensweise an dieser Stelle, dass gleichzeitig zwei parallele Simulationen durchgeführt werden. Einerseits wird ein GT mit dem Verkehrsszenario simuliert und andererseits die Verkehrsrekonstruktion genutzt, um die jeweilige Situation zu approximieren. Die Stellgrößen der LSA-Signale werden der Netzwerkkommunikation entsprechend an beide Simulationen übermittelt. Die Daten zur Auswertung der Ergebnisse werden wiederum direkt aus dem GT extrahiert, damit nicht der beobachtete Zustand (Schätzwerte), sondern der tatsächliche Zustand bewertet werden kann.
Um zunächst den Beobachtungseinfluss abschätzen zu können, werden die Simulationsvarianten #1 und #4 mit den entsprechenden Ergebnissen der idealisierten Situation mit vollständiger Zustandsinformation[62] sowie denen des Bestandsverfahrens aus dem vorherigen Abschnitt in Abbildung 5-14 gegenübergestellt.

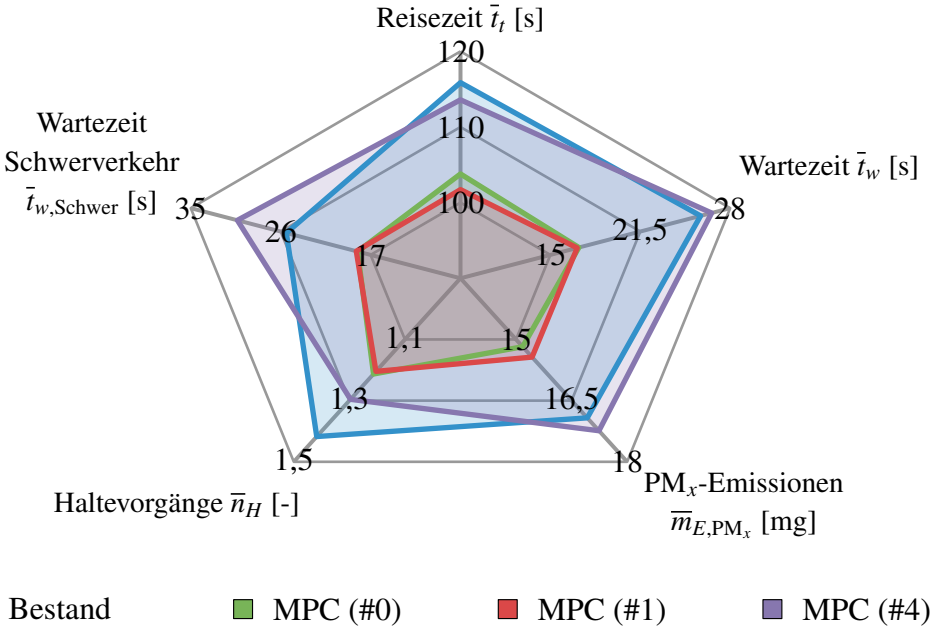


Abbildung 5-14: Übersicht der durchschnittlichen Simulationsergebnisse zur Einflussanalyse der Verkehrsrekonstruktion

Ganz offensichtlich hat die reine Verwendung der Verkehrsrekonstruktion (Variante #1) lediglich eine geringe Auswirkung auf die entwickelte MPC-basierte LSA-Regelung bzw. auf die erreichte Gesamtgüte. Bei den betrachteten Kriterien der Durchschnittswerte für Wartezeit $\bar{t}_w$, Haltevorgänge $\overline{n}_H$ oder auch Wartezeit des Schwerverkehrs $\bar{t}_{w,\mathrm{Schwer}}$ sind keine signifikanten Abweichungen zur Situation ohne Verkehrsrekonstruktion zu erkennen. Gerade im zusätzlichen Vergleich mit dem Bestandsverfahren hat die Regelung nichts

[62] Bekannt aus dem vorherigen Abschnitt 5.2.1 und zur besseren Abgrenzung sowie Einordnung in dieser Passage mit Simulationsvariante #0 bezeichnet.

an Vorteilen eingebüßt, sodass sogar die marginale Verschlechterung bzgl. der Emissionen von weniger als 1 % noch eine deutliche Reduzierung der Ergebnisse des Bestandsverfahrens um gut 9 % darstellt. Die durchschnittliche Reisezeit $\bar{t}_t$ konnte hingegen sogar gegenüber der MPC ohne Beobachter leicht verbessert werden, was einen sehr gut rekonstruierten Verkehrszustand vermuten lässt. Mit zusätzlicher Integration der realistischen netzwerkinduzierten Totzeiten ändert sich das Ergebnisbild auffallend. In keinem der ausgewerteten Kriterien kann die zuvor erreichte Güte ohne derartig hohe Übertragungslatenzen gehalten werden. Stattdessen sind die Ergebnisse mit dem erheblich schlechteren Bestandsverfahren vergleichbar. Als Beispiel zeigt sich hinsichtlich der durchschnittlichen Wartezeit $\bar{t}_w$ eine Verschlechterung hervorgerufen durch die Latenzen von weniger als 17 s bei Variante #1 zu fast 27 s bei Variante #4. Die zusätzliche Verzögerung sowie die Abweichungen zwischen ermitteltem und tatsächlichem Verkehrszustand führen zu Fehlinterpretationen der Verkehrssituation, sodass bei derartigen Latenzen nicht die optimale Kombination von LSA-Phasen und Schaltzeitpunkten ermittelt wird. Um die Verteilung der gezeigten Durchschnittsergebnisse zu verdeutlichen, werden in Abbildung 5-15 Boxplots der Wartezeiten und der sog. Verlustzeiten gesondert dargestellt. In SUMO beschreibt die Verlustzeit t_{TL} (im Englischen Time Loss) jenen Zeitverlust für eine zurückgelegte Strecke, welcher durch Unterschreiten der Idealgeschwindigkeit verloren wird. Dabei ist unerheblich, weshalb die Geschwindigkeit gedrosselt wurde (z. B. LSA oder stockender Verkehr) [DLR24].

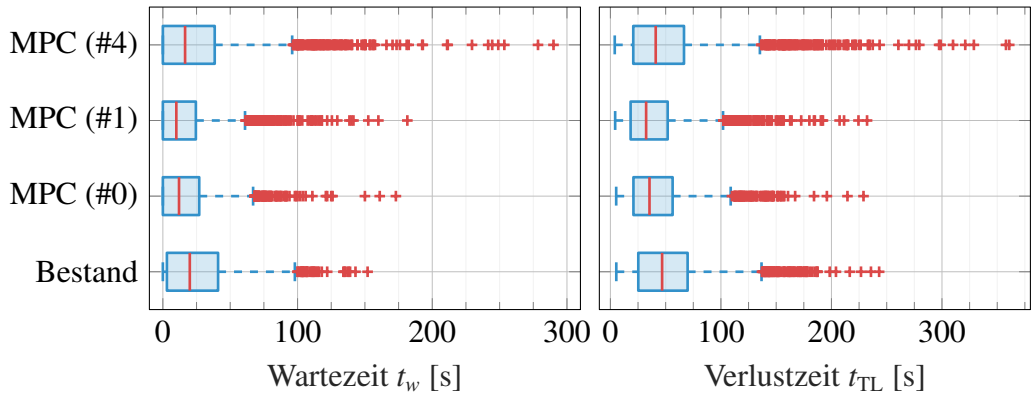


Abbildung 5-15: *Warte- und Verlustzeitverteilung zur Beurteilung des Verkehrsrekonstruktionseinflusses*

In Bezug auf die Wartezeitverteilung lassen sich auch für die Varianten mit Schätzer analoge Aussagen wie bereits anhand von Abbildung 5-9 abgeleitet treffen. So ist die grundsätzliche Verteilung der Wartezeiten der MPC inkl. Beobachter und mit optimalen Latenzen (Simulationsvariante #1) deutlich in den unteren Wertebereich verschoben. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Ausreißer des Bestandsverfahrens geringere Maximalwerte aufweisen. Begründet liegt dieses Phänomen in den festen Umläufen des Bestands-

verfahrens, welche zyklisch sämtliche Fahrtrichtungen berücksichtigen. Bspw. ergeben sich in diesem Verkehrsszenario bei hohen netzwerkinduzierten Totzeiten (Variante #4) kumulierte Wartezeiten von bis zu 290 s. Ohne derartige Latenzen zeigen sich bei der MPC nicht diese auffallenden Werte, was auf eine schlechtere Abstimmung der LSA-Signale zum vorliegenden Verkehrszustand zurückzuführen ist. Die restlichen Merkmale des Boxplots der Simulationsvariante #4 sind wie der Durchschnittswert wiederum mit denen des Bestandsverfahrens vergleichbar. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bzgl. der Verlustzeiten, wobei interessanterweise die Ausreißer der MPC-Simulationsvarianten #0 und #1 unterhalb derer des Bestandsverfahrens liegen. Die Erklärung für diese Beobachtung ist in der Definition der Wartezeit zu finden, die sich erst bei Stillstand der VTN inkrementiert. Im Anhang sind in Abbildung A3-2 und A3-3 weitere Boxplots aufgeführt, die einerseits die Länge der jeweils zurückgelegten Fahrten zeigen und andererseits die Fahrtdauern sowie die damit verbundenen Durchschnittsgeschwindigkeiten beschreiben. Anhand dieser Verteilungen wird die Überlegenheit der MPC ohne hohe Latenzen nochmals bestätigt, zeigt aber auch die Annäherung an das Bestandsverfahren, sobald die netzwerkinduzierten Totzeiten zunehmen.

Der letzte Untersuchungsgegenstand ist der Umgang mit auftretendem Fußverkehr und die Frage, ob und inwieweit die entwickelte MPC mithilfe von Parametervariationen gezielt Einfluss auf entsprechende Merkmale wie Fußverkehrswartezeiten $t_{w,\mathrm{Ped}}$ nehmen kann. Damit endet allerdings auch der Vergleich mit dem Bestandsverfahren, weil die bislang realisierte Umsetzung mit LiSuM nicht spezifisch auf sensierten Fußverkehr regieren kann[63]. Wie eingangs erwähnt, ist das Fußverkehrsaufkommen realen Aufzeichnungen entnommen und die dabei zu beobachtende Aufteilung auf die LSA des Systems in der folgenden Abbildung 5-16 aufgetragen (vgl. Abbildung 5-2).

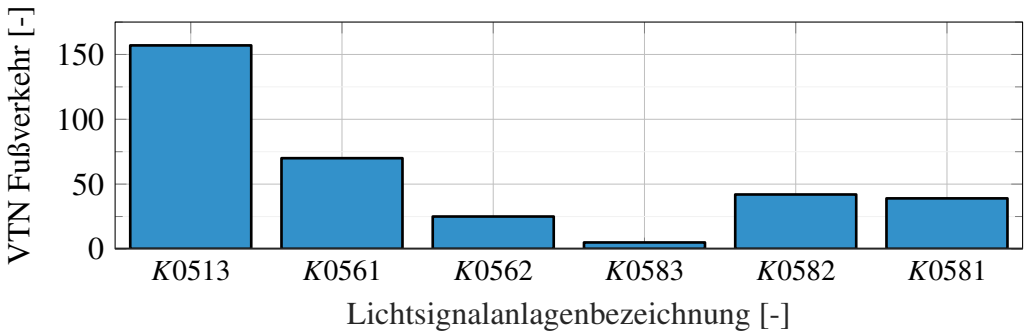


Abbildung 5-16: *Örtliche Verteilung des morgendlichen Fußverkehrs auf die LSA innerhalb des PPS-Testgebiets*

[63] Die Simulationen weisen unrealistisch schlechte Ergebnisse bzgl. der Fußverkehrswartezeiten auf, weshalb sie nicht weiter verwendet werden.

Offensichtlich unterscheiden sich die Kreuzungen innerhalb des Verkehrssystems enorm bzgl. des Fußverkehrsaufkommens, sodass bspw. in Nähe der Autobahn am Knotenpunkt *K*0583 lediglich fünf Passanten in den zwanzig Minuten ab 7:00 Uhr den Melder betätigten. Anders dagegen ist die Situation im urbanen Bereich um die Schlosskreuzung (*K*0513) mit über 150 Meldungen des Fußverkehrs, was wiederum durch die angrenzenden Schulen und deren Beginn bedingt ist. Zur Verdeutlichung der zeitlichen Verteilung des Fußverkehrs innerhalb der Simulationsdauer ist in Abbildung 5-17 ein minütlich aggregiertes Histogramm skizziert, welches zusätzlich um die Aufteilung bzgl. der drei genutzten Furten ergänzt ist (vgl. Abbildung A2-1).

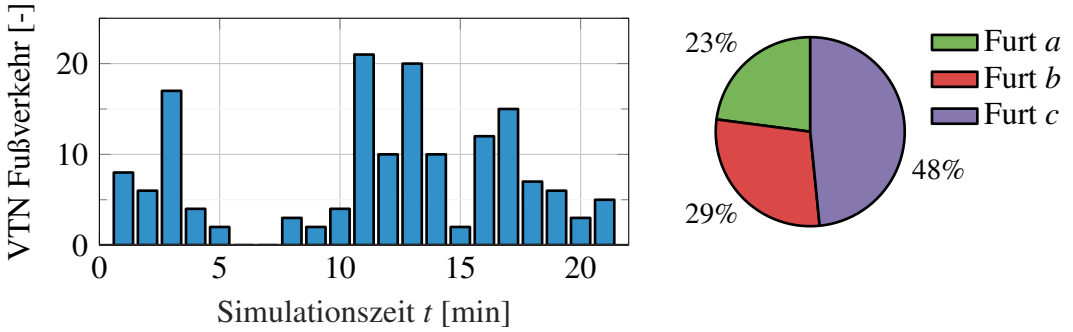


Abbildung 5-17: *Fußverkehrsnachfrage der Schlosskreuzung (K0513) mit zusätzlicher Furtaufteilung*

Auch hier sind jeweils inhomogene Verteilungen zu verzeichnen, welche die Komplexität des betrachteten Verkehrsszenarios erhöhen. Der Fußverkehr stellt eine oftmals nicht mit den Straßenverkehrsströmen gleichzeitig zu vereinbarende Komponente dar, was Kompromissbildungen in der Entscheidungsfindung erforderlich macht. Dementsprechend signifikant sind die Auswirkungen des neu zusammengestellten Verkehrsszenarios auf die Regelgüte verglichen mit der Situation ohne Fußverkehr.
Die Abbildung 5-18 gibt nach bekanntem Muster einen Überblick über die Simulationsergebnisse. Hierbei wird die Netzwerkkommunikation im ersten Schritt zunächst als optimal angenommen, sodass die Simulationsvarianten #1, #2 und #3 verglichen werden. Die Erhöhung der Priorisierung des Fußverkehrs äußert sich dabei in dem Anstieg der Gewichte der entsprechenden Kriterien *K5* und *K6* von zusammen gut 20 % im Standardfall auf 63 %. Aus offensichtlichen Gründen ist das Nichtvorhandensein der durchschnittlichen Wartezeit für den Fußverkehr $\bar{t}_{w,\mathrm{Ped}}$ der größte Unterschied. Die Hinzunahme des Fußverkehrsaufkommens äußert sich erwartungsgemäß in deutlichen Qualitätseinbußen in allen Kriterien aufgrund des zusätzlichen Konflikts der zu bewältigenden Verkehrssituation. Unabhängig von der Gewichtung des Fußverkehrs steigt die Gesamtreisezeit der VTN noch am moderatesten um gut 10 %. Dagegen verschlechtern sich die Ergebnisse der Wartezeiten mit mindestens 45 % wesentlich stärker, sodass die VTN im Schnitt mehr als

7 s länger halten bei gleichzeitigem Anstieg der Haltevorgänge auf durchschnittlich fast 1,6 Stopps.

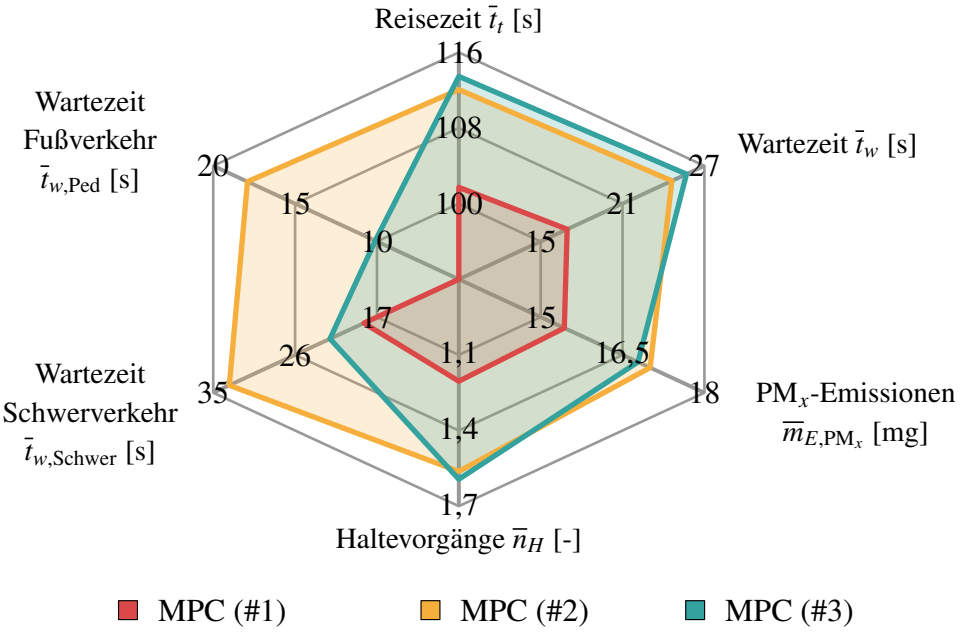


Abbildung 5-18: Übersicht der durchschnittlichen Simulationsergebnisse bzgl. des Einflusses und der gezielten Priorisierung des Fußverkehrs

Mit steigender Fußverkehrspriorisierung verschlechtern sich die Resultate nur unwesentlich, wobei der gewünschte Effekt bzgl. der Fußverkehrswartezeit $\bar{t}_{w,\mathrm{Ped}}$ deutlich ausgeprägt ist. D. h. durch die gewählte Gewichtung kann die Wartezeit des Fußverkehrs um fast 7 s reduziert werden, was einer Abnahme um 44 % entspricht. Zusätzlich ist in diesem Verkehrsszenario auch eine positive Auswirkung auf den Schwerverkehr zu beobachten, sodass auch die Emissionsbilanz geringfügig besser ist als für Variante #2. Bei Betrachtung einer optimalen Kommunikationsstruktur resultiert die Erhöhung der Gewichtungsparameter $g_{K,5}$ und $g_{K,6}$ damit wie beabsichtigt in einer signifikanten Reduktion der Wartezeit des Fußverkehrs.

Da in [FGSV15b] nicht die durchschnittliche Wartezeit, sondern deren Maximum als hauptsächliches Bewertungskriterium verwendet wird, soll dieses Kriterium hier zusätzlich untersucht werden. In den korrespondierenden Simulationen sind im Durchschnitt der Randomisierungen maximale Wartezeiten von $\bar{t}_{w,\mathrm{Ped,max}} = 63{,}6\,\mathrm{s}$ für Variante #2 und $\bar{t}_{w,\mathrm{Ped,max}} = 59{,}5\,\mathrm{s}$ für Variante #3 aufgetreten, sodass der Unterschied im Vergleich zu dem Unterschied der Durchschnittswerte relativ klein ist. Dieses Phänomen ist vor allem auf die bereits in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten Schwellenwerte $t_{w,\mathrm{th,Ped}}$ zurückzuführen, die über feste Grenzwerte gerade diese Maximalwerte limitieren. Jeder Kreuzung kann ein individueller Grenzwert zugeordnet werden, sodass sich die maximale Wartezeit des Fußverkehrs im Gesamtsystem zwangsläufig am größten Schwellenwert orientiert. Im

PPS ist dieser für Kreuzung $K0581$ mit vorgegebenen $t_{w,\text{th,Ped},K0581} = 65\,\text{s}$ festgelegt. Da dementsprechend keine längeren Wartezeiten zu erwarten sind, wird in dieser Auswertung auch für den Fußverkehr das Kriterium der durchschnittlichen Wartezeit genutzt.
Neben der isolierten Betrachtung der Einflussfaktoren des Netzwerks und des Fußverkehrs ist zusätzlich deren Kombination in den Simulationsvarianten #5 und #6 untersucht worden, wobei wiederum die eingesetzte Fußverkehrspriorisierung den einzigen Unterschied darstellt. Die Resultate dieser Simulationen, die aufgrund ihrer Komplexität der Realsituation am nächsten kommen, sind in dem Spinnendiagramm aus Abbildung 5-19 zusammengefasst.

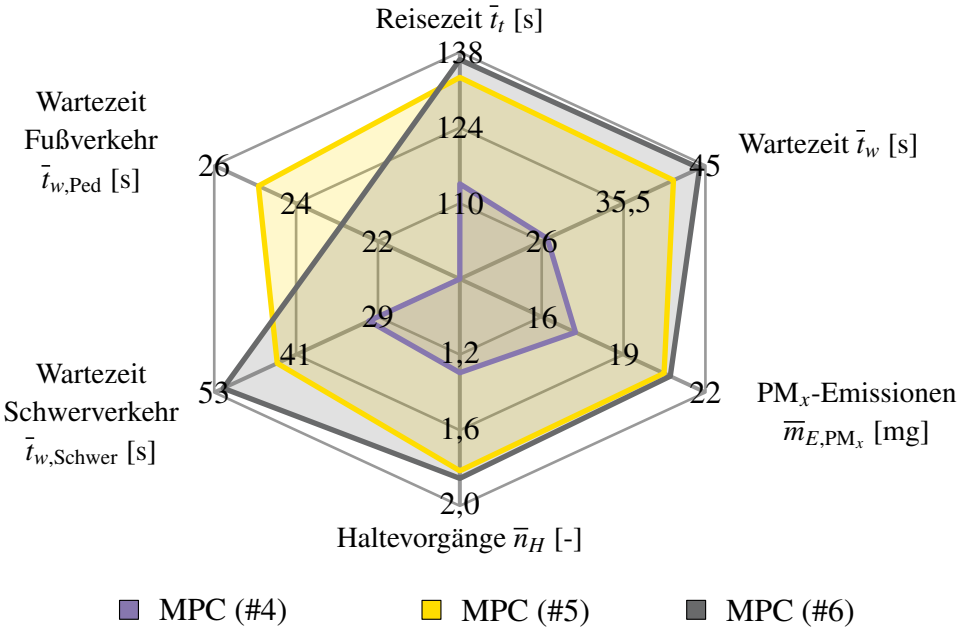


Abbildung 5-19: Übersicht der durchschnittlichen Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung realistischer Latenzen und Fußverkehr

Auf den ersten Blick sind viele Parallelen zur vorangehenden Grafik mit idealer Netzwerkkommunikation zu erkennen. Die Variante ohne Fußverkehrsaufkommen ist den gegenübergestellten jeweils in allen Bereichen deutlich überlegen. So steigt bspw. die durchschnittliche Anzahl an Haltevorgängen $\overline{n}_H$ von knapp 1,3 auf jeweils gut 1,8 und demnach um mindestens 40 %. Allerdings wird der Schwerverkehr im Fall der Fußverkehrspriorisierung nicht mehr besser bewältigt als im Standardfall, was die Emissionen entsprechend beeinflusst, sodass ein Unterschied zur optimalen Kommunikation zu bemerken ist. Als wichtiger Aspekt bleibt wiederum festzuhalten, dass der gewünschte Effekt auf den Fußverkehr erzielt werden konnte. Die Reduktion um 9 % fällt indessen deutlich geringer aus als zuvor beobachtet, sodass hier erneut die verschlechterte Netzwerkkommunikation als Erklärung herangezogen werden kann. Um diesen Vergleich bzgl. des Netzwerkeinflusses mit Fußverkehr noch deutlicher einordnen zu können, ist im Anhang zusätzlich die

zugehörige Grafik mit Abbildung A3-4 aufgeführt.
Als Fazit der angestellten Simulationsstudien lassen sich einige interessante Beobachtungen festhalten und auf deren Basis gewisse Vermutungen bzgl. der Realumsetzung formulieren. Der erste wichtige Punkt ist der festgestellte sehr geringe Einfluss der Verkehrsrekonstruktion auf die allgemeine Regelgüte. Im Vergleich der Simulationsvarianten ohne und mit integrierter Zustandsschätzung (#0 und #1) hat sich kein Bewertungskriterium signifikant verschlechtert, sodass die Qualität der Verkehrsrekonstruktion als geeignet für das Regelungsvorhaben zu bewerten ist. Ein anderer bemerkenswerter Aspekt ist der dagegen sehr große Effekt der zugrunde liegenden Kommunikationsvoraussetzungen. Was sich bereits an isolierten LSA angedeutet hat, kann auf ganze Verkehrssysteme mit einer Vielzahl von Anlagen ausgeweitet werden. Die resultierende Verschlechterung bei hohen aber realistischen netzwerkinduzierten Totzeiten liefert Ergebnisse, die im Bereich derer des Bestandsverfahrens liegen. Die positiven Auswirkungen der Umstellung auf die entwickelte MPC-basierte Regelung, die ohne Latenzen als deutlich überlegen zu bewerten ist, werden durch diesen Effekt nahezu vollständig kompensiert.
Folglich ist als Erwartung für die Realumsetzung ableitbar, dass sich ausgewählte Kriterien gezielt verbessern lassen, die grundsätzliche Qualität aber vergleichbar mit der des Bestandsverfahrens bleibt. Darüber hinaus ist die Integration des Fußverkehrs innerhalb der Simulationen der entwickelten LSA-Regelung erfolgreich getestet worden. Die Wirksamkeit definierter Schranken konnte ebenso wie der gezielte Eingriff über Parametrierungen der Regelung analog zum vorherigen Abschnitt nachgewiesen werden. Es lässt sich jedoch eine Tendenz der Abhängigkeit dieser Anpassungsfähigkeit von den auftretenden Latenzen vermuten, welche es daher zukünftig noch weiter zu untersuchen gilt.

6 Realumsetzung des LSA-Regelungssystems

In den vorherigen Kapiteln wurde die Entwicklung und schließlich der breite simulative Test und Vergleich des mehrstufigen modellprädiktiven LSA-Regelungssystems beschrieben, die sich stets an dem übergeordneten Ziel der Realumsetzung im PPS orientiert hat. Dabei wurde einerseits auf die Übertragbarkeit des Ansatzes geachtet, indem bspw. Beobachter- und Regelungskonzepte generisch auch auf andere vergleichbare Verkehrssysteme übertragen werden können. Andererseits wurden vorliegende Voraussetzungen des verknüpften Forschungsprojekts im Entwicklungsprozess derart berücksichtigt, dass die Anpassung auf spezifische Vorgaben direkt über Parametrierungen umgesetzt werden können. Als ein Beispiel sind die Wartezeitschwellen des Fußverkehrs zu nennen, welche exemplarisch in Kapitel 4 vorgestellt wurden. Ebenso sind die durchgeführten Simulationsstudien sowohl an grundsätzlichen Fragestellungen bzgl. der Leistungsfähigkeit von LSA-Regelungen als auch an den Erfahrungen des Projekts wie den netzwerkinduzierten Totzeiten ausgerichtet worden, um die realen Feldtests als besonderes Merkmal dieser Arbeit vorzubereiten. Daher thematisiert dieses Kapitel die Umsetzung und Analyse der entwickelten LSA-Regelung im Realumfeld sowie insbesondere den Ablauf dieser prototypischen Realisierung. Bevor die Inbetriebnahme der prototypischen LSA-Regelung und abschließend die Ergebnisse der Realumsetzung im PPS behandelt werden, folgt als Einleitung mit Abbildung 6-1 eine Übersicht des Systemaufbaus, welcher innerhalb des PPS im Feld implementiert und erprobt wurde.

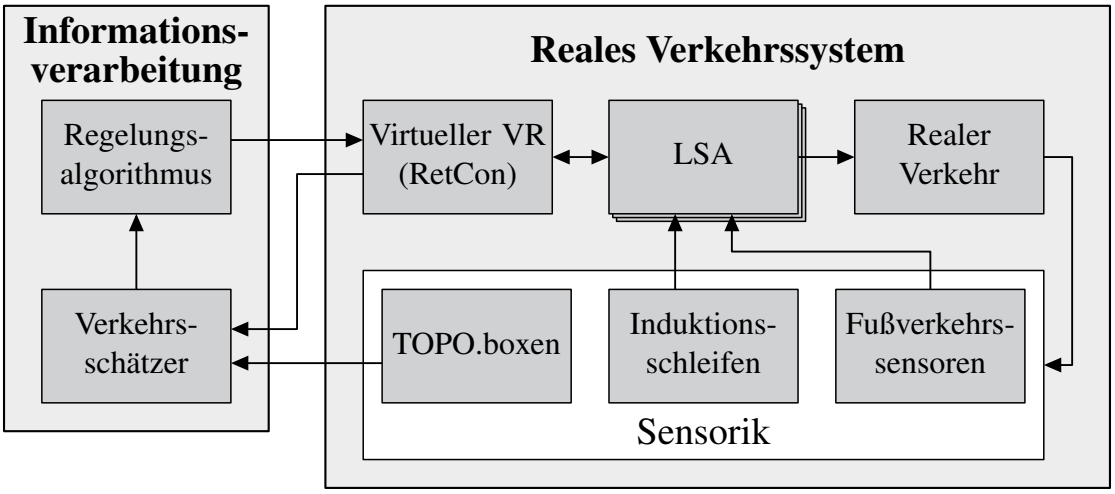


Abbildung 6-1: *Geschlossener Regelkreis des realen Verkehrsregelungssystems innerhalb der Realumsetzung*

Dieser Aufbau weist einige Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede zu der aus Abbildung 5-1 bekannten Darstellung auf, die sich vornehmlich aus Spezifikationen des PPS und dessen Testgebiet ergeben. Der hier dargestellte Teil der Informationsverarbeitung

entspricht als Hauptuntersuchungsgegenstand dem der Entwicklungs- bzw. Simulationsphase. Die im Simulationsframework von den LSA abgegrenzte Netzwerkkommunikation bzw. die Ansteuerung der individuellen LSA wird im realen Umfeld durch einen virtuellen VR koordiniert, der im PPS als LSA-Zentrale fungierte. Um im Zusammenhang mit den (infrastrukturellen) Rahmenbedingungen des nächsten Abschnitts die unterschiedliche Systemintegration der einzelnen Sensorarten zu erläutern, sind in dem Strukturbild die genutzten Sensoren der TOPO.box-Systeme, Induktionsschleifen und Fußverkehrssensoren separat skizziert und ebenfalls die abweichenden Signalflüsse hervorgehoben.

6.1 Voraussetzungen der Feldtests

Ein nicht zu vernachlässigender Teil einer geplanten intelligenten LSA-Regelung im Feld ist die Vorbereitung des Verkehrssystems inklusive der vorangestellten Inbetriebnahme einzelner Komponenten und schließlich des Gesamtsystems. Auch bei einer prototypischen Umsetzung im Rahmen eines Forschungsprojekts sollte gemäß dem zum V-Modell mechatronischer Systeme vorgegangen werden [VDI21], welches im Anschluss an die Implementierung die Schritte der Systemintegration und Verifikation sowie eine Validierung vorsieht. Dementsprechend dient dieser Abschnitt zunächst der Klärung der speziellen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen im PPS, bevor die eigentliche Inbetriebnahme und die daraus abgeleiteten Sicherheitsmaßnahmen erläutert werden.

6.1.1 Infrastrukturelle und projektspezifische Rahmenbedingungen

Die Beschreibung des entwickelten Regelungssystems in Kapitel 4 ist generisch formuliert, um eine Übertragbarkeit auf verschiedene Verkehrssysteme zu ermöglichen. In den Überlegungen zur Rekonstruktion des aktuellen Verkehrszustands spielt die grundlegende Sensorabdeckung daher eine gewichtige Rolle, da sie entscheidend für die Qualität und Genauigkeit des digitalen Abbilds ist. Die optimale Nutzung und Erweiterung der vorhandenen Infrastruktur trägt zur effizienten Umsetzung neuartiger Konzepte bei, sodass im PPS die Induktionsschleifen in der Umgebung aller sechs LSA zentrale Elemente der Verkehrsrekonstruktion darstellen. Deren Anordnung um die jeweilige LSA ist stets individuell abgestimmt auf die LSA-Geometrie (vgl. Abbildungen A2-1 und A2-2), sodass die Lagesituation spezifisch im Beobachter umgesetzt ist. Um diese Induktionsschleifen bestmöglich zu komplementieren, wurden insgesamt 19 TOPO.boxen zwischen den LSA und an den Systemgrenzen positioniert. Die finale Systemabdeckung nach mehreren Iterationen der Sensorpositionierung wurde bereits in Abbildung 5-2 skizziert. Diese strategische Positionierung der zusätzlichen Sensorik in Schloß Neuhaus sorgt einerseits für die Fahrzeugtypunterscheidung und andererseits ermöglicht sie einen längeren Prädiktionshorizont. Bei alleiniger Nutzung der Induktionsschleifen wäre die Verkehrs-

vorhersage bzgl. des Eingangsflusses auf den Kreuzungsnahbereich und somit wenige Sekunden beschränkt, was durch die Zusatzsensorik ausgeweitet wird. Als weiteres Element verfügen die LSA über Fußverkehrstaster, mit deren Hilfe eine Freigabe definierter Spuren direkt angefordert werden kann. An der Schlosskreuzung wurde zusätzlich eine Hybridkamera an einer Spur installiert, welche gesondert die Anzahl wartender Personen je Straßenseite übermitteln kann. Genau wie bei den TOPO.box-Systemen teilt der Sensor dabei eventbasiert über MQTT seine Informationen mit einem Server des Sensorherstellers, von dem die Daten zyklisch (mehrfach pro Sekunde) von der Informationsverarbeitung abgerufen werden. Die unterschiedliche Anbindung der Komponenten im PPS ist in der folgenden Abbildung 6-2 dargestellt.

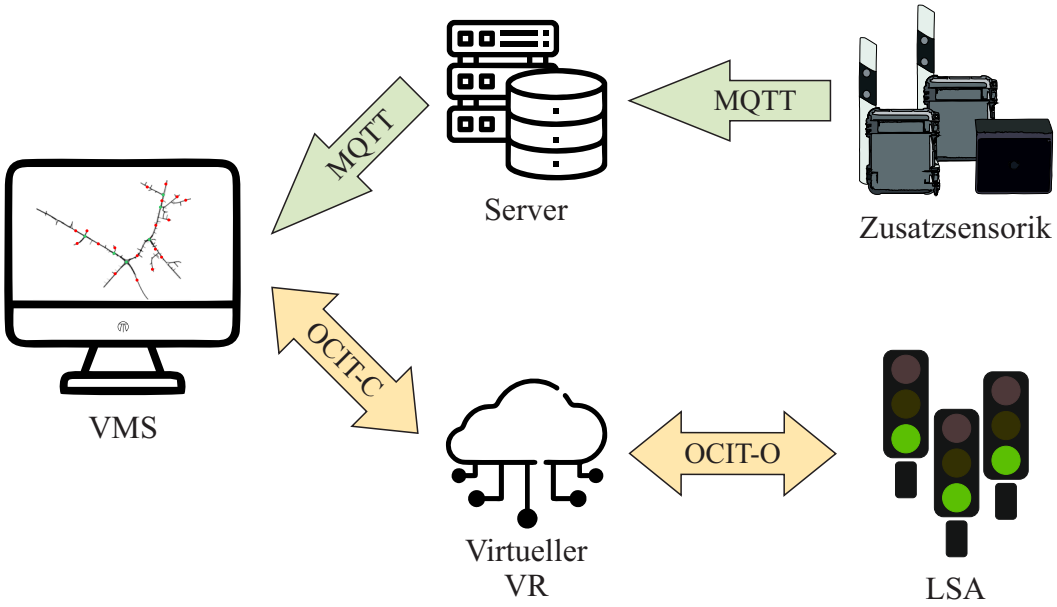


Abbildung 6-2: *Umgesetzte Kommunikationsarchitektur zur LSA-Regelung im PPS*

Die Zusatzsensorik arbeitet dabei mithilfe von Mobilfunkmodulen nach dem „Fire-and-Forget“-Prinzip, also mit der Ouality of Service (QoS)-Stufe 0[64], damit der Gerätespeicher möglichst wenig belastet wird und die Latenzen so gering wie möglich gehalten werden [IBM99; PPS22]. Für den gesamten grün markierten Pfad resultieren bis auf Ausreißer Latenzen von deutlich unter einer Sekunde, was bereits in Abbildung 5-5 anhand von Beispieltests gezeigt wurde. Die LSA-Daten wie Lichtsignale oder auch Induktionsschleifenzustände werden über den VR als LSA-Zentrale sekündlich von der entwickelten Informationsverarbeitung in der Rolle des VMS[65] abgerufen. Dabei stellen die sechs LSA Outstations dar, sodass bei dem Austausch zwischen VR und LSA das OCIT-O-Protokoll verwendet wird. Im Gegensatz dazu kommunizieren der VR und das VMS über

[64] Der Absender erwartet hier keine Bestätigung oder Garantie für die Nachrichtenzustellung.
[65] Die Bezeichnung des entwickelten LSA-Regelungssystems als VMS ist angelehnt an die üblichen OCIT-Bezeichnungen.

OCIT-C (siehe Abschnitt 2.2.3). Da die angedachte Lösung nicht den Anforderungen des gleichzeitigen Abrufs mehrerer LSA ohne Störungen wie Datenpaketverluste genügte und die Anbindung des städtischen VR nicht stabilisiert werden konnte, wurde eine Alternativlösung im Projekt erarbeitet. Zunächst wurde der physische VR durch einen virtuellen VR ersetzt und in Zusammenarbeit mit Stührenberg für den orange markierten Pfad kurzfristig ein neuer OCIT-Client für den Datenaustausch entwickelt. Die resultierenden Latenzen des reinen Datenabrufs wurden auf einen Bereich von 3 s bis 4 s reduziert[66]. Bei der Alternativlösung ist nur ein kleiner Teil der Latenzen auf die Mobilfunkverbindung zurückzuführen und der eigentliche Grund wird in der Zwischenverarbeitung durch den VR vermutet. Diese Problemstellung wird als derzeitiger Untersuchungsgegenstand von Stührenberg analysiert, um die Verzögerungen weiter zu minimieren[67]. Für die Übertragung der Stellgrößen an die LSA wurden im PPS neue Anwenderprogramm (AP)-Werte definiert, die über den OCIT-Standard austauschbar sind. Für jeden Teilknoten der LSA konnten demnach Wunsch- und Zielphasen sowie Auslöser zur Freigabe des Fußverkehrs durch die Regelung vorgegeben werden [PPS22]. Die Wunschphase unterscheidet sich dadurch von der Zielphase, dass sie unmittelbar durch das Steuergerät appliziert wird (vgl. Anwendungszeitleiste in Abbildung 4-8). Dahingegen bereitet die Zielphase lediglich die vermutete nächste Umschaltung, wie z. B. über das Beenden einer Fußverkehrsfreigabe, vor. Sofern demnach innerhalb der MPC-Optimierung ein Phasenwechsel berechnet wurde, der nicht sofort umgesetzt werden soll, kann er auf diese Weise vorgemerkt werden. Die Verzögerung bis zum Eintreffen des Stellsignals an der LSA beträgt wiederum ca. 3 s, weshalb in den Simulationen mithilfe der Werte in Gleichung (5-1) vergleichbare netzwerkinduzierte Totzeiten getestet wurden. Damit das entwickelte Regelungssystem auch unabhängig von Softwarelizenzen dauerhaft auf beliebigen Linux-Plattformen betrieben werden kann, wurde schließlich die zuvor simulativ getestete MATLAB-Anwendung in ein eigenständig lauffähiges Programm eingebettet. Dieses zusammengefasste Framework enthält alle genannten Schnittstellen, kann nachträglich vom Nutzer über Parametervariationen angepasst werden und ist demnach variabel einsetzbar. Trotzdem bietet diese Art der Umsetzung noch Optimierungspotential bspw. hinsichtlich der Ausführungslaufzeit, ist jedoch ausreichend für diese prototypische Anwendung.

[66] Die Variante des Datenaustauschs über den physischen VR lieferte instabil Daten mit Verzögerungen von über 7 s.

[67] Im PPS war für die Realumsetzung zwingend der OCIT-Standard vorgesehen, was eine Direktankopplung an das VMS oder vergleichbare Alternativen nicht ermöglichte.

6.1.2 Inbetriebnahme

Der im Zuge des PPS durchgeführte Ablauf der Inbetriebnahme des Feldversuchs ist in der folgenden Abbildung 6-3 dargestellt und soll dabei helfen, geplantes und tatsächliches Vorgehen zu vergleichen sowie situative Herausforderungen und Probleme gezielt herauszustellen.

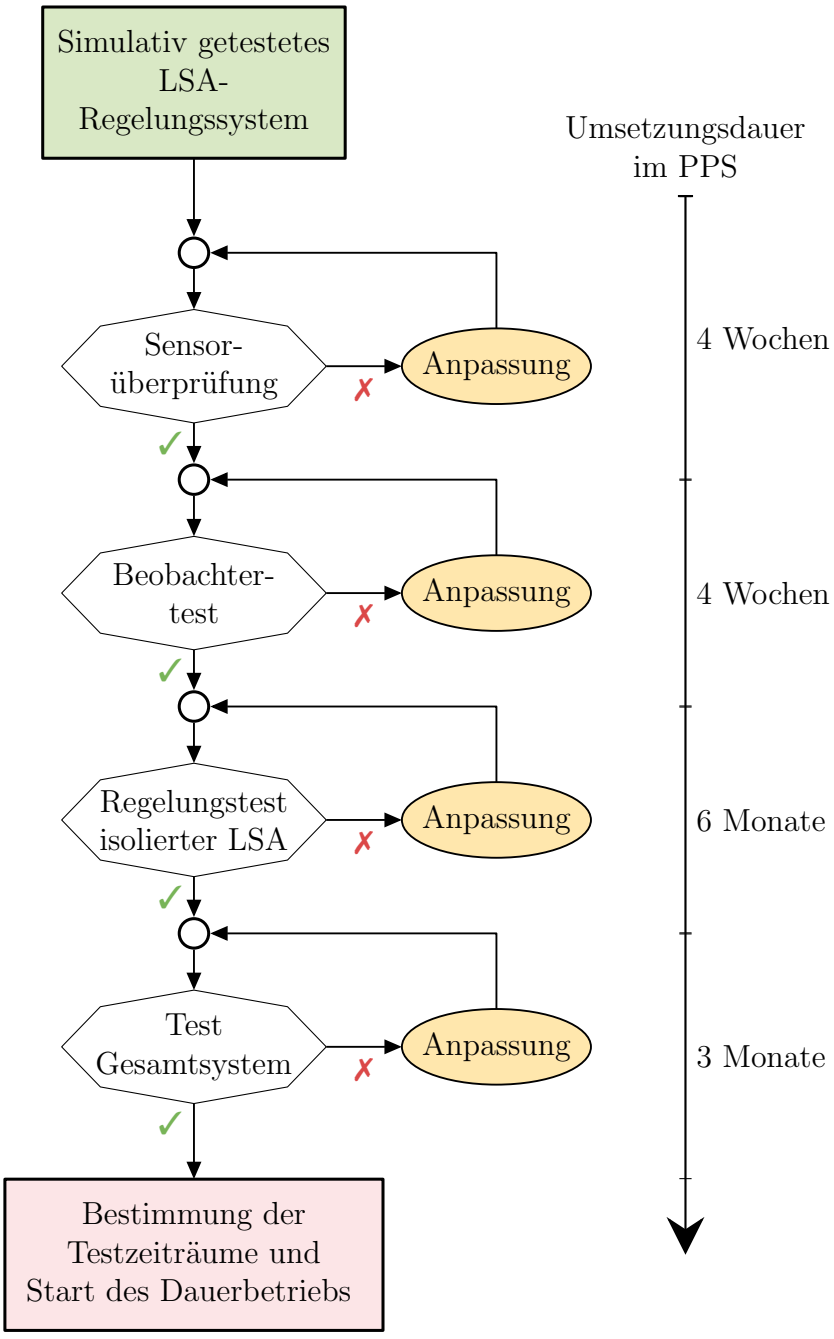


Abbildung 6-3: Ablauf und Vorgehen der Inbetriebnahme des entwickelten LSA-Regelungssystems im Feld

Das gezeigte mehrstufige Vorgehensschema, deren Aspekte im Folgenden detaillierter erläutert werden, beginnt mit dem erfolgreich simulativ getesteten LSA-Regelungssystem. Dementsprechend sind bereits einige wichtige Entwicklungsschritte als abgeschlossen betrachtet wie bspw. der Software-in-the-Loop (SiL)-Test der Regelung in Verbindung mit den LSA-Steuergeräten.
Über die unlängst in Kapitel 5 erwähnte Python-Middleware, mit der auch das Bestandsverfahren simuliert werden konnte, wurde die generelle Ansteuerung der LSA-Signale mit der Schaltungslogik der Steuergeräte abgestimmt und verifiziert. U. a. aufgrund der eingeschränkten zeitlichen Rahmenbedingungen wurde allerdings auf einen Hardware-in-the-Loop (HiL)-Test ebenjener verzichtet. Damit dennoch auch die tatsächlichen Dauern der jeweiligen Umsetzungsschritte nachvollzogen werden können, sind diese ebenfalls in dem Ablaufdiagramm angegeben[68].

Sensorüberprüfung

Noch vor der Prüfung der entwickelten Komponenten der Online-Verkehrsrekonstruktion und der Regelung galt es zunächst, die Funktion und den generellen Informationsabruf der verwendeten Sensoren sicherzustellen. Während die genaue Umsetzung und deren Rahmenbedingungen im nächsten Abschnitt thematisiert werden, soll an dieser Stelle eine exemplarische Anpassung wie im skizzierten Ablauf beschrieben werden. In der studentischen Arbeit [Sch21] wurde in Kooperation mit dem Projektpartner Stührenberg eine Software ausgearbeitet, welche u. a. Verkehrsdaten einzelner LSA abgerufen vom virtuellen Verkehrsrechner direkt auf Plausibilität überprüft und Auffälligkeiten aufdeckt. Dementsprechend hilft dieses Werkzeug bei der Identifikation schlecht parametrierter oder defekter Induktionsschleifen. Durch die Anwendung konnten zwei defekte Schleifen ausgemacht und ausgetauscht sowie bei einer weiteren die Empfindlichkeit angepasst werden. Die eingangs fehlerhafte Parametrierung der Empfindlichkeit hat bspw. durch den Gegenverkehr ausgelöste Fehldetektionen hervorgerufen. Aus den ersten gewonnenen Kenntnissen bzgl. der Störungs- und Ausfallthematik wurden Ideen für Maßnahmen zur Kompensation und zusätzliche Rückfallebenen entwickelt, die später zusammengefasst in diesem Abschnitt beschrieben werden. Das Vorgehen bei den weiteren Sensoren war ähnlich, sodass erst nach bestandener Kontrolle aller verwendeten Sensoren mit dem folgenden Schritt des Beobachtertests begonnen wurde.

[68] Es handelt sich dabei nicht um die geplanten, sondern die im PPS realisierten Zeitspannen.

Beobachtertest

Wie beim simulativen Test wurde der Beobachter in der ersten Betriebsphase zunächst an einer einzelnen Anlage (*K*0583) am westlichen Rand des Bilanzraums (siehe Abbildung 5-2) untersucht, damit auftretende Phänomene isoliert betrachtet werden konnten. Neben der grundsätzlichen Evaluation des Informationsflusses der eingespeisten Messdaten wurde ebenso das Verkehrsbild auf Plausibilität geprüft und daran orientierte Kontrollmechanismen konzipiert. Als weiteres wichtiges Element wurde die Rekonstruktion mit Kameraaufnahmen der Verkehrssituation verglichen, um u. a. die korrekte Synchronisation und Abstimmung der Datenquellen sicherzustellen. Aufgrund der durchgeführten Vorarbeiten, vor allem mithilfe der virtuellen LSA-Steuergeräte, war der Integrationsaufwand bei der reinen Datenabfrage vom VR gering (vgl. Abbildung 6-2). Nachfolgend zum planmäßigen Dauerbetrieb des Beobachters an einer isolierten Anlage sollte das reduzierte Verkehrssystem schrittweise auf das Gesamtsystem ausgeweitet werden. An dieser Stelle wurden die Schwachstellen der zunächst bereitgestellten OCIT-Kommunikationsstruktur deutlich. Entgegen der Spezifikation ermöglichte der Einsatz des städtischen VR in Verbindung mit der zur Verfügung gestellten Software keinen stabilen Datenabruf für mehrere LSA. Als Folge wurde der erweiterte Beobachtertest lediglich mit zwei benachbarten Anlagen durchgeführt und anschließend an dem Kommunikationsproblem gearbeitet.
Da die auftretenden Fehler und Mängel auch mit Hilfe des Herstellers des städtischen VR innerhalb von drei Monaten nicht behoben werden konnten und der Projekterfolg in akuter Gefahr stand, wurde als Alternative der virtuelle VR der Firma Stührenberg eingesetzt und eigens ein auf das Projektvorhaben abgestimmter OCIT-Client entwickelt. Mithilfe dieses Konzepts konnte schließlich deutlich später als planmäßig mit dem Regelungstest isolierter LSA gestartet werden.

Regelungstest isolierter LSA

Als Grundvoraussetzung wurde die erste Testanlage (erneut LSA *K*0583) über den virtuellen VR in ein neu entwickeltes und für das PPS dediziertes Signalprogramm geschaltet, welches anstelle des Standardphasenplans einen innerhalb des Projekts erarbeiteten Phasenplan nutzt. Die Anpassung der Phasenpläne, welche im Anhang durch die Abbildungen A2-5 und A2-6 der exemplarischen Pläne für die Schlosskreuzung dargestellt ist, ermöglicht es, noch flexibler auf die jeweilige Verkehrssituation einzugehen. Als Beispiel kann auf diese Weise durch verschiedene AP-Werte die Phase 123 situativ mit oder ohne die Furt *c* freigegeben werden. Generell agieren die beiden Signalprogramme dabei aber ohne externen Eingriff durch die entwickelte Regelung identisch. Neben weiteren

optionalen Phasen aufgrund eines neuen Phasenplans liegt der Unterschied der Signalprogramme demnach in der Ermöglichung externer Schaltwünsche über die bereits genannten AP-Werte.
Der eigentliche Test der Entwicklung wurde anschließend mit einem sog. *Open-Loop-Test* gestartet. Bei diesem Open-Loop-Test wurde das Verkehrsgeschehen in Echtzeit beobachtet und die Stellsignale entsprechend der Verkehrssituation unmittelbar berechnet, aber lediglich ein Signal zur Überprüfung der Kommunikationsstabilität an die LSA übertragen. Erst im Nachgang an die Durchführung, deren Dauer von wenigen Minuten auf maximal eine Stunde ausgeweitet wurde, sind die aufgezeichneten Stellsignale offline auf Plausibilität überprüft und mit denen des Bestandsverfahrens verglichen worden. Dabei wurden ähnlich wie in Abbildung 5-11 oder in den noch folgenden Abbildungen 6-11 und 6-12 die tatsächlichen Signalverläufe und Füllstände der Zustandsspuren den vorgeschlagenen Phasenwechseln der MPC-basierten Regelung gegenübergestellt. Der Vorteil dieses Vorgehens ist die sicherheitsunkritische Beurteilung der Schnittstellen und der Grundfunktion des entwickelten Regelungsprogramms. Allerdings kann der Regelungseinfluss noch nicht beobachtet werden. Im Anschluss wurde mit steigender Testdauer von wenigen Minuten bis hin zu mehreren Tagen und schließlich Dauertests auch der Regelkreis über das Senden der Stellsignale geschlossen. Bei diesen Dauertests an einer isoliert getesteten LSA kam es in Ausnahmefällen zu Verbindungsabbrüchen der Mobilfunkverbindung, die von wenigen Sekunden bis hin zu mehreren Minuten reichten. Orientiert an derartigen Problemen wurden die nachfolgend beschriebenen Rückfallebenen zunächst erarbeitet sowie direkt implementiert und getestet. In diesen Tests konnten viele Erfahrungen über die Kommunikationsprobleme, aber auch die reale Abstimmung mit dem LSA-Steuergerät gesammelt werden. Dementsprechend konnten sowohl in der Regelung als auch in der neu aufgesetzten Logik der Steuergeräte Fehler behoben werden. Die vollständige Beseitigung derartiger Probleme bedarf umfangreicher Tests und ist im Rahmen eines Forschungsprojekts mit prototypischer Umsetzung nicht realisierbar. Folglich bietet die Detaillierung und Feinabstimmung des Gesamtregelungssystems auch im Hinblick auf die folgende Auswertung des Feldtests zusätzliches Verbesserungspotential.

Test Gesamtregelungssystem

Die bei der Einzelanlage gesammelten Erkenntnisse wurden genutzt, um nach der erfolgreichen Zustandsrekonstruktion des gesamten Verkehrssystems schrittweise die weiteren LSA in den externen Regelungsbetrieb zu überführen. Mithilfe der Rückfallebenen konnte eine Möglichkeit geschaffen werden, trotz der nicht beeinflussbaren Kommunikationsabbrüche als äußere Faktoren die eigene Entwicklung dauerhaft zu testen. Als Ergebnis konnten Testzeiträume für das Bestandsverfahren und die modellprädiktive Regelung de-

finiert werden, deren Beschreibung und Ergebnisse im finalen Abschnitt dieses Kapitels diskutiert werden.

6.1.3 Sicherheitsmaßnahmen und Rückfallebenen

In diesem Abschnitt werden kurz die wichtigsten der entwickelten Mechanismen zur Funktionssicherung des modellprädiktiven LSA-Regelungssystems beschrieben. Die dabei entstandenen Maßnahmen sind an den verschiedenen Herausforderungen der Echtzeit-Regelung im PPS ausgerichtet und sowohl in der Verkehrsrekonstruktion als auch in der eigentlichen Regelung implementiert. Dabei reichen die Konzepte von der einfachen Störungsmitteilung an den Betreiber bis hin zur Aktivierung von hinterlegten Festzeitsteuerungen des lokalen Steuergeräts. Die direkte Mitteilung von Störungen hat sich dabei als besonders wichtig herausgestellt. Über Details innerhalb der Nachricht können die beeinträchtigten Elemente des NCS gezielt überprüft und etwaige Fehler behoben werden.
Die Hauptüberprüfung der Verkehrsrekonstruktion ist die integrierte Plausibilitätsanalyse der verwendeten Sensoren während des Betriebs. Neben Ausfällen und Dauerbelegungen wird ebenso außergewöhnliches Messverhalten[69] identifiziert. Bei Auffälligkeiten wird abhängig von der Sensorinformation und etwaiger Informationsredundanz entweder auf die Daten des korrumpierten Sensors verzichtet oder der aktive Regelungsbetrieb unterbrochen. Eine derartige Unterbrechung ist bspw. dann für eine LSA vorzusehen, wenn eine komplette Fahrtrichtung nicht sensiert werden kann. In diesem Fall ist aufgrund der nicht ausreichenden Kenntnis des Verkehrszustands keine verkehrsabhängige Signalsteuerung mehr möglich. Als bisher nicht umgesetzte Alternative kann ebenso eine zyklische Freigabe der zugehörigen Fahrspur innerhalb der Regelung vorgesehen werden. Wegen der im Projekt realisierten Sensorabdeckung ist ein derartiger Abbruch der LSA-Regelung sehr selten, weshalb diese Maßnahme im Projektverlauf lediglich beim Test der Sicherheitsebenen umgesetzt werden musste. Im Gegensatz dazu wird bei zeitweiligen Verbindungsproblemen einzelner TOPO.box-Systeme deren Funktionalität temporär im TOPO.box-Routing deaktiviert. Als Konsequenz wird u. a. das Anschlussrouting der umliegenden Sensoren modifiziert und entsprechende Fahrzeugrouten erst an den Folgemessstellen angepasst. In Abbildung 6-4 ist eine exemplarische Situation dargestellt, für welche diese Sicherheitsmaßnahme definiert ist. Der Ausfall der gezeigten TOPO.box würde bedeuten, dass für den VTN ausgehend von der zuerst überfahrenen Induktionsschleife eine Folgeroute bis zur folgenden Bemessungsschleife definiert wird und nicht bis zur (defekten) TOPO.box. Die bisherige Fahrzeugklasseninformation wird anschließend ohne erneute Prüfung übernommen. Obgleich der verlorenen Rekonstruktionsqualität wird der

[69] Ein Beispiel war die Fehlklassifikation einer TOPO.box, sodass fast 90 % der VTN als Radverkehr detektiert wurden.

Regelungsbetrieb in diesem Fall nicht zwangsläufig eingestellt, da der Verkehrszustand anhand der Kompensationsmaßnahme weiterhin mit ausreichender Genauigkeit geschätzt werden kann.

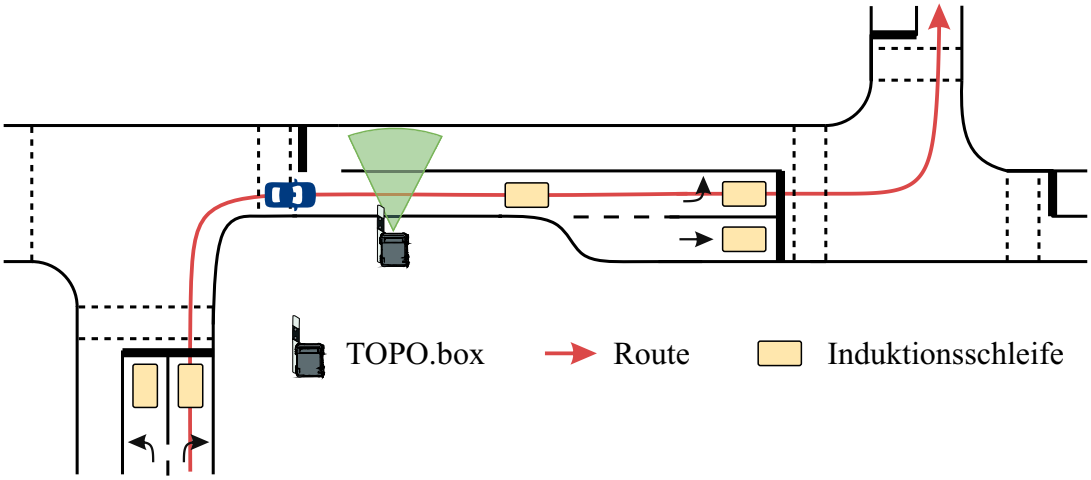


Abbildung 6-4: *Beispielsituation zur Erklärung der Reaktion auf den Sensorausfall einer TOPO.box*

Hinsichtlich der LSA-Regelung sind zwei verschiedene Bereiche der Sicherheitsmaßnahmen zu unterscheiden. Erstens müssen die von der MPC berechneten Stellgrößen mit dem LSA-Steuergerät abgestimmt werden. Diese Abstimmung bedeutet, dass die von der MPC berechneten Wunschphasen auch vom Steuergerät umgesetzt werden können und der gewünschte Phasenübergang zu diesem Zeitpunkt auch möglich ist. Denn bei der hier entwickelten LSA-Regelung handelt es sich um eine vollständig freie Signalprogrammbildung (vgl. Tabelle 2-2), sodass sich an keine feste Phasenfolge gehalten wird. Zweitens ist für den Umgang mit den bereits häufiger genannten Kommunikationsproblemen zwischen Regelungssystem und LSA eine Sicherheitsebene vorzusehen.
Im ersten Bereich sind die im LSA-Steuergerät fest hinterlegten maximalen Sperrzeiten für Verkehrsströme eine entscheidende Größe. Zusätzlich zu einer verkehrsunabhängigen Grenze existiert zur Gewährleistung von maximalen Wartezeiten ebenso ein Schwellenwert $t_{S,\max}$, falls eine der korrespondierenden Induktionsschleifen überfahren wurde. In diesem Fall muss zwingend innerhalb der Zeitspanne $t_{S,\max}$ der entsprechende Verkehrsstrom freigegeben werden oder das LSA-Steuergerät schaltet in die Rückfallebene der Bestandssteuerung. Da dieser Mechanismus auch bei Fehldetektionen greift, musste für die prototypische Umsetzung der Regelung und als Absicherung der entwickelten Verkehrsrekonstruktion eine entsprechende Maßnahme implementiert werden. Die Notwendigkeit ist darin begründet, dass falsche Detektionen prinzipiell durch den Beobachter kompensiert werden. Folglich wird keine Wartezeit akkumuliert und die Freigabe dieser Fahrtrichtung durch die MPC auch nicht priorisiert. Die Umsetzung der Maßnahme erfolgte vergleichbar mit den Schranken des Fußverkehrs aus Abschnitt 4.3.3. Eigens de-

finierte Schwellenwerte $t_{w,\mathrm{th}}$ unterhalb derer des LSA-Steuergeräts sowie Zähler der aktuellen Sperrzeiten t_S sichern dabei die Integration in das Regelungskonzept.
Die Sicherheitsmaßnahmen im Themenfeld der Kommunikation basieren grundlegend auf dem Austausch von *Alive-Signalen* des Regelungssystems mit den LSA des Testgebiets. Wiederum über die Schnittstelle der AP-Werte konnte anhand des Zeitversatzes neben der Aktivität der Verbindung ebenso die netzwerkinduzierte Totzeit abgeschätzt werden. Wenn über eine definierte Dauer (zehn Sekunden) das Alive-Signal nicht aktualisiert wurde, so schaltet das betreffende LSA-Steuergerät lokal in eine Rückfallebene der Bestandssteuerung[70]. Dementsprechend sind zu erfüllende Bedingungen für die automatische Wiederaufnahme des modellprädiktiven LSA-Regelungsbetriebs implementiert, genau wie planmäßige und störungsabhängige Reinitialisierungen des Regelungssystems.
An dieser Stelle sollte bemerkt werden, dass bei vollständigem Kommunikationsausfall einer LSA ebenso keine LSA-Signale oder Induktionsschleifensignale empfangen werden, sodass die zugehörige LSA zwangsläufig aus dem Regelungssystem entfernt wird. Für den gleichzeitigen Betrieb der umliegenden LSA sind die angrenzenden und weiterhin funktionsfähigen Sensoren, speziell die TOPO.box-Systeme, aufgrund ihrer Lage besonders wichtig.
Zur Nachverfolgung und Analyse aller Befehle, Fehler und Ausfälle wird zudem ein Protokoll geführt, welches für die Weiterentwicklung und Untersuchung der prototypischen Umsetzung im PPS herangezogen werden kann.

6.2 Auswertung des LSA-Regelungssystems

Der erste Teile dieses Abschnitts widmet sich der Erläuterung der Auswertungsmethodik der Feldtests, da der Umgang mit den vorliegenden Kommunikationsstörungen geklärt werden muss. Im Anschluss folgt die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse, die mit einem festgelegten Parametersatz der MPC-Regelung erzielt wurden. Die Priorisierung der verschiedenen VTN entspricht dabei der moderat priorisierenden MPC-Konfiguration $p_{\mathrm{Prio,bal}}$ aus dem vorherigen Kapitel 5 und die Kriteriengewichtung innerhalb der Optimierung dem Standard aus Tabelle A3-3.

6.2.1 Methodik der Auswertung

Im Verlauf des PPS wurden viele verschiedene Methoden diskutiert, wie die realen Reaktionen des Verkehrs auf die verschiedenen untersuchten LSA-Steuerungsverfahren quantifiziert werden können. Sowohl die direkte Messung von Wartezeiten als auch die der Emissionsbelastung sind in der Realität kompliziert und kostenintensiv. Bei der Emissi-

[70] Je nach Auftretenshäufigkeit der Kommunikationsabbrüche wird entweder in das verkehrsabhängige Bestandsverfahren oder die hinterlegte Festzeitsteuerung geschaltet.

onsmessung liegt die Problematik bspw. einerseits in den variablen Umgebungseinflüssen und andererseits an immensen behördlichen Auflagen. Daher wurde sich im Konsortium für die Datenerhebung aus den Aufzeichnungen der Verkehrssimulationen innerhalb der Verkehrsrekonstruktion entschieden. Diese indirekte Messung über das Simulationsmodell hat neben der einfachen Umsetzbarkeit und den Kostengründen auch den elementaren Vorteil, dass sämtliche in der Entwicklungsphase berücksichtigten Kriterien ebenso für die Feldtests eingesetzt und verglichen werden können. Der Nachteil ist, dass die Daten nicht durch direkte Messungen aus dem realen System, also dem AGT, entstammen. Stattdessen wird die (validierte) Schätzung der Verkehrsrekonstruktion verwendet, die es ermöglicht, die gleichen Kriterien wie zuvor zu untersuchen. Damit diese Schätzwerte eingeordnet bzw. skaliert werden können, stehen Referenzwerte aus den jeweils parallelen Simulationen des vorherigen Abschnitts 5.2.2 zur Verfügung. In Abbildung 6-5 werden die Ergebnisse der vorherigen Simulationen[71] zusammengefasst. Zusätzlich zu den bekannten Werten aus der GT-Simulation sind hier die Schätzwerte aus der Verkehrsrekonstruktion dargestellt.

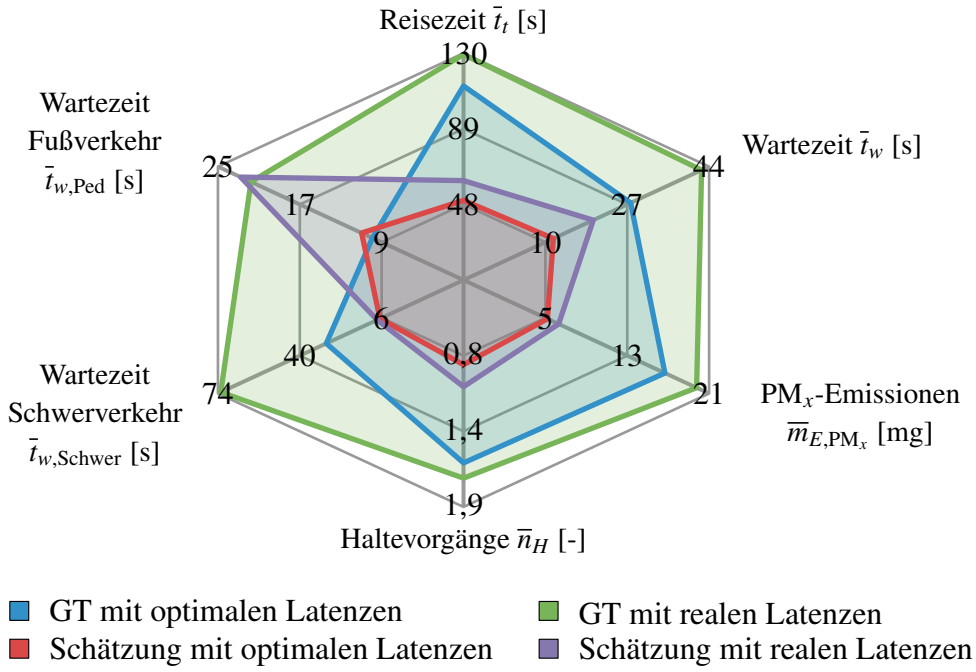


Abbildung 6-5: *Zusammengefasste Ergebnisse aufgenommen in der GT-Simulation und parallelen Verkehrsrekonstruktion*

Aus diesem Spinnendiagramm lassen sich kriteriumsspezifische Abweichungen ableiten, welche in Abbildung 6-6 übersichtlich veranschaulicht werden. In diesem Balkendiagramm sind analog zum vorherigen Diagramm die Durchschnitte der jeweiligen Kriterien

[71] Es werden die Simulationsvarianten #2, #3, #5 und #6 (siehe Tabelle 5-2) genutzt, da hier auch der Fußverkehr berücksichtigt wurde.

abgebildet. Zunächst fällt in dem Balkendiagramm der geringe Unterschied zwischen den Fällen mit unterschiedlichen Latenzen innerhalb der Kriterien auf. Die gezeigten Abweichungen bewegen sich demnach unabhängig von den simulierten Latenzen in einem einheitlichen Bereich.

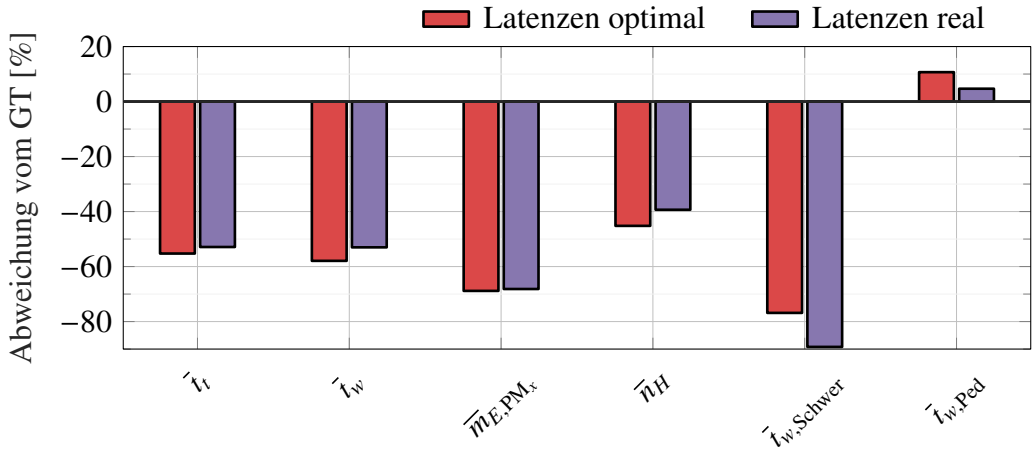


Abbildung 6-6: *Prozentuale Abweichung der Ergebnisse aufgenommen in der GT- bzw. Beobachtersimulation*

Ebenso ist beobachtbar, dass alle Durchschnittswerte für Fahrzeuge deutlich unterschätzt werden, wohingegen die Wartezeit des Fußverkehrs mit einer Überschätzung unter 10% verhältnismäßig genau abgebildet wird. Dieses Phänomen liegt in der Arbeitsweise des Beobachters begründet, da wiederkehrend der Verkehrszustand mit den Messwerten abgeglichen wird und so die Fahrzeugsituation adaptiert wird. Es resultieren entsprechend große Unterschiede in der Anzahl neu initialisierter VTN bei gleichzeitig guter Approximation des Verkehrszustands[72]. Da bei der Rekonstruktion des Fußverkehrs anhand der Furten feste Routen definiert sind, wird die Anzahl der VTN im Fußverkehr gut abgeschätzt, weshalb folgerichtig die durchschnittlichen Abweichungen zwischen GT- und Beobachtersimulation gering sind.

Die Durchschnittswerte der einzelnen Simulationen streuen wenig, was anhand des Beispiels der Reisezeit im Anhang in Abbildung A3-5 deutlich wird. Daher kann ein vergleichbarer proportionaler Zusammenhang auch für die Realumsetzung angenommen werden. D. h. bei exemplarisch aufgezeichneten durchschnittlichen PM_x-Emissionen von 20 mg im Beobachter ist in der Realität von einer ca. 68 % höheren Belastung, also von fast 34 mg pro VTN, auszugehen.

Die größte Herausforderung für den dauerhaften Betrieb der entwickelten Regelung, aber auch für die Auswertung der aufgezeichneten Ergebnisse sind die temporären Verbindungsabbrüche zwischen LSA und Regelung. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts

[72] Fahrzeuge mit einer Reisezeit von unter 20 s werden als wahrscheinliche Fehlentscheidungen des Routings in den Ergebnissen gefiltert.

dient die folgende Abbildung 6-7, die einen beispielhaften Ausschnitt des Verbindungsstatus aller LSA des PPS zeigt.

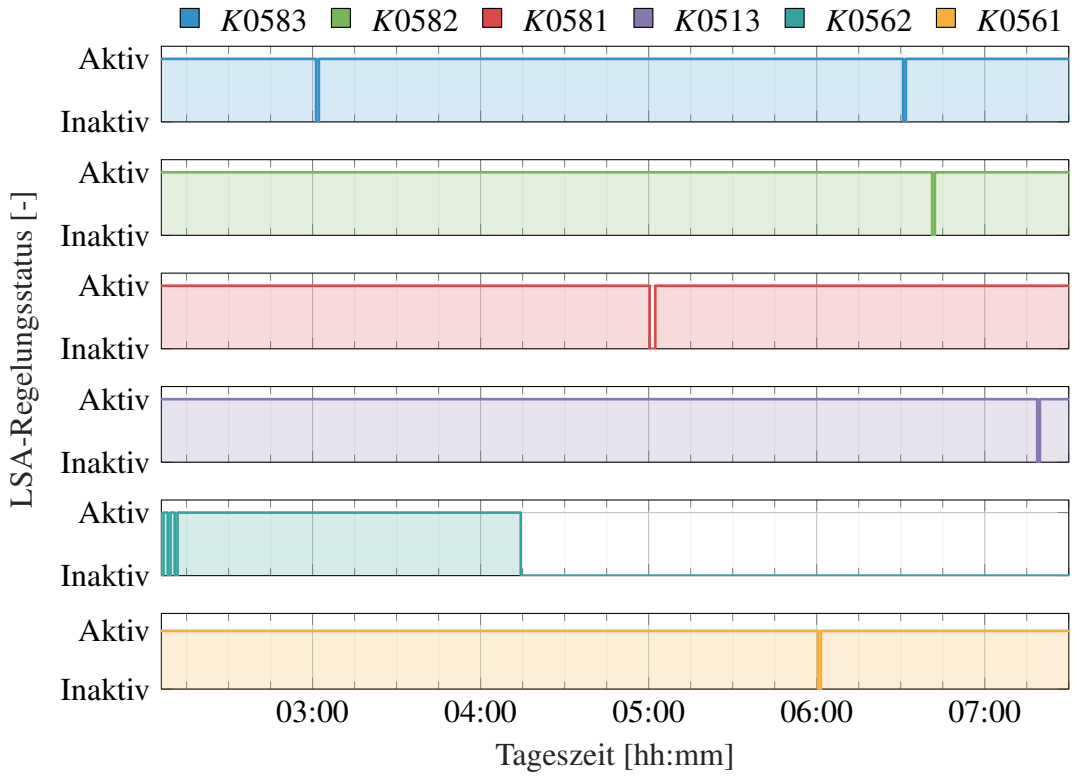


Abbildung 6-7: *Exemplarischer Tagesausschnitt zum LSA-Regelungsstatus des PPS aufgenommen am 01. Juni 2022*

Die Grafik verdeutlicht die stochastische Natur der Verbindungsabrisse und deren Dauern, die von wenigen Sekunden bis hin zu mehreren Stunden variieren. Die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen für den ständigen Betrieb der LSA unter Verwendung der entwickelten Regelung wurden bereits in Abschnitt 6.1.3 skizziert. In dem gezeigten gut fünfstündigen Ausschnitt existiert lediglich ein längerer Zeitraum von über einer Stunde von ca. 03:00 Uhr bis 04:15 Uhr, in dem alle Anlagen gleichzeitig von der MPC geregelt wurden. In der restlichen Zeit ist bei mindestens einer Anlage eine Störung aufgetreten.
Dementsprechend musste bei der Auswertung zwangsläufig ein alternatives Analysekonzept zur zunächst angedachten tageszeitabhängigen Untersuchung (z. B. vormittags 6 bis 8 Uhr) analog zu den Simulationen aus Kapitel 5 mit den simulierten Verkehrsszenarien *VS 1* bis *VS 4* genutzt werden. Da in den dortigen Ergebnissen allerdings bereits eine variierende Verbesserung des Regelungsergebnisses abhängig von der Zusammensetzung und dem Volumen des Verkehrs festgestellt wurde, ist es naheliegend die auftretenden Verkehrszahlen des jeweiligen Ausschnitts als Vergleichskriterium zu definieren. Um den MPC-Einsatz häufiger ununterbrochen analysieren zu können, wurde die Flexibilität des Regelungsansatzes genutzt, indem das Gesamtsystem zwischen den LSA *K*0581

und $K0513$ an der Residenzstraße in zwei Teilsysteme[73] (Ost und West) aufgeteilt wurde, was in der folgenden Abbildung 6-8 dargestellt ist.

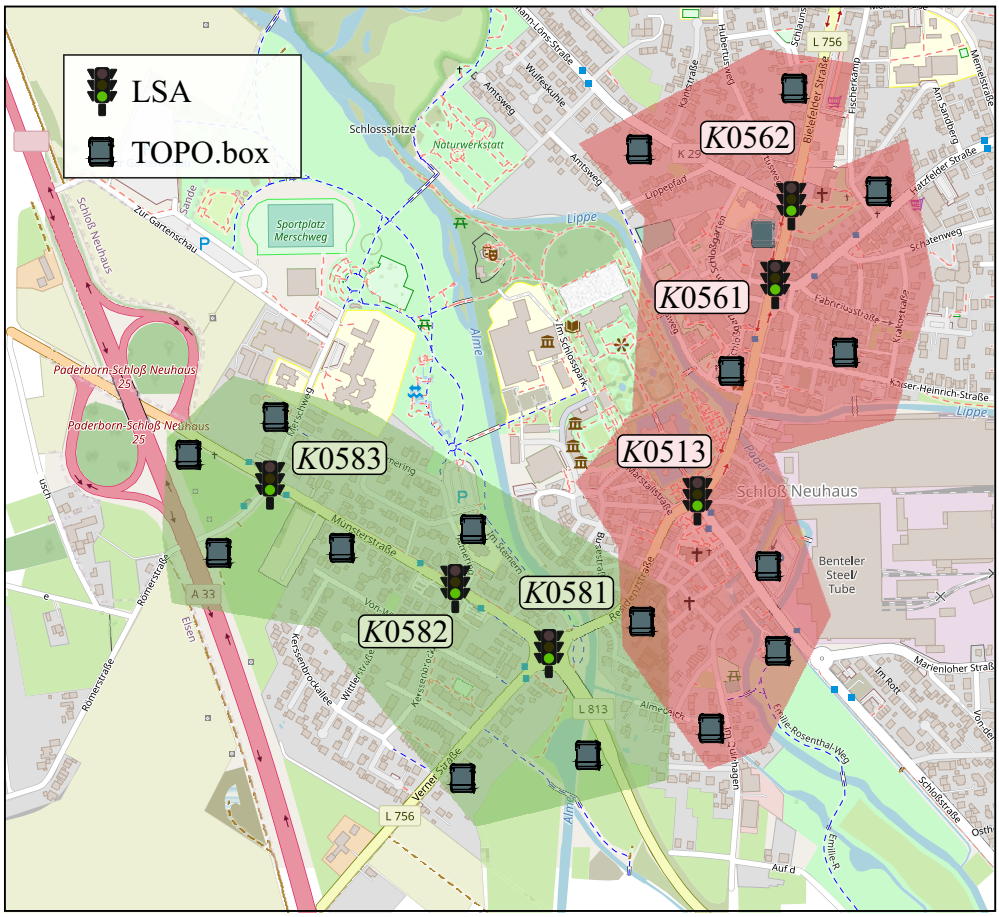


Abbildung 6-8: Aufteilung des Testgebiets in westlichen Teil (grün) und östlichen Teil (rot); angelehnt an Abbildung 5-2 [OSM24]

Die genauen Einteilungskriterien zur Klassifikation der Ergebnisse leiten sich aus den aufgezeichneten Verkehrsvolumen der Teilgebiete ab. Für den östlichen Teil sind neben den VTN-Anzahlen des Straßenverkehrs auch die des Fußverkehrs in der folgenden Abbildung 6-9 dargestellt[74]. Als Konsequenz werden anstelle der Tageszeiten (vgl. Verkehrsszenarien *VS 1* bis *VS 4*) die nachfolgenden drei Verkehrsaufkommen unabhängig vom Fußverkehr bei der Auswertung der Realergebnisse unterschieden:

(*VA 1*) weniger als 1500 VTN pro Stunde,

(*VA 2*) zwischen 1500 und 3000 VTN pro Stunde,

(*VA 3*) mehr als 3000 VTN pro Stunde.

[73] Die Teilsysteme sind über die Grenzsensorik weiterhin verbunden, was in den Instanzen der Rekonstruktion berücksichtigt wird.

[74] Eine analoge Darstellung für das westliche Teilgebiet befindet sich im Anhang in Abbildung A3-6.

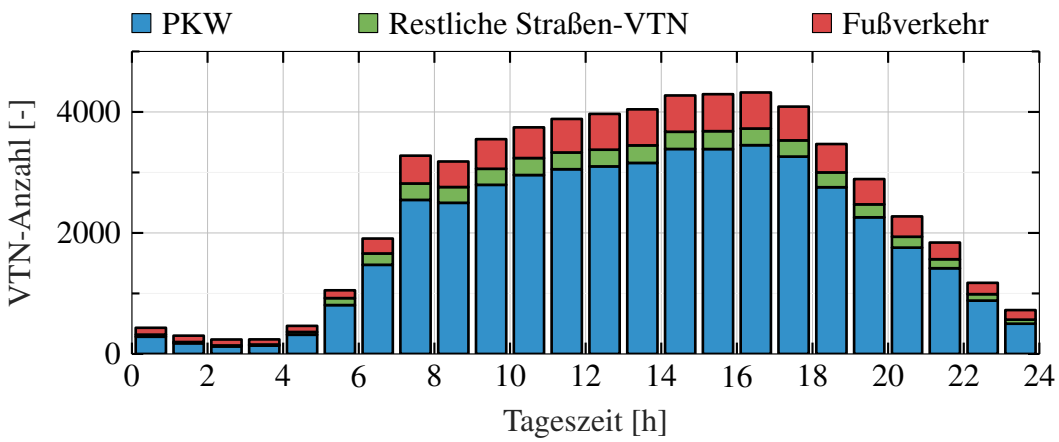


Abbildung 6-9: *Durchschnittlich aufgezeichnetes Verkehrsvolumen im östlichen Teilgebiet während der gesamten Realaufzeichnung*

Wie aus dem exemplarischen Tagesausschnitt in Abbildung 6-7 zu vermuten ist, existieren in den gesamten Aufzeichnungen des abschließenden vierwöchigen Feldtests neben den Abschnitten des störungsfreien Betriebs der MPC auch viele der MPC inklusive Störungen[75], in denen aufgrund ebendieser Störungen Anlagen zeitweise mithilfe des Bestandsverfahrens gesteuert wurden. Um diese Daten dennoch in die Untersuchung zu integrieren, wird die vollständige Aktivität der MPC an allen LSA des jeweiligen Gebiets als weiteres Unterscheidungskriterium der Auswertung definiert.

6.2.2 Ergebnisse der Realumsetzung

Dieser letzte Abschnitt des Kapitels dient der Einordnung und dem Ergebnisvergleich der verschiedenen LSA-Regelungsverfahren des vierwöchigen Realbetriebs. Neben den folgenden Grafiken und Beschreibungen sind die Ergebnisse des Feldtests tabellarisch im Anhang aufgeführt (Tabellen A3-4, A3-6 und A3-7). In dieser Auswertung wird die entwickelte MPC dem Bestandsverfahren gegenübergestellt und anhand derselben Kriterien wie bereits in Kapitel 5 verglichen. Um die Wirksamkeit der MPC ohne Kommunikationsabbrüche beurteilen zu können, wird zwischen der störungsfreien MPC-Regelung und deren Betrieb mit Störungen unterschieden. Diese Differenzierung bedeutet an dieser Stelle, dass bei der Auswertung der MPC inklusive Störungen auch explizit die Zeitabschnitte betrachtet werden, in denen sich mindestens eine der LSA im Teilgebiet in einer Rückfallebene befindet. Dieses Vorgehen ist notwendig, um den zahlreichen Störungen des Feldtests Rechnung zu tragen und dennoch die dabei aufgezeichneten Ergebnisse mit einem zusätzlichen Umfang von fast 900 h zu verwenden. Zudem sollte bemerkt werden,

[75] Dieses Verfahren wird als MPC inklusive Störungen bezeichnet, da einerseits im Feldtest die MPC-Regelung den gewünschten Betriebszustand dargestellt hat und andererseits bei Störungen durch die diversen Sicherheitsmechanismen und Rückfallebenen unter gegebenen Voraussetzungen wieder zurück in den MPC-Betrieb geschaltet wurde.

dass die Routen im Realbetrieb weder festgelegt noch bekannt sind, sondern geschätzt werden, sodass die Reisezeit hier nur bedingt als Gütekriterium herangezogen werden kann und eher zur Verdeutlichung des Einflusses der verschiedenen Verkehrsaufkommen dient.

Als Einstieg wird zunächst die Gesamtsituation des Feldtests thematisiert, bevor anschließend ausgewählte Verkehrsaufkommen und Teilgebiete gezielt analysiert werden. Die nachfolgende Abbildung 6-10 fasst in bekanntem Stil die Gesamtergebnisse zusammen, wobei die Mittelwertbildung, wie im Anhang in Abschnitt A1.2 beschrieben, auf Basis der Verkehrsrekonstruktion durchgeführt wurde. Als Beispiel werden die Reisezeiten, wie zuvor in Abbildung 6-6 zusammengefasst, unabhängig von der Regelungsmethode aufgrund des Prinzips der Rekonstruktion deutlich unterschätzt[76].

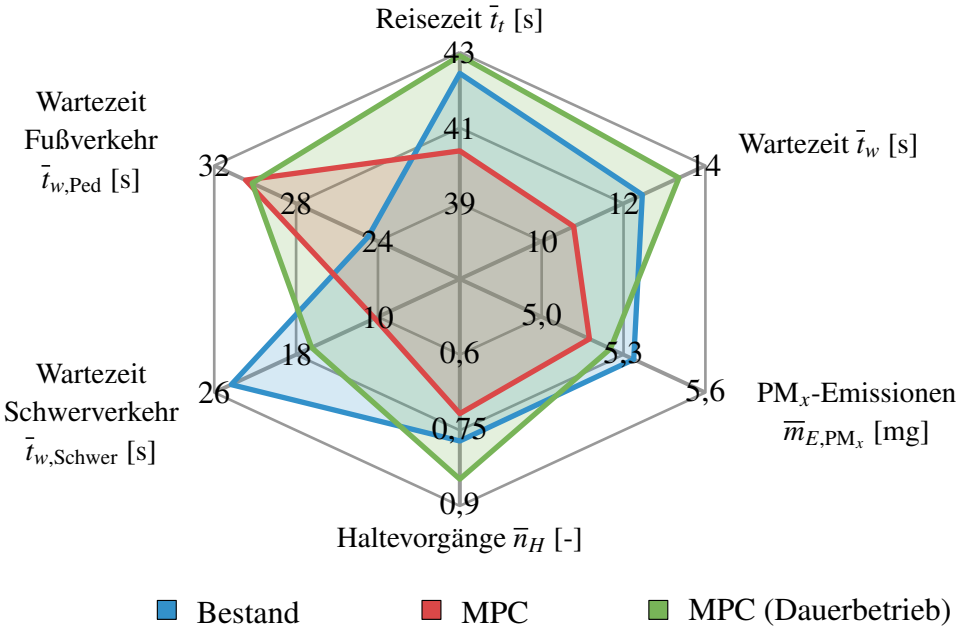


Abbildung 6-10: Ergebnisse der Realauswertung aller Verkehrsstärken des gesamten PPS-Bilanzraums

Auf den ersten Blick zeigt sich die MPC in Abbildung 6-10 in allen Bereichen außer der Wartezeit des Fußverkehrs dem Bestandsverfahren gegenüber überlegen. So konnte durch die entwickelte MPC-basierte Regelung die Wartezeit $\bar{t}_w$ der VTN durchschnittlich um gut 13 % reduziert werden. Die Auswirkungen der Kommunikationsstörungen auf dieses Kriterium sind besonders bemerkenswert. Der deutlich positive Effekt der MPC ändert sich im Störungsfall sogar zu einer Verschlechterung um 7 %. Im Gegensatz dazu konnte durch die Priorisierung des Schwerverkehrs und der entsprechend eingesparten Wartezeit

[76] Skalierte Werte für das Gesamtgebiet, bei denen der Effekt der Verkehrsrekonstruktion auf einfache Weise kompensiert wurde, sodass z. B. vergleichbare Reisezeiten zu den Simulationen resultieren (vgl. Anhang A1.2), sind in Tabelle A3-5 aufgelistet.

die Emissionsbelastung sowohl für die störungsfreie MPC als auch für die MPC inklusive Störungen reduziert werden. Wie anhand der Simulationen mit Integration der realistischen Latenzen bereits zu vermuten war, fällt die Verringerung mit gut 3 % bzw. 2 % deutlich geringer als im simulierten Idealfall aus. Dennoch zeigen sich hier Potentiale der Entwicklung und ebenso Parallelen zu den Untersuchungen aus Abschnitt 5.2.2. Sofern also die gegebene Situation der netzwerkinduzierten Totzeiten überarbeitet wird, ist mit vergleichbar positiven Auswirkungen wie in den angestellten Simulationen zu rechnen. Das mögliche Ergebnis wäre eine sehr deutliche Verbesserung aller analysierten Kriterien.

Als einzige negative Veränderung ist die klare Erhöhung der Wartezeit des Fußverkehrs auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Neben der vorhandenen Latenz[77] stellt auch die grundsätzliche Funktionsweise der MPC eine Begründung dieses Sachverhalts dar. Innerhalb der MPC wird die Dringlichkeit der Fußverkehrsfreigabe anhand der aktuellen Verkehrssituation im Vergleich zu anderen Kriterien bewertet (siehe Standard in Tabelle A3-3) und somit der Fußverkehr nicht bedingungslos mitgeführt. Bei der getesteten moderaten Priorisierung werden bei der Optimierung andere Kriterien höher priorisiert, wobei die rechtzeitige Freigabe des Fußverkehrs stets über die individuellen Schwellenwerte der LSA $t_{w,\mathrm{th,Ped}}$ gesichert ist. Das Greifen dieser Schwellen kann in der Ergebnistabelle A3-7 des westlichen Teilgebiets prägnant beobachtet werden, da die Zunahme des Verkehrsaufkommens den Fußverkehr bzw. $\bar{t}_{w,\mathrm{Ped}}$ nicht merklich beeinflusst.

Um Beispielsituationen für die jeweils unterschiedlichen Vorgehensweisen zu zeigen, kann die einfach konzipierte Fußverkehrsanlage $K0582$ herangezogen werden, deren Lageplan im Anhang unter Abbildung A2-3 zu finden ist. Die folgenden beiden Grafiken zur Verdeutlichung sind gleich aufgebaut, indem sie sowohl die Wartezeiten für Straßen- und Fußverkehr (t_w bzw. $t_{w,\mathrm{Ped}}$), die gesamte Straßenbelegung aller Zustandsspuren x_{total} nach Anzahl der Fahrzeuge als auch das zugehörige Schaltbild der LSA zeigen. Die Daten sind dabei direkt den protokollierten Daten des Verkehrsbeobachters entnommen, sodass sich aufgrund des Netzwerks leichte Unterschiede zum tatsächlichen Schaltbild ergeben können (vgl. dazu Abbildung A3-7 des Anhangs). Zuerst ist in Abbildung 6-11 die exemplarische Situation für das Bestandsverfahren dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass bei Anforderung durch den entsprechenden Melder, was dem Start der Wartezeit des Fußverkehrs in rot bei $t = 8\,\mathrm{s}$ entspricht, unverzögert der Umschaltvorgang gestartet wird. Die LSA wartet mit der Fußverkehrsfreigabe nicht auf einen Zeitpunkt, bei dem die Straßenbelegung minimal wird, sodass sich die Wartezeit t_w entsprechend stark erhöht. Im Vergleich dazu wäre es aufgrund der auftretenden Latenzen für die MPC-Regelung nicht möglich gewesen, so schnell zu reagieren. Wenn jedoch das analoge Diagramm der MPC

[77] Die Latenz wird direkt als Wartezeit akkumuliert, da erst verspätet auf die Anforderung reagiert werden kann.

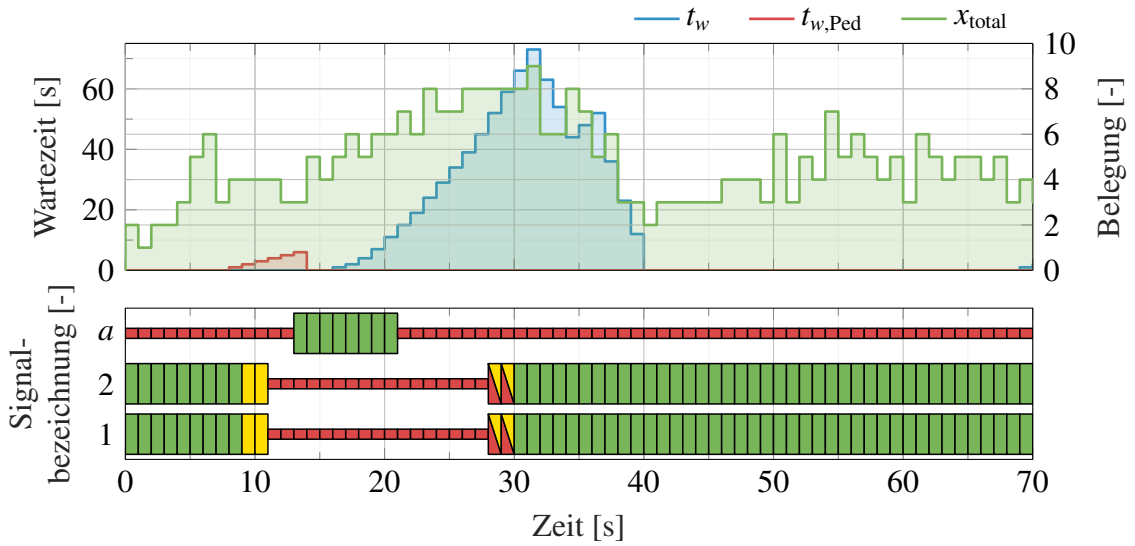


Abbildung 6-11: Exemplarisches Schaltbild der Fußverkehrsanlage K0582 bei Betrieb des Bestandsverfahrens vom 18.05.22 um 11:53 Uhr mit zusätzlicher Wartezeit- und Belegungssituation

in Abbildung 6-12 betrachtet wird[78], dann wird deutlich, dass die MPC einen Anstieg von $t_{w,\mathrm{Ped}}$ auch über den erstmöglichen Schaltzeitpunkt hinaus in Kauf nimmt, um auf ein prädiziertes Belegungsminimum zu warten. Auf diese Weise kann die Wartezeit t_w bei vergleichsweise geringen kumulierten 16 s im Gegensatz zu maximal 73 s beim Bestandsverfahren gehalten werden.

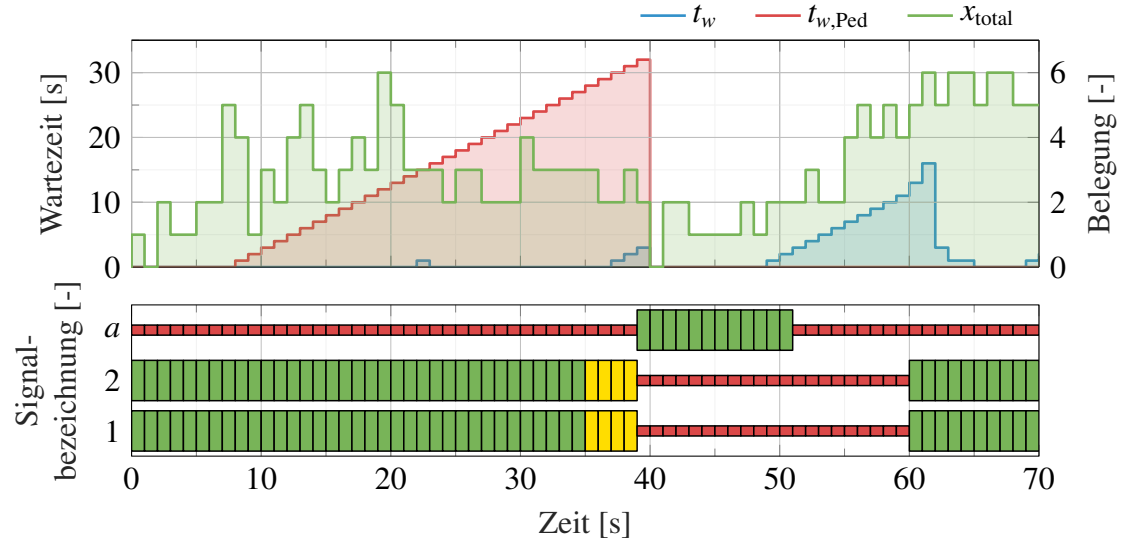


Abbildung 6-12: Exemplarisches Schaltbild der Fußverkehrsanlage K0582 bei Betrieb der MPC-Regelung vom 01.06.22 um 11:54 Uhr mit zusätzlicher Wartezeit- und Belegungssituation

[78] In einer vergleichbaren Situation an einem anderen Tag aufgenommen.

Diese einfache Situation charakterisiert den Unterschied der Regelungsverfahren sehr eindrücklich, insofern die MPC-Regelung auf Basis der implementierten Konfiguration Abwägungen anstellt, wohingegen das Bestandsverfahren nach festen Regeln und wenig differenziert innerhalb bestimmter Abläufe regiert. Außerdem wird die Abhängigkeit der jeweiligen Ergebnisse von der vorliegenden Verkehrsinfrastruktur noch einmal bestätigt. Dabei sind nicht nur die Latenzen gemeint, sondern auch die Lage und Geometrie der geregelten Anlagen.
In den Simulationen im vorherigen Kapitel 5 hat sich gezeigt, wie sehr die Verkehrsbelastung das Regelungsverhalten beeinflusst. Daher wird auch in dieser Auswertung als nächstes gezielt das als niedrig definierte Verkehrsaufkommen *VA 1* für das Gesamtsystem betrachtet. Die Ergebnisübersicht ist dabei in Abbildung 6-13 dargestellt.

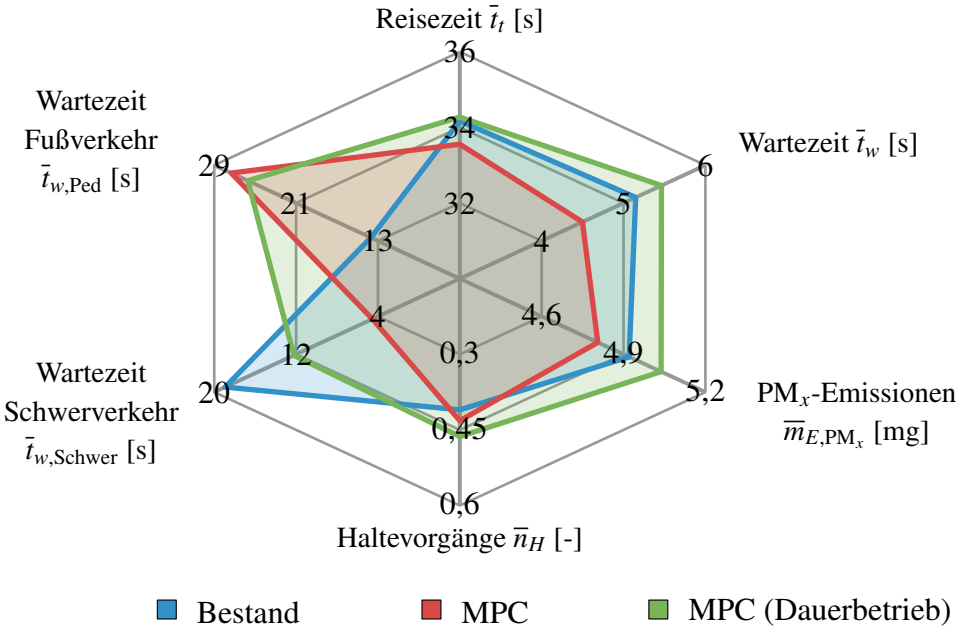


Abbildung 6-13: Ergebnisse der Realauswertung des niedrigen Verkehrsaufkommens VA 1 für den gesamten PPS-Bilanzraum

Grundsätzlich zeigt sich hier ein ähnliches Bild verglichen mit den zuvor diskutierten Resultaten aller Verkehrsbelastungen. Zusätzlich zur Verbesserung der Wartezeiten und Emissionen durch die störungsfreie MPC im Gegensatz zum Bestandsverfahren ist vor allem die gezielte Reduktion der Wartezeiten des Schwerverkehrs signifikant. Gerade bei geringen Verkehrsbelastungen werden höher priorisierte Bewertungskriterien bzw. VTN bei der Kompromissfindung innerhalb der Optimierung besonders stark berücksichtigt. Als Beispiel wirkt sich das Eintreffen eines LKW an einer leeren Kreuzung stärker auf den zu bewertenden Zustand aus als bei einer vollen Kreuzung. Dieser Fokus ist derart ausgeprägt, dass trotz der Störungsunterbrechungen die Reaktion der MPC auf den Schwerverkehr noch sehr auffällig ist. Dementsprechend kann $\bar{t}_{w,\mathrm{Schwer}}$ des Bestandsverfahrens auf

weniger als ein Viertel im Fall der MPC bzw. auf weniger als 65 % im Störungsfall der MPC reduziert werden. Dagegen hat das Bestandsverfahren durch die schnellere Reaktion auf den Fußverkehr in diesem Bereich wiederum Vorteile, was anhand des Beispiels der Fußverkehrsanlage unlängst erklärt wurde. Beim Kriterium der Haltevorgänge sind sich die MPC und das Bestandsverfahren bei diesem Verkehrsaufkommen sehr ähnlich. Daher bewegt sich auch der Störungsfall in einem ähnlichen Bereich und weist lediglich aufgrund der Übergangsprogramme geringfügig höhere Werte auf. Der Vorteil der MPC bei Betrachtung aller Verkehrsbeanspruchungen ist demnach auf Situationen mit höherer Verkehrsbelastung zurückzuführen (vgl. Tabellen im Anhang). Die generelle Auswirkung der Verkehrsbelastung ist klar an der Größenordnung der jeweiligen Durchschnittswerte zu erkennen, sodass bspw. die Wartezeiten $\bar{t}_w$ im Vergleich zur Gesamtsituation auf weniger als die Hälfte abnehmen.

Im Verlauf dieses Abschnitts wurden bereits Lage und Geometrie der Knotenpunkte als Einflussfaktoren auf die Regelgüte genannt, weshalb es naheliegend ist, neben dem Verkehrsaufkommen ebenso die Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Bereiche der Verkehrsrekonstruktion gesondert zu betrachten. Die zusammengefassten Resultate des Feldtests für ein niedriges Verkehrsaufkommen *VA 1* im östlichen Teilgebiet sind daher in der folgenden Abbildung 6-14 dargestellt[79].

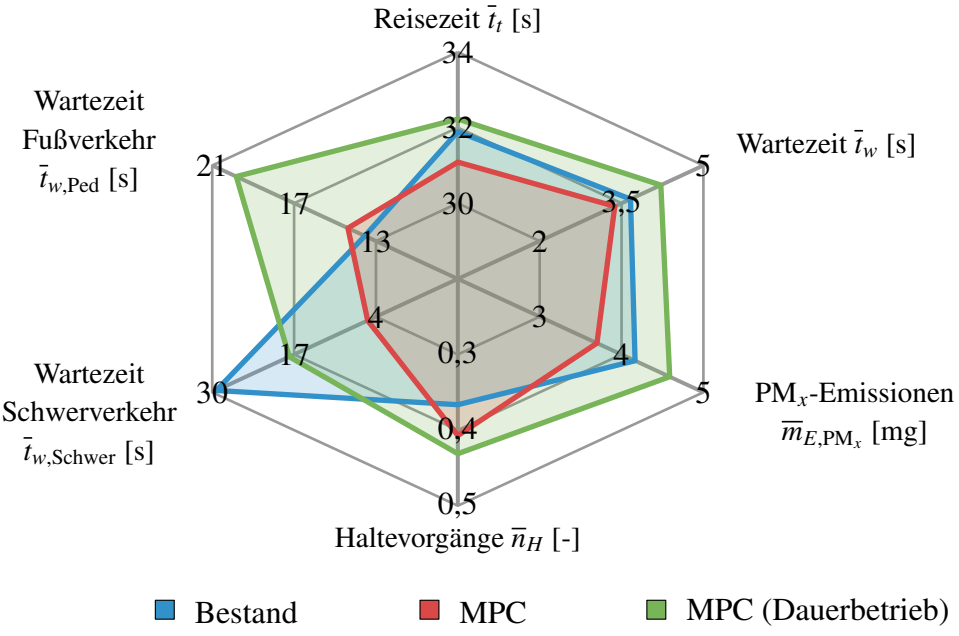


Abbildung 6-14: Ergebnisse der Realauswertung des niedrigen Verkehrsaufkommens VA 1 für den östlichen Teil des PPS-Bilanzraums

[79] Die Ergebnisse des westlichen Teilgebiets sind im Anhang in Abbildung A3-8 dargestellt und ebenso in der zugehörigen Tabelle des Anhangs nachvollziehbar.

Generell stimmen die Ergebnisse des Gesamtgebiets mit denen des hier aufgezeigten östlichen Teils überein. Die MPC unterstreicht mit den Resultaten erneut die Vorteile, welche auf Basis der Prädiktion ermöglicht werden. Insbesondere bei niedrigem Verkehrsaufkommen ist festzustellen, dass gewünschte Kriterien systematisch umgesetzt werden können und bspw. der Schwerverkehr massiv davon profitiert. Selbst im Betrieb der MPC inklusive Störungen sind die positiven Auswirkungen in den Ergebnissen mit einer Verbesserung um fast 40 % noch signifikant.
Als Unterschied zum Verhalten im Gesamtgebiet ist jedoch die überaus vergleichbare Güte der Wartezeit des Fußverkehrs auffallend, die sich nur im Falle von Störungen merklich verschlechtert. Als Konsequenz bedeutet dieses Ergebnis, dass die zuvor registrierte Verschlechterung aus dem westlichen Teilgebiet resultiert. Als Begründung dieser Diskrepanz können mehrere Gründe herangezogen werden, wobei die Unterschiede der Kreuzungsgeometrien entsprechender Knotenpunkte sehr ausgeprägt sind. Die einzige Fußverkehrsanlage $K0582$ liegt im westlichen Teilgebiet und die klaren Gegensätze im Schaltverhalten wurden bereits in den Beispielsituationen der Abbildungen 6-11 und 6-12 deutlich. Das Bestandsverfahren ist lokal umgesetzt und unterliegt damit keinen Latenzen, sodass unmittelbar auf eintreffenden Fußverkehr reagiert wird. Außerdem befindet sich der größte Knotenpunkt mit der höchsten Komplexität im westlichen Teilgebiet[80]. Aufgrund der moderaten Priorisierung innerhalb der Optimierung werden die definierten Bereiche für Fußverkehrswartezeiten $[0, t_{w,\mathrm{th,Ped},K0581}]$ unter strikter Berücksichtigung der Grenzen ausgenutzt. Analog zu verschiedenen Verkehrsaufkommen ergeben sich demnach abhängig vom betrachteten Verkehrssystem unterschiedliche Ergebnisse, die jedoch im entwickelten Konzept dieser Arbeit über angepasste Parametrierungen adressiert und reguliert werden können. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass mit steigender Komplexität der betrachteten Anlagen ebenso der Konfigurationsaufwand der MPC-Regelung steigt (siehe Inbetriebnahme in Abschnitt 6.1.2).
Abschließend lässt sich der Feldtest unabhängig von den genauen Ergebnissen als Erfolg zusammenfassen. Die Umsetzbarkeit des entwickelten Regelungssystems konnte trotz auftretender Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme nachgewiesen werden. Wie bereits zuvor in Kapitel 5 untersucht, ist die modellprädiktive Regelung dabei in der Lage, gezielt Vorgaben wie die Priorisierung des Schwerverkehrs zu realisieren und so u. a. Wartezeiten um gut 13 % und Emissionen um 3 % zu reduzieren. Trotz der Beeinträchtigung durch die vorhandenen Latenzen bewältigt die neuartige Regelung unterschiedliche Verkehrssituationen mindestens vergleichbar zum Bestandsverfahren, sodass bei Anpassung dieser Einflussgröße ähnliche Verbesserungen wie in den angestellten Simulationen zu erwarten sind. Als weitere Erkenntnis dieses Feldtests bleiben allerdings die enormen negativen Auswirkungen von Kommunikationsausfällen festzuhalten, die sogar dazu führen, dass

[80] Die $K0581$ an der Münsterstr. beinhaltet insgesamt vier Teilknoten (siehe Abbildung A2-4).

die eigentlich überlegene MPC-basierte Regelung im Störungsfall schlechtere Ergebnisse als das Bestandsverfahren liefert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Schlusskapitel dieser Arbeit fasst zunächst die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse zusammen. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche Forschungsschwerpunkte für weitere Arbeiten gegeben. Die dabei beschriebenen Ideen und Konzepte knüpfen teilweise lückenlos an den hier vorgestellten wissenschaftlichen Beitrag an und entwickeln den umgesetzten Gedanken weiter.

7.1 Zusammenfassung

Diese Dissertation widmet sich neben der Entwicklung und Analyse auch der Realumsetzung eines ganzheitlichen LSA-Regelungssystems, sodass die ausgearbeiteten Theorien direkt praktisch getestet wurden. Aufgrund des assoziierten PPS wurde als Anwendungsbeispiel ein definierter Straßenzug in Schloß Neuhaus (Paderborn) ausgewählt, um das neuartige Gesamtkonzept erst rein simulativ und anschließend im Feld umzusetzen. Ein wichtiges Forschungsziel stellt dabei die tatsächliche Umsetzbarkeit der mehrstufigen modellprädiktiven LSA-Regelung in Verbindung mit der simulationsbasierten Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion dar. Um dem gerecht zu werden, wurde insbesondere die Beschreibung der Inbetriebnahme in die Arbeit integriert.
Im Anschluss an die notwendigen theoretischen Grundlagen wird der Stand der Wissenschaft und Technik analysiert. Ausgerichtet auf das Ziel der Arbeit werden die Schwerpunkte der Verkehrsbeobachtung und der Regelung von Verkehrsgebieten durch deren LSA thematisiert. Im Bereich der Zustandserfassung und -schätzung haben die vorhandenen Ansätze bspw. Defizite hinsichtlich der Aktualisierungsrate in Verbindung mit dem Detailgrad offenbart, sodass mit der zusätzlichen Anforderung an die schnelle Berechenbarkeit (Echtzeit) ein erster Handlungsbedarf herausgearbeitet wurde. Ebenso sind bei den Konzepten zur LSA-Regelung bspw. Vernachlässigungen von Randbedingungen oder Zusatzinformationen der VTN festgestellt worden, deren Integration als elementar angesehen wird. Als Folge ist unter Berücksichtigung der Schwächen bisheriger Konzepte gerade die abgestimmte Entwicklung einer neuartigen Verkehrsrekonstruktion und LSA-Regelung sowie deren reale Umsetzung als Gesamthandlungsbedarf identifiziert worden.
Daran orientiert wurde das System zur modellprädiktiven LSA-Regelung entworfen. Die Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion mit den verschiedenen Bestandteilen wird zunächst formal beschrieben und kurz auf deren Validierung eingegangen, bevor das mehrstufige LSA-Regelungskonzept behandelt wird. Neben der Struktur mit der Fuzzy-Vorauswahl der Phasen wird insbesondere die Herleitung der Optimierung und Gütefunktion detailliert aufgegriffen, die anhand definierbarer Bewertungskriterien und daran abgestimmter Stellschrauben eine gezielte Verkehrsbeeinflussung ermöglicht. Im Anschluss folgen

Erläuterungen zur Implementierung und simulativen Analyse des gesamten Regelungssystems. Die Simulationen beinhalten verschiedene Testszenarien und Regelungsparametrierungen, die nachweisen, dass mithilfe des LSA-Regelungssystem das Verkehrsgebiet gezielt beeinflusst werden kann. Dabei wird u. a. auch der Einfluss der Verkehrszustandsschätzung, der Netzwerkkommunikation und verschiedener Parametrierungen der Regelung bemessen. Die Simulationsergebnisse zeigen für ein ausgewähltes Beispielszenario das große Potential einer durchschnittlichen Wartezeitreduktion um über 30 % bei optimaler Netzwerkkommunikation, aber auch die erheblichen negativen Auswirkungen der Latenzen, welche die Wartezeiten wiederum in den Bereich des Bestandsverfahrens anheben.
Diese Anzeichen der Simulationen werden in den Ergebnissen der erfolgreichen Realumsetzung bestätigt, wobei der vorangehenden Inbetriebnahme aufgrund der auftretenden Probleme ebenso Aufmerksamkeit geschenkt wird. Folglich kann auch in den Resultaten des Feldtests die gezielte Verkehrsbeeinflussung bspw. anhand der durchschnittlichen Wartezeiten des Schwerverkehrs nachgewiesen werden. Allerdings zeigen sich trotz Kompensationsmaßnahmen die Auswirkungen von Störungen und Latenzen, die eine deutlichere Verbesserung als die Reduktion von 3 % Emissionen oder 13 % der Wartezeit verhindern.

7.2 Ausblick

Allein aufgrund der Tatsache, dass es sich bei der in dieser Arbeit gezeigten Umsetzung um eine prototypische Implementierung gehandelt hat, ist offensichtlich, welche Folgeschritte direkt an diese Arbeit anknüpfen können. Die erlebten Anlaufschwierigkeiten bei der Realumsetzung sind auch auf fehlende Erfahrungen bei der Abstimmung und Inbetriebnahme eines derartigen Regelungssystems zurückzuführen.
Für eine mögliche Verbesserung sind demnach als erstes die Behebung der bisher auftretenden Kommunikationsausfälle zu nennen, damit die Regelung ohne Unterbrechungen dauerhaft getestet werden kann. Diese Problematik soll allerdings in Folgeuntersuchungen der Firma Stührenberg mit dem korrespondierenden Mobilfunkanbieter bearbeitet werden. Im gleichen Zuge wird versucht, die derzeitige Latenzsituation zu verbessern. Einerseits indem lokal die Taktzeiten der Steuergeräte von einer Sekunde auf eine Zehntelsekunde reduziert werden, um so bis zu zwei Sekunden innerhalb der Kommunikationskette einzusparen. Andererseits durch die nochmalige Prüfung der OCIT-Schnittstellen, da ein Großteil der Verzögerungen in deren Datenverarbeitung vermutet wird (vgl. Abbildung 2-15). Zusammen mit der noch ausbaufähigen Feinabstimmung von LSA-Regelungssystem und Steuergerät sind durch diese Maßnahmen bereits erhebliche Auswirkungen auf das Regelungsergebnis zu erwarten, was sich anhand der angestellten

Simulationen vermuten lässt.
Außerdem wurden in Kapitel 5 bereits einige Parametrierungen der MPC simulativ getestet, sodass deren detaillierte Ausarbeitung im Hinblick auf behördliche Vorgaben mit anschließendem Ausrollen im Feld gleichermaßen Ansätze für zukünftige Forschungsarbeiten liefert.
Nicht weniger Möglichkeiten zur Weiterentwicklung bietet das in dieser Arbeit vorgestellte Gesamtkonzept des LSA-Regelungssystems. In diesem Zusammenhang sind zuerst eine effizientere und noch robustere Implementierung zu nennen, aber auch die enthaltenen Grundbausteine der Verkehrsrekonstruktion und LSA-Regelung können überarbeitet und erweitert werden. Denkbar sind die Verfeinerung der dynamischen Verkehrszuweisung anhand zusätzlicher Informationen oder die Nutzung von RL-Methoden anstelle des Fuzzy-Systems zur Phasenvorauswahl.
Das am RtM derzeit bearbeitete Projekt TraCMAS mit dem Ziel der Verkehrsflussregelung eines gemischt-autonomen Verkehrs setzt bei den übertragbaren Konzepten dieser Arbeit an, obwohl das Grundszenario des gegenwärtig realistischen Verkehrs abgewandelt wurde. So ist die Grundstruktur mit der Verkehrserfassung durch einen simulationsbasierten Beobachter und der darauf aufbauenden Regelung identisch. Allerdings ergeben sich durch die V2X-Kommunikation sowohl in der Beobachtung als auch der Regelung neue Möglichkeiten u. a. durch zusätzliche Stellgrößen der manipulierbaren Fahrzeugrouten. Die grundsätzlichen Ansätze wie die LSA-Regelung können dabei um entsprechende Komponenten ergänzt und auf diese Weise ein alternativer Anwendungsfall in einem zweiten Verkehrsgebiet analysiert werden.
Als letzter Aspekt ist das bereits angesprochene Fehlen von einheitlichen Standards oder Benchmark-Tests für den Vergleich und die Auswertung verschiedener LSA-Regelungsstrategien zu nennen. Um verschiedene Verfahren objektiver als bislang miteinander zu vergleichen, wäre die Definition grundlegender Verkehrsszenarien für die Erprobung notwendig, sodass in Zukunft allgemeingültigere Aussagen über deren Leistungsfähigkeit getroffen werden können.

8 Literaturverzeichnis

[AB93] Ashok, K.; Ben-Akiva, M. E.: Dynamic origin-destination matrix estimation and prediction for real-time traffic management system. *Transportation and traffic theory*. Hrsg. von Daganzo, C.; Daganzo, C. F. Amsterdam und London: Elsevier, 1993, S. 465–484

[ABB+14] Antoniou, C.; Barcelo, J.; Brackstone, M.; Celikoglu, H. B.; Ciuffo, B.; Punzo, V.; Sykes, P.; Toledo, T.; Vortisch, P.; Wagner, P.: *Traffic simulation: Case for guidelines*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014

[ABB+16] Antoniou, C.; Barceló, J.; Breen, M.; Bullejos, M.; Casas, J.; Ciprani, E.; Ciuffo, B.; Djukic, T.; Hoogendoorn, S.; Marzano, V.; Montero, L.; Nigro, M.; Perarnau, J.; Punzo, V.; Toledo, T.; van Lint, H.: Towards a generic benchmarking platform for origin–destination flows estimation/updating algorithms: Design, demonstration and validation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 66 (2016), S. 79–98

[ABBM97] Antoniou, C.; Ben-Akiva, M.; Bierlaire, M.; Mishalani, R.: Demand Simulation for Dynamic Traffic Assignment. *IFAC Proceedings Volumes* 30 (1997), Nr. 8, S. 633–637

[ABK07] Antoniou, C.; Ben-Akiva, M.; Koutsopoulos, H. N.: Nonlinear Kalman Filtering Algorithms for On-Line Calibration of Dynamic Traffic Assignment Models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 8 (2007), Nr. 4, S. 661–670

[Ach90] Acheson, D. J.: *Elementary fluid dynamics*. Oxford applied mathematics and computing science series. Oxford: Clarendon Press, 1990

[Ada18] Adamy, J.: *Nichtlineare Systeme und Regelungen*. 3. aktualisierte Auflage. Research. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2018

[ADAC24] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.: *Ausstieg Verbrennungsmotor: Wann wird welcher Hersteller elektrisch?* Hrsg. von Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. 2024. `https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/auto/ausstieg-verbrennungsmotor/` (besucht am 15. 05. 2024)

[AEE15] Acosta, A. F.; Espinosa, J. E.; Espinosa, J.: TraCI4Matlab: Enabling the Integration of the SUMO Road Traffic Simulator and Matlab® Through a Software Re-engineering Process. *Modeling Mobility with Open Data*. Hrsg. von Behrisch, M.; Weber, M. Lecture Notes in Mobility. s.l.: Springer-Verlag, 2015, S. 155–170

[Ash96] Ashok, K.: *Estimation and Prediction of Time-Dependent Origin-Destination Flows*. Dissertation. Cambridge: MIT, 1996

[Av13] Alsaleh, M.; van Oorschot, P. C.: Evaluation in the absence of absolute ground truth: toward reliable evaluation methodology for scan detectors. *International Journal of Information Security* 12 (2013), Nr. 2, S. 97–110

[AW15] Asif, S.; Webb, P.: Networked control system - An Overview. *International Journal of Computer Applications* (2015), Nr. 115

[BA06] Bütler, R.; Aeppli, K.: *Betriebssicherheit von Lichtsignalanlagen: Projektierung, Bau, Betrieb, Unterhalt*. Hrsg. von Marty + Partner AG. Zollikon, Schweiz, 2006

[BA07] Baillieul, J.; Antsaklis, P. J.: Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems. *Proceedings of the IEEE* 95 (2007), Nr. 1, S. 9–28

[Bar10a] Barceló, J., Hrsg.: *Fundamentals of traffic simulation*. 1. Aufl. Bd. 145. International series in operations research management science. New York, NY: Springer, 2010

[Bar10b] Barceló, J.: Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation. *Fundamentals of traffic simulation*. Hrsg. von Barceló, J. Bd. 145. International series in operations research management science. New York, NY: Springer, 2010, S. 1–62

[BBB+01] Ben-Akiva, M.; Bierlaire, M.; Burton, D.; Koutsopoulos, H. N.; Mishalani, R.: Network State Estimation and Prediction for Real-Time Traffic Management. *Networks and Spatial Economics* 1 (2001), Nr. 3/4, S. 293–318

[BBEG14] Bodenheimer, R.; Brauer, A.; Eckhoff, D.; German, R.: Enabling GLOSA for adaptive traffic lights. *2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2014)*. Hrsg. von Dressler, F. Piscataway, NJ, 2014, S. 167–174

[BBKM00] Ben-Akiva, M.; Bierlaire, M.; Koutsopoulos, H.; Mishalani, R.: DynaMIT: a simulation-based system for traffic prediction (2000)

[BC04] Bierlaire, M.; Crittin, F.: An Efficient Algorithm for Real-Time Estimation and Prediction of Dynamic OD Tables. *Operations Research* 52 (2004), Nr. 1, S. 116–127

[BEK+00] Box, D.; Ehnebuske, D.; Kakivaya, G.; Layman, A.; Mendelsohn, N.; Nielsen, H. F.; Thatte, S.; Winer, D.: *Simple Object Access Protocol (SOAP) 1.1*. Hrsg. von DevelopMentor; International Business Machines Corporation; Lotus Development Corporation; Microsoft; UserLand Software. 2000. https://www.w3.org/TR/2000/NOTE-SOAP-20000508/#_Toc478383486 (besucht am 15. 05. 2024)

[Bie23] Biemelt, P.; Trächtler, A. (Betreuer): *Entwurf und Analyse modellprädiktiver Regelungsansätze zur Steigerung des Immersionsempfindens in interaktiven Fahrsimulationen*. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn, 2023

[Bol98] Bollobás, B.: *Modern graph theory*. 6. print. Bd. 184. Graduate texts in mathematics. New York, NY: Springer, 1998

[BRD21] Bundesrepublik Deutschland: *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO*. 2021

[BRP17] Bekiaris-Liberis, N.; Roncoli, C.; Papageorgiou, M.: Traffic State Estimation Per Lane in Highways with Connected Vehicles. *Transportation Research Procedia* 27 (2017), S. 921–928

[BTT+17] Bottazzi, M.; Tcheumadjeu, L. C. T.; Trumpold, J.; Erdmann, J.; Oertel, R.: LiSuM: Design and Development of a Middleware to couple Virtual LISA+ TLS Controller and SUMO Simulation. *Proceedings of the SUMO2017*. Bd. 31. 2017, S. 179–192

[BZBP13] Bungartz, H.-J.; Zimmer, S.; Buchholz, M.; Pflüger, D.: *Modellbildung und Simulation: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013

[CHM58] Chandler, R. E.; Herman, R.; Montroll, E. W.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following. *Operations Research* 6 (1958), Nr. 2, S. 165–184

[CIM93] Cascetta, E.; Inaudi, D.; Marquis, G.: Dynamic Estimators of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts. *Transportation Science* 27 (1993), Nr. 4, S. 363–373

[CLP15] Collotta, M.; Lo Bello, L.; Pau, G.: A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers. *Expert Systems with Applications* 42 (2015), Nr. 13, S. 5403–5415

[CÖ95] Chan, H.; ÖZGÜNER, Ü.: Closed-loop control of systems over a communications network with queues. *International Journal of Control* 62 (1995), Nr. 3, S. 493–510

[CT01] Chow, M.-Y.; Tipsuwan, Y.: Network-based control systems: A Tutorial. *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2001

[Del19] Deloitte GmbH: *Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035: Welche Veränderungen durch Robotaxis auf Automobilhersteller, Städte und Politik zurollen*. Hrsg. von Deloitte GmbH. 2019. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/Innovation/datenland-deutschland-autonomes-fahren.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[DG76] D'Ans, G. C.; Gazis, D. C.: Optimal Control of Oversaturated Store-and-Forward Transportation Networks. *Transportation Science* 10 (1976), Nr. 1, S. 1–19

[Dij59] Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1 (1959), Nr. 1, S. 269–271

[DIN18] DIN ISO 3888-1:2018-12, *Personenkraftwagen - Prüfstrecke für plötzliche Spurwechsel - Teil 1: Doppelspurwechsel*

[DIN88] DIN 44300-1:1988-11, *Informationsverarbeitung - Begriffe - Allgemeine Begriffe*

[DIN94] DIN ISO 7498-1:1994-11, *Informationstechnik - Kommunikation Offener Systeme: Basis-Referenzmodell*.

[DLR24] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *SUMO User Documentation*. Hrsg. von Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. 2024. https://sumo.dlr.de/docs/index.html (besucht am 15. 05. 2024)

[DP04] Dittmar, R.; Pfeiffer, B.-M.: *Modellbasierte prädiktive Regelung: Eine Einführung für Ingenieure*. München: Oldenbourg, 2004

[EOW15] Erdmann, J.; Oertel, R.; Wagner, P.: VITAL: A Simulation-Based Assessment of New Traffic Light Controls. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Piscataway, NJ, 2015, S. 25–29

[Erd14] Erdmann, J.: Lane-Changing Model in SUMO. *SUMO2014 - Modeling Mobility with Open Data*. Hrsg. von Lemmer, K. Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik. Berlin, 2014, S. 77–88

[FBN11] Flötteröd, G.; Bierlaire, M.; Nagel, K.: Bayesian Demand Calibration for Dynamic Traffic Simulations. *Transportation Science* 45 (2011), Nr. 4, S. 541–561

[Fel94] Fellendorf, M.: VISSIM: A Microscopic Simulation Tool to Evaluate Actuated Signal Control including Bus Priority. *Compendium of technical papers, 1994 64th ITE annual meeting : Dallas, Texas, USA, October 16 - 19, 1994*. Washington, DC, 1994

[FF56] Ford, L. R.; Fulkerson, D. R.: Maximal Flow Through a Network. *Canadian Journal of Mathematics* 8 (1956), S. 399–404

[FGSV15a] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA: Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*. Köln, 2015

[FGSV15b] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen: HBS 2015*. Köln, 2015

[FGSV19] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: *Hinweise zu Detektionstechnologien im Straßenverkehr*. Ausgabe 2019. FGSV W1 - Wissensdokumente. Köln: FGSV, 2019

[Föl22] Föllinger, O.: *Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. 13., überarbeitete Auflage. Berlin: VDE Verlag, 2022

[Fri00] Friedrich, B.: Steuerung von Lichtsignalanlagen, BALANCE - Ein neuer Ansatz (2000)

[FV10] Fellendorf, M.; Vortisch, P.: Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. *Fundamentals of traffic simulation*. Hrsg. von Barceló, J. Bd. 145. International series in operations research management science. New York, NY: Springer, 2010, S. 63–93

[GC10] Gupta, R. A.; Chow, M.-Y.: Networked Control System: Overview and Research Trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57 (2010), Nr. 7, S. 2527–2535

[Ge14] Ge, Y.: A Two-Stage Fuzzy Logic Control Method of Traffic Signal Based on Traffic Urgency Degree. *Modelling and Simulation in Engineering* (2014), Nr. 3, S. 1–6

[GHR61] Gazis, D. C.; Herman, R.; Rothery, R. W.: Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow. *Operations Research* 9 (1961), Nr. 4, S. 545–567

[Gip81] Gipps, P. G.: A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological* 15 (1981), Nr. 2, S. 105–111

[GOA13] Garcia-Nieto, J.; Olivera, A. C.; Alba, E.: Optimal Cycle Program of Traffic Lights With Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 17 (2013), Nr. 6, S. 823–839

[Gre34] Greenshields, B. D.: The photographic method of studying traffic behavior. *Highway Research Board Proc., 1934* (1934), Nr. 13, S. 382–399.

[Gre35] Greenshields, B. D.: A study in highway capacity. *Highway Research Board Proc., 1935* (1935), Nr. 14, S. 448–477

[Gri14] Grieves, M.: Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: A Whitepaper by Dr. Michael Grieves (2014)

[HDB+81] Hunt, P. B.; Di Robertson; Bretherton, R. D.; Winton, R. I.; Transport; Road Research Laboratory: *SCOOT: A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals*. TRRL Laboratory report. TRRL Urban Networks Division, 1981

[Hel97] Helbing, D.: *Verkehrsdynamik: Neue Physikalische Modellierungskonzepte*. 1st ed. 1997. Springer eBook Collection. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997

[HLCH19a] Higuera, C.; Lozano, F.; Camacho, E. C.; Higuera, C. H.: Demonstration of Multiagent Reinforcement Learning Applied to Traffic Light Signal Control. *Advances in Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems*. Hrsg. von Demazeau, Y.; Matson, E.; Corchado, J. M.; La Prieta, F. de. Bd. 11523. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 255–258

[HLCH19b] Higuera, C.; Lozano, F.; Camacho, E. C.; Higuera, C. H.: Multiagent Reinforcement Learning Applied to Traffic Light Signal Control. *Advances in Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems*. Hrsg. von Demazeau, Y.; Matson, E.; Corchado, J. M.; La Prieta, F. de. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 115–126

[HNR68] Hart, P.; Nilsson, N.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4 (1968), Nr. 2, S. 100–107

[HTLC18] Hu, T.-Y.; Tong, C.-C.; Liao, T.-Y.; Chen, L.-W.: Dynamic route choice behaviour and simulation-based dynamic traffic assignment model for mixed traffic flows. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22 (2018), Nr. 2, S. 813–822

[IBM99] International Business Machines Corporation; Eurotech: *MQTT V3.1 Protocol Specification*. 1999. https://public.dhe.ibm.com/software/dw/webservices/ws-mqtt/mqtt-v3r1.html (besucht am 15. 05. 2024)

[IDR22] Irfan, M. S.; Dasgupta, S.; Rahman, M.: Towards Transportation Digital Twin Systems for Traffic Safety and Mobility Applications: A Review (2022)

[INF24] INFRAS: *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)*. Hrsg. von INFRAS. 2024. https://www.hbefa.net/d/index.html (besucht am 15. 05. 2024)

[INR24] INRIX: *2022 INRIX Global Traffic Scorecard*. Hrsg. von INRIX. 2024. https://inrix.com/scorecard-city-2022/?city=Paderborn&index=376 (besucht am 15. 05. 2024)

[JMK17] Jin, J.; Ma, X.; Kosonen, I.: An intelligent control system for traffic lights with simulation-based evaluation. *Control Engineering Practice* 58 (2017), S. 24–33

[JU97] Julier, S. J.; Uhlmann, J. K.: New extension of the Kalman filter to nonlinear systems. *Defense, Security, and Sensing*. 1997

[KB05] Ki, Y.-K.; Baik, D.-K.: Vehicle Classification Model for Loop Detectors Using Neural Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1917 (2005), Nr. 1, S. 164–172

[KBM+05] Krajzewicz, D.; Brockfeld, E.; Mikat, J.; Ringel, J.; Feld, C.; Tuchscheerer, W.; Wagner, P.; Woesler, R.: Simulation of modern Traffic Lights Control Systems using the open source Traffic Simulation SUMO. *Proceedings of the 3rd Industrial Simulation Conference 2005*. Hrsg. von Industrial Simulation Conference. Berlin: EUROSIS-ETI, 2005, S. 299–302

[KEBB12] Krajzewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M.; Bieker-Walz, L.: Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements* 3&4 (2012)

[KEPT21] Kyriacou, V.; Englezou, Y.; Panayiotou, C. G.; Timotheou, S.: Estimating the posterior predictive distribution of the traffic density in multi-lane highways using spacing measurements. *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. 2021, S. 3634–3639

[Kes19] Kessels, F.: *Traffic Flow Modelling: Introduction to Traffic Flow Theory Through a Genealogy of Models*. EURO advanced tutorials on operational research. Cham: Springer, 2019

[KHRW02] Krajzewicz, D.; Hertkorn, G.; Rössel, C.; Wagner, P.: SUMO (Simulation of Urban MObility): An open-source traffic simulation. *Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling*. Hrsg. von Al-Akaidi, A. 2002, S. 183–187

[KHv12] Knoop, V. L.; Hoogendoorn, S. P.; van Lint, J. W. C.: Routing Strategies Based on Macroscopic Fundamental Diagram. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2315 (2012), Nr. 1, S. 1–10

[KIH+15] Kamal, M. A. S.; Imura, J.-i.; Hayakawa, T.; Ohata, A.; Aihara, K.: Traffic Signal Control of a Road Network Using MILP in the MPC Framework. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research* 13 (2015), Nr. 2, S. 107–118

[KKLC01] Kim, S.-W.; Kim, K.; Lee, J.-h.; Cho, D.-i. D.: Application of Fuzzy Logic to Vehicle Classification Algorithm in Loop/Piezo-Sensor Fusion Systems. *Asian Journal of Control* 3 (2001), Nr. 1, S. 64–68

[KLCL09] Kong, Q.-J.; Li, Z.; Chen, Y.; Liu, Y.: An Approach to Urban Traffic State Estimation by Fusing Multisource Information. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10 (2009), Nr. 3, S. 499–511

[KMv20] Knoop, V. L.; Mermygka, M.; van Lint, H.: Estimating the urban traffic state with limited traffic data using the MFD (2020)

[Kra09] Krajzewicz, D.: Kombination von taktischen und strategischen Einflüssen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft*. Hrsg. von Jürgensohn, T. Bd. 28. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme. Düsseldorf: VDI Verlag, 2009

[Kra10] Krajzewicz, D.: Traffic Simulation with SUMO – Simulation of Urban Mobility. *Fundamentals of traffic simulation*. Hrsg. von Barceló, J. Bd. 145. International series in operations research management science. New York, NY: Springer, 2010, S. 269–293

[Kra98] Krauss, S.; Stauffer, D. (Betreuer); Schrader, R. (Betreuer): *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Dissertation. Köln: Universität Köln, 1998

[Kri17] Krimmling, J.: *Ampelsteuerung: Warum die grüne Welle nicht immer funktioniert*. essentials. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017

[KS61] Kometani, E.; Sasaki, T.: Dynamic Behavior of Traffic with a Nonlinear Spacing-Speed Relationship. *Theory of Traffic Flow*. Hrsg. von Herman, R.; General Motors Corporation. Research Laboratories. General Motors symposium series. Elsevier Publishing Company, 1961, S. 105–119.

[LBB+18] Lopez, P. A.; Behrisch, M.; Bieker-Walz, L.; Erdmann, J.; Flötteröd, Y.-P.; Hilbrich, R.; Lücken, L.; Rummel, J.; Wagner, P.; Wiessner, E.: Microscopic Traffic Simulation using SUMO (2018)

[LDVV18] Lana, I.; Del Ser, J.; Velez, M.; Vlahogianni, E. I.: Road Traffic Forecasting: Recent Advances and New Challenges. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 10 (2018), Nr. 2, S. 93–109

[Leu72] Leutzbach, W.: *Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1972

[LGGG08] Litz, L.; Gabriel, T.; Gross, M.; Gabel, O.: Networked Control Systems (NCS) – Stand und Ausblick: Networked Control Systems (NCS) - State of the Art and Future. *Automatisierungstechnik* 56 (2008), Nr. 1, S. 4–19

[LM67] Lee, E. B.; Markus, L.: *Foundations of optimal control theory*. SIAM series in applied mathematics. New York: Wiley, 1967

[LMGT23] Link, C.; Malena, K.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Simulation Environment for Traffic Control Systems Targeting Mixed Autonomy Traffic Scenarios. *9th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*. Hrsg. von Vinel, A. Setúbal, 2023, S. 367–377

[LMS21] Lubna; Mufti, N.; Shah, S. A. A.: Automatic Number Plate Recognition:A Detailed Survey of Relevant Algorithms. *Sensors* 21 (2021), Nr. 9

[LR94] Luck, R.; RAY, A.: Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems. *International Journal of Control* 59 (1994), Nr. 6, S. 1357–1372

[Lue64] Luenberger, D. G.: Observing the State of a Linear System. *IEEE Transactions on Military Electronics* 8 (1964), Nr. 2, S. 74–80

[Lue66] Luenberger, D.: Observers for multivariable systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 11 (1966), Nr. 2, S. 190–197

[Lun14] Lunze, J.: *Control Theory of Digitally Networked Dynamic Systems*. 1. Aufl. Cham: Springer, 2014

[LW55] Lighthill, M. J.; Whitham,, Gerald Beresford: On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 229 (1955), Nr. 1178, S. 317–345

[Mar10] Marty + Partner AG: *Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen: Functional requirements for traffic collection systems relating to traffic lights*. Hrsg. von Marty + Partner AG. 2010

[Mat24] MathWorks Inc.: *Visualize summary statistics with box plot - MATLAB boxplot - MathWorks Deutschland*. Hrsg. von MathWorks Inc. 2024. https://de.mathworks.com/help/stats/boxplot.html (besucht am 15. 05. 2024)

[Mer22] Mertin, S.; Trächtler, A. (Betreuer): *Konzept für ein hierarchisches autonomes Verkehrsmanagement*. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn, 2022

[MLB+22] Malena, K.; Link, C.; Bussemas, 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*. Hrsg. von Klein, C.; Jarke, M.; Helfert, M.; Berns, K.; Gusikhin, O. Bd. 1612. Springer eBook Collection. Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2022, S. 232–254

[MLGT21] Universität Paderborn, Verkehrsleitsystem für die Steuerung von Lichtsignalanlagen (in Prüfung). Erfinder: Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A., Anmeldung: 26. 7. 2021. Deutschland, *epoline Einreichungsnummer 800863291*

[MLGT23] Universität Paderborn, 2023. Vorrichtung und Verfahren zur echtzeitbasierten dynamischen Verkehrszuordnung für zumindest zwei nachfolgende Fahrbahnen. Erfinder: Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A., Anmeldung: 27. 4. 2021. Deutschland, *Patentschrift 10 2021 204 191*. 29. 6. 2023

[MLM+21a] Malena, K.; Link, C.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Online State Estimation for Microscopic Traffic Simulations using Multiple Data Sources. *7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS)*. Hrsg. von Berns, K. Setúbal, 2021, S. 386–395

[MLM+21b] Malena, K.; Link, C.; Mertin, S.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Validation of an Online State Estimation Concept for Microscopic Traffic Simulations. *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. Hrsg. von IEEE. Piscataway, NJ, 2021, S. 212–217

[MML+20] Mertin, S.; Malena, K.; Link, C.; Gausemeier, S.; Trächtler, A.: Macroscopic Traffic Flow Control using Consensus Algorithms. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Hrsg. von IEEE. Bd. 23. Piscataway, NJ, 2020

[MRRS00] Mayne, D. Q.; Rawlings, J. B.; Rao, C. V.; Scokaert, P.: Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica* 36 (2000), Nr. 6, S. 789–814

[MS14] Milanés, V.; Shladover, S. E.: Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 48 (2014), S. 285–300

[MTL78] McGill, R.; Tukey, J. W.; Larsen, W. A.: Variations of Box Plots. *The American Statistician* 32 (1978), Nr. 1, S. 12

[MTS21] Marai, O. E.; Taleb, T.; Song, J.: Roads Infrastructure Digital Twin: A Step Toward Smarter Cities Realization. *IEEE Network* 35 (2021), Nr. 2, S. 136–143

[New02] Newell, G. F.: A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B: Methodological* 36 (2002), Nr. 3, S. 195–205

[New61] Newell, G. F.: Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following. *Operations Research* 9 (1961), Nr. 2, S. 209–229

[Nis14] Nissen, V.: *Ausgewählte Grundlagen der Fuzzy Set Theorie*. 2., korr. Aufl. Bd. 2014-01. Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik. Ilmenau: Institut für Wirtschaftsinformatik, TU Ilmenau, 2014

[NP00] Niittymäki, J.; Pursula, M.: Signal control using fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems* 116 (2000), Nr. 1, S. 11–22

[NVG22] Nuli, S.; Vikranth, N.; Gupta, K. A.: Real-Time Traffic Prediction Using Neural Networks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1086 (2022), Nr. 1, S. 012029

[OC15] Osorio, C.; Chong, L.: A Computationally Efficient Simulation-Based Optimization Algorithm for Large-Scale Urban Transportation Problems. *Transportation Science* 49 (2015), Nr. 3, S. 623–636

[OCI18a] OCIT Developer Group: *IT-Sicherheit von OCIT-Systemen: Positionspapier der ODG*. Hrsg. von OCIT Developer Group. 2018. https://www.ocit.org/media/ocit_info_zur_it_sicherheit_2.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[OCI18b] OCIT Developer Group: *OCIT-C Center to Center: Daten*. Hrsg. von OCIT Developer Group. 2018. https://www.ocit.org/media/ocit-c_daten_v2.0_a02.pdf

[OCIT04] OCIT Developer Group: *OCIT-LED*. 2004. https://www.ocit.org/de/ocit/schnittstellen/ocit-led/ (besucht am 15. 05. 2024)

[OCIT12a] OCIT Developer Group: *OCIT-Outstations: Profil 3*. Hrsg. von OCIT Developer Group. 2012. https://www.ocit.org/media/ocit-o-profil_3_v1.0_a02.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[OCIT12b] OCIT Developer Group: *OCIT-Outstations: Profil 1*. Hrsg. von OCIT Developer Group. 2012. https://www.ocit.org/media/ocit-o-profil_1_v1.1_a03.pdf

[OCIT18b] OCIT Developer Group: *OCIT-Outstations: Einführung in das System*. 2018. https://www.ocit.org/media/ocit-o_system_v3.0_a01.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[OCIT18c] OCIT Developer Group: *OCIT-Outstations: Basisfunktionen für Feldgeräte*. Hrsg. von OCIT Developer Group. 2018. https://www.ocit.org/media/ocit-o_basis_v3.0_a01.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[OCIT19] OCIT Developer Group: *OCIT-Outstations: Profil 4*. Hrsg. von OCIT Developer Group. 2019. https://www.ocit.org/media/ocit-o-profil_4_v1.0_a01.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[OCIT23] OCIT Developer Group: *OCIT-Referenzarchitektur zur Definition der Latenzzeiten in kooperativen Systemen*. Hrsg. von OCIT Developer Group. 2023. https://www.ocit.org/media/ocit-referenzarchitektur_latenz_version_6_frei.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[ON15] Osorio, C.; Nanduri, K.: Urban transportation emissions mitigation: Coupling high-resolution vehicular emissions and traffic models for traffic signal optimization. *Transportation Research Part B: Methodological* 81 (2015), S. 520–538

[ORIT20] ORIT: *Funklösungen, Kommunikations- und Analyseprodukte für Energieversorger, Industrie, Stadtwerke und den ÖPNV: Produktbroschüre*. Hrsg. von MERETEC Technologies GmbH. 2020. https://www.orit.de/fileadmin/user_upload/Orit/Dokumente/ORIT_O__PNV_Katalog_2020_DE.pdf (besucht am 15. 05. 2024)

[OSM24] OpenStreetMap: *OpenStreetMap*. Hrsg. von OpenStreetMap. 2024. https://www.openstreetmap.org/#map=15/51.7442/8.7080 (besucht am 15. 05. 2024)

[Oso19a] Osorio, C.: Dynamic origin-destination matrix calibration for large-scale network simulators. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 98 (2019), S. 186–206

[Oso19b] Osorio, C.: High-dimensional offline origin-destination (OD) demand calibration for stochastic traffic simulators of large-scale road networks. *Transportation Research Part B: Methodological* 124 (2019), S. 18–43

[Pay71] Payne, H. J.: Models of freeway traffic and control. *Mathematical Models of Public Systems* (1971), Nr. 1, S. 51–61

[Pip53] Pipes, L. A.: An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics* 24 (1953), Nr. 3, S. 274–281

[PK89] Pursula, M.; Kosonen, I.: Microprocessor and PC-based vehicle classification equipments using induction loops. *Second International Conference on Road Traffic Monitoring, 1989*. 1989, S. 24–28

[PLB15] Papageorgiou, M.; Leibold, M.; Buss, M.: *Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. 4., korrigierte Auflage. Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2015

[PPS22] PPS: *Allgemeine Projektunterlagen des Pilotprojekts Schlosskreuzung*. 2022

[PTV24] PTV Planung Transport Verkehr GmbH: *Verkehrssimulation Software PTV Vissim*. Hrsg. von PTV Planung Transport Verkehr GmbH. 2024. https://www.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim (besucht am 15. 05. 2024)

[QB03] Qin, S.; Badgwell, T. A.: A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice* 11 (2003), Nr. 7, S. 733–764

[QB97] Qin, J.; Badgwell, T.: An Overview Of Industrial Model Predictive Control Technology. *AIChE Symposium Series* 93 (1997)

[QGÖ20] Qadri, Syed Shah Sultan Mohiuddin; Gökçe, M. A.; Öner, E.: State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *European Transport Research Review* 12 (2020), Nr. 1, S. 1–23

[Rau03] Rau, M.; Schröder, D. (Betreuer); Abel, D. (Betreuer): *Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung auf Basis lernfähiger Zustandsraummodelle*. Dissertation. München: TU München, 2003

[Rei94] Reiter, U.: Empirical Studies as Basis for Traffic Flow Models. *Proceedings of the Second International Symposium on Highway capacity*. Hrsg. von Akcelik, R. Victoria, Australia: Australian Road Research Board, 1994

[Ric56] Richards, P. I.: Shock Waves on the Highway. *Operations Research* 4 (1956), Nr. 1, S. 42–51

[RTB21] RTB GmbH: *TOPO Fahrzeugklassifizierungssysteme*. Hrsg. von RTB GmbH. 2021. `https://www.rtb-bl.de/wp-content/uploads/RTB_TOPO-1.pdf` (besucht am 15. 05. 2024)

[Sch05] Scholz, P.: *Softwareentwicklung eingebetteter Systeme: Grundlagen, Modellierung, Qualitätssicherung*. Xpert.press. Berlin, Heidelberg und New York: Springer, 2005

[Sch17] Schweers, C.; Trächtler, A. (Betreuer): *Adaptive Sigma-Punkte-Filter-Auslegung zur Zustands- und Parameterschätzung an Black-Box-Modellen*. Dissertation. Universität Paderborn, 2017

[Sch24] Schlothauer & Wauer GmbH: *Softwaresysteme: Schlothauer & Wauer*. Hrsg. von Schlothauer & Wauer GmbH. 2024. `https://www.schlothauer.de/softwaresysteme/` (besucht am 15. 05. 2024)

[Sch90] Schips, B.: *Empirische Wirtschaftsforschung: Methoden, Probleme und Praxisbeispiele*. Springer eBook Collection Business and Economics. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1990

[SD80] Sims, A. G.; Dobinson, K. W.: The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 29 (1980), Nr. 2, S. 130–137

[SEF18] Semrau, M.; Erdmann, J.; Friedrich, B.: Multi-Level-Validation of Chinese traffic in the ChAoS framework. *SUMO 2018 - Simulating Autonomous and Intermodal Transport Systems*. Hrsg. von Wiessner, E.; Lücken, L.; Hilbrich, R.; Flötteröd, Y.-P.; Erdmann, J.; Bieker-Walz, L.; Behrisch, M. Bd. 2. EPiC Series in Engineering. 2018, S. 194–205

[SEFW16] Semrau, M.; Erdmann, J.; Friedrich, B.; Waldmann, R.: Simulation framework for testing ADAS in Chinese traffic situations. *SUMO 2016 – Traffic, Mobility, and Logistics*. Hrsg. von Lemmer, K. Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik. Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V, 2016

[SGD11] Sommer, C.; German, R.; Dressler, F.: Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 10 (2011), Nr. 1, S. 3–15

[Sie17] Siegl, S.: „Networked Control Systems: Ein Überblick: Technischer Report“. Technischer Report. 2017

[Sta19] Stadt Essen: *Rat beschließt Bau und Baubeginn der Maßnahme "Umweltsensitive Steuerung Alfredstraße"*. Hrsg. von Stadt Essen. 2019. `https://www.essen.de/meldungen/pressemeldung_1343867.de.html` (besucht am 15. 05. 2024)

[Sta20] Stadt Essen: *Keine Fahrverbote für Dieselfahrzeuge in Essen: Maßnahmen zur Einhaltung des Stickstoffdioxid-Immissionsgrenzwerts*. Hrsg. von Stadt Essen. 2020. `https://www.essen.de/leben/mobilitaet/kraftfahrzeugverkehr/dieselfahrverbote/dieselfahrverbote_massnahmen_teil_1.de.html` (besucht am 15. 05. 2024)

[TC03] Tipsuwan, Y.; Chow, M.-Y.: Control methodologies in networked control systems. *Control Engineering Practice* 11 (2003), Nr. 10, S. 1099–1111

[THH00] Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E* 62 (2000), Nr. 2, S. 1805–1824

[TK10] Treiber, M.; Kesting, A.: *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer, 2010

[TLK+14] Tettamanti, T.; Luspay, T.; Kulcsar, B.; Peni, T.; Varga, I.: Robust Control for Urban Road Traffic Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15 (2014), Nr. 1, S. 385–398

[Tuk77] Tukey, J. W.: *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley series in behavioral science Quantitative methods. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1977

[TVKB08] Tettamanti, T.; Varga, I.; Kulcsar, B.; Bokor, J.: Model predictive control in urban traffic network management. *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*. 2008, S. 1538–1543

[TVP10] Tettamanti, T.; Varga, I.; Peni, T.: MPC in Urban Traffic Management. *Model Predictive Control*. Hrsg. von Zheng, T. Sciyo, 2010

[Umw21] Umweltbundesamt, Hrsg.: *25 Jahre Umweltbewusstseinsforschung im Umweltressort: Langfristige Entwicklungen und aktuelle Ergebnisse*. le-tex publishing services GmbH, 2021

[VDI21] VDI-Richtlinie 2206:2021-11, *VDI/VDE 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme: Development of mechatronic and cyber-physical systems*

[vO16] van der Pol, E.; Oliehoek, F. A.: Coordinated Deep Reinforcement Learnersfor Traffic Light Control. *30th Conference on Neural Information Processing Systems* (2016)

[vvVH15] van Wageningen-Kessels, F.; van Lint, H.; Vuik, K.; Hoogendoorn, S.: Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics* 4 (2015), Nr. 4, S. 445–473

[Whi74] Whitham, G. B.: *Linear and nonlinear waves*. New York: Wiley, 1974

[WHT22] Wang, Z.; Han, K.; Tiwari, P.: Digital Twin-Assisted Cooperative Driving at Non-Signalized Intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 7 (2022), Nr. 2, S. 198–209

[Wie74] Wiedemann, R.: *Simulation des Strassenverkehrsflusses*. Habilitationsschrift. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1974

[WLZ+20] Wang, Z.; Liao, X.; Zhao, X.; Han, K.; Tiwari, P.; Barth, M. J.; Wu, G.: A Digital Twin Paradigm: Vehicle-to-Cloud Based Advanced Driver Assistance Systems. *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Piscataway, NJ, 2020, S. 1–6

[Wor23] World Bank: *World Development Indicators — DataBank*. Hrsg. von World Bank. 2023. `https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=world-development-indicators#` (besucht am 15. 05. 2024)

[WPR+08] Wegener, A.; Piórkowski, M.; Raya, M.; Hellbrück, H.; Fischer, S.; Hubaux, J.-P.: TraCI: An Interface for Coupling Road Traffic and Network Simulators. *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium on - CNS '08*. Hrsg. von Ahmad, A.; Bragg, A. New York, 2008, S. 155

[Wv00] Wan, E. A.; van der Merwe, R.: The unscented Kalman filter for nonlinear estimation. *The IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, AS-SPCC*. Piscataway, NJ, 2000, S. 153–158

[WWXW13] Wang, Y.; Wang, D.; Xu, B.; Wongpiromsarn, T.: Junction-based Model Predictive Control for urban traffic light control. *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. 2013, S. 54–59

[WWY+15] Woods, D. L.; Wyma, J. M.; Yund, E. W.; Herron, T. J.; Reed, B.: Factors influencing the latency of simple reaction time. *Frontiers in human neuroscience* 9 (2015)

[WZYL18] Wei, H.; Zheng, G.; Yao, H.; Li, Z.: IntelliLight: A Reinforcement Learning Approach for Intelligent Traffic Light Control. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. KDD '18. New York, NY, USA, 2018, S. 2496–2505

[XWSv18] Xiao, L.; Wang, M.; Schakel, W.; van Arem, B.: Unravelling effects of cooperative adaptive cruise control deactivation on traffic flow characteristics at merging bottlenecks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 96 (2018), S. 380–397

[XWv17] Xiao, L.; Wang, M.; van Arem, B.: Realistic Car-Following Models for Microscopic Simulation of Adaptive and Cooperative Adaptive Cruise Control Vehicles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2623 (2017), Nr. 1, S. 1–9

[Zad65] Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (1965), Nr. 3, S. 338–353

Literaturverzeichnis der studentischen Arbeiten

Die in der vorliegenden Dissertationsschrift erbrachte Forschungsleistung wurde von studentischen Arbeiten begleitet, die maßgeblich zum dargelegten Erfolg beigetragen haben. Von diesen wurden, aufgrund ihrer Relevanz im Kontext des Gesamtvorhabens, die nachfolgend aufgeführten Masterarbeiten im Hauptteil der Abhandlung referenziert. Insbesondere sind beim Grundlagenabschnitt 2.4.3 verschiedene Abbildungen in [Buß21] abgewandelter Form zu finden. Gleiches gilt für den Abschnitt 4.3, der im Wesentlichen auf den in [MLB+22] veröffentlichtem Beitrag beruht. Die Definition der Zielsetzung, die Erarbeitung von Lösungsansätzen sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung der in den folgenden Arbeiten hervorgebrachten Ergebnisse erfolgte unter direkter wissenschaftlicher Anleitung des Autors dieser Dissertationsschrift. Inhalte aus anderen studentischen Arbeiten sind darüber hinaus nicht in diese Arbeit eingeflossen.

[Ash20] Ashry, M. G. A.; Malena, K. (Betreuer); Link, C. (Betreuer); Trächtler, A. (Betreuer); Gausemeier, S. (Betreuer): *Entwicklung einer intelligenten vernetzten Lichtsignalanlagenregelung auf Basis mikroskopischer Verkehrsmodelle*. Masterarbeit. Paderborn: Universität Paderborn, 2020

[Buß21] Bussemas, L.; Malena, K. (Betreuer); Link, C. (Betreuer); Trächtler, A. (Betreuer); Gausemeier, S. (Betreuer): *Strategie zum Umgang mit netzwerkbedingten Störungen einer modellprädiktiven LSA-Regelung*. Masterarbeit. Paderborn: Universität Paderborn, 2021

[Pol21] Polnau, C.; Link, C. (Betreuer); Malena, K. (Betreuer); Trächtler, A. (Betreuer); Gausemeier, S. (Betreuer): *Sensitivitätsanalyse und Parameterstudie einer MPC-basierten Regelung für Lichtsignalanlagen*. Masterarbeit. Paderborn: Universität Paderborn, 2021

[Sch21] Schinke, L.; Malena, K. (Betreuer); Schnittker, G. (Betreuer); Trächtler, A. (Betreuer); Gausemeier, S. (Betreuer): *Entwicklung einer Test Bench zur Qualitätsanalyse von Lichtsignalanlagensteuerungen*. Masterarbeit. Paderborn: Universität Paderborn, 2021

[Sim20] Simon, C.; Malena, K. (Betreuer); Link, C. (Betreuer); Trächtler, A. (Betreuer); Gausemeier, S. (Betreuer): *Entwicklung einer intelligenten vernetzten LSA-Regelung mithilfe von Ansätzen des maschinellen Lernens*. Masterarbeit. Paderborn: Universität Paderborn, 2020

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A1 Weitergehende Grundlagen und Methodik 188

A2 Exemplarisches Material der Verkehrsplanung im PPS 191

A3 Weitergehende Diagramme und Tabellen 198

A1 Weitergehende Grundlagen und Methodik

A1.1 Boxplots

Die Grundlagen zu Boxplots sind in [MTL78; Tuk77] zusammengefasst und angewendet in [Mat24] zu finden. In der nachfolgenden Tabelle A1-1 sind die wichtigsten Merkmale aufgelistet und die enthaltenen Beispielwerte können anhand der Abbildung A1-1 nachvollzogen werden.

Tabelle A1-1: *Wichtigste Merkmale von Boxplots mit Beispielwerten zu Abbildung A1-1*

Merkmal	Beschreibung	Beispielwert [-]
Minimum	Kleinster Datenwert des Datensatzes	5
Unterer Whisker	Das Maximum aus dem kleinsten Datenwert des Datensatzes und der Differenz des unteren Quartils und des anderthalbfachen Interquartilsabstands	5
Unteres Quartil	Die kleinsten 25 % der Daten sind geringer oder gleich dieser Kenngröße	202
Median	Die Hälfte der Datenwerte sind geringer oder gleich dieser Kenngröße	331
Oberes Quartil	Die kleinsten 75 % der Daten sind geringer oder gleich dieser Kenngröße	425,5
Oberer Whisker	Das Minimum aus dem größten Datenwert des Datensatzes und der Summe des oberen Quartils und des anderthalbfachen Interquartilsabstands	599
Maximum	Größter Datenwert des Datensatzes	990
Spannweite	Größe des Wertebereiches: Differenz zwischen Maximum und Minimum des Datensatzes	985
Interquartilsabstand	Wertebereich der mittleren 50 % der Daten	223,5

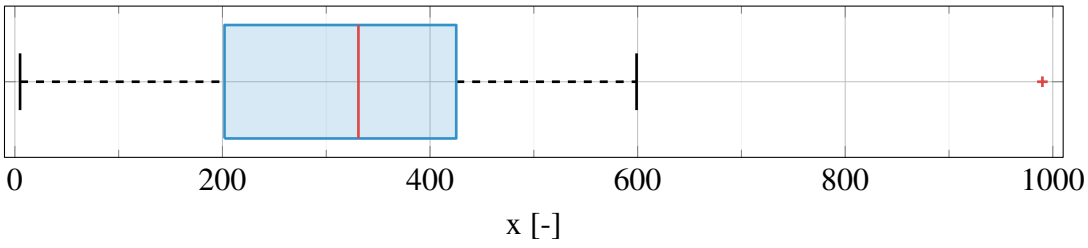


Abbildung A1-1: *Exemplarischer Boxplot zur Datenreihe der Variablen x*

Als Datensatz dieser Grafik dienen dabei 100 Zufallswerte x des Intervalls $[0, 600]$ zusammen mit dem Einzelwert 990. Ebenjener Wert stellt im vorliegenden Boxplot auch den einzigen Ausreißer dar, also hier einen Wert oberhalb des oberen Whiskers. Der Vorteil dieses statistischen Werkzeugs ist die komprimierte Darstellung unabhängig von der Größe des Datensatzes (hier lediglich 101 Werte).

A1.2 Ergänzungen zur Methodik und Darstellung der Realergebnisse

In Abschnitt 6.2.1 des Hauptteils der Arbeit werden die grundlegenden Aspekte zur Auswertung der Realergebnisse angesprochen. U. a. zur Einteilung der Ergebnisse in die drei definierten Verkehrsaufkommen *VA 1*, *VA 2* und *VA 3* werden die Aufzeichnungen auf maximal stündliche Segmente reduziert. Bei der anschließenden Mittelwertbildung der Ergebnisse wird anstelle des arithmetischen Mittels das gewichtete Mittel

$$\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^{N} g_i} \tag{A1-1}$$

verwendet, damit die Resultate eines 20-minütigen Intervalls auch nur ein Drittel des Anteils eines 60-minütigen Intervalls zum Gesamtergebnis beitragen. Im Speziellen werden mithilfe von Gleichung (A1-1) die jeweiligen Ergebnisse der Kriterien y_i aller N aufgezeichneten Segmente anhand der Segmentdauern g_i gewichtet. Diese Art der Mittelwertbildung wird bei sämtlichen Ergebnissen aus Abschnitt 6.2.2, die direkt aus den Rekonstruktionssimulationen entnommen wurden, genutzt.
Aus den kriteriumsspezifischen Abweichungen in Abbildung 6-6 können Skalierungsfaktoren ermittelt werden, um die geschätzten Werte der Verkehrsrekonstruktion anzupassen. Als ein exemplarisches Beispiel werden an dieser Stelle die in Abbildung 6-10 gezeigten Beobachterergebnisse des Gesamtgebiets für alle Verkehrsaufkommen skaliert. Diese Werte entsprechen dann von der Größenordnung wieder denjenigen, die in Kapitel 5 aus dem simulierten GT mit festgelegten Routen der VTN ermittelt wurden, sodass dies als (sehr einfache) Kompensation des Beobachtereffekts verwendet werden kann.

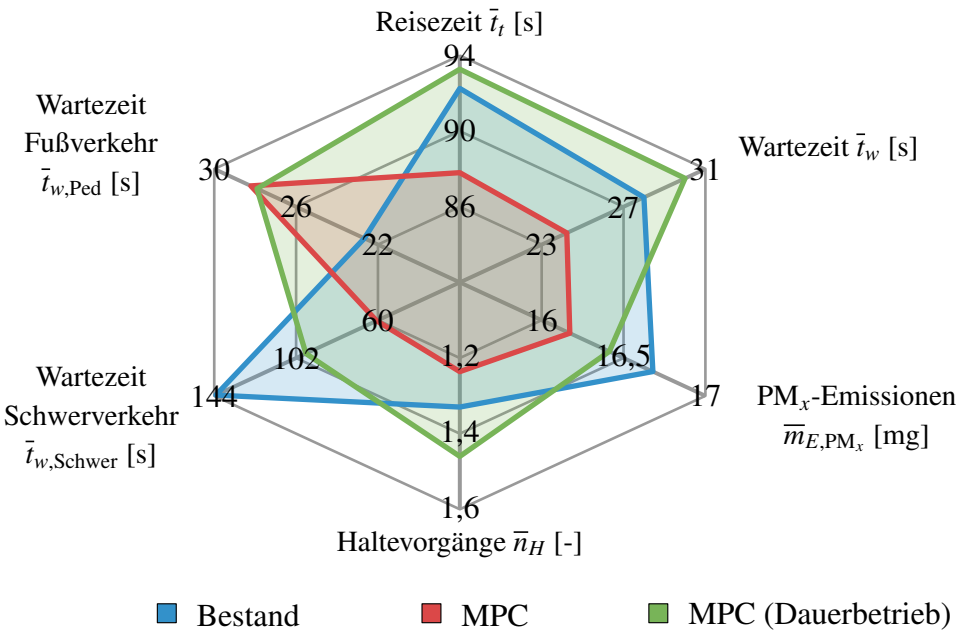


Abbildung A1-2: Reskalierte Ergebnisse der Realauswertung aller Verkehrsstärken des gesamten PPS-Bilanzraums zur Kompensation des Beobachtereffekts

A2 Exemplarisches Material der Verkehrsplanung im PPS

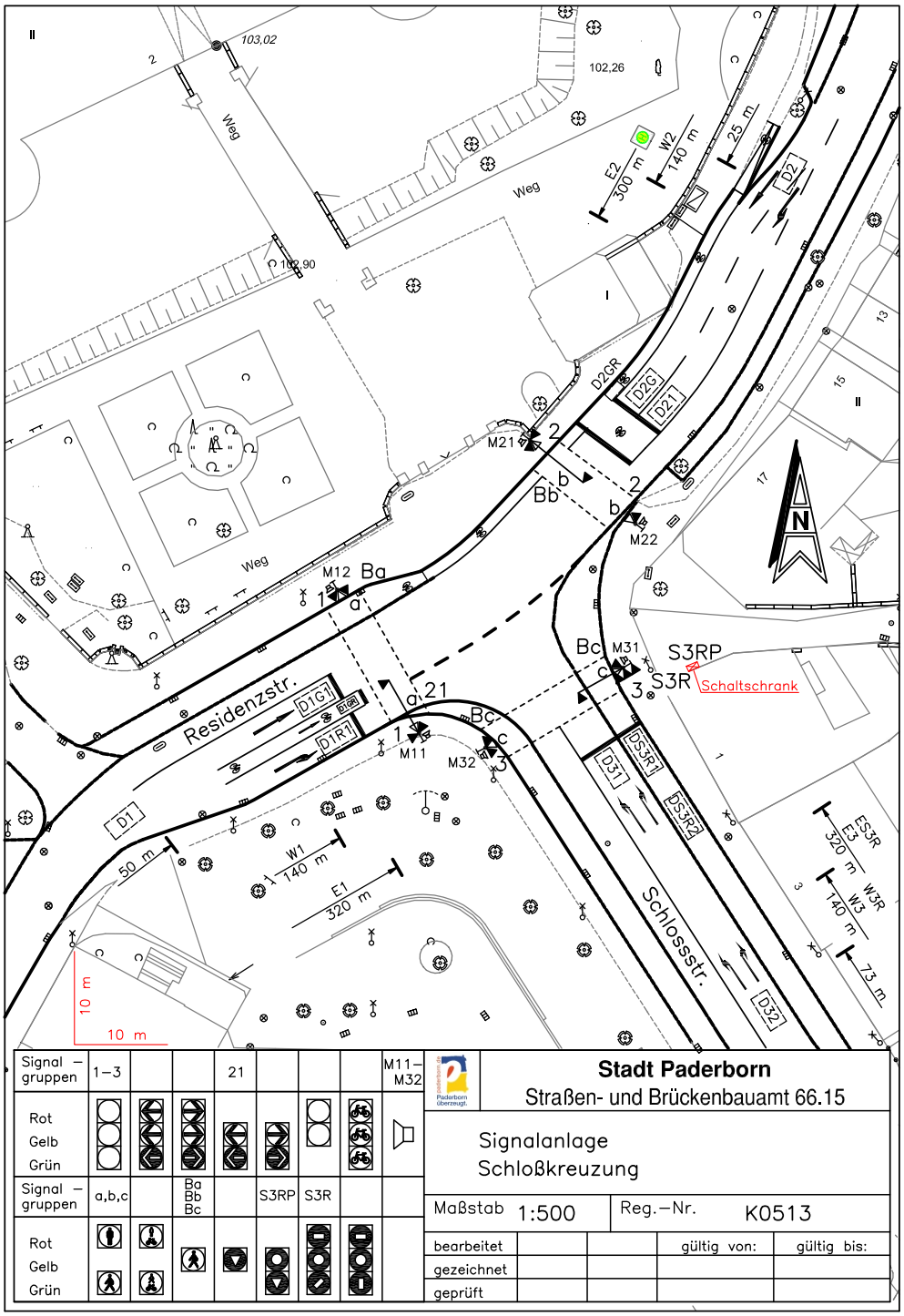


Abbildung A2-1: Lageplan der Schlosskreuzung (K0513 - Residenzstr. / Bielefelder Str. / Schlossstr.) von Paderborn (Schloß Neuhaus), Deutschland [PPS22]

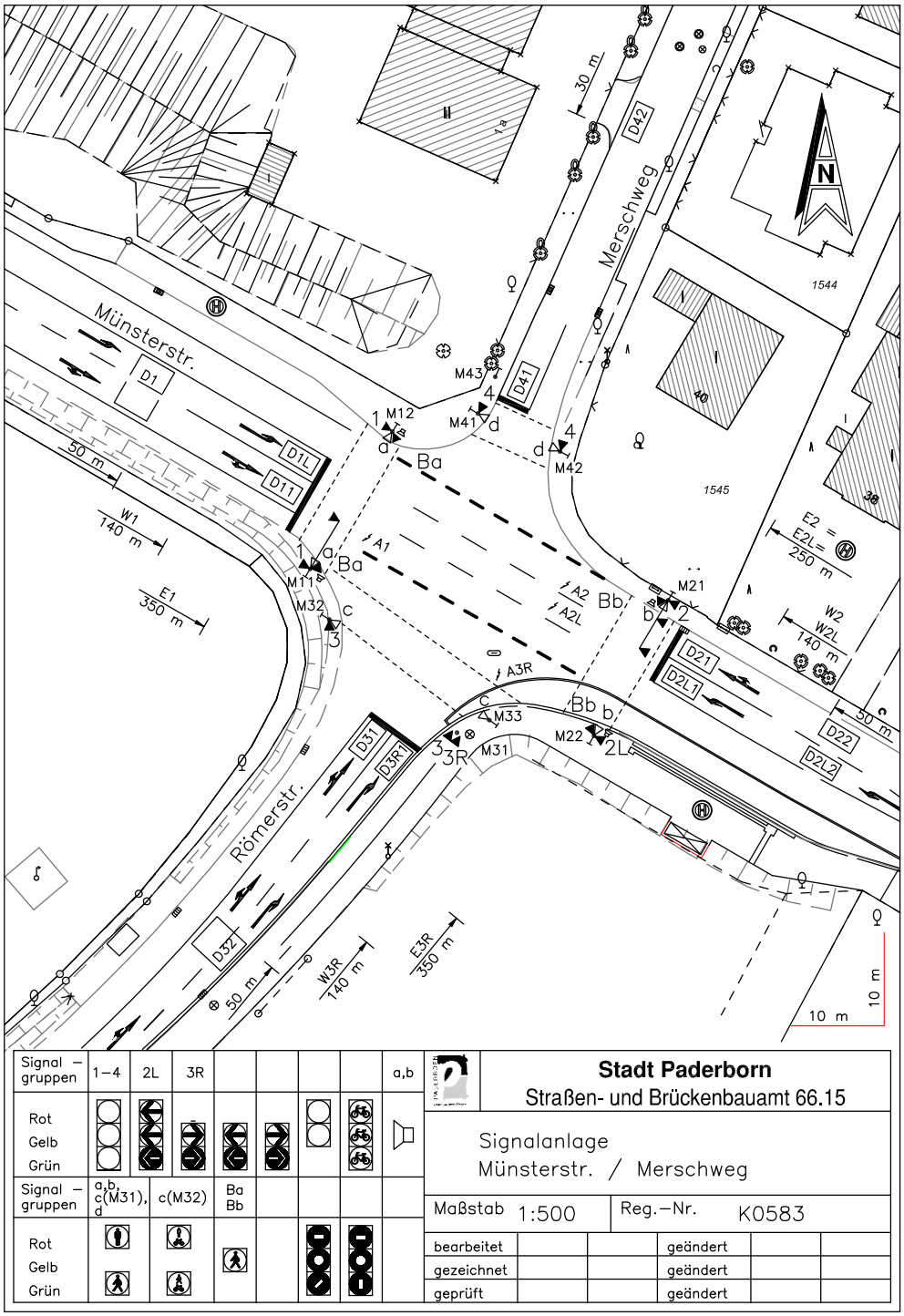


Abbildung A2-2: Lageplan der LSA K0583 (Münsterstr. / Merschweg) von Paderborn (Schloß Neuhaus), Deutschland [PPS22]

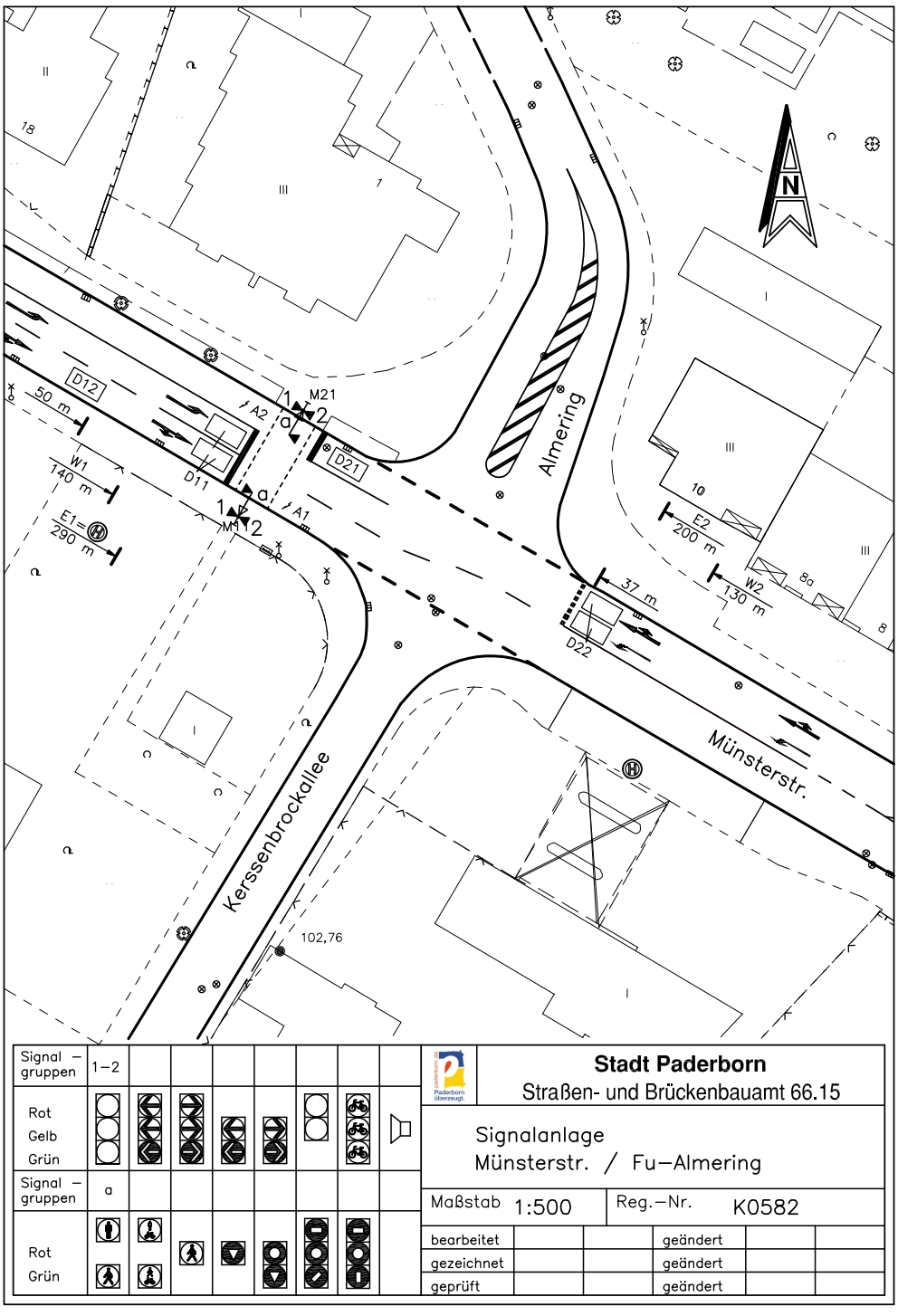


Abbildung A2-3: *Lageplan der LSA K0582 (Münsterstr. / Almering) für Fußverkehr von Paderborn (Schloß Neuhaus), Deutschland [PPS22]*

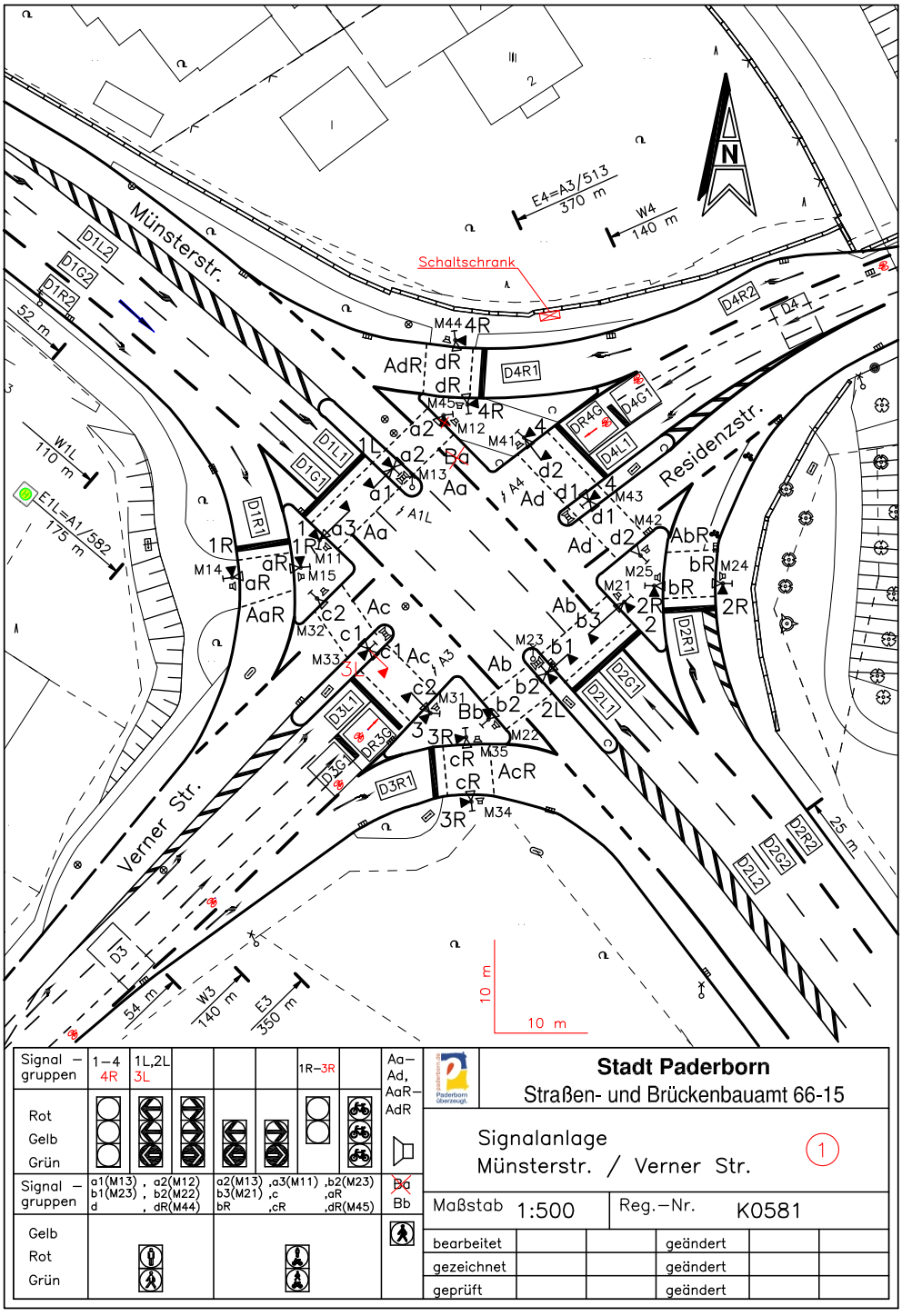


Abbildung A2-4: Lageplan der LSA K0581 (Münsterstr. / Verner Str.) von Paderborn (Schloß Neuhaus), Deutschland [PPS22]

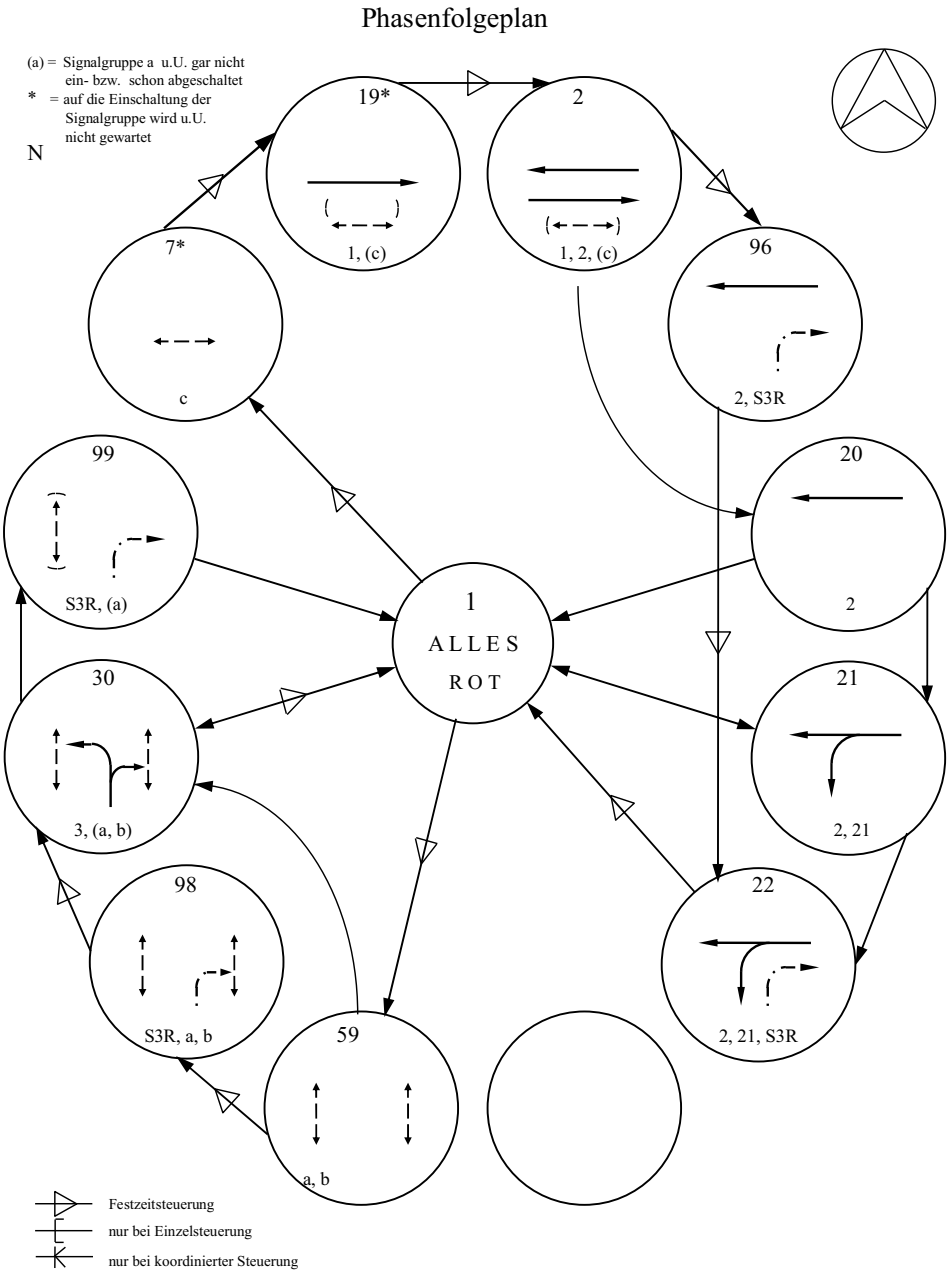


Abbildung A2-5: *Phasenfolgeplan der Schlosskreuzung (K0513) vor Aufnahme des PPS [PPS22]*

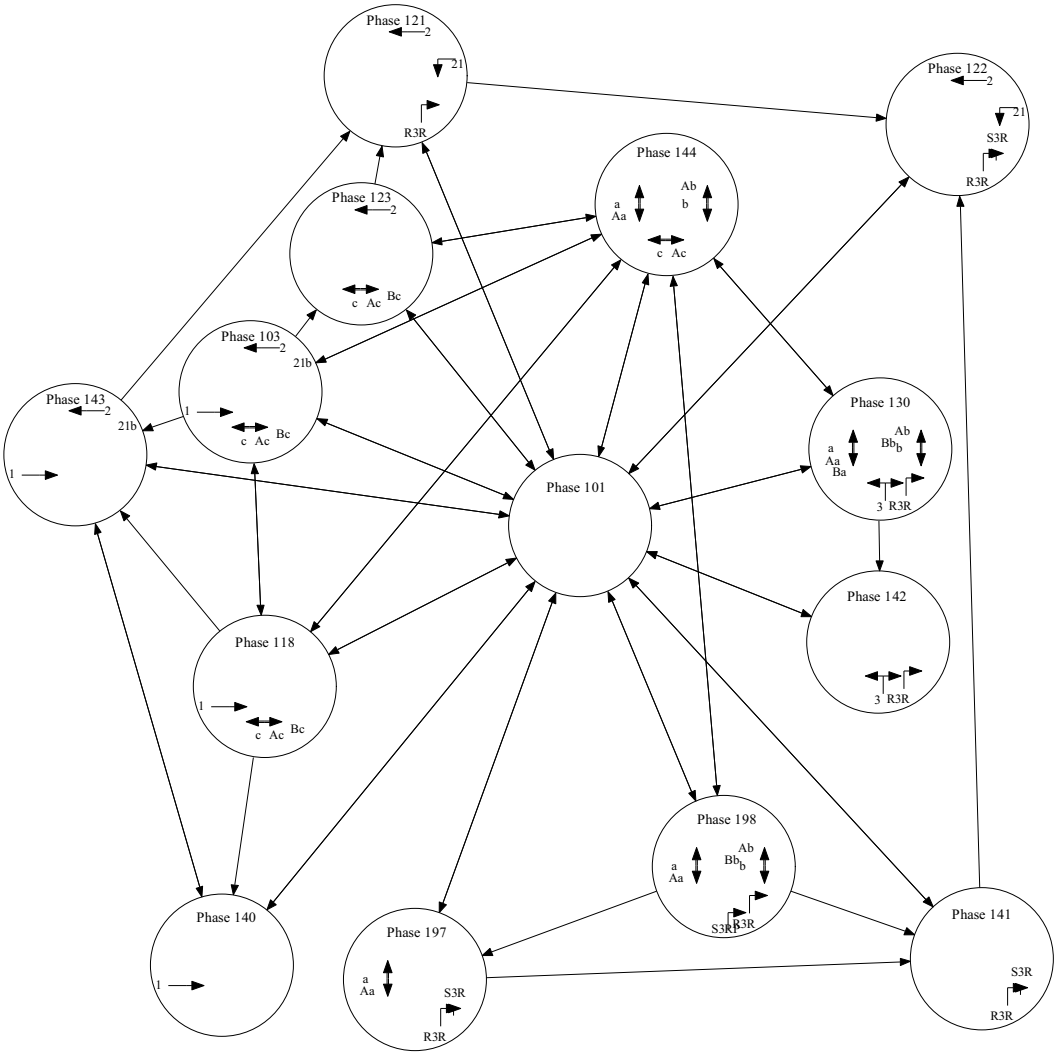


Abbildung A2-6: *Phasenfolgeplan der Schlosskreuzung (K0513) infolge des PPS [PPS22]*

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen kleinen Teil der im Rahmen des PPS angepassten Steuerungslogik der LSA-Steuergeräte. In diesem Ablaufdiagramm sind Fallunterscheidungen des AP-Wertes *ppsWPh1* als Variable der Wunschphase für Teilknoten 1 angedeutet. Als Reaktion werden entsprechende Phasenübergänge initialisiert.

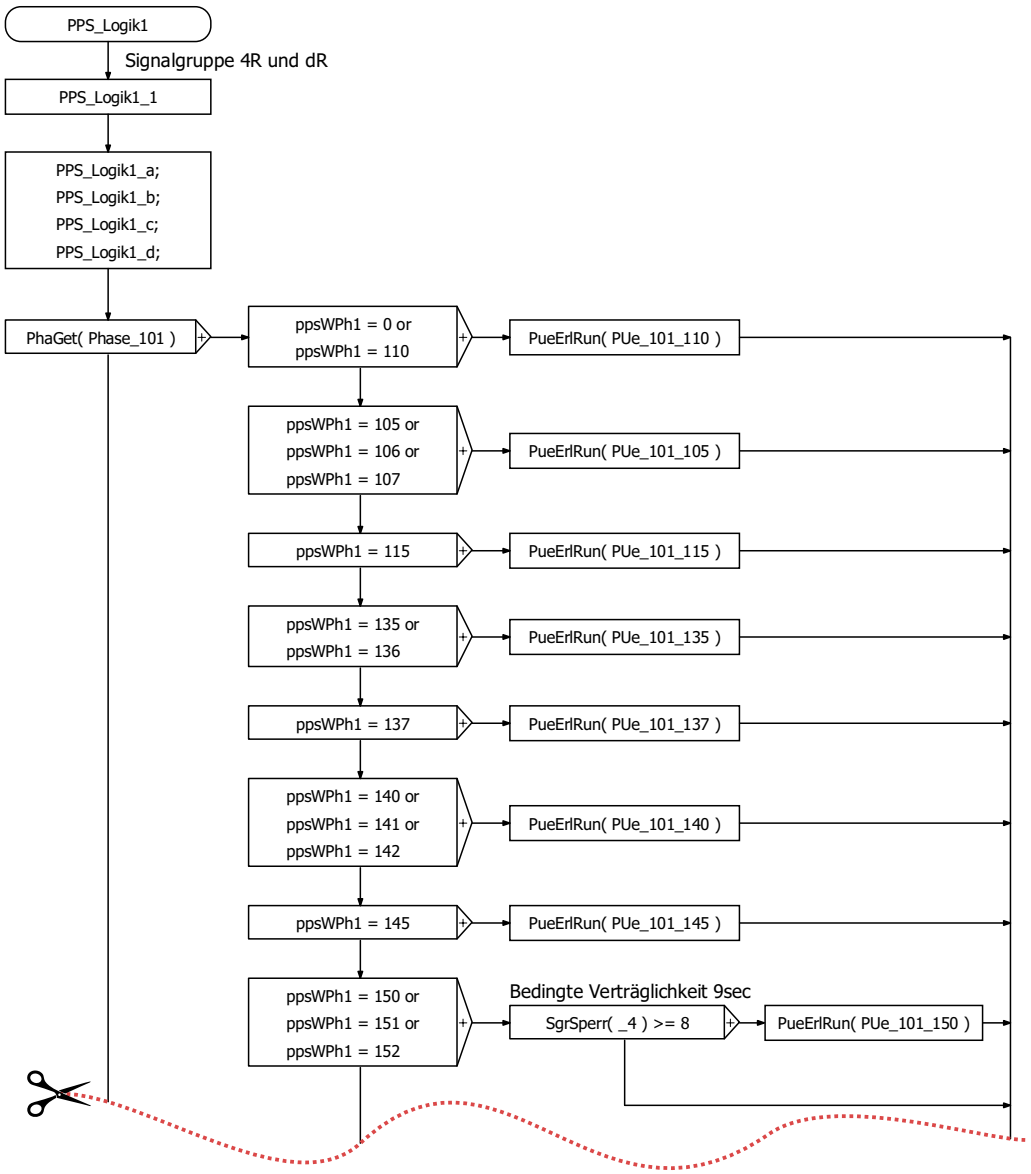


Abbildung A2-7: Auszug der Steuerungslogik einer LSA des PPS in Paderborn (Schloss Neuhaus) [PPS22]

A3 Weitergehende Diagramme und Tabellen

Im Hauptteil der Ausarbeitung dieser Dissertation sind bereits viele Untersuchungen u. a. grafisch veranschaulicht worden. Neben diesen sehr wichtigen und hervorgehobenen Beobachtungen sind einige weitere ausgewählte Ergebnisse und Darstellungen im Text referenziert, welche in diesem Abschnitt zusätzlich angeführt sind. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wird auf eine Auflistung der restlichen Ergebnisse an dieser Stelle verzichtet.

A3.1 Ergänzungen zu Kapitel 5

Abbildung A3-1: *Abweichungen der Fahrspurbelegungen von GTR und Schätzung einer ausgewählten Fahrspur in LSA-Umgebung*

Tabelle A3-1: *VTN-Gewichtungen der getesteten MPC-Konfigurationen*

		VTN-Fahrzeugtyp							
		PKW	Bus	LKW	Motor-rad	Fahr-rad	Liefer-wagen	Sattel-zug	Sattel-auflieger
MPC-Konfiguration	$p_{\text{Prio,bal}}$	1	2,4	1,2	0,6	1	1	1,6	1,6
	$p_{\text{Prio,uni}}$	1	1	1	1	1	1	1	1
	$p_{\text{Prio,em}}$	1	5	2	0,6	0,6	1,6	4	3,6

Tabelle A3-2: Wertetabelle zur Gegenüberstellung der LSA-Regelungsverfahren aus Abbildung 5-8

		Bewertungskriterium				
		$\bar{t}_t$ [s]	$\bar{t}_w$ [s]	$\overline{m}_{E,\mathrm{PM}_x}$ [mg]	$\overline{n}_H$ [-]	$\bar{t}_{w,\mathrm{Schwer}}$ [s]
Verkehrsszenario *VS 2*	Bestand	106,96	20,52	16,54	1,21	22,53
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,bal}}$)	93,92	10,63	14,97	0,9	11,67
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,uni}}$)	93,85	10,66	15,04	0,9	11,87
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,em}}$)	94,18	10,86	14,88	0,92	10,43
Verkehrsszenario *VS 3*	Bestand	126,12	31,12	15,24	1,57	65,8
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,bal}}$)	112,58	21,22	13,6	1,33	17,63
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,uni}}$)	110,96	20,03	13,55	1,28	17,2
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,em}}$)	112,05	20,9	13,37	1,29	11,8
Verkehrsszenario *VS 4*	Bestand	111,6	20,78	9,39	1,28	-
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,bal}}$)	93,79	5,96	8,3	0,63	-
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,uni}}$)	93,69	5,84	8,23	0,63	-
	MPC ($p_{\mathrm{Prio,em}}$)	93,91	6	8,25	0,64	-

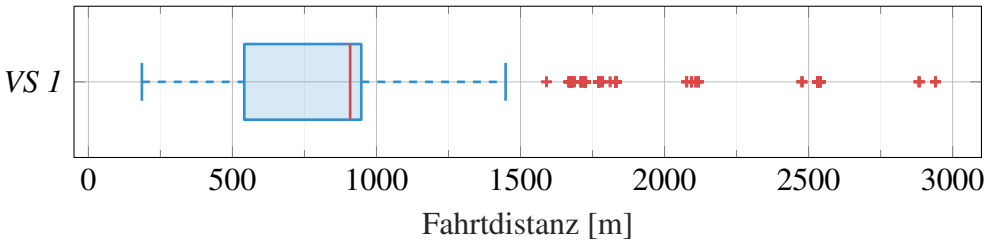


Abbildung A3-2: Fahrtdistanzverteilung des morgendlichen Verkehrsszenarios VS 1

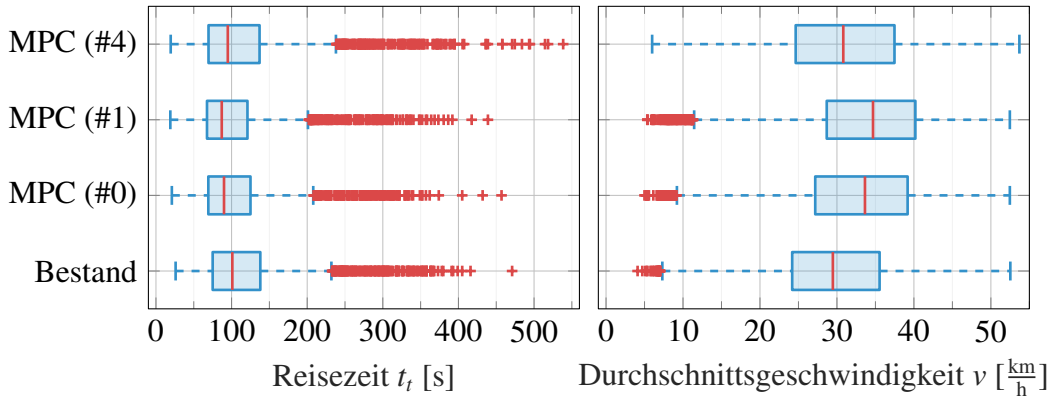


Abbildung A3-3: *Reisezeit- und Fahrtdistanzverteilung des morgendlichen Verkehrsszenarios VS 1*

Tabelle A3-3: *Prozentuale Kriteriengewichtungen innerhalb der MPC-Zielfunktion* (4-5) *mit Markierung der angepassten Gewichte*

			Art der Kriteriengewichtung	
			Standard [%]	Hohe Priorisierung Fußverkehr [%]
Kriterium	*K1*	Fahrzeugklassengewichtete Spurbelegungen	6,8	3,1
	K2	Kumulierter Ausgangsfluss der Kreuzung	9,5	4,4
	K3	Fahrzeugklassengewichtete Wartezeiten	12,2	5,7
	K4	Fahrzeugklassengewichtete maximale Wartezeiten	27,0	12,6
	K5	Spurbelegungen des Fußverkehrs	6,8	31,4
	K6	Wartezeiten des Fußverkehrs	13,5	31,4
	K7	Frühzeitiger Abwurf von Fußverkehrssignalen	6,8	3,1
	K8	Anzahl an Phasenwechseln	4,1	1,9
	K9	Anzahl freigegebener Signale innerhalb der gewählten Phasen	10,8	5,0
	K10	Frühe Schaltzeitpunkte	0,1	0,1
	K11	Bewertung aus vorangehender Optimierung	2,7	1,3

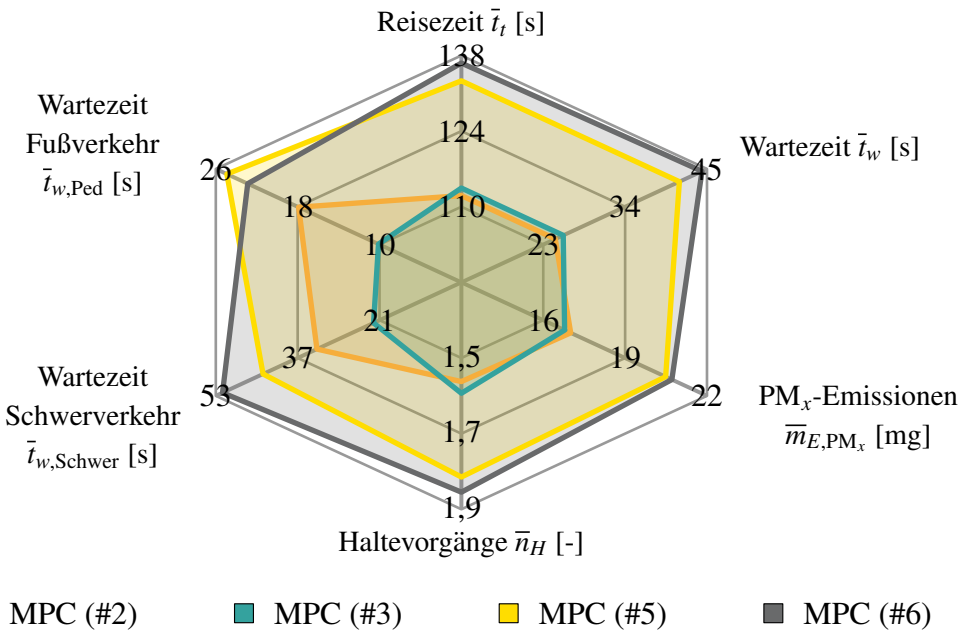


Abbildung A3-4: *Gegenüberstellung der durchschnittlichen Simulationsergebnisse verschiedener Netzwerkkommunikationen in Verbindung mit Fußverkehr und dessen Priorisierung*

A3.2 Ergänzungen zu Kapitel 6

Im Gegensatz zu den individuellen Reisezeiten der VTN variieren die durchschnittlichen Reisezeiten der jeweils zehn Simulationsdurchführungen lediglich sehr gering. Dementsprechend kann aufgrund der Art der Simulationsrandomisierung über die Startzeiten der VTN gefolgert werden, dass der Verkehrsbeobachter in allen Fällen trotz der wahrscheinlichkeitsbasierten Komponenten den Zustand des Systems gut rekonstruiert.

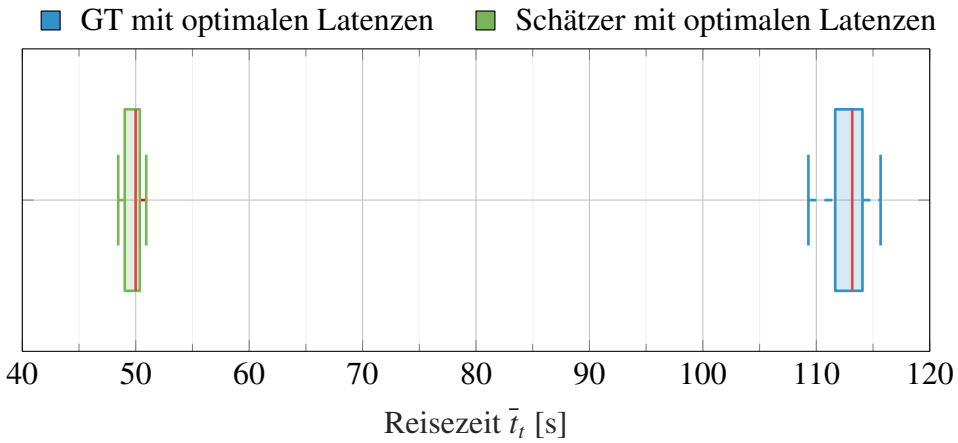


Abbildung A3-5: *Verteilung der durchschnittlichen Simulationsergebnisse der einzelnen Simulationen bzgl. der Reisezeit*

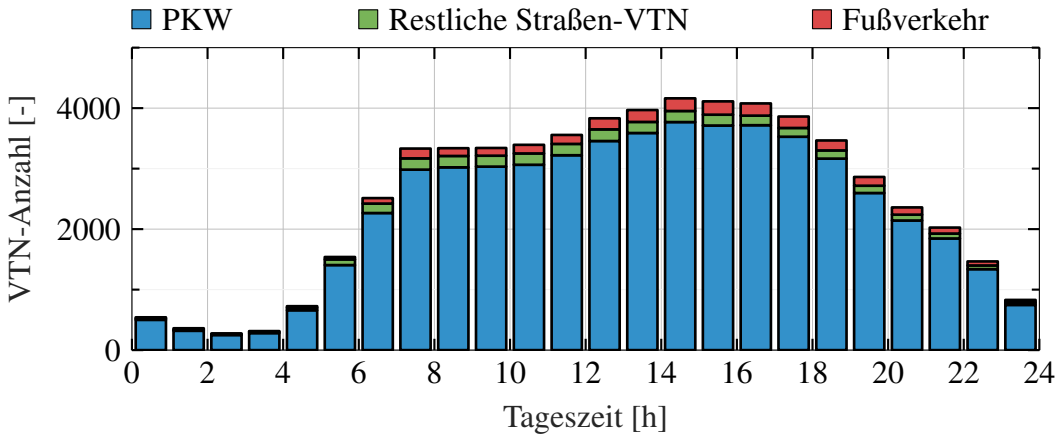


Abbildung A3-6: *Durchschnittlich aufgezeichnetes Verkehrsvolumen im westlichen Teilgebiet während des Realbetriebs*

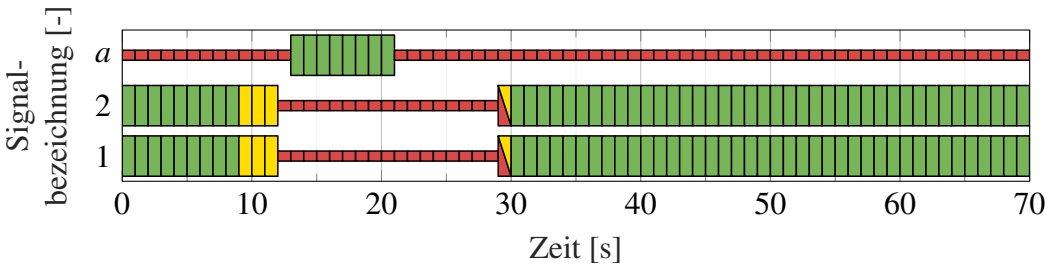


Abbildung A3-7: Korrespondierendes Schaltbild extrahiert aus den Steuergerätaufzeichnungen der Fußverkehrsanlage K0582 bei Betrieb des Bestandsverfahrens vom 18.05.22 um 11:53 Uhr

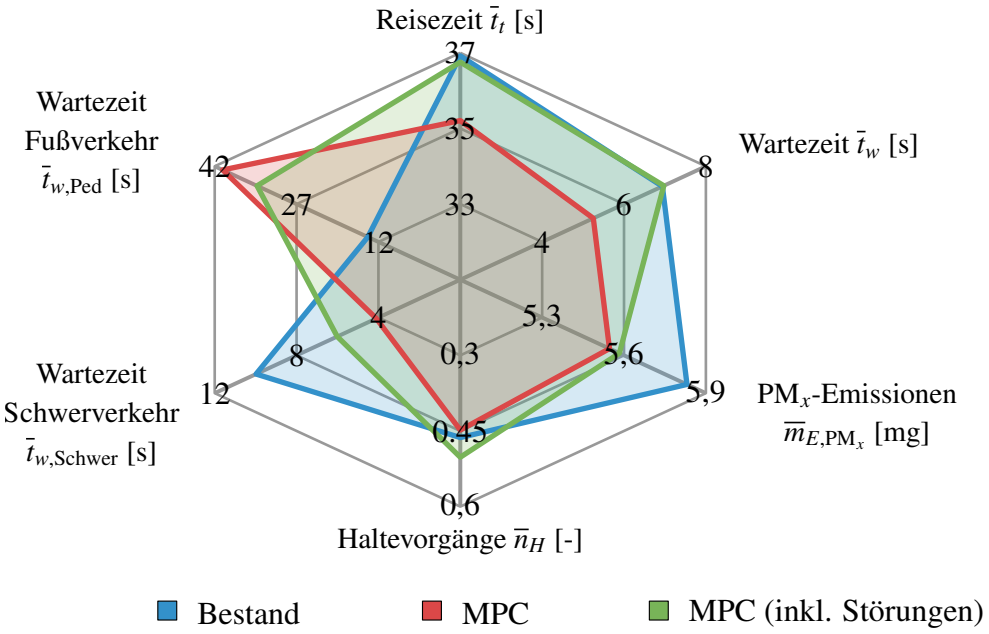


Abbildung A3-8: Ergebnisse der Realauswertung für VA 1 des westlichen PPS-Bilanzraums

Tabelle A3-4: *Ergebnisse des Feldtests im Gesamtgebiet des PPS*

		Bewertungskriterium						
		t_{Mess} [h]	$\bar{t}_t$ [s]	$\bar{t}_w$ [s]	$\overline{m}_{E,\text{PM}_x}$ [mg]	$\overline{n}_H$ [-]	$\bar{t}_{w,\text{Schwer}}$ [s]	$\bar{t}_{w,\text{Ped}}$ [s]
alle Verkehrsaufkommen	Bestand	275,74	42,44	12,46	5,34	0,77	24,34	24,48
	MPC	139,74	40,39	10,78	5,17	0,72	10,31	30,47
	MPC (inkl. Störungen)	1036,1	42,91	13,35	5,25	0,85	16,49	30,15
Verkehrsaufkommen *VA 1*	Bestand	95,34	34,17	5,15	4,92	0,41	18,94	13,69
	MPC	78,42	33,56	4,5	4,81	0,43	4,54	27,34
	MPC (inkl. Störungen)	376,2	34,27	5,46	5,04	0,46	12,22	25,72
Verkehrsaufkommen *VA 2*	Bestand	61,32	41,73	11,63	4,96	0,8	25,44	25
	MPC	18,26	46,52	15,88	5,54	0,93	12,92	35,29
	MPC (inkl. Störungen)	226,72	43,05	13,17	4,89	0,88	16,45	31,08
Verkehrsaufkommen *VA 3*	Bestand	119,08	49,42	18,74	5,86	1,05	27,18	31,24
	MPC	43,05	50,24	20,07	5,69	1,15	17,82	32,95
	MPC (inkl. Störungen)	433,18	50,33	20,3	5,63	1,16	19,88	33,22

Tabelle A3-5: *Angepasste Gesamtergebnisse des Feldtests im Gesamtgebiet des PPS durch Kompensation des Beobachtereffekts*

		Bewertungskriterium						
		t_{Mess} [h]	$\bar{t}_t$ [s]	$\bar{t}_w$ [s]	$\overline{m}_{E,\text{PM}_x}$ [mg]	$\overline{n}_H$ [-]	$\bar{t}_{w,\text{Schwer}}$ [s]	$\bar{t}_{w,\text{Ped}}$ [s]
alle Verkehrsaufkommen	Bestand	275,74	92,26	28	16,68	1,33	143,16	22,66
	MPC	139,74	87,8	24,23	16,17	1,24	60,68	28,21
	MPC (inkl. Störungen)	1036,1	93,28	30,01	16,41	1,46	96,99	27,91
Verkehrsaufkommen *VA 1*	Bestand	95,34	74,29	11,57	15,38	0,71	111,38	12,68
	MPC	78,42	72,95	10,11	15,02	0,74	26,7	25,32
	MPC (inkl. Störungen)	376,2	74,51	12,28	15,74	0,8	71,87	23,81
Verkehrsaufkommen *VA 2*	Bestand	61,32	90,72	26,13	15,51	1,38	149,67	23,15
	MPC	18,26	101,13	35,68	17,31	1,61	76,02	32,68
	MPC (inkl. Störungen)	226,72	93,58	29,6	15,29	1,52	96,78	28,78
Verkehrsaufkommen *VA 3*	Bestand	119,08	107,44	42,11	18,32	1,8	159,88	28,92
	MPC	43,05	109,21	45,09	17,79	1,97	104,84	30,51
	MPC (inkl. Störungen)	433,18	109,42	45,62	17,58	2	116,94	30,76

Tabelle A3-6: *Gesamtergebnisse des Feldtests im östlichen Teilgebiet des PPS*

		Bewertungskriterium						
		t_{Mess} [h]	$\bar{t}_t$ [s]	$\bar{t}_w$ [s]	$\overline{m}_{E,\text{PM}_x}$ [mg]	$\overline{n}_H$ [-]	$\bar{t}_{w,\text{Schwer}}$ [s]	$\bar{t}_{w,\text{Ped}}$ [s]
alle Verkehrsaufkommen	Bestand	139,08	39,17	9,75	4,66	0,69	34,89	24,85
	MPC	52,16	35,69	7,51	3,98	0,66	11,3	18,61
	MPC (inkl. Störungen)	533,15	38,73	10,09	4,5	0,78	19,38	24,42
Verkehrsaufkommen *VA 1*	Bestand	52,11	31,89	3,66	4,17	0,37	29,37	12,54
	MPC	31,47	31,09	3,38	3,7	0,41	5,32	13,31
	MPC (inkl. Störungen)	206,23	32,23	4,22	4,59	0,43	17,77	18,36
Verkehrsaufkommen *VA 2*	Bestand	30,84	38,26	8,77	4,23	0,73	35,7	25,56
	MPC	2,92	38,01	9,23	4,59	0,83	13,35	26,6
	MPC (inkl. Störungen)	119,89	39,58	10,48	4,2	0,85	18,37	28,08
Verkehrsaufkommen *VA 3*	Bestand	56,13	46,43	15,93	5,36	0,97	37,86	35,28
	MPC	17,77	43,47	14,56	4,39	1,09	18,7	26,68
	MPC (inkl. Störungen)	207,03	44,71	15,7	4,59	1,1	21,37	28,35

Tabelle A3-7: *Gesamtergebnisse des Feldtests im westlichen Teilgebiet des PPS*

		Bewertungskriterium						
		t_{Mess} [h]	$\bar{t}_t$ [s]	$\bar{t}_w$ [s]	$\overline{m}_{E,\text{PM}_x}$ [mg]	$\overline{n}_H$ [-]	$\bar{t}_{w,\text{Schwer}}$ [s]	$\bar{t}_{w,\text{Ped}}$ [s]
alle Verkehrsaufkommen	Bestand	136,66	45,77	15,22	6,02	0,86	14,82	20,22
	MPC	87,58	43,19	12,73	5,88	0,75	9,79	35,21
	MPC (inkl. Störungen)	502,95	47,33	16,82	6,05	0,91	13,52	31,82
Verkehrsaufkommen *VA 1*	Bestand	43,24	36,92	6,94	5,83	0,46	9,98	12,91
	MPC	46,96	35,21	5,25	5,55	0,45	4,1	37,55
	MPC (inkl. Störungen)	169,97	36,76	6,97	5,58	0,5	6,01	31,71
Verkehrsaufkommen *VA 2*	Bestand	30,47	45,25	14,52	5,7	0,87	15,4	20,72
	MPC	15,34	48,14	17,14	5,72	0,95	12,84	33,83
	MPC (inkl. Störungen)	106,83	46,93	16,19	5,67	0,93	14,3	29,56
Verkehrsaufkommen *VA 3*	Bestand	62,95	52,09	21,25	6,31	1,12	17,65	23,26
	MPC	25,28	54,99	23,94	6,61	1,18	17,21	33,19
	MPC (inkl. Störungen)	226,16	55,47	24,51	6,58	1,22	18,51	32,97

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Vernetzung, Autonomie: Neue Methoden und Technologien für die intelligenten technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren/in mit insgesamt 120 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 15 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Networking, Autonomy: New methods and technologies for intelligent technical systems of tomorrow”. In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrows economy.

Today eight Professors and 120 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 15 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 396 KOHLSTEDT, A.: Modellbasierte Synthese einer hybriden Kraft-/Positionsregelung für einen Fahrzeugachsprüfstand mit hydraulischem Hexapod. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 396, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-15-6

Bd. 397 DREWEL, M.: Systematik zum Einstieg in die Plattformökonomie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 397, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-16-3

Bd. 398 FRANK, M.: Systematik zur Planung des organisationalen Wandels zum Smart Service-Anbieter. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 398, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-17-0

Bd. 399 KOLDEWEY, C.: Systematik zur Entwicklung von Smart Service-Strategien im produzierenden Gewerbe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 399, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-18-7

Bd. 400 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 16. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 2. und 3. Dezember 2021, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 400, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-19-4

Bd. 401 BRETZ, L.: Rahmenwerk zur Planung und Einführung von Systems Engineering und Model-Based Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 401, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-20-0

Bd. 402 WU, L.: Ultrabreitbandige Sampler in SiGe-BiCMOS-Technologie für Analog-Digital-Wandler mit zeitversetzter Abtastung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 402, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-21-7

Bd. 403 HILLEBRAND, M.: Entwicklungssystematik zur Integration von Eigenschaften der Selbstheilung in Intelligente Technische Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 403, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-22-4

Bd. 404 OLMA, S.: Systemtheorie von Hardware-in-the-Loop-Simulationen mit Anwendung auf einem Fahrzeugachsprüfstand mit parallelkinematischem Lastsimulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 404, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-23-1

Bd. 405 FECHTELPETER, C.: Rahmenwerk zur Gestaltung des Technologietransfers in mittelständisch geprägten Innovationsclustern. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 405, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-24-8

Bd. 406 OLEFF, C.: Proaktives Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 406, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-25-5

Bd. 407 JAVED, A. R.: Mixed-Signal Baseband Circuit Design for High Data Rate Wireless Communication in Bulk CMOS and SiGe BiCMOS Technologies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 407, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-26-2

Bd. 408 DUMITRESCU, R, KOLDEWEY, C.: Datengestützte Projektplanung. Fachbuch. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 408, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-27-9

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 409 PÖHLER, A.: Automatisierte dezentrale Produktionssteuerung für cyber-physische Produktionssysteme mit digitaler Repräsentation der Beschäftigten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 409, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-28-6

Bd. 410 RÜDDENKLAU, N.: Hardware-in-the-Loop-Simulation von HD-Scheinwerfer-Steuergeräten zur Entwicklung von Lichtfunktionen in virtuellen Nachtfahrten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 410, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-29-3

Bd. 411 BIEMELT, P.: Entwurf und Analyse modellprädiktiver Regelungsansätze zur Steigerung des Immersionsempfindens in interaktiven Fahrsimulationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 411, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-30-9

Bd. 412 HAAKE, C.-J., MEYER AUF DER HEIDE, F., PLATZNER, M., WACHSMUTH, H., WEHRHEIM, H. (Eds..): On-The-Fly Computing - Individualized IT-Services in dynamic markets, Collaborative Research Centre 901 (2011 - 2023), Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 412, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-31-6

Bd. 413 DUMITRESCU, R.; HÖLZLE, K. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 17. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 14./15. September 2023, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 413, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-32-3

Bd. 414 ABUGHANNAM, S.: Low-power Direct-detection Wake-up Receiver at 2.44 GHz for Wireless Sensor Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 414, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-33-0

Bd. 415 REINHOLD, J.: Systematik zur musterbasierten Transformation von Wertschöpfungssystemen für Smart Services. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 415, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-34-7

Bd. 416 YANG, X.: Eine Methode zur Unterstützung von Entscheidungen bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 416, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-35-4

Bd. 417 GRÄLER, M.: Entwicklung adaptiver Einrichtassistenzsysteme für Produktionsprozesse. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 417, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-36-1

Bd. 418 RÖSMANN, D.: Menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 418, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-37-8

Bd. 419 BAHMANIAN, M.: Optoelectronic Phase-Locked Loop, Theory and Implementation. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 419, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-38-5

Bd. 420 HEIHOFF-SCHWEDE, J.: Spezifikationstechnik zur Analyse, Gestaltung und Bewertung von Engineering-IT-Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 420, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-39-2

Bd. 421 MEYER, M.: Systematik zur Planung und Verwertung von Betriebsdaten-Analysen in der strategischen Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 421, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-40-8

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Die vorliegende Dissertation beschreibt das Konzept und den Entwicklungsprozess eines Lichtsignalanlagenregelungssystems bis zur Realumsetzung. Das Regelungssystem, welches im Rahmen des Pilotprojekts Schlosskreuzung entstanden ist, besteht dabei aus zwei untereinander abgestimmten Methoden zur Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion und zur modellprädiktiven Regelung des Verkehrssystems anhand der vorhandenen Lichtsignalanlagen. Die Echtzeit-Verkehrsrekonstruktion approximiert dabei simulationsbasiert den aktuellen Verkehrszustand anhand gegebener Messdaten über dynamische Verkehrszuweisungen. Die entwickelte mehrstufige Lichtsignalanlagenregelung nutzt ein Fuzzy-System zur Phasenvorauswahl, um anschließend über eine modellprädiktive Regelung das nichtlineare Problem mit dem Ergebnis der optimalen Kombinationen von Phasen und Schaltzeitpunkten zu lösen. Das Regelungssystem wird in dieser Arbeit anhand eines ausgewählten Verkehrsgebiets zunächst rein simulativ getestet und mit dem vorliegenden Bestandsverfahren verglichen. Im Anschluss an die prototypische Inbetriebnahme wird dieser Vergleich durch die Feldtests abgeschlossen. Entsprechende Ergebnisse zeigen das große Potential der Entwicklung hinsichtlich der Reduktion von Kriterien wie Emissionen oder Wartezeiten und gleichzeitig den Handlungsbedarf für eine standardmäßige Nutzung.