

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



```
0111 1001
0110011 01011
10101110110001110101
1011010111100001011001
0100011010001101001101111010
11010110000011110101011101
00111010110100001110010
10001001000011100000
011001001011101011100
01100100101110 101
11001011010
011010
101
```

DIGITALES
NORDRHEIN-WESTFALEN
MODELLREGION OWL

Pilotprojekt Schlosskreuzung

Abschlussbericht

Autoren:

Alexander Schmidt (RTB GmbH und Co. Kg)

Georg Schnittker (Stührenberg GmbH)

Kevin Malena (Heinz Nixdorf Institut – Universität Paderborn)

Sebastian Adler (Straßen- und Brückenbauamt – Stadt Paderborn)

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	1
II.	Zusammenfassung.....	2
III.	Summary	3
IV.	Projektbeschreibung.....	4
V.	Zeitplan:	9
VI.	Aufgaben und Ergebnisse der Arbeitspakete	13
	Arbeitspaket 1: Erstellen eines Lasten- und Pflichtenhefts.....	14
	Arbeitspaket 2: Aufbau eines Simulationsmodells des Versuchsfelds	15
	Arbeitspaket 3: Entwicklung der Verkehrsflussregelung.....	18
	Arbeitspaket 4: Ausbau der Kommunikationsinfrastruktur	23
	Arbeitspaket 5: Ausbau der Infrastruktur für die Datenerhebung.....	25
	Arbeitspaket 6: Ausbau der Infrastruktur der Verkehrssteuerungssysteme	41
	Arbeitspaket 7: Öffentlichkeitsarbeit	53
	Arbeitspaket 8: Validierung	54
VII.	Projektergebnisse	72
VIII.	Literaturverzeichnis der im Projekt entstandenen Veröffentlichungen	80
IX.	Abbildungsverzeichnis.....	81
X.	Tabellenverzeichnis.....	83
XI.	Anlage 1: Konzept zur Vorrangschaltung von Einsatzfahrzeugen	84
XII.	Anlage 2: IT-Sicherheit von OCIT-Systemen	87
XIII.	Anlage 3: Arbeitsprozesse zur Behebung von Störungen.....	94
XIV.	Anlage 4: Übersicht der Veranstaltungen und Webseiten	96

II. Zusammenfassung

Hohes Fahrzeugaufkommen im städtischen Verkehrsraum verursacht Schadstoff- und Lärmemissionen. Lokale Fahrverbote senken zwar kurzfristig lokale Emissionen, lösen das grundsätzliche Problem jedoch nicht. Ziel dieses Projektes der Projektpartner Stadt Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, RTB und Stührenberg war daher die Verflüssigung des Verkehrs entlang eines ausgewählten Straßenzugs (Residenzstraße mit „Schlosskreuzung“) durch eine intelligente Steuerung der Lichtsignalanlagen (LSA) auf dem Gebiet der Stadt Paderborn. Dadurch sollten nicht nur die Emissionen gesenkt, sondern auch die Lebensqualität der Anwohner sowie die Standortattraktivität für Pendler und ortsansässige Unternehmen gesteigert werden.

Erforderlich waren dazu die Umsetzung einer digitalen Infrastruktur zur Echtzeitdatenerhebung aller Verkehrsteilnehmenden und eine hochgradig flexible LSA-Steuerung. Diese wird auf Basis von innovativer Sensorik und Optimierungsalgorithmen stets dem aktuellen Verkehrsgeschehen angepasst und kann so Stauungen, energieaufwändige Stop & Go-Bewegungen der Fahrzeuge sowie unnötige Wartezeiten der Verkehrsteilnehmenden vermeiden.

Die zusätzlich erhobenen Verkehrsdaten werden auf der Local Open Data Platform der Stadt Paderborn bereitgestellt, um die Wahrnehmung und Akzeptanz in der Bevölkerung zu unterstützen, außerdem können die Daten zur Erprobung der Plattform genutzt werden. Das Projekt leistet damit einen wichtigen Beitrag zum Konzept „Digitales Paderborn in der Modellregion OWL“, im Handlungsfeld „Digitalisierung in den Lebensbereichen“ (Lebensbereich Verkehr).

Das Projekt lässt sich insgesamt sehr positiv zusammenfassen. Alle sechs Testanlagen im Gebiet von Schloß Neuhaus konnten mithilfe des neu entwickelten modellprädiktiven Regelungsalgorithmus dauerhaft betrieben werden. Dazu wurden Sensordaten der sog. TOPO-Boxen und zusätzlich Live-Daten der LSA (u.a. Induktionsschleifendaten) in eine Verkehrssimulation eingespeist, auf deren Basis dann über die Regelungsstrategie die als optimal berechneten Folgephasen als Wunsch an die betreffenden LSA übertragen wurden. Für die Kommunikation zwischen dem Steuerungsalgorithmus und den LSA wurde das cloudbasierte ReTCon-Online-System genutzt, bei dem die Anbindung über Mobilfunk (gewöhnlich mit Schwächen im Bereich Latenz und Stabilität) erfolgt. Hintergrund ist, dass die Verbindung über Standleitungen zum städtischen Verkehrsrechner nicht mit ausreichender Qualität hergestellt werden konnte. Obwohl es bei der Realumsetzung dennoch zu einigen Problemen im Kommunikationsbereich mit den LSA kam, konnten die Emissionen im Betriebszeitraum des Pilotprojekt-Regelungsalgorithmus gesenkt werden. Zudem hat sich herausgestellt, dass bspw. kurzzeitige Kommunikationsausfälle dazu führen, dass das Potential des neuen Algorithmus nicht ausgeschöpft werden kann. Dennoch konnten nicht nur im Optimalfall, sondern auch im Dauerbetrieb, d.h. mit Kommunikationsausfällen, die Emissionen im Testgebiet reduziert werden.

III. Summary

High vehicle volumes in urban traffic areas cause pollutant and noise emissions. Local driving bans reduce local emissions in the short term, but do not solve the fundamental problem. Therefore, the aim of this project of the project partners City of Paderborn, Heinz Nixdorf Institute, RTB and Stührenberg was the smoothing of traffic along a selected road section (Residenzstraße with „Schlosskreuzung“) via an intelligent control of the traffic light systems (TLS) within the City of Paderborn. The intention was not only to reduce emissions, but also to improve the quality of life for residents and make the location more attractive for commuters and local businesses.

This required the implementation of a digital infrastructure for real-time data collection of all road users and a highly flexible TLS control system. The control strategy based on innovative sensor technologies and optimization algorithms adapts to the current traffic situation and thus is able to avoid congestion, energy-consuming Stop & Go-movements of vehicles and unnecessary waiting times for road users.

The collected traffic data is made available on the Local Open Data platform of the city of Paderborn to support awareness and acceptance among the community and to test the platform. The project makes an important contribution to the concept „Digital Paderborn in the model region OWL“ specifically in the field of „Digitalization in the areas of life“ (area transport).

The project can be summarized very positively overall. All six test TLS in the area of Schloß Neuhaus could be operated permanently with the help of the newly developed model predictive control algorithm. For this purpose, sensor data from the so-called TOPO-Boxes and additional live data from the TLS (including induction loop data) were fed into a traffic simulation. For the communication between the control algorithm and the TLS, the cloud-based ReTCon online system was used, in which the connection is made via mobile radio (usually with weaknesses in the area of latency and stability). The background is that the connection via dedicated lines to the municipal traffic computer could not be established with sufficient quality. On this basis the following optimal traffic light phases were then transmitted to the relevant TLS. Although there were still some problems in the communication with the TLS during the real implementation (high latencies and communication failures), the emissions could be improved during the operating period of the pilot project control algorithm. However, it has been found that, for example, short-term communication failures cause that the potential of the new algorithm cannot be fully exploited. Nevertheless, emissions in the test area were reduced not only in the optimum case, but also in permanent operation, i.e. with communication failures.

IV. Projektbeschreibung

Motivation und Ausgangslage

Besonders in Kreuzungsbereichen treten Staus und stockender Verkehr auf und haben einen erheblichen Anteil an den Emissionen im innerstädtischen Straßenverkehr. Insbesondere bei Beschleunigungsvorgängen stoßen verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge¹ höhere Emissionen aus als bei gleichmäßiger Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass sich die Emissionen in Städten verringern ließe, wenn Fahrzeuge in einem möglichst konstanten Verkehrsfluss fahren könnten. Gleichzeitig sind die Belange weiterer Verkehrsteilnehmenden (Fußverkehr, Radverkehr, öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)) zu berücksichtigen. Bei der Steuerung von LSA² besteht ein großes Optimierungspotential zur Verstetigung der Verkehrsflüsse wie es mittel- bzw. kurzfristig möglich ist positiven Einfluss auf die generelle Verkehrssituation eines bestimmten Bereiches zu nehmen.

In den Jahren vor 2019 wurden die Grenzwerte nach der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung in drei Straßenraumabschnitten in der Stadt Paderborn überschritten. Einer der betroffenen Straßenabschnitte war im Stadtteil Schloß Neuhaus die Residenzstraße. Hier lagen die Stickstoffoxide über dem jährlichen Grenzwert. Ziel des Pilotprojekts war es daher in Schloß Neuhaus die Schaltungen der Lichtsignalanlagen so zu optimieren, dass kurzfristig ein Betrag geleistet werden kann, die Emissionen zu senken. Derzeit werden die LSA im Stadtgebiet Paderborn überwiegend verkehrsabhängig³ gesteuert. Zudem sind nahezu alle LSA am städtischen Verkehrssystemrechner angeschlossen. Somit lassen sich verschiedenste Analysen mit den vorhandenen Daten vornehmen. Darüber hinaus können vereinzelt Eingriffe in die Steuerlogik über den Verkehrsrechner erfolgen. Das Potenzial der vorliegenden Echtzeitdaten kann über das derzeitige Steuerverfahren jedoch nicht voll ausgeschöpft werden.

Alle vier am Vorhaben beteiligten Partner verfügen über eine ausgesprochen hohe Digitalisierungskompetenz. Die Stadt Paderborn hat sich im Jahr 2017 mit ihrem Digitalisierungskonzept bei dem vom Digitalverband Bitkom und dem Deutschen Städte- und Gemeindebund ausgerufenen Wettbewerb „Digitale Stadt“ beworben und sich für die Endrunde qualifiziert. Damit ist sie bestens gerüstet für das Programm „Förderung von digitalen Modellregionen“ in NRW. Das Heinz Nixdorf Institut befasst sich mit dem Entwurf intelligenter technischer Systeme und hat speziell bei der Auslegung intelligenter Steuerungen und Regelungen in Bezug auf die Digitalisierung in technischen Bereichen eine hohe wissenschaftliche Reputation. Die innovativen

¹ Bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb ist bei ungleichmäßiger Fahrt der Energiebedarf ebenfalls höher. Hier lägen die Hauptvorteile im verminderten Energiebedarf und in der Verkürzung von Wartezeiten.

² LSA = Lichtsignalanlagen; Diese dienen primär der Verkehrssicherheit und steuern den Straßenverkehr. Es gilt Sicherheit vor Leichtigkeit.

³ (teil)-verkehrsabhängige Signalsteuerung: Über Detektoren wird das Verkehrsaufkommen lokal ermittelt. Anhand dieser Daten werden für alle VTN Freigaben eingeleitet und Freigabezeiten angepasst.

Unternehmen RTB und Stührenberg entwickeln ihre Produkte konsequent in Richtung Digitalisierung weiter, z.B. durch intelligente Auswertelgorithmen, Drahtloskommunikation entwickelter Sensoren oder Flexibilisierung der LSA-Steuerung durch offene⁴ programmierbare Schnittstellen.

Projektziele

Das übergeordnete Projektziel

Projektziel war die Optimierung des Verkehrsflusses zur Senkung von Schadstoff- und Lärmemissionen sowie der Wartezeit für alle Verkehrsteilnehmenden (VTN) innerhalb des ausgewählten städtischen Verkehrsraumes. Das Testgebiet war auf einen Bereich des Stadtteils Schloß Neuhaus von Paderborn beschränkt, der sechs Lichtsignalanlagen (LSA) enthält. Dementsprechend sollte im Pilotprojekt Schlosskreuzung eine vollständig flexible, optimal und dynamisch an das aktuelle Verkehrsgeschehen angepasste LSA-Schaltung erreicht werden. Diese entwickelte Regelung basiert auf innovativer Sensorik, die hochaufgelöste Echtzeitdaten über das Verkehrsaufkommen bereitstellt.

Weitere Zielsetzungen:

- Echtzeitdatenerfassung und -verarbeitung
- Weiterentwicklung von Sensorik zur besseren Klassifizierung der VTN
- Öffnung des städtischen Verkehrsrechners (Implementierung von OCIT)
- Entwicklung von Sensorik zur Rückstauerfassung
- Entwicklung von Sensorik zur Umweltdatenerfassung
- Ertüchtigung der Lichtsignalanlagentechnik zur Echtzeitschaltung über einen zentralen Steuerungsalgorithmus
- Aufbau der Gesamtarchitektur zur Kommunikation zwischen datenerfassenden und datenverarbeitenden Systemen
- Bereitstellung der erfassten Daten auf der „Local Open Data Platform“

Alleinstellungsmerkmale des Projekts

Eines der Alleinstellungsmerkmale des Projekts ist die innovative Verwendung der zur Verfügung stehenden Live-Daten. Diese teils fahrzeugtyp-sensitiven Daten werden direkt in eine Verkehrssimulation integriert und zu einem aktuellen Verkehrszustand verarbeitet. Zudem ist die modellbasierte Prädiktion des zukünftigen Verkehrsgeschehens eine weitere Besonderheit. Darüber können die jeweils optimalen Folgephasen⁵ dann an die entsprechenden LSA im System übermittelt werden. Auf diese

⁴ Offene Schnittstellen: freizugängliche Schnittstellenstandards.

⁵ Folgephase = die Phase, die auf die aktuelle Phase folgt.

Weise kann sehr gezielt und aktuell auf den Verkehr reagiert und definierte Ziele wie bspw. die Reduktion von Emissionen oder von Buswartezeiten umgesetzt werden.

Vorstellung der Projektpartner

Heinz Nixdorf Institut

Die Fachgruppe Regelungstechnik und Mechatronik des Heinz Nixdorf Instituts forscht bereits seit mehreren Jahren auf den Gebieten der Fahrassistenzsysteme, des automatisierten Fahrens und Verkehrsmanagement. Die Schwerpunkte im Verkehrsmanagement liegen auf einer intelligenten Verkehrssteuerung für einzelne Kreuzungen, Straßenzüge und größere Bilanzräume aus einer Vielzahl vernetzter Kreuzungen. Die Ziele sind u. a. durch Verflüssigung des Verkehrs Wartezeiten zu verkürzen und Emissionen bzw. den Primärenergiebedarf zu minimieren. In realitätsnahen Simulationsszenarien konnten bereits signifikante Verbesserungen nachgewiesen werden. Die Grundlagenforschung ist so weit fortgeschritten, dass nun der Transfer in reale Anwendungen erfolgen kann.

Der Projektbeitrag des Heinz Nixdorf Instituts war der Aufbau einer Simulationsumgebung für das Versuchsfeld, die simulationsbasierte Analyse zur Identifikation geeigneter Messstellen sowie die Entwicklung und Umsetzung einer optimalen dynamischen Verkehrsflusssteuerung für den ausgewählten Bilanzraum. Im ersten Schritt sollte die Simulation den derzeitigen Zustand wiedergeben. Hierzu wurde ein entwickeltes Verkehrsmodell mit aktuellen Verkehrsdaten und den Steuerungslogiken der Verkehrsleitsysteme (LSA) im betrachteten Gebiet parametrisiert. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Analyse der Verkehrsflüsse und die Bedarfsermittlung für Messstellen zur optimierten dynamischen Verkehrsflusssteuerung. Im weiteren Projektverlauf wurde anhand der Erkenntnisse der Analyse des Ist-Zustandes die optimale Verkehrsflusssteuerung entwickelt und wiederum zunächst simulationsbasiert erprobt. Im Anschluss wurde die dabei entstandene Logik in Verbindung mit den aufgerüsteten LSA-Steuergeräten der Fa. Stührenberg und der zusätzlichen auf einem dedizierten Rechner der Stadt Paderborn implementiert, sodass die Grundlage für den realen Test gegeben war. Nach der Durchführung und Begleitung der mehrwöchigen Testphase bestand der letzte Arbeitspunkt darin, die Auswertung und Analyse der im Projekt aufgenommenen Daten vorzunehmen.

RTB GmbH und Co. KG

Der Projektbeitrag der Firma RTB GmbH & Co. KG ist die Bereitstellung / Lieferung, Installation und Inbetriebnahme der zur Verkehrsflussdatenerhebung erforderlichen Messsysteme sowie die Weiterentwicklung dieser Systeme während der Projektlaufzeit. Ziel ist eine optimale Verkehrsflusssteuerung gemäß den Anforderungen ermöglichen zu können. Hierzu ist eine Anpassung der Kommunikationsschnittstellen der Messsysteme notwendig, da im Projektverlauf eine neu eingerichtete Kommunikationsinfrastruktur entsteht.

Zusätzlich sollte untersucht werden, inwieweit Einrichtungen zur Emissionsmessung (neben Schall- auch Schadstoffemissionen) in bestehende Messsysteme integriert werden können. Mit Hilfe dieser Schadstoffemissionsdaten, die gleichzeitig mit den Verkehrsdaten erfasst werden sollten, sollten die im Projektantrag beschriebenen Zusammenhänge auch messtechnisch untersucht und nachgewiesen werden.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden neuartige kamerabasierte Systeme mit besonders hoher Genauigkeit / Auflösung bei der Klassifizierung und der Interpretation des Verhaltens der VTN integriert. Hierzu sollten innovative Auswertelgorithmen entwickelt werden, die nicht nur eine Zählung, sondern auch eine Klassifizierung sowie Verhaltensinterpretation der VTN und das Erkennen von Pulkbildungen ermöglichen. Dies schließt eine Pulkerkennung sowie die Ermittlung der Pulkauflösung ein.

Stührenberg GmbH

Die Firma Stührenberg ist mit innovativer Verkehrstechnik seit mehr als 50 Jahren am Markt präsent. Als mittelständisches Unternehmen ist sie über die Grenzen von Deutschland hinaus tätig. Vom Stammsitz in Detmold aus bietet sie gemeinsam mit den Niederlassungen und Servicestützpunkten modernste Straßenverkehrstechnik. Dabei reicht die Produktpalette von LSA-Steuergeräten über eine selbst entwickelte Signalgeberreihe und innovative LED-Beleuchtungstechnik bis zum modularen Rechnersystem für hochkomplexe Verkehrssituationen. Mit den neuen Möglichkeiten der Verkehrsdatenerhebung ergeben sich auch neue Potentiale für die Verkehrssteuerung. Der nächste logische Schritt ist es, durch die frühzeitige Erfassung der Verkehrsströme eine Optimierung des Verkehrsflusses für einzelne Kreuzungen, aber insbesondere auch für ganze Straßenzüge oder Bezirke zu erreichen. Als Mitglied der ODG (OCIT Developer Group) wird Stührenberg die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse auch in die Weiterentwicklung des OCIT-Standards einfließen lassen.

Der Projektbeitrag der Firma Stührenberg war der Ausbau der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur, die Herstellung der Kommunikationsverbindung zu den zentralen Komponenten, die Bereitstellung von Programmierschnittstellen und die Integration der optimierten Steuerungsalgorithmen in die LSA-Steuergeräte. Für die spätere Bewertung der Verkehrssteuerung wurden verschiedene Prozessdaten aus der LSA-Steuerung bereitgestellt. Für die Integration der Steuerungsalgorithmen wurden, in Abhängigkeit der Anforderungen der Optimierungsalgorithmen, Weiterentwicklungen an den LSA-Steuergeräten umgesetzt.

Stadt Paderborn

Die Abteilung Verkehrstechnik der Stadt Paderborn betreibt, plant und baut die LSA im Paderborner Stadtgebiet. Darüber hinaus ist die Stadt Paderborn Eigenwarter, wodurch auch die technische Anpassung und die Wartung der Lichtsignalanlagen in der Abteilung Verkehrstechnik koordiniert werden. Durch das vorhandene Fachwissen von Elektro- und Bauingenieuren sind die Kompetenzen für den Betrieb und die Planung

von Lichtsignalanlagen vorhanden. Zusätzlich besteht durch eine enge Zusammenarbeit mit der städtischen Straßenverkehrsbehörde ein hohes Maß an fachlichem Wissen zum Thema Verkehrssicherheit und Richtlinienkonformität.

Der Projektbeitrag der Stadt Paderborn bestand darin, die Infrastruktur für die Durchführung des Pilotprojekts anzupassen, damit Feldversuche möglich sind. Außerdem stellte die Stadt Paderborn das nötige Fachwissen bezüglich signaltechnischer Sachverhalte und verkehrsrechtlicher Sicherheit des Vorhabens. Das Vorhaben war in Bezug auf signaltechnische und verkehrsrechtliche Regelwerke zu prüfen, deren Einhaltung stets zu gewährleisten war. Die Koordination und Ausführung der notwendigen baulichen Anpassungen lagen ebenfalls bei der Stadt Paderborn. Darüber hinaus übernahm die Stadt die Projektkoordination und die Bereitstellung anonymisierter Daten (Local-Open-Data).

V. Zeitplan:

Ursprüngliche Zeitplanung

Tabelle 1: Projektzeitplan des Pilotprojekts

Arbeits- und Zeitplan Pilotprojekt Schlosskreuzung	2019				2020				2021			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
AP 1: Erstellung eines Pflichten- und Lastenheftes (Stadt PB)												
AS 1.1: Anforderungen an das Simulationsmodell												
AS 1.2: Anforderungen an die optimierte Verkehrsflussregelung												
AS 1.3: Anforderungen Infrastruktur Kommunikation												
AS 1.4: Anforderungen Infrastruktur Datenerfassung												
AS 1.5: Anforderungen Infrastruktur LSA												
AS 1.6: Konzeptionierung der Öffentlichkeitsarbeit												
AS 1.7: Quantifizierung der Projektziele / Validierungsziele												
AP 2: Aufbau eines Simulationsmodells des Versuchsfelds (HNI)												
AS 2.1: Ermittlung und Aufbereitung relevanter Verkehrsinfrastrukturdaten												
AS 2.2: Modellbildung der Verkehrsinfrastruktur in der Simulationsumgebung												
AS 2.3: Ermittlung des Verkehrsaufkommens und der Umweltbelastung												
AS 2.4: Kalibrierung und Validierung des Gesamtmodells												
AP 3: Entwicklung der Verkehrsflussregelung (HNI)												
AS 3.1: Modellbasierte Entwicklung einer optimalen Regelung von Verkehrsflüssen												
AS 3.2: Bewertung und Auswahl der entwickelten Regelungsansätze												
AS 3.3: Bestimmung der minimal notwendigen Messeinrichtungen												
AP 4: Ausbau der Kommunikationsinfrastruktur (Stadt PB)												
AS 4.1 Vorbereitende Maßnahmen zur Öffnung des Verkehrsrechners												
AS 4.2 Technische Öffnung des Verkehrsrechners												
AP 5: Ausbau der Infrastruktur für die Datenerhebung (RTB)												
AS 5.1 Infrastruktur zur Datenerfassung für die Kalibrierung und Validierung												
AS 5.2 Infrastruktur zur Datenerfassung für die Umsetzung der Verkehrsflussregelung												
AS 5.3 Weiterentwicklung der kamerabasierten Algorithmen												
AS 5.4 Weiterentwicklung der Sensorik-Hardware												
AS 5.5 Weiterentwicklung der Kommunikationsschnittstellen der Messeinheiten												
AP 6: Ausbau der Infrastruktur der Verkehrssteuerungssysteme (Stührenberg)												
AS 6.1 Ausbau der vorhanden Infrastruktur für die Verkehrssteuerung												
AS 6.2 Umsetzung der vorhandenen verkehrsabhängigen Planung												
AS 6.3 Verbindung zum zentralen Verkehrsrechner												
AS 6.4 Programmierschnittstelle für die Steuersignale												
AS 6.5 Integration der optimierten Steuerungsalgorithmen												
AS 6.6 Bereitstellung von Prozessdaten												
AP 7: Öffentlichkeitsarbeit und Bereitstellung anonymisierter Daten (Stadt PB)												
AS 7.1 Einbindung der Verkehrsdaten in die Local Open Data Plattform												
AS 7.2 Öffentlichkeitsarbeit												
AP 8: Validierung (HNI)												
AS 8.1 Messung der Emissionsbelastung und des Verkehrsflusses im Ausgangszustand												
AS 8.2 Messung der Emissionsbelastung und des Verkehrsflusses während der Testphase												
AS 8.3 Analyse der Entwicklung der Emissionsbelastung und des Verkehrsflusses												

Neben der Aufteilung in Arbeitspakete und Arbeitsschritte wurden fünf Meilensteine festgesetzt:

MS I: Projekt Kick-off

MS II: Simulationsbasierte Analyse des Ist-Zustandes (3. Quartal 2019)

a) Datenerhebung

b) Aufbau Simulationsmodell

c) Parametrierung mit aktuellen Daten und Steuerungslogiken

- d) Konzeption des Infrastrukturausbaus, insb. der Einrichtung zusätzlicher Messstellen und Kommunikationsnetzen
- e) Messung der Schadstoff- und Lärmbelastung im Ausgangszustand

MS III: Algorithmen für die optimale dynamische Verkehrsflusssteuerung (2. Quartal 2020)

- a) Modellbasierte Entwicklung und Validierung der Verkehrsflusssteuerung
- b) Implementierung auf LSA-Steuergeräten
- c) Konzeption zur echtzeitfähigen Kommunikation zwischen zentralem Verkehrsrechner und dezentralen Einheiten (LSA und Messstellen)
- d) Sicherheitskonzept Verkehrssteuerung: Safety (sichere Rückfallebene) und Security (Schutz gegen externe Angriffe)
- e) Konzept für das Katastrophenmanagement und die Priorisierung von Rettungskräften

MS IV: Beginn der Testphase im Versuchsfeld (1. Quartal 2021)

- a) Ausbau Infrastruktur Kommunikation, Verkehrsdatenerhebung und LSA-Steuergeräte

MS V: Validierung (4. Quartal 2021)

- a) Erneute Messung der Schadstoff- und Lärmbelastung und Vergleich mit dem Ausgangszustand

Das Projekt lässt sich in drei primäre Phasen gliedern:

1. In der ersten Phase wurde die Ist-Situation ermittelt und das Konzept zum Feldversuchsaufbau erstellt.
2. Die zweite Phase setzte das Konzept zum Feldversuchsaufbau um und erstellte das Konzept zur Durchführung des Feldversuchs.
3. Das entsprechende Konzept zur Durchführung des Feldversuchs wurde in der dritten und letzten Phase des Projekts umgesetzt.

Somit bauten alle Phasen aufeinander auf und griffen ineinander. Dabei wurden stets Änderungen und Anpassungen an den Arbeitspaketen und Konzepten nötig, um die jeweiligen Projektziele zu erreichen.

Projektverzug und Projektlaufzeitverlängerung

Im Arbeitsschritt 4.2 „Technische Öffnung des Verkehrsrechners“ kam es zu deutlichen Verzögerungen in der Umsetzung:

Zur Realisierung des OCIT-Kommunikationsstandards wurde der Betreiber des städtischen Verkehrssystemrechners frühzeitig beauftragt. Die Bearbeitung seitens des Betreibers verlief sehr schleppend, was für die Anfangszeit teils auf die Corona-Maßnahmen zurückzuführen war. Dazu gehörte auch ein Dienstreiseverbot des Auftragnehmers. Ein weiterer wesentlicher Faktor war der Umzug des städtischen

Verkehrssystemrechners. Ursprünglich war vorgesehen, dass die OCIT-Kommunikation Ende des zweiten Quartals 2020 eingerichtet ist und anschließend mit den Arbeiten zum Feldversuch begonnen werden können.

Erst im September 2021 konnte durch die bereitgestellte Kommunikation festgestellt werden, dass eine sehr hohe Latenz (ca. 7-8 Sekunden pro Übertragungsrichtung) vom städtischen Verkehrsrechner zum Steuerungsalgorithmus auftritt, so dass sich damit der Projekterfolg nicht einstellen könnte. Bei derartigen Verzögerungen ist ein vorausschauender Eingriff in den Verkehrsablauf nicht möglich.

Zudem sind keine weiteren technischen Lösungen seitens des Betreibers zur Umsetzung der OCIT-C-Schnittstelle vorgestellt worden, um den Anforderungen des Projekts gerecht zu werden.

Bereits im September 2020 wurde als (projektinterne) Alternative ein sogenannter virtueller Verkehrsrechner⁶ (ReTCon-Online) über den Projektpartner Stührenberg eingerichtet. Zweck war es zu diesem Zeitpunkt, die notwendigen Verkehrsdaten der LSA im Bilanzraum zum Aufbau des Simulationsmodells und zur Entwicklung des Steuerungsalgorithmus bereitstellen zu können. Damit konnte sichergestellt werden, dass keine weiteren zeitlichen Verzögerungen im Projektablauf eintreten.

Darüber hinaus wurde an der Entwicklung eines speziellen OCIT-C-Clients⁷ zum Abruf von Verkehrsdaten vom ReTCon-Online-System durch den Steuerungsalgorithmus gearbeitet. Dabei stellte sich eine maximale Latenz von ca. 4 Sekunden ein (enthält sowohl den Abruf als auch das Senden der notwendigen Daten). Seit Juli 2021 war eine stabile Datenübertragung gewährleistet. Damit entspricht diese Alternative deutlich besser den Anforderungen des Projekts und ermöglicht die geplante Realumsetzung. Auf Basis dieser Werte wurde im Juli 2021 beschlossen mit dem ReTCon-Online-System zu arbeiten.

Aufgrund der Verzögerungen im Arbeitspaket 4 konnten die Tätigkeiten in den Arbeitsschritten 6.3 „Verbindung zum zentralen Verkehrsrechner“ und 6.4 „Programmierschnittstelle für die Steuersignale“ nicht rechtzeitig umgesetzt werden.

Eine weitere Folge war, dass der Termin zum MS IV (Beginn der Testphase im Versuchsfeld) damit nicht eingehalten werden konnte.

Um weitere Verzögerungen im Projektablauf zu vermeiden, wurden bereits im September 2020 folgende wesentliche Maßnahmen getroffen:

- Tätigkeiten von Arbeitsschritten und Arbeitspaketen, die nicht in direkter Abhängigkeit zueinanderstehen, wurden teilweise parallel durchgeführt;
- Es wurden vorbereitende Maßnahmen von Arbeitsschritten und Arbeitspaketen durchgeführt, die nicht fristgerecht gestartet werden konnten, um weitere Auswirkungen auf einen Projektverzug so gering wie möglich zu halten;

⁶ Virtueller Verkehrssystemrechner (ReTCon-Online-System): Cloud-Lösung mit Anbindung über Internet

⁷ Entwicklung von Stührenberg und HNI

- Es wurden Aufgaben, die den Gesamtprojektzeitplan gefährden könnten, priorisiert;
- Nutzung des alternativen Verkehrsrechners (ReTCon-Online-System), um die Kommunikation zwischen Lichtsignalanlagensteuerung und Regelungsalgorithmus herzustellen.

Trotz der frühzeitig getroffenen Maßnahmen verlor das Projekt wertvolle Zeit. Die spezielle Entwicklung des OCIT-C-Clients benötigte mehr Zeit als erwartet. Ein früherer Start der Entwicklung war jedoch aufgrund der Problematiken beim städtischen Verkehrssystemrechner nicht möglich gewesen. Zum Ende des dritten Quartals 2021 konnte die erste LSA über den Steuerungsalgorithmus geschaltet werden.

Damit alle LSA über den Steuerungsalgorithmus geschaltet werden können und damit ein vollständiger Feldversuch stattfinden konnte, wurde eine Projektlaufzeitverlängerung unausweichlich. Der Fördermittelgeber konnte überzeugt werden, dass die bisher durchgeführten Tätigkeiten vielversprechend sind und mit einer Laufzeitverlängerung das Projektziel weiterhin erreicht werden kann. Das offizielle Projektende war nun der 31. März 2022.

Trotz der Verlängerung des Projekts fiel der Meilenstein 5 „Validierung“ außerhalb der eigentlichen Projektphase.

VI. Aufgaben und Ergebnisse der Arbeitspakete

Die Aufgaben der Arbeitspakete (AP) sind klar voneinander abgegrenzt. Die weitere Aufteilung in Arbeitsschritten (AS) dient primär der Organisation. Die Arbeiten und Ergebnisse von verschiedensten Arbeitsschritten bauten teilweise aufeinander auf. Die dafür notwendigen Abstimmungen bzgl. der Ergebnisse und Aufgaben mussten koordiniert werden, so dass ein weitestgehend reibungsloser Projektablauf gewährleistet war. Die Arbeitspakete zusammen mit den untergeordneten Arbeitsschritten waren für die Ressourcen-, Aufgaben- und Zeitplanung elementar.

Die Ergebnisse der Arbeitspakete waren gleichzeitig die Teil- und Zwischenziele des Projekts. Somit war der Erfolg des Projekts messbar und überwachbar. In den Meilensteinen wurden wichtige Zwischenergebnisse des Gesamtprojekts festgehalten. Gleichzeitig konnte bei den definierten Meilensteinen der Projekterfolg und -zeitplan überwacht werden und gegebenenfalls nachjustiert werden.

Im Zeitplan (siehe Kapitel V) wurden die jeweiligen Start- und Endpunkte der AP und AS festgelegt. In der Praxis hatte sich bewährt, dass einige AP und AS fortlaufend weitergeführt werden. Aufgrund der stetigen Entwicklung und Umsetzung konnten stets neue Erkenntnisse gewonnen werden. Diese wurden fortlaufend im Projekt berücksichtigt und hatten einen positiven Einfluss auf den Projekterfolg. Des Weiteren entstanden aus der Entwicklung des Steuerungsalgorithmus neue oder erweiterte Anforderungen. Diese fanden ebenfalls Berücksichtigung.

Zudem entstand aus dem Projektverzug heraus die Notwendigkeit einige AP und AS parallel durchzuführen.⁸

⁸ Siehe Kapitel V Projektverzug und Projektlaufzeitverlängerung

Arbeitspaket 1: Erstellen eines Lasten- und Pflichtenhefts

Das Ziel des Arbeitspakets war es zu Beginn des Projekts die im Förderantrag formulierten Aufgaben und Ziele weiter zu konkretisieren und aufeinander abzustimmen. Es wurden für die Arbeitspakete 2 bis 7 die genauen Anforderungen an die Umsetzung formuliert. Des Weiteren wurden die Zielsetzungen des Arbeitspakets 8 „Validierung“ definiert. Das Pflichten- und Lastenheft wurde von allen Projektpartnern gemeinsam und fristgerecht ausgearbeitet.

Die Inhalte des Lasten- und Pflichtenhefts sind in den Arbeitspaketen und Arbeitsschritten aufgeführt und werden daher an dieser Stelle nicht explizit gelistet.

Arbeitspaket 2: Aufbau eines Simulationsmodells des Versuchsfelds

AS 2.1: Ermittlung und Aufarbeitung relevanter Verkehrsinfrastrukturdaten

Es wurden alle relevanten statischen (d.h. zunächst ohne Berücksichtigung von Verkehrsteilnehmenden) Verkehrsinfrastrukturdaten des betrachteten Versuchsfelds gesammelt und aufgearbeitet. Zu diesen Daten gehören bspw. die genauen Straßen- sowie Spurverläufe, die Kreuzungslagen und -geometrien, erlaubte Abbiegerichtungen und Streckenverbote (v.a. zulässige Höchstgeschwindigkeiten) sowie die Bestandsignalplanung der sechs Lichtsignalanlagen:

1. Münsterstraße / Merschweg → K0583,
2. Münsterstraße / Kerssenbrockallee (Almering) → K0582,
3. Münsterstraße / Verner Straße → K0581,
4. Residenzstraße / Schloßstraße (Schloßkreuzung) → K0513,
5. Bielefelder Straße / Hatzfelderstraße (Hatzfelder Platz) → K0561,
6. Bielefelder Straße / Herrmann-Löns-Straße → K0562.

Diese Knotenpunkte und die später in AP 5 thematisierten Messtellen (TOPO-Boxen) sind in dem Versuchsfeld des Pilotprojekts in der folgenden Abbildung 1 skizziert .

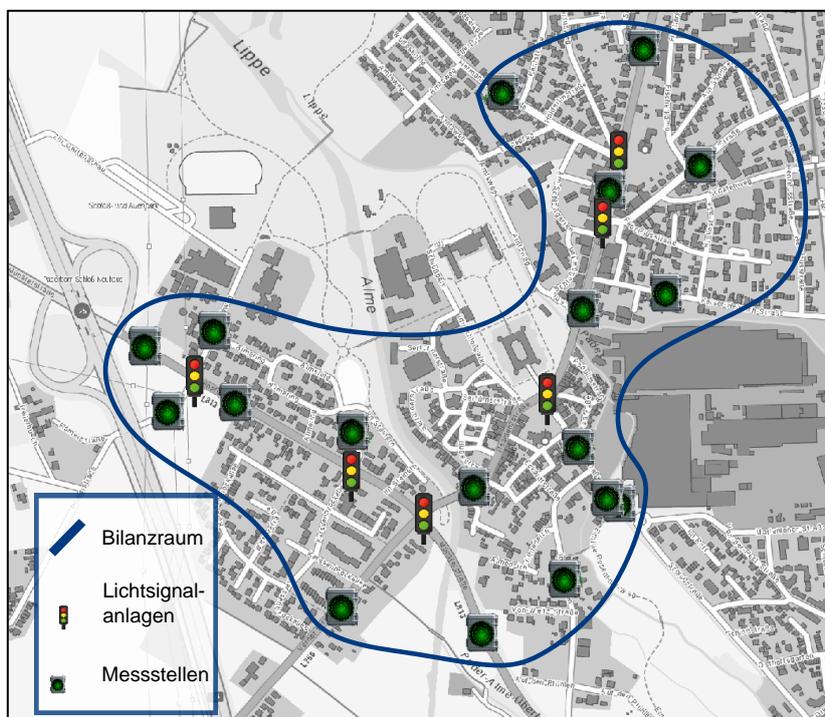


Abbildung 1: Versuchsfeld des Pilotprojekts Schlosskreuzung⁹

⁹ Kartenmaterial von <https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2/> bearbeitet.

AS 2.2: Modellbildung der Verkehrsinfrastruktur in der Simulationsumgebung

Die in AS 2.1 ermittelten und aufbereiteten Verkehrsinfrastrukturdaten wurden in ein Simulationsmodell umgesetzt. Zur Modellbildung findet die Open-Source-Simulationsumgebung SUMO¹⁰ Anwendung, welche einen komplexen Funktionsumfang besitzt und in der Lage ist, großräumige Verkehrssituationen mit einer Vielzahl an Verkehrsteilnehmenden (in Form von Pkw, Lkw, Bussen, Schienenverkehr, Radverkehr, Fußverkehr und Weiteren) zu simulieren. In [1] ist genauer beschrieben, wie ein derartiges Modell aufgebaut ist und wie und in welcher Form die Eingangsdaten in die Simulation integriert werden.



Abbildung 2: Vogelperspektive des realen Testgebiets in a), OSM-basiertes SUMO-Netz in b) und dessen Reduktion auf Hauptstraßen mit den Standorten von TOPO-Boxen und LSA in c)

In der obigen Abbildung 2 ist eine Darstellung gezeigt, welche das Vorgehen der Modellnetzentwicklung andeutet. Aus dem realen Verkehrsnetz in Vogelperspektive (Teil a)) wurde über dessen OSM-Daten ein vorläufiges Netzmodell entwickelt (Teil b)). Anschließend wurde in Teil c) dieses Straßennetz auf die wichtigsten Straßenzüge reduziert und zusätzlich sind wie in Abbildung 1 die Standorte der LSA und TOPO-Boxen abgebildet.

AS 2.3: Datenerhebung zur Ermittlung des typischen Verkehrsaufkommens sowie der Umweltbelastung (Schadstoff- und Lärmbelastung)

Um das Simulationsmodell mit dynamischen Verkehrsteilnehmenden zu ergänzen sowie eine spätere Validierung des Gesamtsimulationsmodells zu ermöglichen, wurde das typische Verkehrsaufkommen in der aktuellen Verkehrssituation über einen längeren Zeitraum erfasst. Hierfür wurden die Verkehrsdaten der Lichtsignalanlagen und die klassifizierten Verkehrsdaten der TOPO-Boxen ausgewertet und aufgearbeitet. Damit abschließend der Projekterfolg beurteilt werden kann, sollten die ursprünglich bestehenden Umweltbelastungen durch Schadstoff- und Lärmemissionen gemessen werden. Ergänzend zu den punktuellen professionellen Messungen sollte die ansässige Bevölkerung in die Lage versetzt werden, selbst Emissionen dezentral mit kleinen Messgeräten über längere Zeiträume zu erfassen.

¹⁰ Simulation of Urban MObility, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Die ursprünglich geplante Vorgehensweise zur Ermittlung der Umweltbeeinflussung hat sich im Projektverlauf als nicht realisierbar herausgestellt. Im Allgemeinen sind aussagekräftige Messungen zu Umweltdaten nur mit aufwendigen Verfahren möglich. Im Einzelnen werden diese Verfahren in der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) beschrieben. Für das Projekt sind Messungen nach dieser Verordnung nicht realisierbar. Darüber hinaus müssen für eine Gegenüberstellung von Messwerten die Rahmenbedingungen vergleichbar bleiben. Die Erhebung von Umweltdaten unterliegt jedoch einer Vielzahl an unterschiedlicher Einflussfaktoren. Insbesondere die jeweils herrschenden Witterungsbedingungen (Regen, Luftfeuchtigkeit, Windstärke etc.) erschweren eine praktische Vergleichbarkeit von an unterschiedlichen Tagen vorgenommenen Messungen. Daher wurde im Projekt ein anderer Ansatz verfolgt. Das Umweltbundesamt hat mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) Emissionsfaktoren für gängige Fahrzeugtypen zur Verfügung gestellt. Die Daten beinhalten Werte zu unterschiedlichen Verkehrssituationen, zu Fahrzeugtypen und Emissionskonzepten. In dem Simulationsprogramm SUMO sind die Daten und Informationen des HBEFA hinterlegt worden. Somit war und ist eine simulationsbasierte Erhebung der Umweltdaten über das entwickelte detaillierte Modell möglich. Vorteil dieser Variante ist, dass die Rahmenbedingungen zwischen dem Ausgangszustand und dem Endzustand identisch parametrisiert werden können und somit eine Vergleichbarkeit der Daten sichergestellt werden konnte. Eine aussagekräftige Beurteilung des Projekts ist somit gegeben.

AS 2.4: Kalibrierung und Validierung des Gesamtmodells

Aus den beobachteten und aufgenommenen Verkehrsdaten wurden verschiedene typische Verkehrsszenarien generiert (Kombinationen von Verkehrsbelastung und -verteilung sowie Verkehrsteilnehmertypen). Nach Abschluss der Modellbildung wurde das Gesamtmodell kalibriert, ebenfalls mittels der erhobenen Verkehrsdaten. Das Ziel der Entwicklung eines Gesamtmodells, welches das real gemessene Verkehrsaufkommen möglichst genau abbildet, wurde erreicht. Sowohl die Anzahl der VTN als auch ihre zeitliche Verteilung in der Simulation stimmten mit den real gemessenen Daten überein. Folglich können in der Simulationsumgebung auch die resultierenden Verkehrsbeeinflussungen (Warteschlangen an LSA, Rückstaus, etc.) realitätsnah ab- und nachgebildet werden. Das validierte Gesamtmodell (siehe [\[2\]](#)) dient als Grundlage für den Vergleich des eingesetzten Bestandsverfahrens¹¹ mit den entwickelten optimierten Verkehrsflussreglungen.

¹¹ Das Bestandsverfahren ist das bisher eingesetzte Verfahren zur Steuerung der LSA. Die sechs LSA wurden von Stührenberg umgerüstet und die „alte“ Planung, wie in AS 6.2 beschrieben, umgesetzt und auch als Rückfallebene implementiert.

Arbeitspaket 3: Entwicklung der Verkehrsflussregelung

AS 3.1: Modellbasierte Entwicklung einer optimalen Regelung von Verkehrsflüssen

Auf Grundlage vorangegangener Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Verkehrssteuerung und -regelung wurden die in Frage kommenden Lösungsansätze, z.B. modellprädiktive Optimalsteuerungen, auf die hier geplante Anwendung angepasst. Hierfür musste eine genaue Analyse des konkret vorliegenden Versuchsfelds durchgeführt werden. Hierzu zählte bspw. die Notwendigkeit, einzelne Verkehrsarten in besonderer Weise bei der Entwicklung zu berücksichtigen (z.B. Fußverkehr oder ÖPNV) oder die möglichen Stelleingriffe zu definieren (z.B. dynamisches LSA-Programm, empfohlene Richtgeschwindigkeiten). Ebenso waren Situationen zu berücksichtigen, die einer besonderen Behandlung bedürfen. Dies umfasste bspw. den Fall, wenn Rettungsfahrzeuge im Einsatz im Versuchsfeld priorisiert werden müssen oder der Verkehr um eine Unfallstelle umgeleitet werden soll.

Die Aufgabe der Bestimmung einer Verkehrssteuerungsstrategie wurde dann als Optimierungsproblem formuliert, in welchem alle o. g. Einschränkungen, insbesondere einschließlich der Verkehrssicherheit, berücksichtigt werden. Auf Basis der jeweils aktuell eintreffenden Verkehrsdaten werden die Parameter (Wunschphasen und Schaltzeiten) für den nächsten Eingriffszeitpunkt durch Lösen des Optimierungsproblems bestimmt. Dieser Prozess wird fortlaufend wiederholt. Durch unterschiedliche Gewichtung einzelner Randbedingungen oder Optimierungskriterien ergeben sich unterschiedliche Steuerungsstrategien, die simulativ erprobt und von denen geeignete ausgewählt wurden. Diese wurden dann in die Gesamtsimulationsumgebung aus AP 2 eingebettet und umfangreich hinsichtlich Funktion und Performanz analysiert.

Da die Übertragbarkeit des Lösungsansatzes auf andere Verkehrsräume essenzieller Bestandteil dieses Projekts war, wurde außerdem untersucht, wie weit der entwickelte Ansatz skalierbar ist und sich auch auf andersartige Straßenzüge/Kreuzungsgruppen übertragen lässt.

AS 3.2: Bewertung und Auswahl der entwickelten Regelungsansätze

Die Lösungsansätze aus AS 3.1 wurden in diesem Arbeitsschritt hinsichtlich der Leistungsfähigkeit untersucht und bewertet. Ziel war es hier, den besten Lösungsansatz auszuwählen und für die künftige Umsetzung mit den realen Steuergeräten festzulegen. Das Grundsystem mit allen relevanten Schnittstellen, in das die LSA-Regelung im Pilotprojekt implementiert wurde, ist dem Schaubild in Abbildung 3 zu entnehmen. Dabei wird die Funktionsweise der Regelung an dieser Stelle nur umrissen und ist detaillierter in [\[3\]](#) beschrieben. Für das entwickelte System wurden sowohl für die

simulative Verkehrsrekonstruktion [4] als auch für den Regelungsalgorithmus [5] im Jahr 2021 Patente beantragt, welche sich derzeit noch in der Prüfungsphase befinden¹².

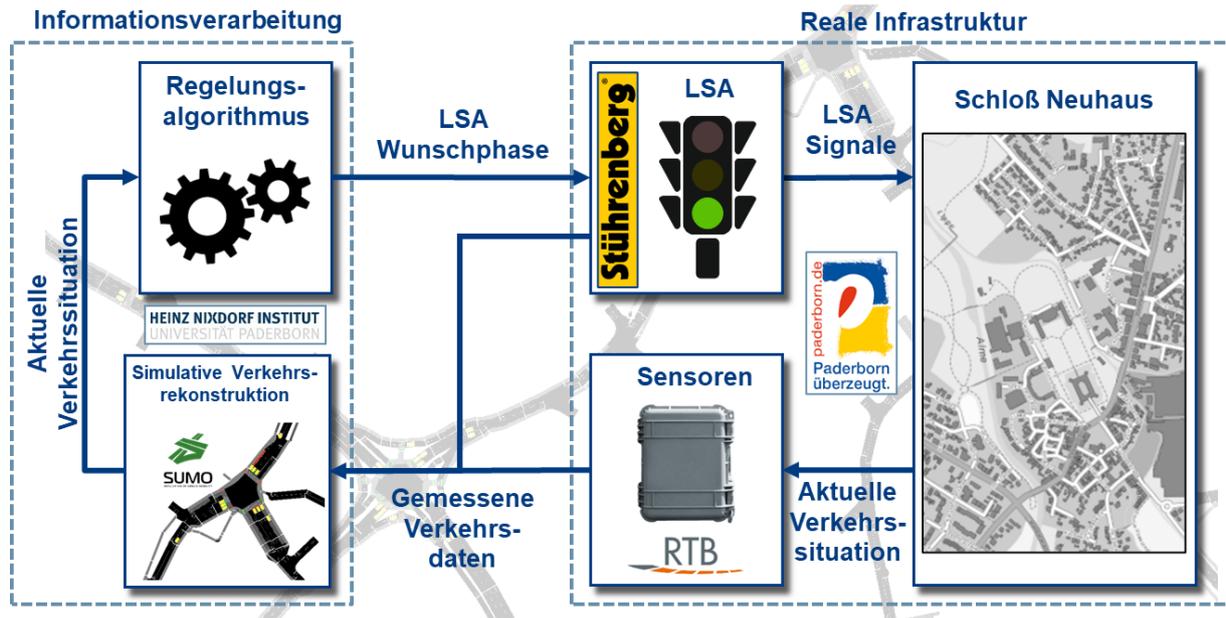


Abbildung 3: Gesamtsystemübersicht der LSA-Regelung im Pilotprojekt

Der hier abgegrenzte Bereich der Informationsverarbeitung teilt sich in die bereits in AP 2 beschriebene simulative Verkehrsrekonstruktion (synonym auch als Verkehrsschätzer bezeichnet) und den entwickelten Regelungsalgorithmus. Beim Vergleich verschiedener Regelungsansätze erwies sich der Ansatz der modellprädiktiven Regelung für die LSA als überlegen gegenüber reinen Fuzzy-Reglern oder Ansätzen des maschinellen Lernens. Diese Bewertung bezieht sich nicht nur auf die Regelgüte des Systems, sondern auch auf die Anwendbarkeit innerhalb des Projekts. Als Resultat wurde eine mehrstufige LSA-Regelung entwickelt, deren Schema in Abbildung 4 skizziert ist.

Im ersten Prozessschritt erfolgt eine Bewertung des aktuellen Verkehrszustands durch eine Fuzzy-Logik. Dies dient dazu, die Grundmenge an möglichen Folgephasen auf eine geringere Anzahl zu reduzieren. Dabei werden die Phasen aufgrund einfacher Regeln wie „viel Verkehr in Richtung ‚XY‘ → hohe Priorität der Freigabe von Richtung ‚XY‘“ oder „hohe Wartezeit auf Straße ‚Z‘ → hohe Priorität zur Räumung von Straße ‚Z‘“ grob vorausgewählt. Die restlichen zur Auswahl stehenden Folgephasen werden im modellprädiktiven Regler detaillierter untersucht. In diesem Baustein der Regelung werden durch eine Optimierung verschiedene Kriterien wie die Belegung von Einzelspuren oder die durchschnittlichen Wartezeiten von Verkehrsteilnehmenden mit unterschiedlicher Gewichtung berücksichtigt und damit die optimalen Phasen jeder im System befindlichen LSA ermittelt. Da über die Verkehrsrekonstruktion auch

¹² Stand: 08/2022

verschiedene Verkehrsteilnehmertypen (PKW, LKW, Busse etc.) simuliert werden, kann über deren separate Gewichtung wiederum gezielt Einfluss genommen werden.

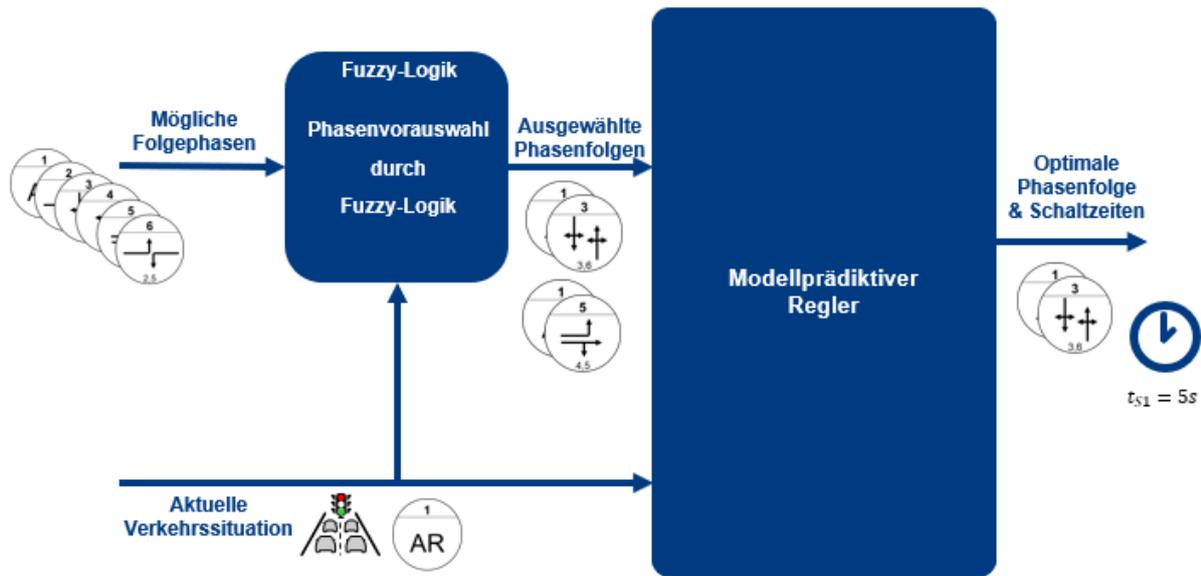


Abbildung 4: Struktur der entwickelten mehrstufigen LSA-Regelung

Um den Einfluss verschiedener Parametrierungen zu verdeutlichen, folgt ein simulatives Beispiel, in dem die unterschiedlichen Verkehrsteilnehmenden individuell gewichtet und damit priorisiert werden.

In Tabelle 2 sind zwei Varianten der relativen Gewichtung von Verkehrsteilnehmenden aufgelistet, wobei die erste Variante V1 eine Gleichgewichtung vorsieht und V2 eine moderate Anpassung auf Basis von Emissionen, möglichen Passagieren und einer generellen Priorisierung (für z.B. den Radverkehr) vorsieht.

Tabelle 2: Beispielhafte relative Gewichtung unterschiedlicher Verkehrsteilnehmertypen

	PKW	Bus	LKW (bis 3,5t)	Moto	Rad	Sattel (voll)	Sattel (Auflieger)	Liefer- wagen
V1	1	1	1	1	1	1	1	1
V2	5	12	6	3	5	8	8	5

Dementsprechend wird in Variante V2 ein Bus aufgrund der höheren Emissionsrate und der vielen Passagiere priorisiert. Zur Verdeutlichung des Einflusses dieser Typengewichtung soll ein Beispielszenario mit der Zusammensetzung aus Tabelle 3 genutzt werden. Bei dem Szenario sind insgesamt 130 Teilnehmende in der Simulation über 10 Minuten verteilt im System. Es handelt sich also um eine geringe Verkehrsbelastung.

Tabelle 3: Fahrzeugtypendaten einer 10-minütigen Beispielsimulation (geringes Verkehrsaufkommen)

Σ	PKW	Bus	LKW (bis 3,5t)	Moto	Rad	Sattel (voll)	Sattel (Auflieger)	Liefer- wagen
130	98	2	8	2	0	3	4	12

Es ergeben sich in der Simulation des Gesamtsystems die in Tabelle 4 gezeigten Werte für das Bestandsverfahren gegenübergestellt mit der entwickelten LSA-Regelung in Verbindung mit der zuvor dargestellten Typengewichtung. Auf diese Weise kann simulativ der Einfluss der Regelung im Hinblick auf eine Verbesserung der jetzigen Situation untersucht werden.

Tabelle 4: Exemplarische Ergebnisse der zuvor beschriebenen Beispielsimulation

Kriterium/ Verfahren	\emptyset WT [s]	\emptyset WT _{Bus} [s]	\emptyset PM _x [mg]	\emptyset Speed [m/s]	\emptyset #Stops [-]
Bestand	22,2	32	45,4	7,5	1,3
MPC (V1)	12,5	13	40,5	8,6	0,7
MPC (V2)	11,8	12	39,6	8,6	0,8

Bei den dargestellten Kriterien handelt es sich um Durchschnittswerte für die Wartezeit aller Verkehrsteilnehmenden (\emptyset WT), die Wartezeit für Busse (\emptyset WT_{Bus}), die Feinstaubemissionen (\emptyset PM_x), die Geschwindigkeit (\emptyset Speed) und die Anzahl an Haltevorgängen (\emptyset #Stops) in den jeweils gezeigten Einheiten. Innerhalb der Typengewichtungsvarianten sind Unterschiede zu erkennen, aber vor allem ist die klare Verbesserung gegenüber der Bestandsschaltung deutlich ersichtlich. Über eine Vielzahl derartiger Simulationsstudien wurden verschiedene Parametersätze getestet und bewertet, sodass als Ergebnis ein Parametersatz ausgewählt wurde, der entsprechend gut auf viele unterschiedliche Verkehrssituationen und -zusammensetzungen reagiert.

An dieser Stelle sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass die obigen Simulationen jeweils mit der „idealen“ Gesamtverzögerung bzw. Latenz von 1s durchgeführt wurden. Die folgende Abbildung 3 zeigt daher anhand einer weiteren Beispielsimulation die Auswirkungen der aktorseitigen Verzögerung¹³ auf die Regelgüte bzgl. der durchschnittlichen Wartezeit. Die Datenpunkte sind dabei die durchgeführten Simulationen, welche durch eine Regression einen deutlichen Negativtrend mit steigender Latenz zeigen. Neben der aktorseitigen Verzögerung ist bei der

¹³ Die aktorseitige Verzögerung ist die Zeitdauer, bis das berechnete Stellsignal der Regelung, also die Wunschphase, an die LSA übertragen wurde. Dagegen ist die sensorseitige Verzögerung die Zeitdauer, bis das Sensorsignal bei der Regelung eintrifft.

Realumsetzung auch mit einer sensorseitigen Verzögerung zu rechnen. Die in der Grafik markierten Bereiche stellen die im Pilotprojekt möglichen Latenzbereiche dar, welche mit den verschiedenen Umsetzungen, des ReTCon-Online-Systems und dem städtischen Verkehrsrechner, erreicht werden konnten (siehe AP 4).

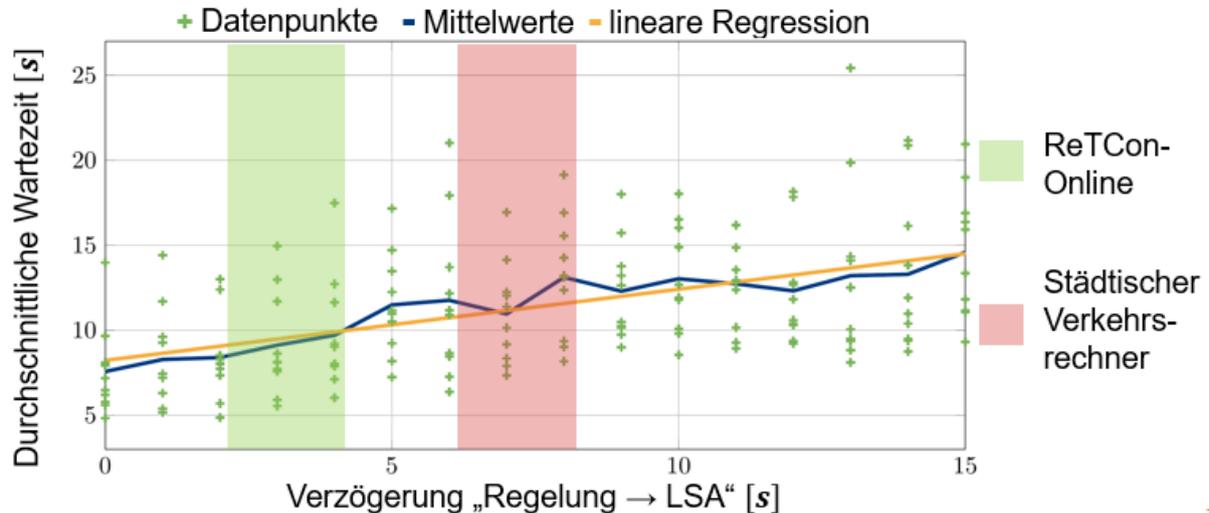


Abbildung 5: Auswirkungen von Verzögerungen auf die Wartezeit innerhalb der entwickelten LSA-Regelung

Zusätzlich wurde bereits vor der reellen Inbetriebnahme für den modellprädiktiven Ansatz, der sich in der Simulation bewährt und die genannten Anforderungen erfüllt hat, ein Konzept für eine Sicherheitsrückfallebene ausgearbeitet. Dies betrifft den Fall, dass im laufenden Betrieb Funktionsstörungen auftreten.

Arbeitspaket 4: Ausbau der Kommunikationsinfrastruktur

Das Ziel des Arbeitspakets war die Öffnung und Erweiterung der Schnittstellen des bisher in sich geschlossenen städtischen Verkehrssystemrechners (VSR), damit u. a. Verkehrsdaten und Steuersignale verarbeitet und bereitgestellt werden können. Darüber hinaus sollte die Steuerung der LSA mittels des Regelungsalgorithmus über den städtischen VSR erfolgen.

AS 4.1 Vorbereitende Maßnahmen zur Öffnung des Verkehrsrechners

In einem ersten Schritt wurden die Anforderungen an die Schnittstelle definiert. Zudem wurden die erforderlichen Komponenten beim Betreiber des städtischen VSR beschafft.

AS 4.2 Technische Öffnung des Verkehrsrechners

Zur Erfassung und zur Steuerung der LSA im Versuchsfeld war es erforderlich, dass die Schnittstellen zu den LSA und zum Verkehrssystemrechner geöffnet werden. Hierfür wurde der OCIT-Kommunikationsstandard¹⁴ implementiert. Die entsprechende Hardware zusammen mit den erforderlichen Lizenzen wurden installiert. Nach dem Austausch der LSA im Quartal II/2020, wurden die Lichtsignalanlagen an den städtischen Verkehrssystemrechner angeschlossen.

OCIT-O-Server

Der OCIT-O-Server dient zur Kommunikation zwischen den LSA im Feldversuch und des VSR. Mittels eines durchgeführten Integrationstestes konnte nachgewiesen werden, dass die Kommunikation zwischen den LSA und dem VSR fehlerfrei funktioniert.

OCIT-C-Server

Der OCIT-C-Server dient zur Kommunikation innerhalb der zentralenseitigen Komponenten. U.a. auch zur Bereitstellung der Verkehrsdaten. Im September 2021 konnte durch die bereitgestellte Kommunikation festgestellt werden, dass eine sehr hohe Latenz (ca. 7-8 Sekunden pro Übertragungsrichtung) auftritt, so dass mit dieser Lösung der Projekterfolg gefährdet war. Bei derartigen Verzögerungen ist ein vorausschauender Eingriff in den Verkehrsablauf nicht möglich (siehe auch Simulationsergebnisse aus AP3). Zudem sind keine weiteren technischen Lösungen seitens des Betreibers zur Umsetzung der OCIT-C-Schnittstelle vorgestellt worden, um den Anforderungen des Projekts gerecht zu werden.

Als Alternative wurde das ReTCon-Online-System des Projektpartners Stührenberg eingesetzt. Das System erfüllt die Anforderungen des Projekts besser, indem die notwendigen Daten ausgetauscht werden können und die Latenz auf ca. 3-4 Sekunden pro Übertragungsrichtung reduziert werden konnte. Das ReTCon-Online-System ist eine Cloud-Lösung, bei der die Anbindung über Mobilfunkverbindungen erfolgt.

¹⁴ OCIT = Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems

Gegenüber den ursprünglich vorgesehenen Standleitungsverbindungen haben diese Verbindungen den Nachteil einer höheren Störanfälligkeit und tendenziell einer höheren Latenz.

Das Primärziel der Öffnung des städtischen VSR ist zwar erreicht worden, jedoch haben die Komponenten für das Projekt keine weitere Bedeutung. Es kann davon ausgegangen werden, dass in Zukunft die Daten des städtischen VSR über geeignete Schnittstellen abrufbar sind.

Arbeitspaket 5: Ausbau der Infrastruktur für die Datenerhebung

AS 5.1 Einrichtung der Infrastruktur zur Datenerfassung für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells

Das im Pflichten- und Lastenheft ausgearbeitete Konzept zur Datenerfassung wurde umgesetzt. Dazu wurden an den dafür vorgesehenen Orten Messsysteme (TOPO.box) installiert und in Betrieb genommen. Diese lieferten bis zur Umschaltung auf die Live-Daten kumulierte Tagesdaten in der örtlichen Auflösung und Klassifizierung, um den Ist-Zustand festzuhalten und die Entwicklung des Simulationsmodells zu starten.

AS 5.2 Einrichtung der Infrastruktur zur Datenerfassung für die Umsetzung der optimalen Verkehrsflussregelung

Die Anforderungen an die Datenerfassung wurden im Vergleich zu AS 5.1 erheblich angehoben. Es wurde in einer modellbasierten Analyse bestimmt, welche Messeinrichtungen für die Umsetzung der optimalen Verkehrsflussregelung erforderlich sind. Als Resultat wurde ein genauer Plan mit Messorten, Art der Messgrößen, jeweiliger zeitlicher und örtlicher Auflösung sowie Übermittlungsfrequenz an die zentrale Recheneinheit ermittelt. Dieser wurde umgesetzt und in Addition zu AS 5.1 entsprechende weitere Systeme installiert und in Betrieb genommen. Auf die Weiterentwicklungen der Kommunikationsschnittstellen wird im AS 5.5. näher eingegangen und die Anpassungen detailliert erläutert.

AS 5.3 Weiterentwicklung der kamerabasierten Klassifizierungs- und Interpretationsalgorithmen

Die Klassifizierung der Verkehrsteilnehmenden (einschließlich der Pulkerkennung und -auflösung) und die Interpretation ihres Verhaltens (z.B. hinsichtlich der Reisezeiten oder Andeutung von Absichten wie Straßenüberquerung) musste mit ausreichender Zuverlässigkeit und Ergebnisgenauigkeit umgesetzt werden. Um auch bei extremen Wettersituationen zuverlässige Daten für die intelligente Verkehrsbeeinflussung liefern zu können, war es wichtig, die Robustheit der bereits existierenden Detektorsysteme gegenüber diesen extremen Wettereinflüssen wie Starkregen, Hagel, Schneefall oder Sturm weiter zu verbessern. Daher wurde im Rahmen dieses Projekts auch untersucht, inwieweit eine Kombination verschiedener Sensorprinzipien (Sensorfusion) eine sichere Störungserkennung ermöglicht. Zusätzlich dazu wie geeignete Maßnahmen aussehen müssen, um trotz starker Störungen weiterhin Daten mit möglichst gleichbleibend guter Qualität liefern zu können.

Zur Erkennung des Fuß- und Radverkehrs wurden zwei unterschiedliche Systeme (3D Kamera und Radar) in einem Gerät kombiniert entwickelt, der so genannten Hybridkamera „NOSCO.hybridkamera“. Der Vorteil dieses Messprinzips liegt in der erhöhten Robustheit gegenüber Störungen durch Umwelteinflüsse – insbesondere Wettereinflüsse. Optische Störungen durch Nebel, Staub oder Rauch werden minimiert.

Mit diesem Messprinzip soll eine sichere Detektion von Fußgängern und Radfahrern gewährleistet werden. Dies hilft der intelligenten Verkehrssteuerung, da die Zeiten, die die Fußgänger für die Überquerung benötigen, berücksichtigt werden. Außerdem kann ermittelt werden, wie viele Personen auf eine Grünphase warten.

Hybridkamera¹⁵

Eine anonymisierte Detektion der Objekte (Fuß- und Radverkehr im Bereich von Überwegen von LSA) konnte gewährleistet werden. Da im Detektionszeitraum keine extremen Wetterverhältnisse wie Starkregen, Hagel, Schneefall oder Sturm festgestellt bzw. aufgenommen wurden, konnte in diesem Bereich keine Verbesserung erzielt werden. Eine Kommunikation zum MQTT¹⁶-Server (siehe AS 5.5) wurde erstellt, sodass bei Bedarf diese Informationen ebenfalls über die Kommunikationsschnittstelle verschickt werden können.

Die Zählung der Personen im Detektionsbereich wurde realisiert. Es wurden Personengruppen von bis zu vier Personen unterschieden. Eine größere Anzahl an Personen, die sich gleichzeitig im Detektionsbereich befunden haben, wurde nur in wenigen Fällen wahr- bzw. aufgenommen. Diese Fälle wurden deswegen vernachlässigt.

Das allgemeine Ziel der Weiterentwicklung der kamerabasierten Klassifizierungsalgorithmen konnte innerhalb des Pilotprojekts erreicht werden. Es ist jedoch noch viel Verbesserungspotential vorhanden. In diesem Bereich könnten und sollten weitere Schritte durchgeführt werden, sodass ein endgültiges Produkt für die Firma RTB dabei entstehen kann.

Es können derzeit Personengruppen (mit und ohne Objekte wie Taschen, Rollatoren, Fahrrädern, Regenschirmen, etc.) von bis zu vier Personen gleichzeitig im Detektionsbereich unterschieden werden. Die Differenzierungsrate sinkt jedoch mit zunehmender Anzahl Personen. Die Anzahl Personen werden wie folgt von dem Detektionsalgorithmus (gemittelt über 1.127 Datensätze) erkannt:

- 0 Personen: 86,4%,
- 1 Person: 82,1%,
- 2 Personen: 54,4%,
- 3 Personen: 31,8%,
- 4 Personen: 34,8%,
- >4 Personen: → nicht weiter untersucht, da zu geringe Datengrundlage für derartige Gruppengrößen.

Durch verschiedene Wetterbedingungen verschlechtert sich die Detektionsrate u.a. durch Rauschen, so dass in einigen Bildern Phantomdetektionen stattfinden. In einigen,

¹⁵ NOSCO.hybridkamera.

¹⁶ MQTT = Message Queuing Telemetry Transport: ist ein offenes Netzwerkprotokoll für Machine-to-Machine-Kommunikation (M2M), siehe AS 5.5

wenigen Fällen wurden auch Tiere als Objekt gezählt, bei denen die besitzende Person nicht durch die Detektionsfläche läuft. Ansonsten sinkt die Genauigkeit der Algorithmen mit steigender Anzahl Personen, die sich im Detektionsbereich befinden. Dies liegt u.a. daran, dass die Personen durch Objekte (Schilder, LSA-mast, Regenschirm, vorbeigehende oder -fahrende Personen) verdeckt werden oder sich nicht ganz im Bild befinden.

Die Software ist darauf ausgelegt die maximale Anzahl Personen und deren Genauigkeit auszugeben. Befinden sich z.B. drei Personen im Bild, hat die Software drei unterschiedliche Genauigkeitsraten. Die für eine Person mit z.B. 82%, die für eine zweite Person mit 54% und die für eine dritte Person mit 32%. Ausgegeben werden drei Personen mit 32% Genauigkeit, so dass Pulk Bildungen schneller erkannt und präferiert werden können.

Eine Verbesserung an der NOSCO.hybridkamera erfolgte während des Projektzeitraums durch eine komplette Neuentwicklung des Produkts. Diese war notwendig, da der Sensor und die darauf aufbauenden Algorithmen (Bildraten, Bilddatenfusion, Datenbanken, neuronale Netze) sowie die Kommunikation zum MQTT-Server nicht zufriedenstellend bzw. für den jetzigen Nutzungszweck nicht ausgelegt waren und somit neu erstellt werden mussten.



Abbildung 6: NOSCO.hybridkamera an der Schlosskreuzung

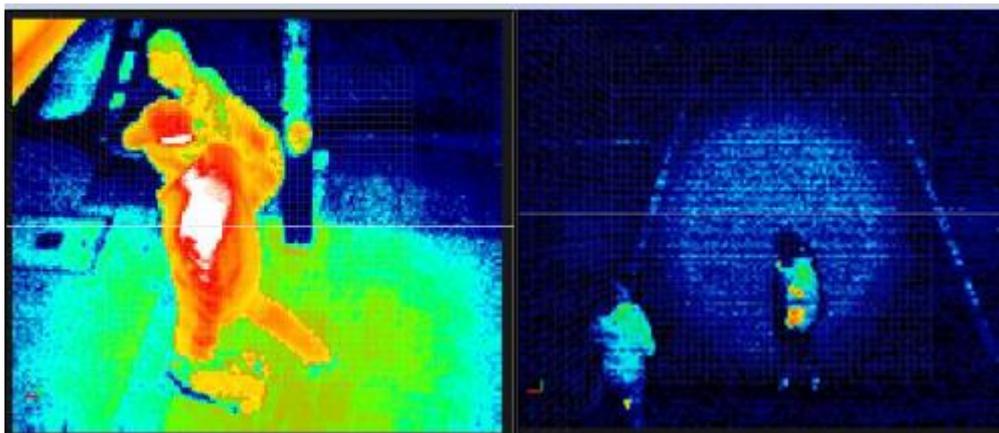


Abbildung 7: Beispielaufnahmen der NOSCO.hybridkamera

Radar-Anforderungstaster

Der berührungslose Anforderungstaster „Radar-Taster“ dient zur automatischen Erkennung des Fußverkehrs, welcher die Kreuzung queren möchte und interpretieren damit das Verhalten des Fußverkehrs.



Abbildung 8: Fotoaufnahme eines Radar-Tasters an der Schloßkreuzung

Der Radar-Taster ermöglicht die berührungslose Grünanforderung mit Hilfe der radar-basierten Näherungserkennung. Betritt eine Person einen bestimmten Bereich vor dem Taster (Öffnungswinkel 80° horizontal, 40° vertikal) erkennt der Taster diese. Tritt die Person näher an den Taster heran, löst dieser die Grünanforderung aus, ohne dass der Taster berührt wurde. Der Bereich für die automatische Anforderung kann mit Hilfe von zwei Schaltern in vier Stufen (10cm bis 1m) eingestellt werden.

Zusätzlich zur berührungslosen Anforderung verfügt der Taster über weitere Funktionen

- Interne oder externe Quittungslogik
- Blinken oder Dauerleuchten der LED
- Erhältlich als Plus, PiT oder Plus-PiT
- Spannungsvarianten 24V DC, 40V AC zukünftig auch 230V AC
- Optional: LED-Leuchtring

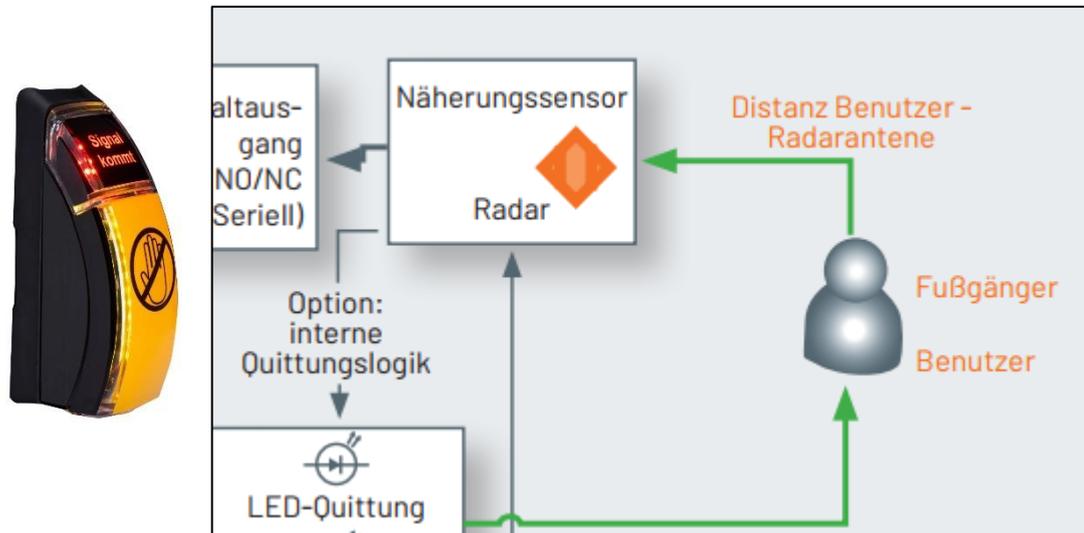


Abbildung 9: Prinzip der Erkennung des Radar-Tasters

Zunächst löste der Taster nicht immer zuverlässig aus, da das Detektionsverhalten der Firmware nicht zufriedenstellend war. Ein Grund hierfür war u. a. der Entfernungsbereich von 0-10 cm, der bei der Firmware der Vorserie nicht problemlos funktionierte. Zudem wussten viele Passanten nicht, dass es sich um einen berührungslosen Taster handelt, die übliche Handbewegung wird häufig von der Seite im oben genannten Problembereich durchgeführt.

Während der Projektlaufzeit wurde eine Optimierung der Firmware vorgenommen, sodass auch der Nahbereich 0-10cm detektiert werden kann. Ebenfalls wurde die Reaktionsgeschwindigkeit optimiert.

AS 5.4 Weiterentwicklung der Sensorik-Hardware

Für die Erfassung der Fahrzeuge im Rückstau vor LSA sollte der Einsatz der LIDAR-Technologie untersucht werden. Dazu sollten Algorithmen zur Detektion stehender und langsam bewegter Kfz im Bereich von 50 - 100 m vor LSA entwickelt werden. Mit Hilfe der aus den Sensoren gewonnenen Daten, kann eine Beeinflussung der Grünphasen bei zu großen Rückstaus ermöglicht werden.

Im Verlauf des Projektes wurden deutlich günstigere Alternativen zur LiDAR-Technologie am Markt verfügbar. So konnte aufgrund vielversprechender Untersuchungsergebnisse mit einem winkelauflösenden Radarsystem auf den Einsatz und die nähere Untersuchung der teureren LiDAR-Technologie verzichtet werden. Außerdem

wurde im Verlauf des Projektes für die Erfassung der Fahrzeuge im Rückstau an der LSA eine Polarisationskamera als alternativer Sensor untersucht.

Ebenfalls wurden Sensoren für die Umweltbox zur Messung von Feinstaub gesucht und die Integrierung in das TOPO-System geprüft (siehe Abschnitt Umweltbox).

Weiterentwicklung der TOPO-Systeme

Bei den Messeinrichtungen handelt es sich um radarbasierte Detektoren. Die beiden eingesetzten Produkte „TOPO.bigbox 4G“ und „TOPO.slp 4G“, unterscheiden sich lediglich in der Bauform, die elektronischen Komponenten sind identisch. Die Radar-Technologie ist dabei unempfindlich gegenüber Wettereinflüssen.

Die TOPO-Geräte bieten folgende Geräteeigenschaften:

- Detektion von Fahrzeugen nach 8+2 Fahrzeugklassen,
 - o Detektion auf zwei Fahrstreifen in gegengesetzter Fahrtrichtung,
 - o BASt geprüftes System,
 - Eignungsprüfung der Verkehrserfassung gemäß den Prüfanforderungen für Geräte zur temporären Verkehrserfassung auch für den Einsatz bei gegenüberliegenden Schutzeinrichtungen aus Stahl bestanden,
 - Prüfergebnis TZ5 Klassen (siehe Abbildung 10),
- FSK Technologie¹⁷,
 - o Zur Entfernungsmessung eingesetzt,
- Geschwindigkeitserfassung,
- Schallerfassung,
- Mobilfunk Modem,
 - o 2G, 3G, 4G (LTE),
 - o Daten versandt,
- GPS,
 - o Positionsortung,
- Schnittstellen,
 - o Bluetooth,
 - o Ethernet,
 - o Sim-Karten-Slot.

Dieses System wurde aus den oben genannten Geräteeigenschaften und der bestandenen BASt Eignungsprüfung gewählt.

¹⁷ FSK Technologie = Frequency-shift-keying.

Im Projekt wurde die Kommunikationseinheit der TOPO-Systeme entwickelt, um das Versenden von Live-Daten zu ermöglichen. Die Kommunikationseinheit beinhaltet folgende Funktionen:

- Interne Schnittstellen zur Anbindung der Radareinheit (Klassifizierungssystem) und der Umweltbox,
- GPS, Modem, Bluetooth, Ethernet-Schnittstelle,
- Sim-Karten-Slot,
- Speicherkapazität für über 950.000 Fahrzeugdatensätze.

Damit der Servicetechniker vor Ort die Überprüfung des Gerätes per Smartphone oder Tablet vornehmen kann, wurde eine Bluetooth-Schnittstelle implementiert. Die Ethernet-Schnittstelle erfüllt zwei Aufgaben. Sie stellt die Service-Schnittstelle für den Servicetechniker dar und ermöglicht das Anbinden an bestehende Netzwerke, um die Live-Daten zu versenden. Falls diese Infrastruktur vorhanden ist, kann die Nutzung der Sim-Karte entfallen. In diesem Projekt ist diese Infrastruktur jedoch nicht vorzufinden. Deshalb musste die Mobilfunk-Schnittstelle (Kommunikationsschnittstelle) inkl. Sim-Karte verwendet werden. Das Modem und die Kommunikationsschnittstelle werden in AS 5.5 näher beschrieben.

Ebenfalls wurden neue Halterungssysteme für die Geräte entwickelt, damit die Revisionsklappen an den Beleuchtungsmasten frei bleiben. Das Problem hierbei ist, dass die Geräte auf einer Höhe von einem Meter installiert werden müssen und in den meisten Fällen auf dieser Höhe die Revisionsklappen für die Servicetechniker der Beleuchtungsmasten ist.



Anzahl Klassen / Gruppen	Bezeichnung der Fahrzeugklassen / -gruppen (mit Code)										
TZ2	nk Kfz (64)						SV (40)				
TZ4	Lvm (37)						SGV (34)			Bus (5)	Krad (10)
TZ5	Lvm (37)						Lkw (3)	Lkwk (4)		Bus (5)	Krad (10)
Grundklassifizierung	Fahrrad (230)	nk Kfz (6)	Teilverdeckte Kfz (250)	Pkw (7)	PkwA (2)	Lfw (11)	Lkw (3)	LkwA (8)	Sattel-Kfz (9)	Bus (5)	Krad (10)

Anzahl Klassen / Gruppen	Bezeichnung der Fahrzeugklassen / -gruppen (mit Code)										
1	nk Kfz (64)										
2	Pkw-Ähnliche (32)						Lkw-Ähnliche (33)				
5+1	nk Kfz (6)	PkwG (1)				PkwA (2)	Lkw (3)	Lkwk (4)		Bus (5)	
8+1	nk Kfz (6)	Krad (10)	Pkw (7)	Lfw (11)	PkwA (2)	Lkw (3)	LkwA (8)	Sattel-Kfz (9)	Bus (5)		
8+1+F	Fahrrad (230)	nk Kfz (6)	Krad (10)	Pkw (7)	Lfw (11)	PkwA (2)	Lkw (3)	LkwA (8)	Sattel-Kfz (9)	Bus (5)	
Grundklassifizierung	Fahrrad (230)	nk Kfz (6)	Teilverdeckte Kfz (250)	Krad (10)	Pkw (7)	Lfw (11)	PkwA (2)	Lkw (3)	LkwA (8)	Sattel-Kfz (9)	Bus (5)

© 2017 RTB GmbH & Co. KG • Schulze-Delitzsch-Weg 10 • D-33175 Bad Lippspringe • Tel.: +49 (0)5252 / 9706-265 • Fax: +49 (0)5252 / 9706-10 • Email: DD.web4.0@rtb-bl.de • www.rtb-bl.de

Abbildung 10: Klassifizierungsschema für Fahrzeuge

Systeme zur Rückstauererkennung

Winkelauflösender Radar

Mit dem winkelauflösenden Radar iSYS5220 (siehe Abbildung 11) können Objekte (Fahrzeuge, Fußverkehr, Radverkehr, etc.) über mehrere Fahrstreifen detektiert und klassifiziert werden (siehe Abbildung 12).



Abbildung 11: Aufnahme eines winkelauflösenden Radars



Abbildung 12: Vergleichende Beispielaufnahmen des winkelauflösenden Radars an der Schloßkreuzung mit zusätzlicher Markierung der Sensierungsgebiete und Fahrzeuge

In diesem Fall wurden zwei Zonen eingerichtet (siehe Abbildung 13), die der Sensor überwachen soll und den entstehenden Rückstau per Live-Übertragung an die zentrale Recheneinheit überträgt. Der Sensor wurde so konfiguriert, dass die detektierten Objekte und die Rückstaulänge pro Zone (Fahrstreifen) ausgegeben werden.

Die Untersuchungen des Sensors und die daraus resultierenden Anpassungen vom Herstellenden wurden erfolgreich umgesetzt. Ein Vorteil des Sensors ist das Tracking von fahrenden und stehenden Objekten. Damit ist es möglich den Verkehrsfluss einer Kreuzung zu überwachen, also zu sehen aus welcher Richtung die Fahrzeuge kommen und wohin diese fahren. Weitere Gründe den Sensor in diesem Projekt einzusetzen waren u.a. die Detektion über mehrere Fahrspuren und einen Erfassungsbereich von mehr als 200 Metern. Zudem ist auch die Inbetriebnahme unkompliziert durchzuführen.

Des Weiteren wurde die Anbindung des winkelauflösenden Radars an den MQTT-Server umgesetzt, damit die Informationen in Echtzeit an die zentrale Recheneinheit übermittelt werden können.

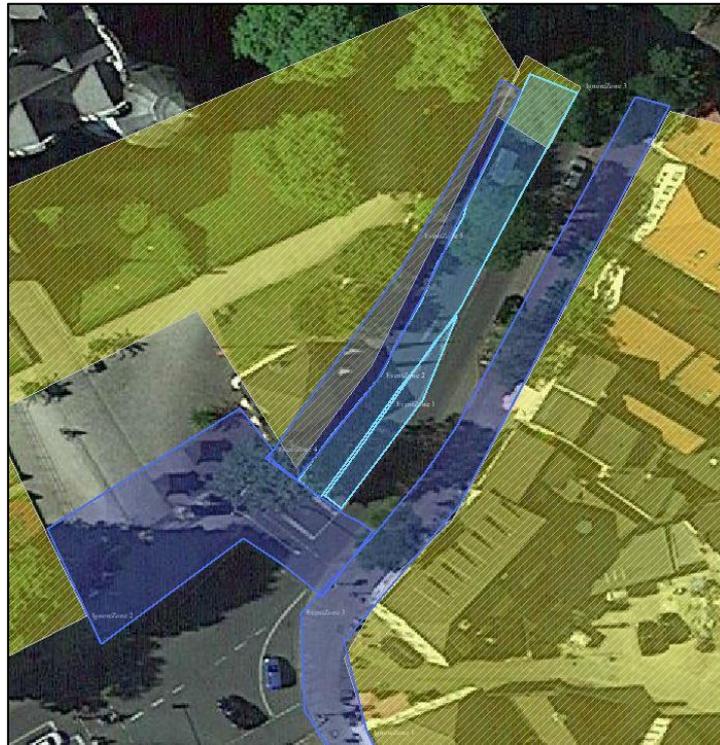


Abbildung 13: Winkelauflösender Radar: Vogelperspektive der Schlosskreuzung inklusive der Markierung der Sensierungsgebiete und Zonen

In dem Beispielausschnitt des Servers, welcher in der folgenden Abbildung 14 zu sehen ist, werden in den Live-Daten die Zonen (1 oder 2) und über den Parameter *queue_len* die Länge des Rückstaus in Metern aufgelistet.

```

Device: [isys5220-00044BE4D8D4] clear [ ] raw [x] autoscroll
[{"t": 1611919297024, "zone": 2, "object_count": 0, "queue_len": 0}
{"t": 1611919297374, "zone": 1, "object_count": 2, "queue_len": 11}
{"t": 1611919298783, "zone": 1, "object_count": 1, "queue_len": 2}
{"t": 1611919300175, "zone": 1, "object_count": 0, "queue_len": 0}
{"t": 1611919333373, "zone": 2, "object_count": 1, "queue_len": 1}
{"t": 1611919342673, "zone": 1, "object_count": 1, "queue_len": 4}
{"t": 1611919342773, "zone": 1, "object_count": 0, "queue_len": 0}
{"t": 1611919345874, "zone": 1, "object_count": 1, "queue_len": 3}
{"t": 1611919351773, "zone": 2, "object_count": 2, "queue_len": 6}
{"t": 1611919366124, "zone": 1, "object_count": 0, "queue_len": 0}
{"t": 1611919368274, "zone": 2, "object_count": 1, "queue_len": 1}
{"t": 1611919375874, "zone": 1, "object_count": 1, "queue_len": 4}
{"t": 1611919383324, "zone": 1, "object_count": 0, "queue_len": 0}
{"t": 1611919408623, "zone": 2, "object_count": 2, "queue_len": 4}
{"t": 1611919410874, "zone": 1, "object_count": 1, "queue_len": 4}
{"t": 1611919431473, "zone": 1, "object_count": 2, "queue_len": 10}
{"t": 1611919440474, "zone": 2, "object_count": 1, "queue_len": 1}
{"t": 1611919441874, "zone": 1, "object_count": 1, "queue_len": 2}
{"t": 1611919441974, "zone": 1, "object_count": 0, "queue_len": 0}
{"t": 1611919442674, "zone": 2, "object_count": 0, "queue_len": 0}

```

Abbildung 14: Winkelauflösender Radar im MQTT-Server mit Rückstaulänge und Zone im UI

Polarisationskamera

Aus Zeitgründen konnte die Entwicklung der Rückstauerkennung mit den dafür angeschafften Polarisationskameras erst zum Projektende starten. Ein Testaufbau, mit einer Polarisationskamera, wurde nahe dem Standort der Firma RTB eingerichtet, somit konnten erste Untersuchungen durchgeführt werden.



Abbildung 15: Ablaufdiagramm der Polarisationskamera

Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden erste Ansätze einer Bildsignalverarbeitung algorithmisch umgesetzt und befanden sich zum Projektabschluss noch im Test.

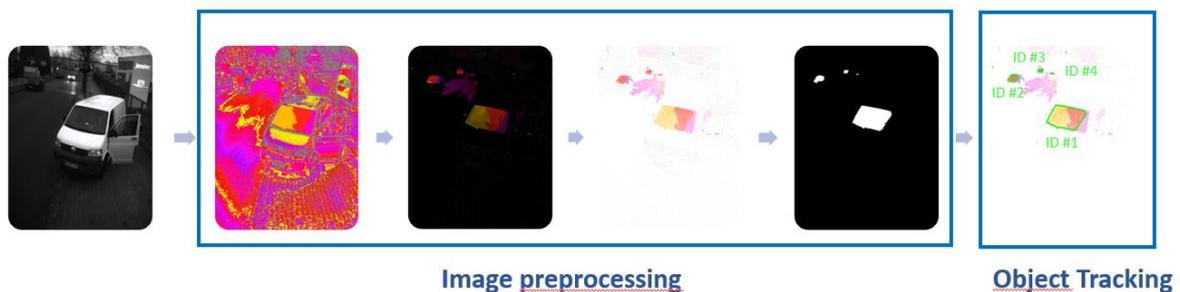


Abbildung 16: Ablaufeinordnung der Elemente der Polarisationskamera

Besondere Herausforderungen sind u.a. die notwendige Beleuchtung der Szene bei Nacht und die unterschiedlich gut erkennbaren Windschutzscheiben insbesondere von Lkw.

Die Projektziele konnten jedoch durch den Einsatz des RADAR-Sensors sehr gut abgedeckt werden. Dieser liefert bereits Objektlisten mit allen detektierten Fahrzeugen auf den verschiedenen Fahrspuren an der Kreuzung.

Umweltbox

Die Integrierung einer Umweltdatenmessung in das TOPO-System wurde erfolgreich geprüft und umgesetzt. Es ist nicht nur möglich Feinstaubdaten, sondern auch

meteorologische Daten wie z.B. Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit zu messen. Es wurden Prototypen erstellt, welche an verschiedenen Messpunkten die vorherrschenden Wetterdaten aufnehmen und abspeichern.



Abbildung 17: Umweltbox in Schloss Neuhaus

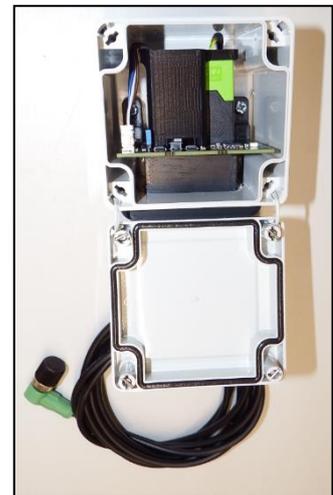
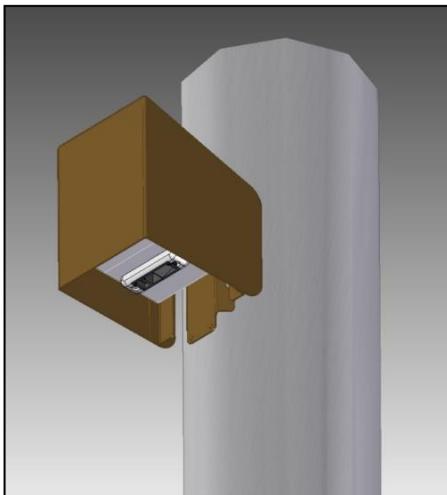


Abbildung 18: Verschiedene Darstellungen der Umweltbox

Bei der Umsetzung haben sich gleich mehrere neue Aufgaben durch die Zusammenführung von unterschiedlichen Sensoren auf einer Platine ergeben. Die Sensoren haben sich gegenseitig beeinflusst, z.B. wurde die Temperaturmessung durch die Erwärmung der gesamten Platine beeinflusst. Dies hatte zur Folge, dass der Temperatursensor abgesetzt von der Platine aufgebracht werden musste.

Um die Genauigkeit der unterschiedlichen Sensoren zu messen und nachzuweisen, wurde das LANUV¹⁸ kontaktiert. An zwei unterschiedlichen Messstationen des LANUV wurden Umweltboxen installiert, die Messwerte verglichen und Korrekturen an der Hard- und Software durchgeführt.

Die Umweltbox (TOPO.air) dient generell dazu Tendenzen zu messen (siehe Abbildung 19) und keine vor Gericht belastbaren Daten zu erheben. Da hier die benötigte präzise Installation der Sensoren und die notwendige jährliche Kalibrierung unverhältnismäßig hohe Kosten verursachen würden. Durch mehrere Iterationen verschiedenster Kombinationen ist ein vielversprechender Prototyp entstanden. Sobald dieser vollfunktionsfähig ist werden die aktuellen Sensoren (1. Generation) ausgetauscht.

Table 6. Air Quality Index Levels Described by the EPA*

Air Quality Index (AQI)	Level of Concern and Air Quality Condition	NO ₂ Concentration [ppb]	O ₃ Concentration [ppb]	Color Code
0 to 50	Good	0 to 53	0 to 62	Green
51 to 100	Moderate	54 to 100	63 to 124	Yellow
101 to 150	Unhealthy for Sensitive Groups	101 to 360	125 to 164	Orange
151 to 200	Unhealthy	361 to 649	165 to 204	Red
201 to 300	Very unhealthy	650 to 1249	205 to 404	Purple
301 to 500	Hazardous	1250 to 2050	405 to 604	Maroon

Abbildung 19 Index-Tabelle-Umweltbox

Zur Erfassung des Ist-Zustands konnten die Umweltboxen (TOPO.air) nicht genutzt werden, da dieses Produkt erst innerhalb des Projekts entwickelt wurde. Für die Erfassung der Umweltdaten wurden daher die simulationsgenerierten Werte verwendet (siehe auch AP 3 und 8).

AS 5.5 Weiterentwicklung der Kommunikationsschnittstellen der Messeinheiten

Alle Messeinheiten im Bilanzraum müssen sich in die in AP 4 aufgebaute Kommunikationsinfrastruktur implementieren lassen. Hierzu sind – je nach genutzter Datenübertragungstechnologie – entsprechende Schnittstellen bereitzustellen. Die Fahrzeugdaten, die im Projekt nahezu live übertragen werden müssen, um eine Optimierung des Verkehrs herbeizuführen, sollten über LoRaWAN transferiert werden. Aufgrund der hohen Datenmengen kombiniert mit hoher Sendefrequenz ist ein Versand der Daten mittels LoRaWAN nicht möglich. LoRaWAN limitiert die Nutzung zu stark und bildet daher kein geeignetes Kommunikationsmedium. Als Alternative werden die Daten im Projekt mittels Mobilfunks übertragen.

¹⁸ LANUV = Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz.

Wie in AS 5.3 bereits beschrieben, wird hier die Kommunikationsschnittstelle zur Übertragung der Live-Daten genauer beschrieben. Auch die Umsetzung aus AS 5.2 spielt hierbei eine große Rolle.

An den Standorten der Messeinheiten ist keine Infrastruktur zur Anbindung über die Ethernet-Schnittstelle vorhanden und somit musste die Mobilfunkvariante der Kommunikationseinheit gewählt und implementiert werden.

Damit die Datensätze der detektierten Fahrzeuge lokal gespeichert und live übertragen werden können, wurden folgende Module und Funktionen im Projekt umgesetzt:

- LTE-fähiges Mobilfunkmodem inkl. Antennen,
- MQTT-Server,
- MQTT-Protokoll.

Die Prozesskette der Datensätze sieht wie folgt aus:

1. Fahrzeug wird klassifiziert (Radareinheit)
2. Datensatz wird erzeugt und an die Kommunikationseinheit weitergeleitet
3. Datensatz wird gespeichert und über das Modem live an den MQTT-Server gesendet

Diese Messsysteme liefern Livedaten mit geringer Latenzzeit (abhängig vom Mobilfunknetz) an den MQTT-Server von RTB. Um den Prozess besser erkennen zu können, ist dieser in Abbildung 20 dargestellt. Auf dem Server 1 werden die Daten entschlüsselt. Die entschlüsselten Daten können von jedem Projektteilnehmer (Server 2) entgegengenommen bzw. abonniert und weiterverarbeitet werden.

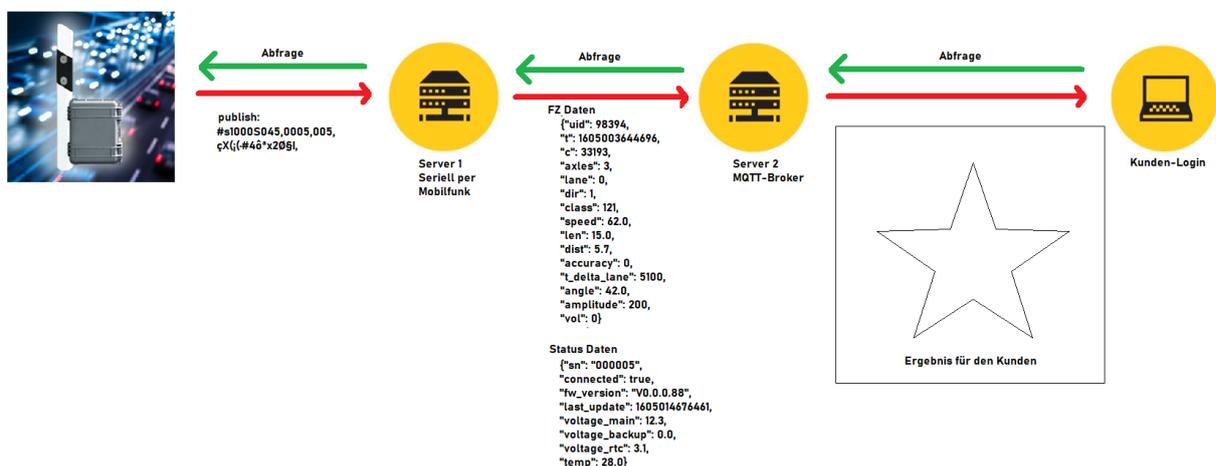


Abbildung 20: MQTT Prozess

In der Abbildung 21 sind beispielhaft alle Geräte (Sensoren) in einer Live-Übersicht aufgelistet. Das dient der manuellen Überprüfung der Geräte während des Projekts.

topo live debug

Server:

State: connected

type	serial	connected	fw	last status update	last detection event	#ev	power main/bck/rtc	gps	cfg_rev
t	004933	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:19:54			12.8 / 4 / 3.1	51.743633 8.707512 (5)	25
t	004944	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:32:00	17.1.2022, 09:32:20	2	12.8 / 4.1 / 3.2	51.743435 8.714228 (6)	28
t	004946	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:32:12			12.8 / 4 / 3.3	51.740858 8.707597 (7)	58
t	004937	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:23:13			11.5 / 4.1 / 3.2	51.745365 8.703235 (5)	23
t	004934	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:29:17			12.8 / 4.2 / 3.1	51.746367 8.716232 (7)	26
t	004940	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:31:25	17.1.2022, 09:32:21	1	12.8 / 4.1 / 3	51.748712 8.717325 (6)	89
t	004945	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:28:46			12.8 / 4.1 / 3.1	51.741533 8.71356 (5)	45
t	004932	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:32:17	17.1.2022, 09:32:21	2	12.7 / 4.1 / 3.2	51.744055 8.704615 (6)	69
t	005595	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:32:13	17.1.2022, 09:32:21	4	12 / 4.1 / 3.2	51.74517 8.70195 (6)	123
t	004947	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:32:11	17.1.2022, 09:32:18	1	12.8 / 4.1 / 3.1	51.743867 8.70122 (7)	211
t	004941	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:30:19			12.6 / 4 / 3.1	51.7431 8.714787 (6)	68
t	005589	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:31:35			11.5 / 4.1 / 3.1	51.74035 8.71134 (7)	159
t	005593	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:30:40			13.2 / 4.1 / 3.2	51.74027 8.711168 (7)	169
t	005594	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:29:37	17.1.2022, 09:32:18	2	11.8 / 4.1 / 3.2	51.745283 8.701073 (8)	48
t	004948	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:28:38			12.7 / 4 / 3.1	51.74977 8.712035 (8)	45
t	004936	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:28:38	17.1.2022, 09:32:19	2	12.7 / 4.1 / 3.2	51.750367 8.715767 (8)	149
t	004939	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:30:23	17.1.2022, 09:32:20	2	12.8 / 4.1 / 3.2	51.74272 8.715028 (8)	51
t	004935	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:32:09	17.1.2022, 09:32:20	3	12.7 / 4.1 / 3.2	51.74824 8.714925 (7)	153
t	004943	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:31:35	17.1.2022, 09:32:19	1	12.8 / 4.1 / 3.2	51.742732 8.711092 (6)	242
t	004942	online	V2.0.1.015	17.1.2022, 09:00:00			14.5 / 4.1 / 3.2	51.746012 8.714178 (8)	229
i	iSYS5220-00044BE4D8D4	online		28.11.2021, 10:24:09	17.1.2022, 09:32:18	2	//		
p	PB_SCHK_M32	online	V1.0.0.2_(Debug)_086	17.1.2022, 09:31:30	17.1.2022, 09:32:22	9	//		
p	PB_SCHK_M31	online	V1.0.0.2_(Debug)_077	17.1.2022, 09:32:03	17.1.2022, 09:32:22	9	//		

Abbildung 21: Live-Übersicht des MQTT-Servers

Über dieses UI können folgende Parameter geprüft werden.

- Sensortyp
 - o TOPO-System (t)
 - o Radarsensor für die Rückstauerkennung (i)
 - o NOSCO.hybridkamera (p)
- Status vom Gerät (online, offline)
- Firmwareversion auf dem Gerät
- Letzte Statusmeldung des Geräts
 - o Akkuspannung, etc.
- Letztes Fahrzeug mit Zeitstempel
- Statusinformationen zu den Akkus
 - o Hauptakku
 - o Back-Up-Akku
 - o Knopfzelle
- GPS-Position vom Gerät

Vorteile des gewählten MQTT-Protokolls:

- Live-Daten Übertragung möglich
- Standardprotokoll

Mit diesem Protokoll kann die Komplexität vom Gerät auf den Server übertragen werden, so dass das Gerät (Sensor) einfach auszutauschen ist ohne größere Konfigurationen vornehmen zu müssen. Bei Änderungen bzw. Weiterentwicklungen in der Datenverarbeitung muss nur der Server angepasst werden und nicht die Firmware der Geräte. Die Protokoll-Spezifikationen können dabei öffentlich eingesehen werden.¹⁹

Auch auf mögliche Störungen musste reagiert werden können. Es können unterschiedliche Störungen auftreten für die jeweils Lösungen gefunden werden mussten.

- Beispiel: „Mobilfunk ist nicht verfügbar.“
- Problem: Der entsprechende Datensatz kann nicht an den MQTT-Server gesendet werden und geht verloren.
- Lösung: Alle Datensätze haben eine Unique-ID, die nach dem Versenden und anschließendem Quittieren vom MQTT-Server als erfolgreich gesendet gekennzeichnet werden (keine weiteren Schritte notwendig).

Sollte das Mobilfunknetz über mehrere Minuten ausfallen wird der Datensatz nicht quittiert und somit als nicht gesendet gekennzeichnet, und erneut gesendet, sobald die Verbindung zum MQTT-Server wiederhergestellt ist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Datensätze der gerade live klassifizierten Fahrzeuge eine höhere Priorität haben und direkt gesendet werden. In den Lücken werden die älteren Datensätze zur Vollständigkeit übermittelt. Damit ist die Vollständigkeit der Datensätze auf der Datenbank gewährleistet und die nachträgliche Auswertung der Daten bleibt erhalten. Auch im Projekt konnte durch diese Lösung die Funktion des Algorithmus überprüft werden.

- MQTT-Server (Server 1)
 - Datensatz wird im proprietären Format vom Gerät gesendet und muss hier entschlüsselt werden,
- MQTT-Server (Server 2)
 - Datensätze leserlich,
 - Ansicht über das UI (User-Interface) zur manuellen Kontrolle,
 - Login über
 - UI (User-Interface) zur manuellen Kontrolle,
 - Kundenserver.

Mit diesen Lösungsansätzen ist es gelungen die Datensätze live an die zentrale Rechen- einheit zu übermitteln. Der MQTT-Server ist für mehrere tausend Geräte ausgelegt, welche ihre Datensätze live übertragen. Es wurde viel Zeit benötigt, um die aktuelle

¹⁹ <https://github.com/rtb-electronics/topo-doc/blob/master/topo-live-mqtt.md>

Stabilität der Datenübertragung zu gewährleisten. Der MQTT-Server muss dabei nicht zwangsläufig nur mit RTB-Geräten verbunden sein, wie die Anbindung des winkelauflösenden Radars zeigt.

Arbeitspaket 6: Ausbau der Infrastruktur der Verkehrssteuerungssysteme

AS 6.1 Ausbau der vorhandenen Infrastruktur für die Verkehrssteuerung

Damit die optimierten Algorithmen zur Verkehrssteuerung in die LSA-Steuergeräte eingesetzt werden konnten, war es erforderlich moderne angepasste Steuergeräte einzusetzen. Dafür wurden die vorhandenen Steuergeräte ausgetauscht. Diese wurden für den Einsatz der optimierten Steuerungsalgorithmen vorbereitet. Vorhandene bzw. neu errichtete Peripheriekomponenten (Signalgeber, Taster und Detektionstechnik) wurden mit dem LSA-Steuergerät verbunden. Um den Verkehrsablauf möglichst wenig zu stören, erfolgte der Umbau der Steuergeräte im Frühjahr 2020. Im Folgenden werden die genauen Daten der Einzelanlagen zeitlich sortiert aufgelistet:

- Bielefelder Straße / Hatzfelderstraße (Hatzfelder Platz) → K0561,
 - 06.03.2020,
- Bielefelder Straße / Herrmann-Löns-Straße → K0562,
 - 16.03.2020,
- Münsterstraße / Merschweg → K0583,
 - 03.04.2020,
- Residenzstraße / Schloßstraße (Schloßkreuzung) → K0513,
 - 14.04.2020,
- Münsterstraße / Kerksenbrockallee (Almering) → K0582,
 - 15.04.2020,
- Münsterstraße / Verner Straße → K0581,
 - 28.04.2020.

Im Rahmen des Projekts wurden zusätzlich Weiterentwicklungen an dem Steuergerät vorgenommen, damit zum einen die uneingeschränkte Ablauffähigkeit der Algorithmen sichergestellt wird und zum anderen die Überprüfung der angepassten Steuerungsalgorithmen gewährleistet bleibt. Als Bedien- und Anzeigeeinheit wurde ein grafisches Touch-Display mit verschiedenen Visualisierungsmöglichkeiten eingesetzt um auch vor Ort einen besseren Überblick über die aktuelle Verkehrssituation, die Signalisierungszustände und Detektionszustände zu gewährleisten.

Bei der Ausstattung der LSA-Steuergeräte wurde darauf geachtet, dass historische Prozessdaten auch für zurückliegende Zeitbereiche ausgelesen werden können. Dazu wurden Langzeitdatenspeicher verbaut, die eine Aufzeichnung der relevanten Verkehrsdaten über mehrere Monate ermöglichen.

Im ersten Schritt wurden auf den neuen Steuergeräten die Bestandsplanungen umgesetzt. Nach dem Austausch der Steuergeräte konnten auf Basis der Bestandsplanungen auch Referenzdaten erfasst werden, um später die Verbesserungen

durch den Steuerungsalgorithmus besser beurteilen zu können. Weiterhin werden die Bestandsplanungen als Rückfallebene verwendet. Die Rückfallebene kann bei Funktionsstörungen manuell oder automatisiert aktiviert werden (siehe AS 6.2).

Die Hierarchie innerstädtischer Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung wird im Wesentlichen durch deren räumlichen Bezug bestimmt. Diese kann durch die nachfolgend genannten Bezugsebenen differenziert werden:

- Knotenpunktbezogene Steuerung
- Linienbezogene Steuerung

Bei der knotenpunktbezogenen Steuerung werden einzelne Knoten autark signalisiert. Die zu einer Steuerungsentscheidung führenden Verkehrsdaten werden im Umfeld der jeweiligen Lichtsignalanlage erfasst. Die Steuerungseingriffe erfolgen dabei signalgruppen- oder phasenbezogen.

Mit den optimierten Steuerungsalgorithmen wurde eine linienbezogene Steuerung realisiert. Verkehrsdaten wurden für das gesamte Umfeld des Straßenzuges erfasst und bewertet. Daraus wurden dann Steuerungsentscheidungen für den kompletten Straßenzug abgeleitet. Die Steuerungseingriffe erfolgen dabei phasenorientiert²⁰. Dadurch wurde eine eingängige Bewertung der Verkehrsflusssteuerung in der Validierungsphase sichergestellt. Auch konnte sich auf die eigentliche Aufgabe der Verkehrssteuerung konzentriert werden und die Einhaltung von Zwischenzeiten²¹, Mindestzeiten und weiteren Rahmenbedingungen wurde den vordefinierten Phasenübergängen überlassen. Zur Übertragung von Steuersignalen an die LSA-Steuergeräte wurden die in den OCIT-Schnittstellen standardisierten Anwenderprogrammwerte (AP-Werte) verwendet. Projektspezifisch wurden Bezeichnungen der AP-Werte für die Übertragung der Phasenwünsche und zur Absicherung der Kommunikation festgelegt (siehe AS 6.4).

Um die Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Kommunen zu erreichen war die Verwendung offener Schnittstellen eine entscheidende Voraussetzung. Aus diesem Grund wurden die von der ODG (OCIT Developer Group) spezifizierten Schnittstellen, „OCIT-Outstation Schnittstelle“ (OCIT-O) und „Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems - Center to Center“ (OCIT-C), verwendet. Ende der 1990er Jahre wurde die Arbeitsgemeinschaft ODG von mehreren Signalbaufirmen gegründet. Die ODG arbeitet mit anderen Gruppen zusammen an der Standardisierung

²⁰ Phase: Signale für verträgliche und bedingt verträgliche Verkehrsströme können in einer Phase zusammengefasst und geschaltet werden. Verträgliche Verkehrsströme haben dabei keine Konfliktzonen zueinander. Bedingt verträgliche haben Konfliktzonen dürfen dennoch unter definierten Voraussetzungen zeitgleich geschaltet werden. Unverträgliche Verkehrsströme haben Konfliktzonen und dürfen keine gleichzeitige Freigabe erhalten.

²¹ Zwischenzeiten: Die Zwischenzeit ergibt sich aus den Räumzeiten, den Einfahrzeiten und den Überfahrzeiten zwischen unverträglichen Verkehrsströmen. Hier wird festgelegt, welche Zeitdauer zwischen dem Ende der Freigabezeit (Grünzeitende) eines Verkehrsstroms und dem Beginn der Freigabezeit (Grünzeit) eines anschließend kreuzenden oder einmündenden Verkehrsstroms mindestens eingehalten werden muss, damit diese nicht kollidieren.

der Kommunikation zwischen Komponenten der Straßenverkehrstechnik. Die standardisierten Schnittstellen werden unter der Markenbezeichnung OCIT dokumentiert.

Die OCIT-Outstation-Schnittstelle (OCIT-O) wird zwischen den Feldgeräten der Straßenverkehrstechnik und den zugehörigen zentralen Einrichtungen eingesetzt und ermöglicht die Anbindung an den städtischen Verkehrsrechner.

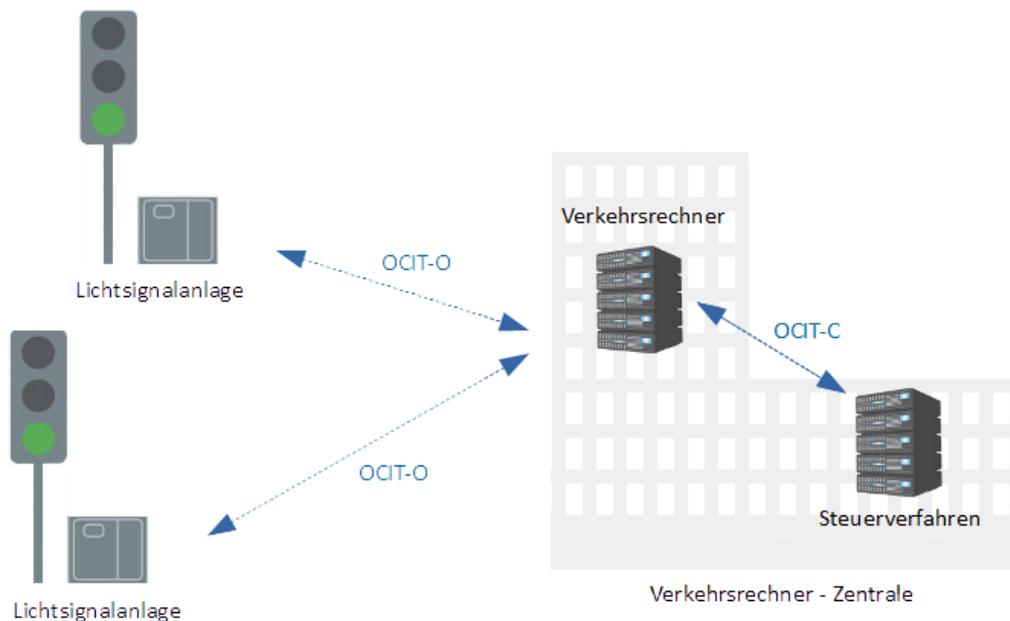


Abbildung 22: Schaubild der OCIT-Kommunikation

Für die Anbindung des optimierten Steuerverfahrens an das Verkehrssteuerungssystem wurde die offene OCIT-C-Schnittstelle verwendet. Mit dieser Schnittstelle werden im Allgemeinen auch die Funktionen zur Kommunikation zwischen der zentralen Verkehrssteuerung und den Verkehrslenkungs-Systemen ermöglicht.

AS 6.2 Umsetzung der vorhandenen verkehrsabhängigen Planung (zur Nutzung als Rückfallebene)

Bei der Erprobung der optimierten Steuerungsalgorithmen auf realen LSA-Steuergeräten im Versuchsfeld musste im ersten Schritt auch mit Funktionsstörungen gerechnet werden. Um den Verkehrsfluss nicht übermäßig zu stören, sollte eine Rückfallebene vorhanden sein. Diese Rückfallebene sollte im Fall einer Funktionsstörung manuell, bzw. automatisch aktiviert werden. Als Rückfallebene wurden die ursprünglich vorhandenen verkehrsabhängigen Planungen verwendet. Diese wurden für die neu errichtenden LSA-Steuergeräte umgesetzt und anschließend auf den Steuergeräten hinterlegt.

Die sicherheitsrelevante Konfiguration der Lichtsignalanlagen ist unverändert geblieben und wird auch weiterhin von einer unabhängigen Signalsicherung überwacht. Damit ist ausgeschlossen, dass verkehrsgefährdende Signalisierungen geschaltet werden.

Auf verkehrstechnischer Ebene sind die folgenden Rückfallebenen installiert worden:

- Überwachung der Kommunikation mit dem Steuerungsalgorithmus
Der zentralseitig angeordnete Steuerungsalgorithmus muss regelmäßig Phasenwünsche abgeben und dabei auch ein „Alive“-Signal regelmäßig ändern. Bleibt dies aus, wird die Phasensteuerung außer Betrieb genommen und in die Bestandsplanung geschaltet. Das Signalprogramm bleibt in diesem Fall unverändert. Der Status der Steuerung kann über einen entsprechenden Rückgabewert ausgewertet werden.
- Überwachung der Reaktion auf Anforderungen
Die Steuerung der Lichtsignalanlage bewertet unabhängig von dem laufenden Verfahren ständig ob Anforderungen einzelner Verkehrsteilnehmenden auch bedient werden. Reagiert das Verfahren in einer festgelegten Zeit nicht auf die Anforderung, wird das Verfahren zunächst einmal vollständig abgeschaltet und in eine Festzeitsteuerung umgeschaltet. Nach dem alle Verkehrsteilnehmenden einmal freigegeben wurden wird versucht das Verfahren wieder in Betrieb zu nehmen. Wenn das Fehlverhalten mehrfach in kurzer Zeit auftritt, wird die Wiedereinschaltung des Verfahrens unterbunden.

AS 6.3 Verbindung zum zentralen Verkehrsrechner

Zu Projektbeginn wurden über die vorhandenen Kabelverbindungen bereits Statusmeldungen und Steuerungsentscheidungen zwischen LSA-Steuergerät und Verkehrsrechner ausgetauscht. Die bis dahin verwendeten proprietären Datenprotokolle mussten gegen offene standardisierte und weit verbreitete Datenprotokolle ausgetauscht werden, um die flächendeckende Übertragbarkeit des Systems für andere Anwender sicherzustellen. Hierfür wurden im AP 4, mit der Einrichtung der OCIT-Schnittstellen am Verkehrssystemrechner, die wesentlichen Schritte vorgenommen.

Die OCIT-Outstation-Schnittstelle (OCIT-O), als offene Schnittstelle, ermöglicht die Verbindung zwischen Feldgeräten der Straßenverkehrstechnik und den zugehörigen zentralen Einrichtungen, wie bspw. dem städtischen Verkehrsrechner. Die typische Aufgabe von OCIT-O ist die sichere Bedienung und Überwachung von Feldgeräten aus der Ferne. Durch die Öffnung und Implementierung der offenen Schnittstelle, ist eine herstellerunabhängige Anschaltung an den Verkehrsrechner möglich.

Physikalisch sollte die Anbindung der Steuergeräte an den städtischen Verkehrsrechner über die vorhandenen stadteigenen Standleitungen mittels DSL-Technologie erfolgen. Um die zuverlässige Kommunikation über DSL sicherzustellen, wurde geklärt welche Modemtypen im Verkehrsrechner zum Einsatz kommen. Im Steuergerät wurden anschließend kompatible Modems verwendet.

Auf die physikalische Verbindung wurde protokolltechnisch die OCIT-O-Schnittstelle aufgesetzt. Für die Verbindung mussten im Vorfeld Konfigurations- und Zugangsdaten ausgetauscht werden. Bei der Bereitstellung der Zugangsdaten durch den Herstellenden

des städtischen Verkehrsrechners kam es dabei zu Verzögerungen. Weitere Verzögerungen ergaben sich auch durch den geplanten Umzug des städtischen Verkehrsrechners an einen neuen Standort.

Um zeitliche Beeinträchtigungen im weiteren Projektverlauf zu vermeiden, wurde ein Konzept für eine alternative Kommunikationsarchitektur erarbeitet. Dabei kam das ReTCon-Online-System als cloudbasierter Verkehrsrechner zum Einsatz. An der grundsätzlichen Architektur ändert sich dabei nichts. Der städtische Verkehrsrechner wird dabei gegen den cloudbasierten Verkehrsrechner ausgetauscht. Die physikalische Anbindung der Steuergeräte erfolgte über Mobilfunkverbindungen und dem Internet. Um trotzdem die Sicherheit der Verbindung gegen externe Zugriffe nicht zu beeinträchtigen kommt ein „Virtual Private Network“ (VPN) zum Einsatz. Das VPN bezeichnet ein virtuelles privates (in sich geschlossenes) Kommunikationsnetz, welches von unbeteiligten Dritten nicht einsehbar ist. Als „virtuell“ wird es bezeichnet, weil es sich um keine eigene physische Verbindung handelt. Es wird ein bestehendes Kommunikationsnetz (Internet) als Transportmedium verwendet. Nachteilig bei den Mobilfunkverbindungen ist eine höhere Störanfälligkeit und eine tendenziell höhere Latenz.

Die Steuergeräte wurden mit einem zusätzlichen Mobilfunkmodem ausgestattet, um die Anbindung an den cloudbasierten Verkehrsrechner zu ermöglichen. Das DSL-Modem für die Anbindung an den städtischen Verkehrsrechner blieb weiterhin angeschlossen. Dies erlaubte im Projekt kurzfristig, auch aus der Ferne, die Umschaltung zwischen beiden Verkehrsrechnern.

Nach der Realisierung des Anschlusses an den städtischen Verkehrsrechner konnte im April 2021 ein Integrationstest, für den Nachweis der ordnungsgemäßen Funktion der OCIT-O-Schnittstelle, durch das Ingenieurbüro ROPERTZ TrafficConsult GmbH erfolgreich durchgeführt werden.

Da es bei der Einrichtung der OCIT-C-Schnittstelle ebenfalls zu Verzögerungen und technischen Problemen kam (siehe AS 6.4: Programmierschnittstelle für die Steuersignale), wurde im Juli 2021 beschlossen für die Restlaufzeit des Projekts das ReTCon-Online-System als cloudbasierten Verkehrsrechner zu nutzen. Eine parallele Nutzung beider Verkehrsrechnersysteme war leider nicht möglich da die OCIT-O-Schnittstelle nicht multimasterfähig ist.

Für die betreffenden Nutzenden im Projekt und in der Stadt wurden Bedienungszugänge auf dem ReTCon-Online-System eingerichtet.

Zur Optimierung der Verkehrssteuerung wurden Verkehrsdaten / Messwerte erhoben und an den zentralen Verkehrsrechner übermittelt. Die von der Verkehrssteuerung berechneten Steuersignale für die einzelnen LSA-Steuergeräte wurden ebenfalls über die vorhandenen Verbindungswege als AP-Werte an die LSA-Steuergeräte übertragen. Die AP-Werte werden im folgenden Kapitel (AS 6.4) näher beschrieben. Ein wichtiges

Kriterium sind dabei die durch die Kommunikationsverbindungen entstehende Latenz. Diese müssen möglichst niedrig gehalten werden.

AS 6.4 Programmierschnittstelle für die Steuersignale

Der Steuerungsalgorithmus benötigt eine Schnittstelle zur Beeinflussung der LSA-Steuerung und zum Auslesen von Verkehrsdaten der LSA-Steuerung. Bei den Verkehrsdaten handelt es sich um Informationen der Detektoren und Taster sowie um Statusinformationen der LSA-Steuerung.

Für die Beeinflussung der LSA-Steuerung durch den Steuerungsalgorithmus wurden die folgenden Anwenderprogrammwerte (AP-Werte) festgelegt. Die Meisten werden in beide Richtungen übertragen, können also sowohl gelesen als auch geschrieben werden.

Tabelle 5: AP-Werte des Pilotprojekts

Name	Datentyp	Initialwert	Bemerkung	Schreib-/Leseberechtigung
ppsAlive	Int (32 bit)	0	PPS Alive Signal	Lesbar/Schreibbar
ppsWPh1	Int (32 bit)	0	PPS Wunschphase TK1	Lesbar/Schreibbar
ppsWPh2	Int (32 bit)	0	PPS Wunschphase TK2	Lesbar/Schreibbar
ppsWPh3	Int (32 bit)	0	PPS Wunschphase TK3	Lesbar/Schreibbar
ppsWPh4	Int (32 bit)	0	PPS Wunschphase TK4	Lesbar/Schreibbar
ppsZPh1	Int (32 bit)	0	PPS nächste Zielphase TK1	Lesbar/Schreibbar
ppsZPh2	Int (32 bit)	0	PPS nächste Zielphase TK2	Lesbar/Schreibbar
ppsZPh3	Int (32 bit)	0	PPS nächste Zielphase TK3	Lesbar/Schreibbar
ppsZPh4	Int (32 bit)	0	PPS nächste Zielphase TK4	Lesbar/Schreibbar
ppsFg1	boolean	false	PPS Fußgängerfreigabe TK1	Lesbar/Schreibbar
ppsFg2	boolean	false	PPS Fußgängerfreigabe TK2	Lesbar/Schreibbar
ppsFg3	boolean	false	PPS Fußgängerfreigabe TK3	Lesbar/Schreibbar
ppsFg4	boolean	false	PPS Fußgängerfreigabe TK4	Lesbar/Schreibbar
ppsRun	boolean	false	Rückmeldung vom Steuergerät, ob die Phasensteuerung aktiv ist.	Lesbar

ppsAlive

Der AP-Wert „ppsAlive“ dient als Lebenszeichen des zentralen Steuerungsalgorithmus.

Wenn das Lebenszeichen ausbleibt, schaltet die Steuerung der Lichtsignalanlage in die Rückfallebene. Das Lebenszeichen muss durch den zentralen Algorithmus mindestens alle 10 Sekunden verändert werden, anderenfalls wird die Wunschphase zurückgesetzt. Es empfiehlt sich den Wert alle 5 Sekunden neu zu beschreiben, um zu verhindern das aufgrund der Latenz die Steuerung ungewollt in die Rückfallebene geht. Vorteilhaft ist die Verwendung eines 32 Bit UTC Zeitstempels als ppsAlive-Wert.

ppsWPh1-4

Die AP-Werte ppsWPh1 bis ppsWPh4 dienen der Übertragung der gewünschten Phase vom zentralen Steuerungsalgorithmus an die Lichtsignalanlage. Die 4 Instanzen dienen der Unterscheidung von bis zu vier verkehrstechnisch unabhängigen Teilknoten. Als Beispiel seien hier freie Rechtsabbiegende mit kreuzendem Fußverkehr genannt, die keine sicherheitstechnischen Abhängigkeiten zur restlichen Lichtsignalanlage haben. Diese Rechtsabbiegenden und der zugehörige Fußverkehr können frei geschaltet werden. Die Wunschphase muss größer 0 sein. Bei einer 0 wird die Rückfallebene angesteuert.

ppsFg1-4

Die AP-Werte ppsFg1 bis ppsFg4 dienen der Übermittlung einer Fußverkehrsanforderung. Um die Anzahl der Phasen auf ein überschaubares Maß begrenzen zu können, wurde der Fußverkehr in den einzelnen Phasen nur optional freigegeben. Wenn die Wunschphase ppsWPhx zusammen mit ppsFg_x gesetzt wird, werden alle in der Phase vorhandenen Fußverkehrsfurten im Übergang zur Wunschphase mit freigegeben. Falls die AP-Werte ppsFg_x während einer laufenden Phase wieder zurückgenommen werden, werden die Fußverkehrsfurten ebenfalls wieder gesperrt. Falls einzelne Fußverkehrsfurten getrennt geschaltet werden sollen, müssen zusätzliche Phasen eingeführt werden, die dieses Verhalten dann abbilden.

ppsZPh1-4

Die AP-Werte ppsZPh1 bis ppsZPh4 dienen der Übertragung einer Zielphase. Die Zielphase gibt die Phase an, die zeitlich nach der aktuellen Wunschphase geschaltet wird, ohne festzulegen wann der Übergang gestartet wird. Hintergrund ist ein Wechsel zwischen zwei Phasen, in denen der Fußverkehr angefordert wird. Es ist davon auszugehen, dass im Regelfall in diesen beiden Phasen nicht die gleichen Fußverkehrsfurten freigegeben werden sollen. Die Übermittlung der Zielphase dient also der Erkenntnis welche Fußverkehrsfurten mit Setzen der Zielphase bereits abgeworfen werden können, weil sie mit dem nächsten Phasenwechsel ohnehin abgeworfen werden müssten. Mit dem frühzeitigen Abwurf der betreffenden Fußverkehrsfurten können Phasenübergänge schneller ablaufen und Verlustzeiten (Räumzeiten des Fußverkehrs) reduziert werden.

ppsRun

Dieser AP-Wert dient der Rückmeldung vom Steuergerät an die Verkehrsrechner-Zentrale und an den übergeordneten Steuerungsalgorithmus. Er kann die Werte TRUE

und FALSE annehmen. Steht der Wert auf TRUE, werden die Phasenwünsche des Steuerverfahrens ausgeführt. Bei FALSE werden die Phasenwünsche von der übergeordneten Steuerung aktuell nicht ausgeführt.

Die beschriebenen AP-Werte werden noch einmal in dem AP-Wert Block ppDPV1 zusammengefasst. Der Vorteil hierbei ist, dass sie zusammen in einer Operation übertragen werden.

Tabelle 6: Zusammenfassender AP-Wert für erleichterte Kommunikation

Name	Datentyp	Initialwert	Bemerkung	Schreib-/Leseberechtigung
ppDVP1	1 x Byte 4 x Integer (32 bit)	0	PPS Alive Signal / Wunschphase / Zielphase / Fg	Lesbar/Schreibbar

Der ppsDPV1 hat eine Nutzlänge von 17 Byte und ist wie folgt aufgebaut:

- Byte 0, Typ
- Byte 1 – 4, Alive Wert (Network-Order)
- Byte 5 – 8 WPh1 – WPh4
- Byte 9 – 12 ZPh1 – ZPH4
- Byte 13 – 16 Fg1 – Fg4

Der Steuerungsalgorithmus ist mittels Programmierschnittstelle und OCIT-C-Schnittstelle mit dem Verkehrsrechner verbunden. Für die Übergabe der Steuerungsinformationen und das Auslesen der Verkehrsdaten wird ein OCIT-C-Client benötigt. Dieser liest zyklisch die Daten der Verkehrsrechner-Zentrale über die OCIT-C-Schnittstelle aus und überträgt bei Bedarf Steuerungsinformationen an die Verkehrsrechner-Zentrale.

Für die Realisierung der Programmierschnittstelle und des OCIT-C-Clients wurde im ersten Schritt auf eine frei im Markt verfügbare Softwarelösung für Qualitätsanalysen zurückgegriffen. Da diese Lösung aber nicht auf einen permanenten Echtzeitbetrieb ausgelegt war, konnte sie im Projekt nicht verwendet werden. In der Folge wurde deshalb ein OCIT-C-Client mit einer entsprechenden Schnittstelle für den Steuerungsalgorithmus neu entwickelt.

Bei der Einrichtung der OCIT-C-Schnittstelle am städtischen Verkehrsrechner kam es zu technischen Problemen, die durch den Lieferanten des Verkehrsrechnersystems kurzfristig auch nicht abgestellt werden konnten. Unter anderem war ein zeitgleicher Abruf der Daten von unterschiedlichen Anlagen und eine Latenz der Daten von weniger als 5s nicht möglich. Um weitere zeitliche Verzögerungen zu vermeiden und das Projekt nicht grundsätzlich zu gefährden, wurde im Juli 2021 beschlossen für die Restlaufzeit des Projekts das ReTCon-Online-System als cloudbasierten Verkehrsrechner zu nutzen.

Dies erfolgte trotz der höheren Störanfälligkeit und der tendenziell höheren Latenz bei Mobilfunkverbindungen.

Ein wichtiger Punkt bei der Verwendung der Verkehrsdaten über die OCIT-C-Schnittstelle ist eine geringe Latenz. Da es sich bei dem Steuerungsalgorithmus prinzipiell um eine Echtzeitsteuerung handelt müssen die Daten mit möglichst geringer Latenz von der Steuerung der LSA an den Algorithmus und anschließend die Steuerungsinformationen vom Algorithmus wieder zurück an die Steuerung der LSA übertragen werden. Eine Gesamtlatenz von 2 bis 3 Sekunden wurde hier als zielführend angesehen.

AS 6.5 Integration der optimierten Steuerungsalgorithmen

Die Steuerungseingriffe erfolgen phasenorientiert. Dadurch wurde eine eingängige Bewertung der Verkehrsflusssteuerung in der Validierungsphase sichergestellt. Zudem wurde die Einhaltung von Zwischenzeiten, Mindestzeiten und weiteren Rahmenbedingungen den vordefinierten Phasenübergängen überlassen.

Die Ablaufsteuerungen der LSA mussten dazu um die Phasensteuerung und Überwachungen für die Rückfallebene erweitert werden. Die Stellsignale für die Umschaltung der Phasensteuerung erhält die Steuerung über die AP-Werte der OCIT-Schnittstelle. Über die AP-Werte erfolgt dann auch die Rückmeldung des aktuellen Status des Steuerungsalgorithmus.

Um den Steuerungsalgorithmus gezielt in Betrieb nehmen zu können, wurden neben den Festzeitsignalprogrammen 1 bis x und den verkehrsabhängigen Signalprogrammen 11 bis 1x zusätzliche Signalprogramme mit den Nummern 21 bis 2x für die Phasensteuerung angelegt. In diesen Signalprogrammen wird der optimierte Steuerungsalgorithmus aktiv geschaltet. Die Signalprogramme können entweder manuell oder über eine hinterlegte Zeitautomatik ausgewählt werden. Durch die Doppelung der Signalprogramme ergibt sich noch ein weiterer Vorteil. Bei der Aktivierung der Rückfallebene kann direkt aus dem Signalprogramm 2x in das zugehörige Signalprogramm 1x als Rückfallebene gesprungen werden.

Steuerungsalgorithmen, die sich in der Simulation bewährt haben, wurden anschließend im Versuchsfeld erprobt. Dazu wurden die Steuerungen schrittweise ab Ende 2021 bis Anfang 2022 in Betrieb genommen.

AS 6.6 Bereitstellung von Prozessdaten

Zur Bewertung und Validierung der optimierten Verkehrssteuerung wurden Daten aus den Steuerungen der LSA-Steuerung benötigt. Dabei handelt es sich vorwiegend um Prozessdaten wie Zählwerte, Signalplanaufzeichnungen, etc. Diese Daten wurden online über das Verkehrsrechner-System oder auch lokal am Steuergerät zur Verfügung gestellt.

Für die Bewertung des Steuerungsalgorithmus anhand der vorliegenden Daten wurden Kriterien für die Bewertung benötigt. In diesem Punkt mangelte es an geeigneten, leicht

verständlichen Kriterien und Werkzeugen für eine systematische Qualitätsbewertung. Die Qualitätssicherung von LSA-Steuerungen findet meist als Reaktion auf auftretende Mängel, Störungen oder Beschwerden statt. Da Lichtsignalanlagen häufig über lange Zeiträume (bspw. 20 Jahre) betrieben werden, ändern sich auch die verkehrstechnischen Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel das Verkehrsaufkommen. Eine regelmäßige Überarbeitung der LSA-Steuerung würde aber zu einer finanziellen Überlastung von Kommunen, Bund und Ländern führen. Es werden deshalb Hilfsmittel benötigt, die die Qualität mit leicht verständlichen Kriterien bewerten. Damit ist dann eine Abschätzung der Verkehrsgüte und eines möglichen Verbesserungspotenzials gegeben. Investitionsmittel können anschließend effektiv eingesetzt werden.

Im Rahmen des Projektes wurde deshalb parallel auch an Hilfsmitteln für die Qualitätsbewertung einer Lichtsignalanlage gearbeitet.

Bei der Bewertung der Qualität einer Lichtsignalanlage müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden:

- Bewertung der Hardwarekomponenten
- Anforderungen an die Verkehrsregelung
- Festlegungen durch den Betreiber unter Berücksichtigung der Vorgaben aus der Politik
- Betrachtung eines einer einzelnen LSA bzw. eines Netzes

Für die Bewertung von LSA-Steuerungen wurden in vielen Ländern Regelwerke erstellt. Mit diesen Regelwerken sollen Lichtsignalanlagen nach vorgegebenen Kriterien bemessen und bewertet werden. Die Stufen der Kriterien stellen die zu erwartende Qualität des Verkehrsablaufs dar.

Das amerikanische „Highway Capacity Manual (HCM)“ ist dabei das Vorbild der Regelwerke. Viele Länder übernahmen sogar direkt das HCM als eigenes Regelwerk. Das HCM wird unter Federführung von Transportation Research Board (TRB) erstellt, regelmäßig erneuert und an die neusten Kenntnisse aus der Straßenverkehrstechnik angepasst. In Deutschland wurde im Jahr 1994 am Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum der Entwurf eines Handbuchs erstellt, der bis Ende 2001 auch in der Praxis als Orientierung des Kapazitätsnachweises verwendet wurde. Dieser Entwurf wurde in der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 699 veröffentlicht. Auf Basis dieses Entwurfs wurde unter der Federführung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) ein Projekt gestartet, ein erstes Handbuch mit dem Namen „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ zu erstellen. Dieses Handbuch soll als Standard in Deutschland gelten. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, kurz genannt HBS 2001, steht seit 2001 den Benutzenden zur Verfügung.

Nachteilig ist bei allen Bewertungsverfahren, dass sie Wetter- und Straßenverhältnisse nicht ausreichend berücksichtigen können. Bei Vergleichen muss deshalb auf vergleichbare Rahmenbedingungen geachtet werden.

Bei den Daten, die für eine Qualitätsanalyse zur Verfügung stehen, wird zwischen statischen Daten (Planungsdaten) und dynamischen Daten (Betriebsdaten) unterschieden:

- Statische Daten
 - Planerische und verkehrstechnische Grunddaten,
- Dynamische Daten
 - Prozessdaten,
 - Betriebs- und Störungsinformationen,
 - Beobachtungen des Verkehrsablaufs,

Die Prozessdaten untergliedern sich unter anderem in:

- Verkehrsdaten (Detektordaten),
- Freigabezeiten,
- Umlaufzeiten²²,

Daneben gibt es Prozessdaten, die sich in Regel nicht direkt in der LSA-Steuerung bestimmen lassen. Diese können zusätzlich über eine Simulation ermittelt werden:

- Wartezeiten,
- Anzahl Haltevorgänge,
- Reststaulängen,
- Reisezeiten,
- Geschwindigkeiten,
- Emissionen,

Aktuell stehen folgende Funktionen für die Qualitätsbewertung ausschließlich auf Basis der LSA-Daten zur Verfügung:

- Plausibilität der Detektion
 - Differenzen zwischen Zufluss und Abfluss
- Bewertung der ÖPNV Bevorrechtigung
 - Reisezeiten / Fahrtzeiten
- Signalisierung

²² Umlaufzeit: bei entsprechender Anforderung sollten die Verkehrsarten innerhalb dieser Zeit grün erhalten. Je nach Tageszeit und Verkehrsaufkommen werden unterschiedliche Signalprogramme mit unterschiedlichen Umlaufzeiten geschaltet. Je länger die Umlaufzeit ist, desto höher ist in der Regel die Leistungsfähigkeit einer LSA (gemessen am Kfz). Aber: höhere Umlaufzeiten führen in der Regel zu höheren Wartezeiten. Daher werden höhere Umlaufzeiten vorrangig in den Hauptverkehrszeiten und kurze Umlaufzeiten in Tagesrandlage geschaltet.

- Freigabezeit-, Sperrzeitverteilung
- Wartezeit / Verlustzeit.

Auf eine ausführliche Darstellung möglicher Analysen wird an dieser Stelle verzichtet. Diese erfolgt im Rahmen der Validierung.

Arbeitspaket 7: Öffentlichkeitsarbeit

AS 7.1 Einbindung der Verkehrsdaten in die Local Open Data Plattform

Die in Echtzeit erhobenen Verkehrsdaten der TOPO-Boxen werden fortlaufend auf der Local Open Data Plattform²³ gespeichert. Über eine Benutzeroberfläche können derzeit beispielhaft Verkehrsdaten heruntergeladen werden.

Die Bereitstellung der Verkehrsdaten der LSA erfolgt derzeit nicht, was auch kein primäres Projektziel war. Mit der Öffnung des städtischen Verkehrssystemrechners wurde dennoch ein wesentlicher Schritt dafür vorgenommen. Aufgrund der Anbindung der sechs LSA im Versuchsgebiet an den virtuellen VSR (ReTCon-Online-System von Stührenberg), gehen derzeit aber keine Verkehrsdaten an den städtischen VSR, denn jede LSA kann nur mit einer Zentrale verbunden sein.

AS 7.2 Öffentlichkeitsarbeit

Das Pilotprojekt wurde bei vielen verschiedenen Veranstaltungen, wie z. B. beim Mobilitätstag in Paderborn, der Öffentlichkeit vorgestellt.

Ebenso wird auf den Internetplattformen der beteiligten Partner das Projekt präsentiert. Auf weiteren Internetplattformen bestehen Kurzpräsentationen und Links zu den jeweiligen Plattformen der Partner. Darüber hinaus erfolgten Vorstellungen in Fachzeitschriften, Presse, Rundfunk und wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

Eine Liste der Veranstaltungen befindet sich in der Anlage 4.

Aktive Einbindung der Bürger*innen

Bei der ursprünglichen Planung war vorgesehen, dass die Bürger*innen in Schloß Neuhaus mit Messgeräten für die Umwelterfassung ausgestattet werden und aktiv im Pilotprojekt partizipieren. Ziel war es dabei, diese Daten u. a. zur Validierung des Projekts zu nutzen. Wie im AS 2.3. erläutert, ist die Realerfassung von Umweltdaten zur Validierung der Emissionseinsparungen nicht zielführend. Demensprechend musste auf diese Einbindungsmöglichkeit der Öffentlichkeit verzichtet werden und stattdessen generierte Emissionsdaten über das validierte Simulationsmodell verwendet werden.

²³ Parallel-Projekt der Stadt Paderborn (siehe <https://gitlab.com/zentrale-open-data-plattform-paderborn/overview>).

Arbeitspaket 8: Validierung

Rahmenbedingungen der Validierung

Einleitend für die Validierungsphase muss angemerkt werden, dass sich die Auswertungen auf Daten stützen, die über die Simulationssoftware SUMO gewonnen wurden. Dies liegt u. a. darin begründet, dass für eine direkte Messung eine große Menge an zusätzlicher Validierungssensorik angeschafft werden müsste (limitiert durch das Projektbudget) und die Messungen aufgrund verschiedener äußerer Einflüsse stark variieren würden. Gerade für die Emissionsbestimmung müssten zusätzlich viele aufwändige Auflagen aus der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) erfüllt werden. Für das Projekt sind Messungen nach dieser Verordnung nicht realisierbar (siehe AS 2.3). Daher wurde im Projekt ein anderer Ansatz verfolgt. Das Umweltbundesamt hat mit dem „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA) Emissionsfaktoren für gängige Fahrzeugtypen zur Verfügung gestellt. Die Daten beinhalten Werte zu unterschiedlichen Verkehrssituationen, zu Fahrzeugtypen und Emissionskonzepten. In dem verwendeten Simulationsprogramm SUMO sind diese Daten und Informationen des HBEFA umgesetzt worden. Somit ist eine Auswertung der Umweltdaten über das Simulationsmodell möglich. Der große Vorteil dieser Variante ist, dass die Rahmenbedingungen zwischen dem Ausgangszustand der LSA-Schaltung (Bestandsverfahren) und dem zu testenden Verfahren (intelligenter LSA-Regelungsansatz auf Basis einer modellprädiktiven Regelung (MPC)) gleich festgelegt werden können und somit eine verbesserte Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Außerdem können andere spezifische Fahrzeugdaten, wie Wartezeiten, dem Simulationsergebnissen entnommen und analysiert werden.

Um eine Einschätzung über die Einsatz- und Leistungsfähigkeit des neuen Regelungsansatzes zu bekommen, wurde dieser zunächst rein simulativ und umfangreich anhand von verschiedenen Testszenarien erprobt. Diese Ergebnisse konnten mit ebenfalls rein simulativ ermittelten Werten des Bestandsverfahrens direkt verglichen werden (siehe Beispiel in AP 3), da jeweils die exakt gleichen Verkehrssituationen hergestellt werden konnten. Das Stichwort „direkt“ ist an dieser Stelle besonders zu betonen, da im Gegensatz zur Realumsetzung beider Verfahren die unmittelbar entstandenen Emissionen, Wartezeiten, etc. von den einzelnen Fahrzeugen verglichen werden konnten. Der einfache Grund ist, dass in den jeweiligen Simulationen die simulierten Fahrzeuge die identischen Routen fahren, sodass Verkehrsaufkommen und -verteilung (Fahrzeugtypen) gleich sind.

In der Simulation zeigen sich durch Verwendung der im Projekt entwickelten prädiktiven LSA-Regelungsstrategie abhängig vom Szenario deutliche Verbesserungen in den Bilanzen des betrachteten Testgebiets bzgl. der Emissionen und Wartezeiten (abhängig vom gewählten Szenario und der Verkehrsstärke im Bereich von 10-35% bzgl. der Emissionen und 10-50% bzgl. der Wartezeiten). Der Vorteil des entwickelten LSA-Regelungsverfahrens in der Simulation gegenüber der Realumsetzung ist, dass mit

verschiedenen Kenntniskennnissen des momentanen Verkehrszustands getestet werden kann. Eine optimale Zustandskenntnis ist in der Realität aufgrund der verfügbaren Sensordaten und der Zustandsschätzung nicht erwartbar, zeigt aber das Potenzial des jeweilig untersuchten Ansatzes. Zudem kann bei der Übertragung und Umsetzung der Signale auch ein optimaler Kommunikationsaustausch simuliert werden, so dass keinerlei zusätzliche Verzögerungen die Ergebnisse beeinflussen.

Da in der Realität sowohl der Verkehrszustand nicht exakt geschätzt werden kann als auch zusätzlich Latenz in beiden Übertragungsrichtungen des Regelungsalgorithmus auftreten (der Algorithmus ist wie bereits erwähnt zentral auf einem Rechner der Stadt implementiert), sind die deutlichen Verbesserungen reduziert in der Realumsetzung zu erwarten.

Um die Auswirkungen von Störungen und Verzögerungen testen und abschätzen zu können, wurden hierzu Simulationsstudien angestellt, diese bestätigen, dass sich mit zunehmender Latenz das Regelungsergebnis verschlechtert (der negative Einfluss konnte in Beispielszenarien mit etwa 5 % relativer Verschlechterung bzgl. der durchschnittlichen Wartezeiten pro zusätzlicher Verzögerungssekunde beziffert werden; siehe Abbildung 5).

Die Latenz, die in dem Pilotprojekt durch das ReTCon-Online-System bisher erreicht werden konnten, liegen im Mittel bei $\sim 4s$ beim Datenabruf von der LSA über ReTCon-Online zum Regelungsalgorithmus²⁴, bei $\sim 1s$ beim Datenabruf über MQTT der TOPO-Boxen und im Bereich von $\sim 3s$ beim Senden der gewünschten AP-Werte (u. a. der folgenden Wunschphase) bis zum Empfang durch das LSA-Steuergerät vor Ort.

AS 8.1 Messung der Emissionsbelastung und des Verkehrsflusses im Ausgangszustand

Durch den Einsatz des entwickelten Echtzeit-Verkehrsschätzers können die Daten sämtlicher Fahrzeuge im Testgebiet auch für das Bestandsverfahren mithilfe von SUMO aufgezeichnet werden. Da in diesem Fall kein zusätzlicher Eingriff in die Steuerungslogik notwendig ist, agiert die Kommunikation „LSA \leftrightarrow ReTCon-Online \leftrightarrow Regelungsalgorithmus“ in diesem reinen Beobachtungsstadium deutlich verbessert und stabiler gegenüber dem tatsächlichen Regelungseingriff. Die „sensorseitigen“ Kommunikationsausfälle zwischen LSA, dem virtuellen Verkehrsrechner (ReTCon-Online) und der Verkehrssimulation beschränkten sich auf wenige Ausfälle pro Tag (je Anlage ca. vier Ausfälle täglich). Da in diesem Fall „aktorseitig“ keine Kommunikation nötig war (reine Beobachtung ohne Stelleingriffe), konnten auf diese Weise sehr gut zusammenhängende Sequenzen der aktuell implementierten Bestandsschaltung aufgenommen werden.

²⁴ Betrieben auf einem städtischen Server.

Für die spätere Bewertung der verschiedenen Ansätze ist es wichtig zu beachten, dass die Steuerungslogik des Bestandsverfahrens auf dem jeweiligen LSA-Steuergerät selbst hinterlegt ist. Dementsprechend werden sowohl Induktionsschleifendaten als auch Signalbilder und Fußverkehrsmeldungen ohne zusätzliche Verzögerung in der Logik umgesetzt, also wie im oben beschriebenen Optimalfall der Simulation.

AS 8.2 Messung der Emissionsbelastung und des Verkehrsflusses während der Testphase der optimierten Verkehrsflussregelung

Neben der Latenz treten bei der Realumsetzung auch generelle Kommunikationsabbrüche in der Verbindung mit dem ReTCon-Online-System häufiger auf (ca. 50 pro LSA pro Tag). Diese konnten im Projektzeitraum aufgrund der sehr verkürzten Realumsetzungsphase nicht mehr vollständig beseitigt werden, sodass die Validierung der Ergebnisse differenziert durchgeführt werden musste. Bei Auftreten der benannten Kommunikationsproblematik wurde durch das ausgearbeitete Sicherheitskonzept (siehe Anhang) mithilfe einer Übergangsphase in die Bestandssteuerung der jeweiligen LSA geschaltet, sodass ein sicherer Betrieb zu jeder Zeit gewährleistet war. Auch aus diesem Grund wurde das Testgebiet nochmals in ein westliches (K0583, K0582 und K0581) und ein östliches Gebiet (K0513, K0561 und K0562) aufgeteilt. Gerade im Hinblick auf die Analyse des Betriebs ohne Kommunikationsabbrüche war diese Aufteilung für die Bewertung notwendig.

Für die Beurteilung der Güte werden demnach Sequenzen begutachtet, in denen der entwickelte Regelungsalgorithmus ohne Unterbrechung alle Anlagen des jeweiligen Testbereichs geregelt hat, sowie Sequenzen in denen kurzzeitige oder längere Kommunikationsprobleme oder Sicherheitseingriffe auftraten. Neben der reinen Bewertung des neuen LSA-Regelungsansatzes unter Beachtung der auftretenden Latenz, konnte somit auch der hergestellte Dauerbetrieb mit auftretenden Kommunikationsproblemen/-ausfällen der Anlagen evaluiert werden.

Ebenfalls bedingt durch die sehr kurze Testphase konnte lediglich ein konstanter Parametersatz des neuen LSA-Regelungsalgorithmus im Feldbetrieb getestet werden. Weitere Parametersätze werden auch noch nach Projektabschluss in studentischen Arbeiten am Lehrstuhl RtM des HNI detailliert anhand verschiedener Verkehrsszenarien simulativ untersucht.

AS 8.3 Analyse der Entwicklung der Emissionsbelastung und des Verkehrsflusses

Datenverarbeitung: Cluster²⁵ und Filterung

Bezüglich des Datenumfanges dieser Validierung sollte angemerkt werden, dass dieser zwar deutlich verkürzt gegenüber dem eigentlichen Vorhaben (9 Monate Testphase) ist,

²⁵ Cluster = Gruppierungen oder Klassen.

dennoch wurden mit der Inbetriebnahme (Umfang ca. 3 Monate), dem ersten Test des Dauerbetriebs mit zu vielen Störungen zur Vergleichsanalyse (ca. ein Monat) und dem Endzustand des Projekts (mehr als ein Monat der Datenaufzeichnung $\cong 1000 h$) erhebliche Datenmengen zur weiteren Analyse aufgenommen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass lediglich zusammenhängende Datensätze bzw. Sequenzen (Erklärung folgt) mit einer Dauer von mindestens 20 *min* für die Validierungsergebnisse verwendet werden.

Aufgrund der erreichten Stichprobengröße können die Beobachtungen der Analyse des ausgewählten Testparametersatzes der neuentwickelten MPC-Regelung mit den Rahmenbedingungen des Pilotprojekts für die derzeitige Situation als aussagekräftig angenommen werden. Dennoch kann die Leistungsfähigkeit der beiden verschiedenen Ansätze nur bedingt allgemeingültig für generelle Feldumsetzungen evaluiert werden. Die Aussagen gelten lediglich für die Rahmenbedingungen des Pilotprojekts²⁶ und müssen entsprechend „extrapoliert“ werden.

Da im zu untersuchenden Feldbetrieb im Gegensatz zum simulativen Test niemals identische Routen von den exakt gleichen Fahrzeugen zur gleichen Zeit bei Einsatz beider LSA-Regelungsverfahren vorherrschen, müssen bestimmte Cluster entwickelt werden, die zumindest eine gewisse Vergleichbarkeit sicherstellen. Diesem Ansatz liegt der Gedanke zugrunde, beispielsweise gleiche Wochentage miteinander zu vergleichen, da hier ähnliche Verkehrsaufkommen und -situationen zu erwarten sind. Damit aufgrund des Clusters allerdings nicht zu viele Gruppen zur Auswertung der Feldtests entstehen, wurde sich hierbei auf die generelle Verkehrsstärke im Teilgebiet pro Stunde (*veh/h* je Teiltestgebiet) und auf das Auftreten von LSA-Störungen bzw. Kommunikationsproblemen beschränkt. Die Cluster definieren sich demnach über die hier im Pilotprojekt festgelegten und nun folgenden Kriterien:

- Verkehrsaufkommen,

Tabelle 7: Cluster Verkehrsaufkommen

Hoch	$> 4500 \text{ veh/h,}$
Mittel	$> 1500 \text{ veh/h}$ und $\leq 4500 \text{ veh/h,}$
Niedrig	$\leq 1500 \text{ veh/h,}$

²⁶ Beispiel: Dies bedeutet, dass eine resultierende Verbesserung von 5 % weniger Gesamtemissionen bei niedrigen Verkehrsbelastungen ($< 1500 \frac{\text{veh}}{\text{h}}$) nicht heißt, dass die MPC-Regelung bei allen Anlagen und Verkehrsgebieten eine derartige Änderung hervorruft. Viel mehr sagt diese Beobachtung aus, dass im Pilotprojekt in diesem Testgebiet mit dieser Latenz und der restlichen Infrastruktur (u.a. Störungen) dieses Ergebnis erzielt wurde. Bei verbesserten Rahmenbedingungen sind wiederum veränderte Ergebnisse zu erwarten.

- Störungsaufreten bzw. Aktivität der Regelung (bei der MPC-Regelung),

Tabelle 8: Cluster Störungsaufreten

Aktivität 1	Keine Störung	alle Anlagen im gesamten Betrachtungszeitraum aktiv,
Aktivität 2	Sequenz mit mehrheitlichem Einsatz der MPC	mindestens 90% der Zeit werden alle ²⁷ Anlagen im Teilsystem mithilfe der MPC geregelt,
Aktivität 3	Sequenzen mit längeren Störungs- bzw. Ausfallerscheinungen	im Regelungsbetrieb mit 50-90% vollständigem MPC-Betrieb.

Um das zweite Kriterium zu veranschaulichen, soll die nachfolgende Abbildung 23 dienen, die über einen Zeitraum von ca. sechs Stunden die Ausfälle bzw. die Ausfallzeiträume, der einzelnen in dem Teilgebiet befindlichen LSA andeutet.

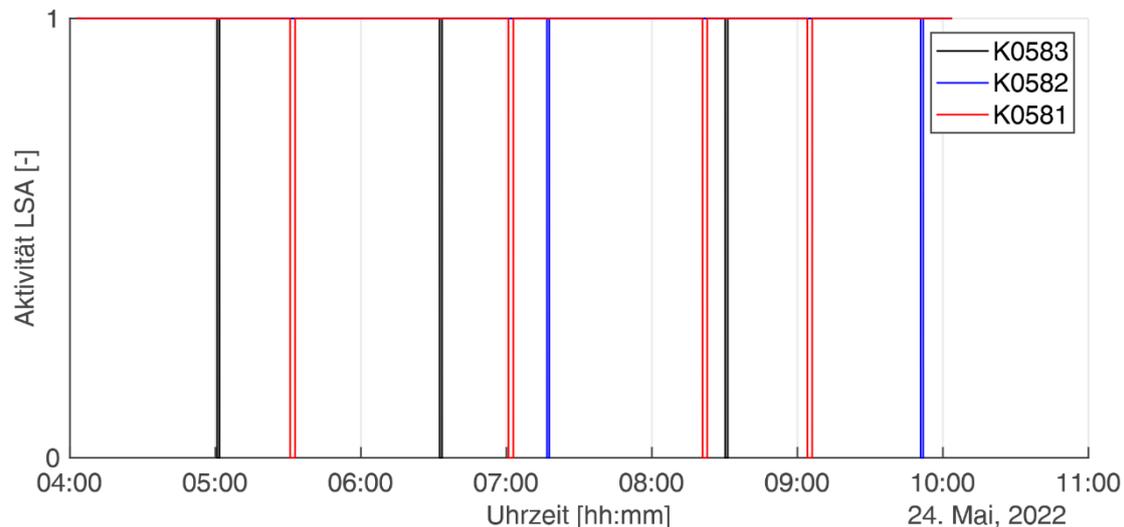


Abbildung 23: Aktivitätsverlauf der LSA im westlichen Testgebiet für einen Beispieltagesausschnitt (24.05.2022)

An der Grafik wird die Häufigkeit der beschriebenen Störungen deutlich ersichtlich. Aktive Anlagen (für die genaue Bezeichnung der Anlage siehe Legende) weisen als Ordinate Eins und inaktive Anlagen Null über der Zeit aufgetragen auf. Des Weiteren wurde bereits erwähnt, dass aufgrund der Sicherheitsmechanismen stets Übergangssequenzen²⁸ zwischen Sicherheitsebene und tatsächlichem Eingriff des intelligenten LSA-Regelungsalgorithmus bestehen. Für die Gesamtauswertung können

²⁷ Zu jedem Zeitpunkt wird die Aktivität jeder Anlage geprüft. Falls auch nur eine Anlage inaktiv ist, so wird dieser als inaktiv für alle Anlagen definiert. Dementsprechend ist der Aktivitätskennwert für eine vollständig inaktive Anlage im System auch vollständig inaktiv.

²⁸ Diese wurden für die Aktivitätsklasse 1 derart gefiltert, dass die Daten der ersten zwei Minuten nach Wiederaufnahme des Regelungsbetriebs nicht für die Auswertung verwendet wurden.

aus SUMO viele verschiedene Vergleichskriterien herangezogen werden. Als Beispiele sind die verschiedenen Emissionen (PM_x, CO₂, etc.), Wartezeiten oder Haltevorgänge zu nennen. Dabei sind nicht alle Kriterien aufgrund der Klasseneinteilung direkt vergleichbar. Damit auch hier ein erster Blick auf die Daten geworfen werden kann, soll die folgende Abbildung 24 als Einführung dienen.

In der Grafik sind zunächst einerseits die „Simulationsdauern“ und andererseits das jeweilige Verkehrsaufkommen in den ersten beiden Untergrafiken aufgetragen. Dabei sind die einzelnen Punkte der Datenwolke die jeweiligen Durchschnitte einer einzelnen Sequenz²⁹, welche aus den individuellen Fahrzeug- bzw. Personendaten des SUMO-Modells des Verkehrsschätzers generiert wurden.

Zur besseren Einschätzung ist der nochmalige Durchschnitt des jeweiligen Verfahrens (MPC oder Bestand) mithilfe einer Linie bzgl. der Kriterien über den Testsequenzen aufgetragen. Die Reihenfolge der Testsequenzen auf der Abszisse ist unerheblich und kann als Nummerierung angesehen werden. Ein betrachteter Tagesausschnitt mehrerer Stunden wie in Abbildung 23 wird dabei in maximal sechzigminütige Sequenzen unterteilt, damit über das Verkehrsaufkommen bezogen auf die Dauer eine gewisse Vergleichbarkeit der Szenarien erreicht werden kann. Grundsätzlich ist der direkte Vergleich von Emissionen, Wartezeiten und anderen Vergleichsparametern schwierig, da keine genauen Informationen über die jeweiligen gefahrenen Routen der Einzelfahrzeuge vorliegen (nur die vom Verkehrsschätzer angenommenen). Durch das Clustern bzgl. der Verkehrsbelastung sollte dennoch ein aussagekräftiger Wert generiert werden. Demnach sind die durchschnittlichen Wartezeiten, Feinstaubemissionen, Zeitverluste, Haltevorgänge, Buswartezeiten sowie Fußgängerwartezeiten in dieser ersten Übersichtsgrafik der Klasse enthalten (Klasse: östlichen Teilgebiet, hohes Verkehrsaufkommen, störungsfrei). An den in Abbildung 24 gezeigten Simulationsdauern lässt sich beispielweise ableiten, dass sowohl im Regelungsbetrieb der MPC als auch für das Bestandsverfahren circa 80h Daten dieses Clusters aufgenommen bzw. in der Analyse verwendet wurden. Die Aussagen bezüglich einer hohen Verkehrsbelastung im östlichen Teilgebiet beziehen sich also nicht bloß auf wenige Einzelstunden, sondern sind auf eine breitere Datengrundlage gestützt, sodass der Einfluss von „Ausreißern“ auf das Gesamtergebnis geringer ausfällt. Für jede der Klassen können aus den Daten analoge Grafiken zu Abbildung 24 generiert werden. Um sich auf die wichtigsten Aspekte des Vergleichs beider LSA-Regelungsverfahren zu konzentrieren, werden in diesem Bericht einige ausgewählte Klassen in Übersichtsdiagrammen gegenübergestellt, verglichen und bewertet.

²⁹ Als (Test-)Sequenz wird ein aufgezeichneter Zeitabschnitt im Feldversuch bezeichnet.

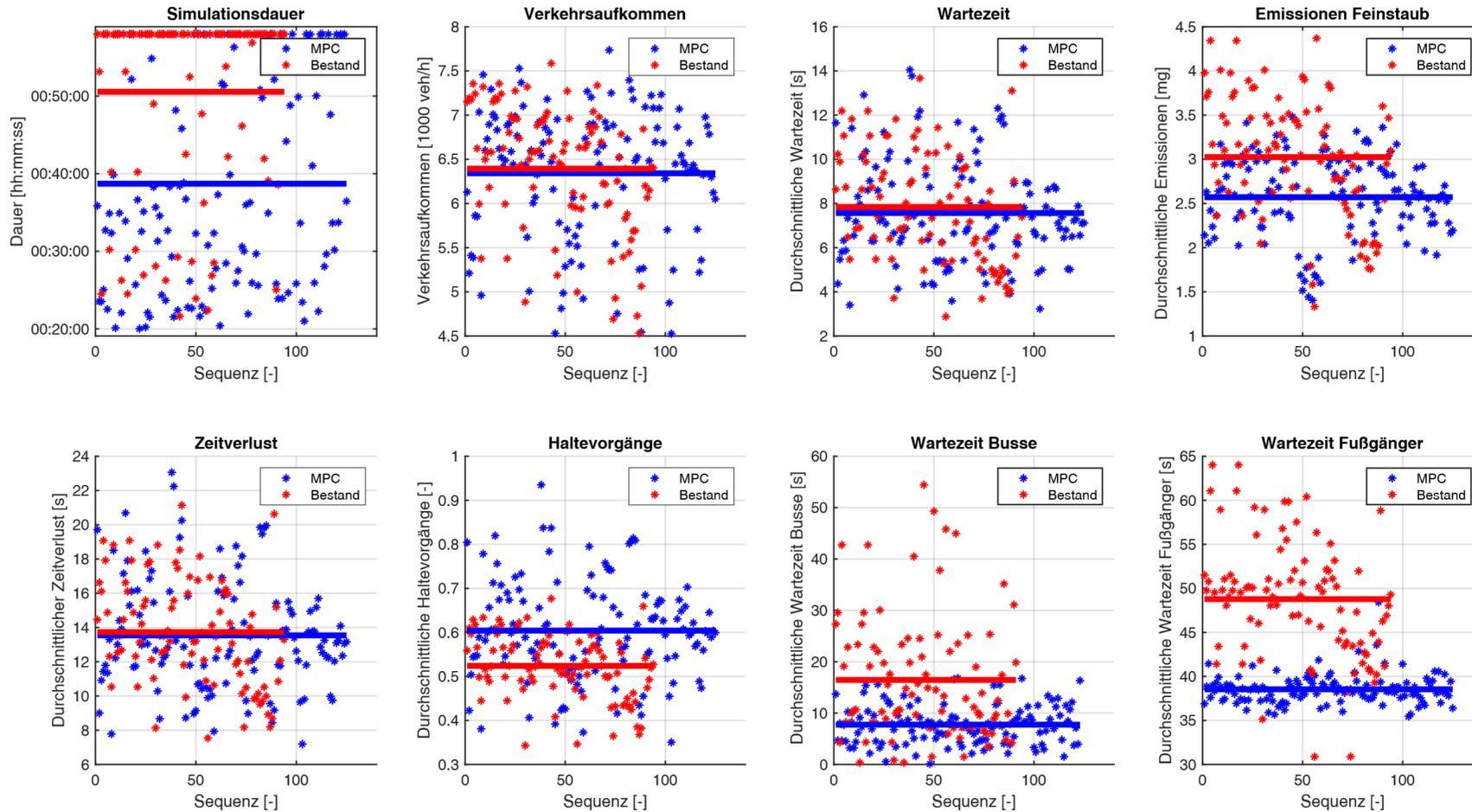


Abbildung 24: Gegenüberstellung von MPC- und Bestandsverfahren bzgl. relevanter Daten aller Aufzeichnungssequenzen mit dem Merkmal hoher Verkehrsaufkommen im östlichen Teilstestgebiet

Nachdem das Clustern und die generelle Vorgehensweise zur Datenauswertung vorgestellt wurde und bevor der eigentliche Validierungsvergleich durchgeführt wird, sollte nochmals auf das Grundprinzip des Verkehrszustandsschätzers mithilfe von SUMO eingegangen werden. Die in das Simulationsmodell eingespeisten Daten werden verwendet, um u. a. die Routen der entsprechenden Fahrzeuge zu prognostizieren. Da diese Schätzungen auf den Wahrscheinlichkeiten vergangener Routen beruhen und keine Car2X-Kommunikation o. Ä. die tatsächlich anvisierten Routen übermittelt, werden im Live-Betrieb (der reinen Beobachtung des Bestandsverfahrens und des Regelungsbetriebs des neuen MPC-Verfahrens) teilweise Fahrzeugrouten fehlprognostiziert, die jedoch über die stetige Einbringung neuer Informationen aktualisiert und korrigiert werden (siehe [1] für weitere Details). Da auf diese Weise von der jeweiligen Sensorik detektierte Fahrzeuge ggfs. nach kurzer Zeit aus dem System wieder entfernt werden müssen (da sie sich auf einer Route befanden, auf welcher keine passende Folgedetektion stattfand), können in der Datenauswertung zusätzliche Filter herangezogen werden, die dies berücksichtigen. Diese können beispielsweise kurze Systemaufenthaltsdauern der Individualfahrzeuge filtern. Auf diese Weise wird das Gesamtverkehrsaufkommen derselben Sequenz deutlich reduziert³⁰ und auch die restlichen Auswertungsparameter verändern sich, da die „Kurzzeitteilnehmer“ der Simulation beispielsweise kaum Wartezeit kumulieren können. Eine Folge dieser Filterung kann sein, dass (abhängig von der Schranke des Filters) nur noch wenige Sequenzen ein hohes Verkehrsaufkommen ($> 4500 \text{ veh/h}$) aufweisen, sodass eine aussagekräftige Analyse für diese Klasse nicht mehr zwingend sichergestellt ist. Dennoch sollen auch diese Ergebnisse beurteilt werden. In den folgenden Vergleichen wird mithilfe dieser Filterart eine weitere Auswertungsmöglichkeit herangezogen. Dabei ist die Schranke in dieser Analyse auf eine relativ hohe Mindestsystemaufenthaltszeit von 20s festgelegt und definiert worden.

Auswertung und Vergleich der beiden LSA-Regelungsverfahren

Der grundsätzliche Vergleich soll zunächst mit der Beurteilung des reinen MPC-Regelungsverfahrens der LSA gestartet werden. Das heißt, dass aus den aufgenommenen Daten die Sequenzen untersucht werden, in denen keine Störungen aufgetreten sind. Es folgen die Evaluierung anhand der bereits genannten zusätzlichen Filter und die Einflussanalyse der fortwährend auftretenden LSA-(Kommunikations-) Störungen.

³⁰ Wenn zuvor bspw. 5000 veh/h in dem Verkehrsgebiet gestartet sind, von denen 30% nur kurzzeitig im System waren, da falsche Routen geschätzt wurden, dann verschiebt sich diese Sequenz bzgl der Clusterkriterien von der hohen zur mittleren Stufe der Verkehrsbelastung. Alle weiteren Daten werden nur für Fahrzeuge ermittelt, die eine entsprechende Aufenthaltsdauer im System hatten.

In dem folgenden Spinnendiagramm in Abbildung 25 sind die wichtigsten Vergleichskennwerte mit den durchschnittlichen Feinstaubemissionen³¹ und spezifischen Wartezeiten skizziert. Außerdem werden nicht sämtliche Einzelsequenzdurchschnitte (wie in dem Beispiel von Abbildung 24) betrachtet, sondern die Durchschnittswerte des gesamten Clusters. Damit zusätzlich das Clusterkriterium des Verkehrsaufkommens sichtbar wird, ist es in der Grafik integriert.

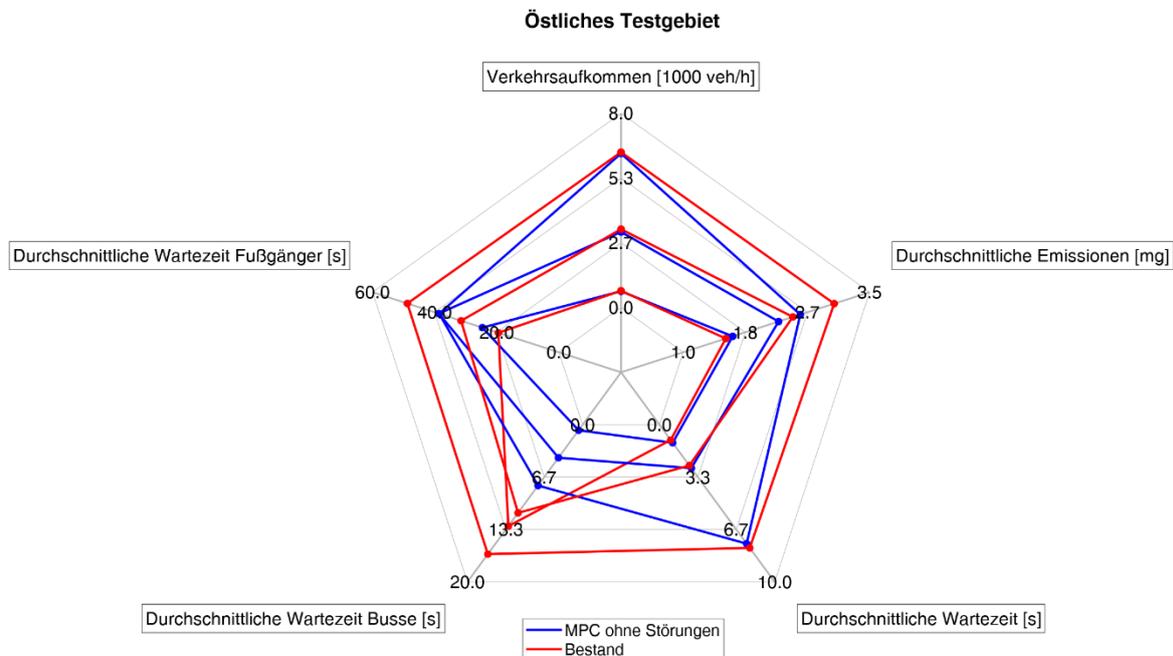


Abbildung 25: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der störungsfreien MPC-Regelung und des Bestandsverfahrens für das östliche Teiltestgebiet

Das Spinnendiagramm zeigt jeweils drei Ringe pro Regelungsverfahren. Wenn das Verkehrsaufkommen betrachtet wird, so ist ersichtlich, dass beide LSA-Regelungsansätze bezüglich der verschiedenen Verkehrsaufkommen in dieser Darstellung verglichen werden können. Die jeweils äußeren Ringe beider Verfahren zeigen die bereits in Abbildung 24 dargestellten Ergebnisse zusammengefasst. Für das östliche Teilgebiet kann demnach die Emissionsbelastung bei höheren und mittleren Aufkommen deutlich um 17,5% bzw. 8,5% verbessert werden, wobei sich die zugehörigen durchschnittlichen Wartezeiten gleichzeitig in einem vergleichbaren Bereich zum Bestandsverfahren bewegen. Um ein besseres Bild von der Feinstaubemissionsersparnis zu haben, kann diese bei dem hohen Verkehrsvolumen für das gesamte Teilgebiet mit etwa 2 g/h abgeschätzt werden. Wenn im gleichen Cluster die Buswartezeiten betrachtet werden, so ist ersichtlich, dass die Emissionseinsparungen vor allem aus der Priorisierung von stärker emittierenden Fahrzeugen resultiert (nicht auf Busse beschränkt). Bei geringer Verkehrsbelastung ($\leq 1500 \text{ veh/h}$) sind beide

³¹ Die restlichen Emissionen und auch der Kraftstoffverbrauch zeigen stets einen vergleichbaren Trend wie die Feinstoffemissionen, sodass nur diese aus Übersichtslichkeitsgründen dargestellt wird.

Verfahren in dieser Konfiguration als vergleichbar zu bewerten. Schon anhand der Simulationsergebnisse mit verschiedener Latenz konnte erwartet werden, dass der Vorteil der besseren Phasenauswahl durch den Nachteil der latenzbedingten Verzögerung aufgehoben werden kann. Ein weiterhin zu untersuchender Grund für das beobachtete Verhalten könnte auch die beschränkte Auswahlmöglichkeit der Phasen im östlichen Teilgebiet sein. Die Signalvariation innerhalb der ausgearbeiteten Phasen ist aufgrund der Kreuzungsgeometrie (jeweils dreiarstig) nicht so ausgeprägt wie bei Anlagen mit einem größeren Grundstock an Phasen (vgl. Anlagen K0583 oder K0581). Die Vorteile des Bestandsverfahrens bezüglich der besseren Reaktion auf Fußverkehre, die in der Unmittelbarkeit der Fußverkehrsanforderungen (Tastersignale der LSA) und der phasenorientierten Schaltweise der LSA begründet liegt, wird beispielsweise durch kürzere Wartezeiten der Busse kompensiert. Das derzeitige „Problem“ der entwickelten MPC-basierten Regelung ist, dass es, wenn ein Phasenwunsch ohne Fußverkehrsmitlauf der LSA bereits übermittelt wurde, ca. 3s dauert, bis dieser umgesetzt wird. Außerdem kann der Phasenwunsch mit dem derzeitigen Kommunikationssetup zwischen Regelungsalgorithmus und LSA nicht mehr ohne weiteres verändert werden, sodass bei einer zwischenzeitlichen Fußverkehrsanforderung kein Fußverkehr berücksichtigt werden kann. Je nach Priorität, welche durch die Optimierung innerhalb der MPC bestimmt wird, kann dann entweder die gleiche Phase mit Fußverkehr (mit „alles Rot“ als Übergang) oder zunächst eine andere Folgephase ausgewählt werden. Auf diese Weise entstehen zusätzliche Wartezeiten, die nicht auf die Funktionsweise des MPC-Ansatzes, sondern auf die Schnittstellenumsetzung im Pilotprojekt zurückzuführen sind. Um auch das westliche Teilgebiet einordnen zu können, ist das analoge Spinnendiagramm mit allen unterschiedenen Verkehrsstärkekassen und störungsfreier MPC-Regelung in Abbildung 26 dargestellt. Auf den ersten Blick sind beide Verfahren in diesem Teilgebiet als sehr vergleichbar zu bewerten. Die geringeren Fußverkehrswartezeiten des Bestandsverfahrens lassen sich im westlichen Teilgebiet auch anhand der im Testgebiet vorzufindenden LSA erklären. Zunächst ist die LSA K0582 (Münsterstraße / Kerssenbrockallee (Almering)) eine reine Fußverkehrsanlage und hat durch die auftretenden Latenz im MPC-Betrieb beim Bestandsverfahren den Vorteil schneller reagieren zu können. Außerdem enthält die größte Anlage des Pilotprojekts, die K0581 an der Münsterstraße, drei separate Fußverkehrsteilknoten bei denen die gleiche Erklärung für kurze Fußverkehrswartezeiten herangezogen werden kann. Ein Vorteil der MPC-Regelung bei Fußverkehrsanlagen ist, dass neben den Tastersignalen auch die aktuelle Gesamtverkehrssituation berücksichtigt wird und bei einer Vielzahl von sich nähernden Fahrzeugen die Fußverkehrsfreigabe verzögert werden kann. Dieser Vorteil macht sich derzeit noch nicht bemerkbar und müsste noch weiter bei Realbedingungen untersucht werden. In der Simulation konnte der einstellbare Kompromiss zwischen möglichst schneller Freigabe für Fußverkehre und bspw. geringe Wartezeit für Kfz bereits beobachtet werden.

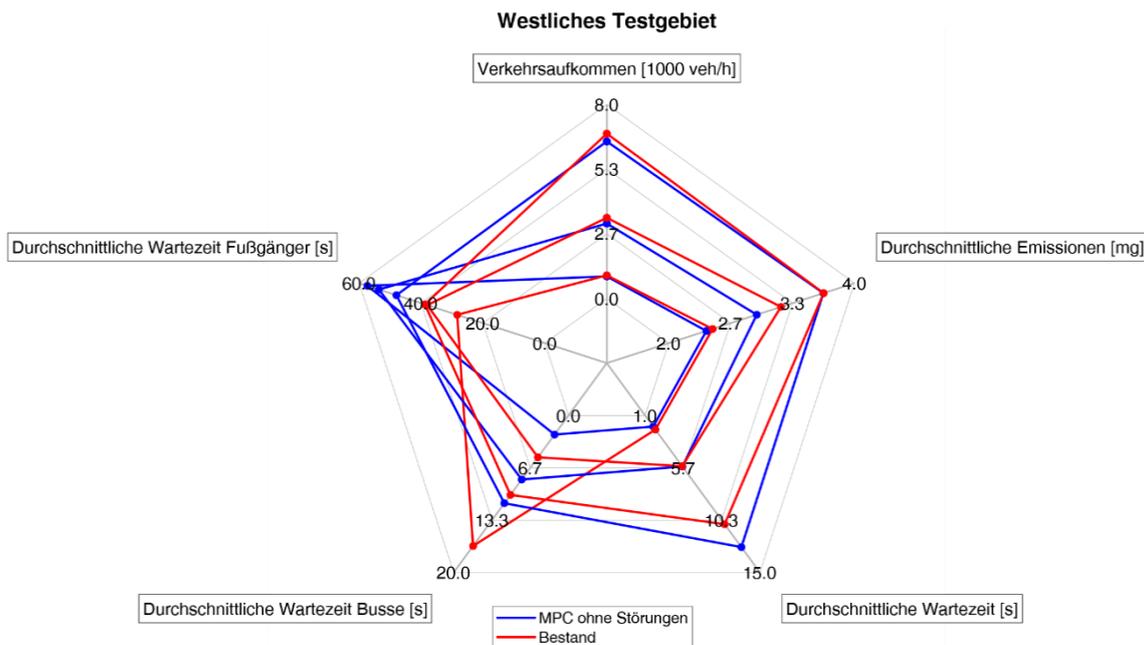


Abbildung 26: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der störungsfreien MPC-Regelung und des Bestandsverfahrens für das westliche Teilstestgebiet

Generell weist das MPC-Verfahren im westlichen Pilotprojekt-Teilgebiet bessere Emissionswerte auf, was wiederum nicht ausschließlich auf die Buswartezeiten zurückzuführen ist. Denn nicht nur die im System auftretenden Busse, sondern auch Lkw o. Ä. werden innerhalb der MPC anders als herkömmliche Pkw bewertet. Besonders im Fall einer hohen Verkehrsbelastung besteht in diesem Spezialfall allerdings noch erhebliches Potenzial beim MPC-Ansatz. Bei der LSA K0581 konnte festgestellt werden, dass einige Phasenübergänge nicht optimal abgestimmt sind. Das hängt mit der Rückkopplung der geschalteten LSA-Phasen zusammen, die nur bei denjenigen Anlagen als direkter Parameterwert existiert, welche nur einen Teilknoten aufweisen. Dementsprechend muss bei der Anlage K0581 anhand des derzeitigen Lichtbildes der Einzelsignale die laufende Phase bzw. der frühestmögliche Schaltzeitpunkt der Folgephase geschätzt werden. Hier besteht noch Optimierungspotential in der Abstimmung von LSA und MPC-Regelungsalgorithmus. In den bisherigen Darstellungen der Ergebnisse wurde kein Zusatzfilter für kurze Systemaufenthalte von Fahrzeugen verwendet. Um einen Eindruck über den Einfluss der Zustandsschätzung des Systems und des Zusatzfilters zu gewinnen, können die Ergebnisse mit und ohne Filter evaluiert werden. Da sich in der Validierung des Pilotprojekts auf die SUMO-Daten beschränkt werden musste, ist dies eine gute Möglichkeit die Validität der Ergebnisse nochmals zu prüfen und zu bestätigen. Daher sind dieselben Daten aus Abbildung 26 mithilfe einer Mindestsystemaufenthaltsdauer von 20s gefiltert in der folgenden Abbildung 27 zu sehen.

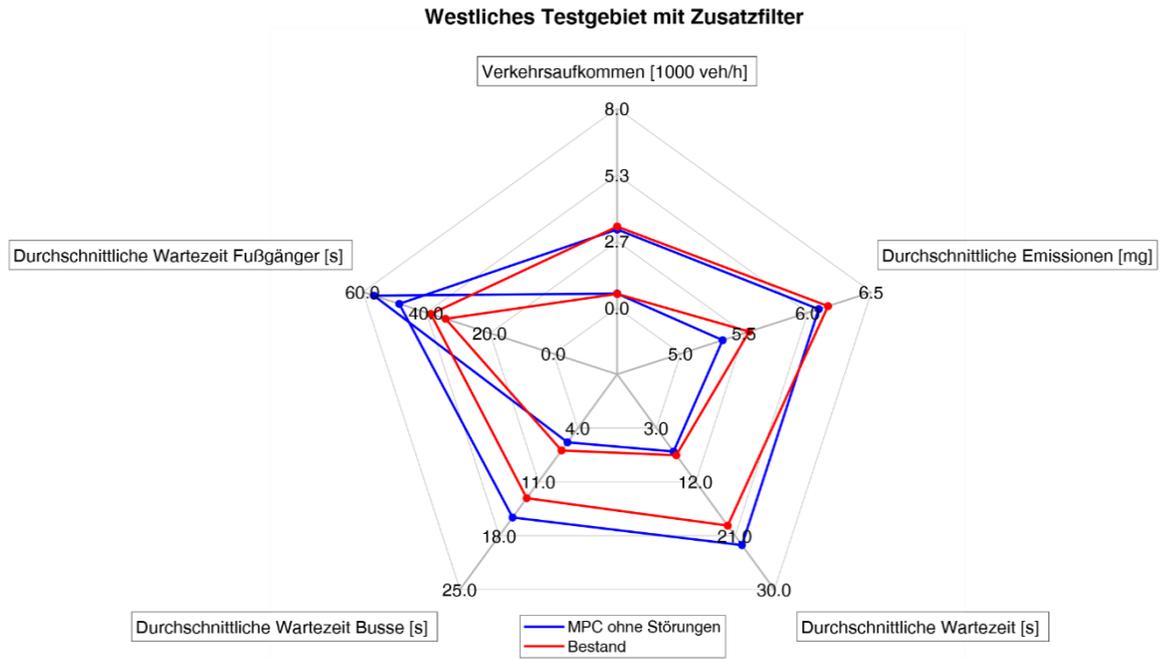


Abbildung 27: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der störungsfreien MPC-Regelung und des Bestandsverfahrens für das westliche Teilstestgebiet mit zusätzlicher Filterung bzgl. der Systemaufenthaltsdauer

Der offensichtlichste Unterschied zwischen beiden Spinnendiagrammen ist das Fehlen der äußeren beiden Ringe für die hohe Verkehrsbelastung. Die Begründung dafür wurde bereits in der Einführung des Filters gegeben (siehe Beispiel in Fußnote), da durch das Filtern schlichtweg weniger Fahrzeuge berücksichtigt werden. In der Tendenz stimmen beide Abbildungen ansonsten überein. Wie zuvor, wird das Fußverkehrsaufkommen vom Bestandsverfahren schneller bewältigt, sodass sich geringere Wartezeiten einstellen. Bezüglich des niedrigen Verkehrsaufkommens erbringt wiederum das MPC-Verfahren in den sonstigen Vergleichskriterien geringfügig bessere Leistung und bei höherer Last weisen beide Verfahren ähnliche Werte auf.

Sämtliche Vergleiche und Daten wurden bisher für den erzielten Optimalfall des Pilotprojekts³² ausgewertet, dass die MPC-Regelung ohne Störungen und ohne Unterbrechung die LSA für mindestens 20 min regeln konnte. Da dieses Szenario im Dauerbetrieb des Pilotprojekts bisher noch nicht den Regelfall dargestellt hat, sollen auch die mit Störungen aufgezeichneten Sequenzen betrachtet und deren Auswirkungen auf die Leistung der MPC-Regelung analysiert werden. Dazu sind in dem folgenden Diagramm der Abbildung 28 für das östliche Teilgebiet bei niedriger Verkehrsstärke die

³² Der Optimalfall des Pilotprojekt-Dauerbetriebs entspricht nicht dem generellen Optimalfall des Dauerbetriebs der MPC-Regelung. Hierfür ist eine Verbesserung der Rahmenbedingungen notwendig. Dazu gehören u.a. die Sicherstellung und Beschleunigung der Kommunikation zwischen Regelungsalgorithmus und LSA (bspw. über das ReTCon-Online-System) oder auch die Verbesserung der Verkehrszustandsschätzung über eine verbesserte Approximationsgüte.

Ergebnisse aller Aktivitätsraten der MPC-Regelung und des Bestandsverfahrens in einer gemeinsamen Übersicht dargestellt.

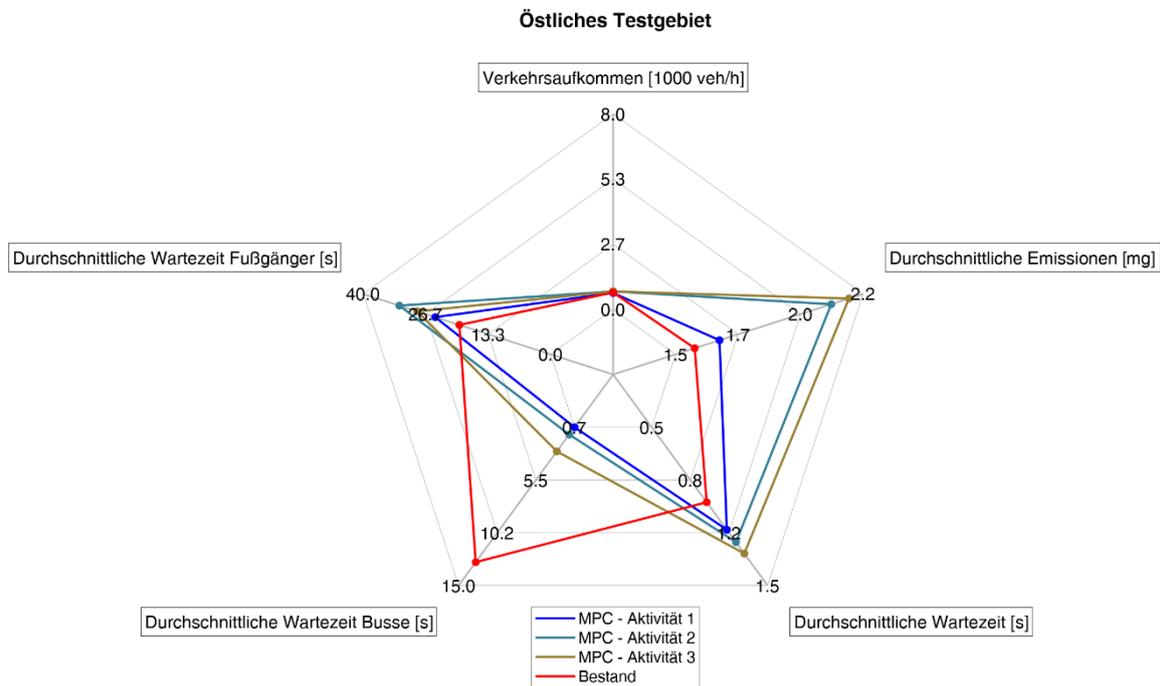


Abbildung 28: Übersicht der durchschnittlichen MPC-Regelung verschiedener Aktivitätsraten und des Bestandsverfahrens für das östliche Teilstestgebiet bei niedrigem Verkehrsaufkommen

In dem Diagramm ist in sämtlichen Kriterien die Verschlechterung der Ergebnisse aufgrund des vermehrten Störungsauftritts ersichtlich. Außerdem ist zu sehen, dass sich auch nicht dem Bestandsverfahren angenähert wird, was eine plausible Vermutung wäre, da in den Sicherheitsebenen bei Ausfällen das Bestandsverfahren aktiviert wird. Jedoch existieren Übergangsabläufe, die innerhalb des LSA-Steuergerätes implementiert sind, um in das jeweilige Signalprogramm des Bestandsverfahrens zu gelangen. An dieser Stelle können die Übergänge als Ursache für die negativen Auswirkungen bei Störungen herangezogen werden. Um die Auswirkungen von Störungen auf die Emissionsbelastung noch detaillierter zu analysieren, kann die folgende Abbildung 29 genutzt werden. Die dargestellten Boxplots der Emissionsverteilung (basierend auf den Durchschnittswerten der Testsequenzen) wurden durch den jeweiligen Gesamtdurchschnittswert des Kriteriums sowie einer Trendlinie erweitert. Zur besseren Einordnung ist das Bestandsverfahren zusätzlich aufgetragen sowie das analoge Diagramm mit Filterung der Systemaufenthaltsdauer angefügt. Über die Trendlinie sind sowohl mit als auch ohne Filter die Aussagen, die anhand der vorherigen Abbildung 28 getätigt wurden, nochmals sehr deutlich ersichtlich. Ohne Filter ist zudem auffällig, dass sich die Quartile samt Whisker wesentlich ausweiten, was einer größeren Streuung der Ergebnisse entspricht. Wünschenswert ist ein möglichst kompakter Boxplot, da auf diese Weise für ein breites Spektrum an Verkehrsszenarien die erreichte Qualität gewährleistet werden kann. Dementsprechend

ist es auch nicht ausreichend sich bei der Analyse rein auf die Durchschnittswerte zu beschränken. Unter diesem Gesichtspunkt könnte sogar die Emissionsbilanz der MPC-Regelung positiver als die des Bestandsverfahrens bewertet werden, obwohl der durchschnittliche Emissionswert geringfügig höher ist.

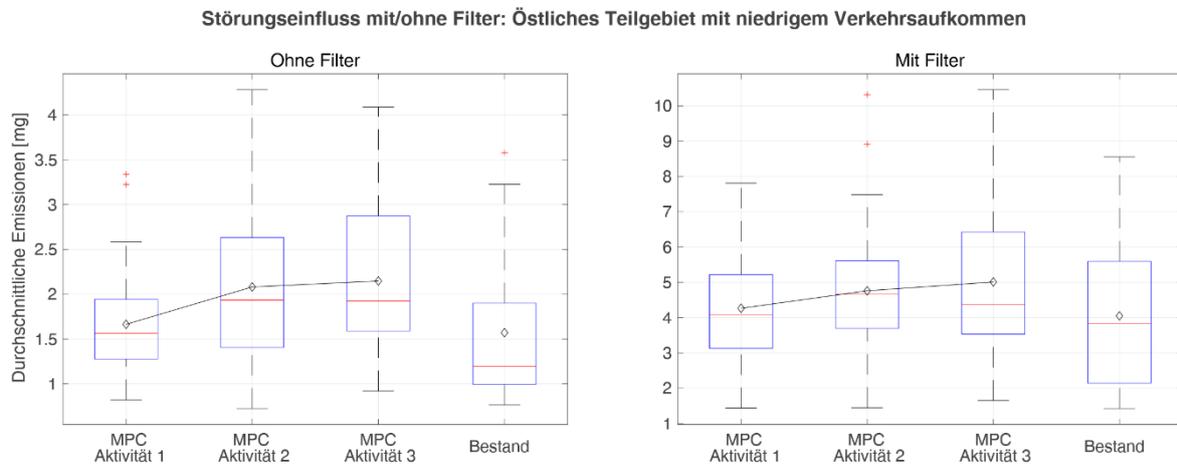


Abbildung 29: Übersicht der durchschnittlichen MPC-Regelung verschiedener Aktivitätsraten und des Bestandsverfahrens für das östliche Teilstgebiet bei niedrigem Verkehrsaufkommen

Allerdings bleibt auch festzuhalten, dass nicht bei allen Verkehrsaufkommen die Störungen diesen eindeutigen negativen Effekt haben, was sich beispielsweise im westlichen Teilgebiet bei niedriger Verkehrsstärke zeigt (siehe Abbildung 30). Diese Art der Ergebnisse zeigt klar auf, dass etwaige Probleme der Inbetriebnahme wie die Auswirkungen von Störungen als zusätzlicher Untersuchungsaspekt in vergleichbaren Projekten noch deutlicher (vor allem in der Projektplanung) Berücksichtigung finden müssen.

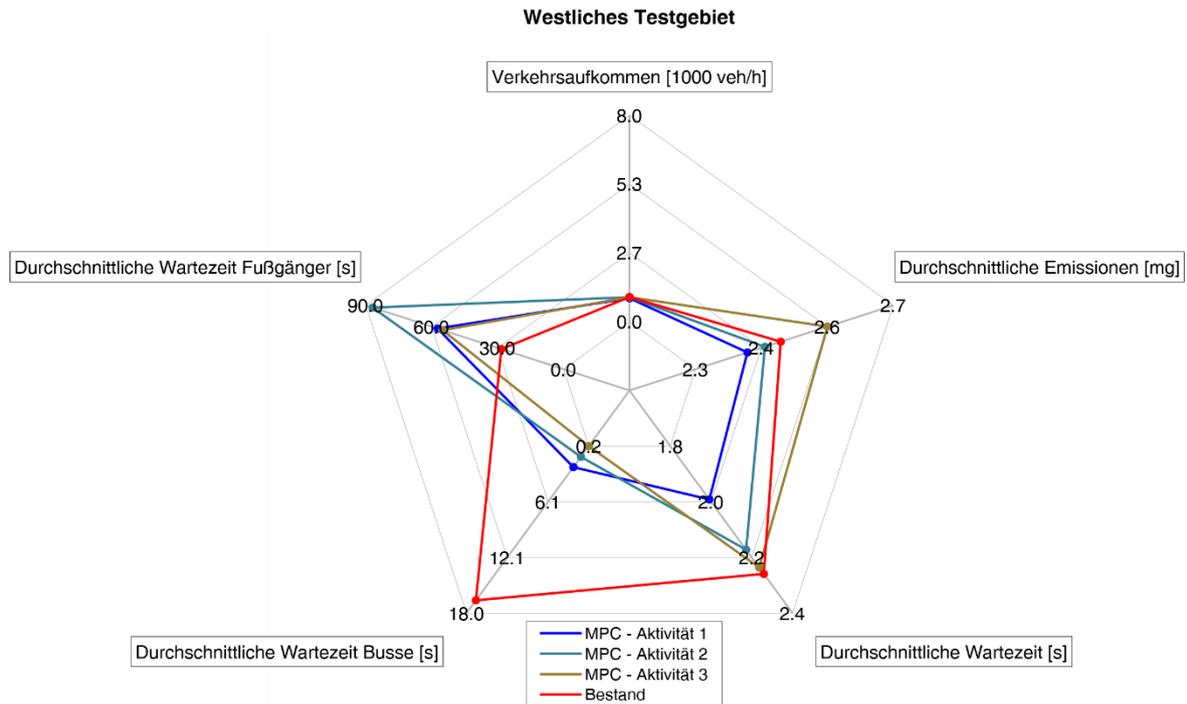


Abbildung 30: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der MPC-Regelung verschiedener Aktivitätsraten und des Bestandsverfahrens für das westliche Teilstgebiet bei niedrigem Verkehrsaufkommen

Zum Abschluss dieses Abschnitts sollen noch einmal die Ergebnisse der neu entwickelten Regelung im sog. Dauerbetrieb³³ der MPC betrachtet werden. Der Grund dieser Definition des Dauerbetriebs der MPC ist, dass bei weniger Aktivität der MPC die Bestandsschaltung einen zu großen Teil der Zeit aktiv ist und somit die Unterschiede in den Ergebnissen verwässert. Exemplarisch ergeben sich für die Feinstaubemissionen und Buswartezeiten für alle Verkehrsstärken die folgenden Abbildung 32 und Abbildung 33, in welchen zusätzlich das Potential der MPC über Simulationsergebnisse angedeutet wird. Diese Werte setzen sich an dieser Stelle ausschließlich aus den Verbesserungen der Latenz bei schnellerer Kommunikation (vgl. Abbildung 5) zusammen.

Bei den Feinstaubemission lässt sich bei niedriger Verkehrsbelastung (siehe Tabelle 7) keine Veränderung feststellen und bei mittlerer Last wurde sogar eine mit zusätzlichen 2 % geringfügig höhere Belastung ermittelt, was sich bei der höheren Verkehrsstärke wiederum ändert. Zur Einordnung kann festgehalten werden, dass in ca. 50 % der Betrachtungszeit eine hohe Verkehrsstärke³⁴ beobachtet wurde, in der die Emissionslast um gut 5 % reduziert werden konnte.

³³ Der Dauerbetrieb der MPC-Regelung ist der Betrieb mit mindestens 90 % der Sequenzdauer aktiver MPC-Regelung. Dies entspricht der Zusammenfassung der Aktivitätslevel 1 und 2.

³⁴ Die restlichen Verkehrsstärken (niedrig und mittel) wurden zu gleichen Teilen beobachtet.

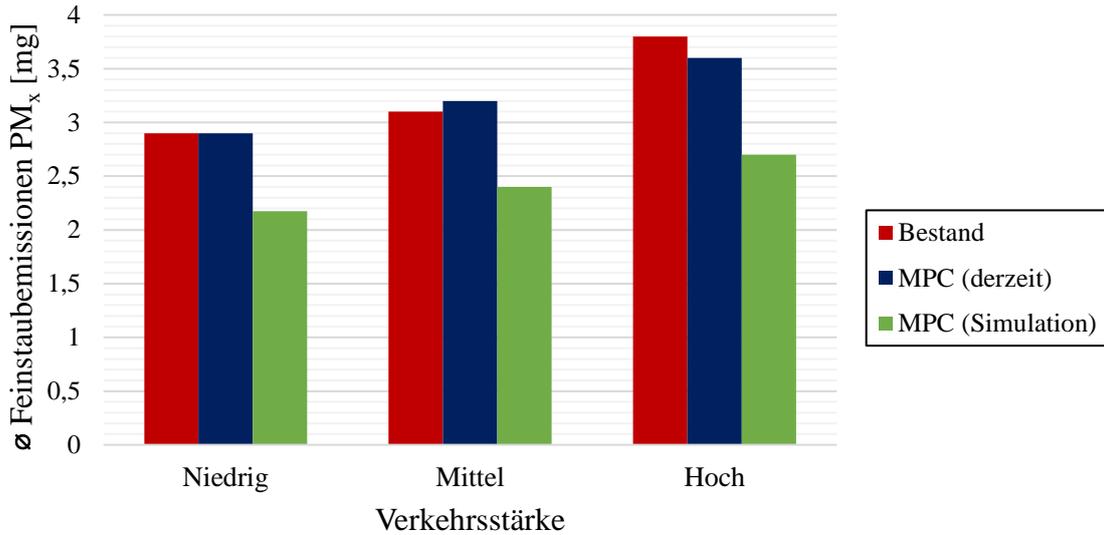


Abbildung 31: Vergleich der durchschnittlichen Feinstaubemissionen der verschiedenen Verfahren im Gesamtgebiet

Die zukünftig möglichen Werte der entwickelten Regelung durch Kommunikationsverbesserungen, hier bezeichnet mit MPC (Simulation), zeigen bei allen Verkehrsstärken ein überlegenes Bild der MPC. Diese Feststellung ist ebenso bei den allgemeinen Wartezeiten und speziell Buswartezeiten in den Abbildung 32 und Abbildung 33 zu erkennen.

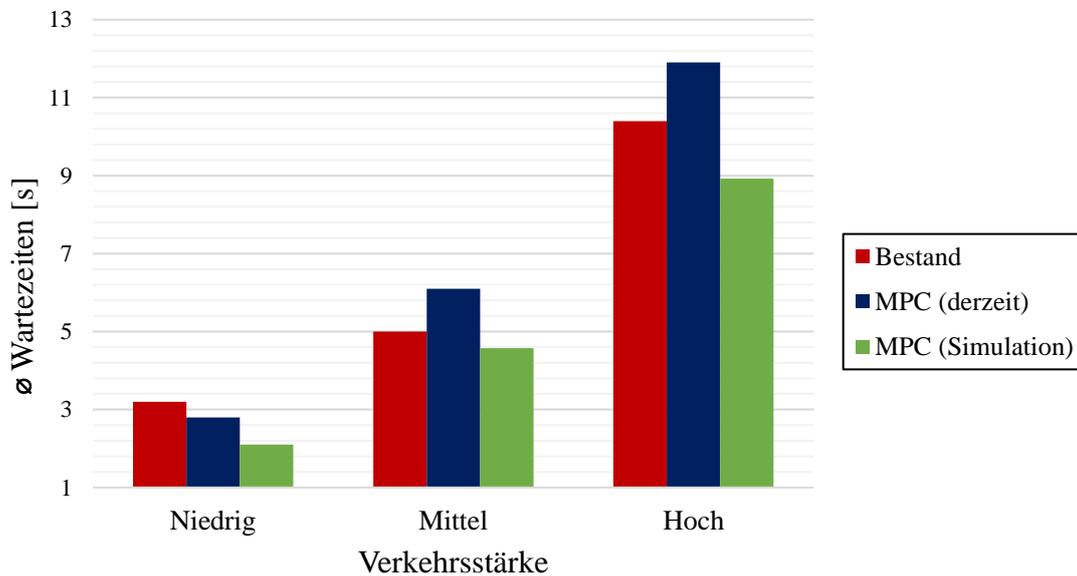


Abbildung 32: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten aller VTN der verschiedenen Verfahren im Gesamtgebiet

Im Gegensatz zu den Feinstaubemissionen und generellen Wartezeiten zeigt sich bei den Buswartezeiten auch in der derzeit umgesetzten MPC bereits in allen Belastungsfällen eine deutliche Verbesserung.

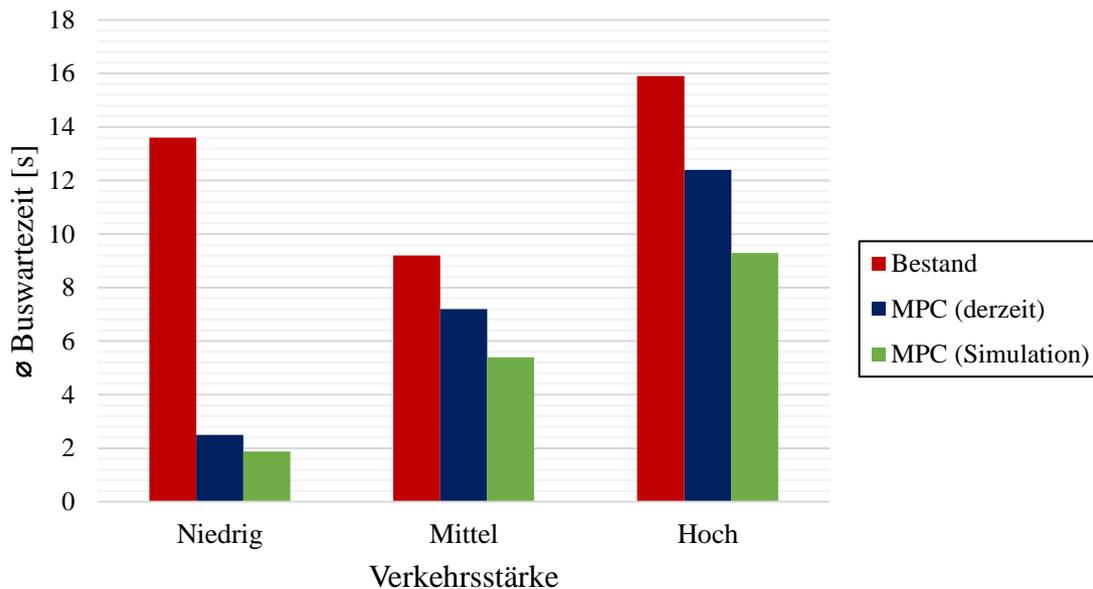


Abbildung 33: Vergleich der durchschnittlichen Buswartezeiten der verschiedenen Verfahren im Gesamtgebiet

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die MPC-Regelung bereits unter den im Pilotprojekt erreichten Rahmenbedingungen (Latenz, LSA-Abstimmung) in Bezug auf die Emissionsbelastung Vorteile gegenüber dem Bestandsverfahren hat. Im gesamten Testgebiet konnten bei störungsfreier Regelung die Emissionen um mehr als 5 % bzw. im Dauerbetrieb der MPC um ca. 3 % reduziert werden. Andere Emissionen wie NO_x oder CO_2 können in einem proportionalen Verhältnis ebenso berücksichtigt werden. Doch es gibt auch Aspekte, in denen das Bestandsverfahren noch Vorteile hat. Diese sind jedoch auf die derzeitige Schnittstellenimplementierung und Kommunikation (u.a. die hohe Latenz) zwischen LSA und Regelungsalgorithmus in Verbindung mit Feinjustierung des MPC-Verfahrens zurückzuführen.

Mögliche weiterführende Maßnahmen, Verbesserungspotenziale und Forschungsarbeiten

In dem Pilotprojekt konnte mehr als nur angedeutet werden, dass großes Potenzial in der Entwicklung von neuartigen Regelungskonzepten steckt. Über die Anpassung der Infrastruktur bzgl. der LSA selbst und der zusätzlichen Sensorik konnte mit der Verwendung einer Echtzeit-Verkehrszustandsschätzung ein prädiktiver Regelungsalgorithmus entwickelt werden, der bereits unter den derzeit gegebenen Bedingungen die Emissionsbelastung des Verkehrs in Schloß Neuhaus verringern konnte.

Um die bisher erzielten Ergebnisse noch weiter zu bestätigen bzw. zu verbessern, sind vor allem zusätzliche Zeitabschnitte der Feldumsetzung und dementsprechend verbundene Weiterentwicklungen notwendig. Besonders die Qualität der Kommunikation mit den LSA kann noch verbessert werden, damit die Anlagen kontinuierlicher mit der entwickelten Regelung betrieben werden können. Gründe für

die schlechte Qualität der Kommunikation lagen unter anderem in den verwendeten Mobilfunk- und Internetverbindungen. Eine verbesserte Qualität ist zum Beispiel durch die Verwendung von Standleitungen zu erwarten. Außerdem sollten weitere Möglichkeiten zur Reduzierung der Latenz untersucht werden und ein noch gezielterer Umgang z. B. bei starker Variation entwickelt werden. Gründe für die Latenz liegen zum Beispiel auch in dem typischen Schaltzyklus von einer Sekunde. Durch die Reduzierung des Schaltzyklus auf 100 ms könnte die Latenz deutlich reduziert werden. Allerdings hat dies auch Auswirkungen auf Bestandssteuerung und konnte in der Kürze der Zeit nicht mehr untersucht werden. Andererseits kann auch das umgesetzte Regelungskonzept der MPC weiterhin angepasst und verbessert werden. Die vollständige Direktintegration der LSA-Steuergerätlogik oder die bisherige Felderprobung lediglich eines Gewichtungssparametersatzes der Optimierung, sind dabei nur einige der vielen Möglichkeiten zur Weiterentwicklung. Der eingesetzte Parametersatz hat unterdessen im Feld einen ausgeglichenen und guten Eindruck gemacht, kann aber noch besser an die jeweiligen Voraussetzungen des Verkehrsgebiets angepasst werden. Dementsprechend werden derzeit auch nach Projektende, u. a. in studentischen Arbeiten, weitere Konfigurationen der MPC-Regelung ausgearbeitet, getestet und ausgewertet. Ein weiterer Punkt ist, dass bislang nicht alle im Projekt entwickelten Sensoren in Gänze in das Regelungsverfahren integriert werden konnten. Die von RTB entwickelte Rückstauerkennung musste aufgrund des Zeitdrucks der Inbetriebnahme bisher vollständig vernachlässigt werden und die Hybridkameras wurden bislang lediglich zur Plausibilitätsprüfung³⁵ der Fußverkehrstaster verwendet.

³⁵ Die derzeit erreichte Sicherheit bzw. Wahrscheinlichkeit der korrekten Erkennung des Fußverkehrs ist noch nicht ausreichend, um die Regelung auf diese Messungen zu stützen (siehe AP 5).

VII. Projektergebnisse

Neben den Ergebnissen des Feldversuchs (siehe AP 8) konnten eine Reihe von weiteren Erkenntnissen innerhalb des Pilotprojekts gewonnen werden die an dieser Stelle noch einmal zusammengefasst werden sollen.

Kooperation der Projektpartner

Während der Projektzeit konnten aufgrund einer engen Zusammenarbeit zwischen Industrie, Wissenschaft und Stadt alle Akteure profitieren. Im Besonderen zeichnete sich bei der technischen Umsetzung die lösungsorientierte Arbeitsweise der Projektpartner aus. Dabei war der Zusammenschluss von verschiedensten Expertisen ein ausschlaggebender Grund.

In einer regelmäßigen Austauschrunde eines Kernteams aus allen Projektpartnern auf Arbeitsebene konnten alle kurzfristigen Maßnahmen koordiniert werden. Zudem konnte ein kontinuierlicher Informationsfluss aufgebaut werden.

Es waren alle notwendigen Akteure für die Umsetzung des Pilotprojekts auch Projektpartner. Damit konnte sichergestellt werden, dass alle Ziele gemeinschaftlich erreicht werden können.

Während der Projektdurchführung sind auch Hürden aufgetreten, die im Vorfeld nicht als solche identifiziert wurden. Der Zustand und die Verfügbarkeit der verkehrstechnischen Infrastruktur für Anpassungen und Erweiterungen sollten im Voraus mitbedacht werden. Dabei sind sowohl Kosten als auch organisatorischer Aufwand gemeint. Es müssen Möglichkeiten zum Anschluss neuer Sensorik vorhanden sein. Ebenso muss das Einrichten der nötigen Kommunikationsschnittstellen möglich sein.

Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit der Lösung auf Verkehrssituationen vergleichbarer Komplexität in anderen Kommunen ist gegeben, da standardisierte Schnittstellen verwendet werden. In der Simulation hat sich gezeigt, dass das entwickelte Regelungssystem skalierbar ist, d.h. sich wirksam auch auf deutlich komplexer (oder einfacher) strukturierte Verkehrssituationen übertragen lässt. U. a. können einzelne Knotenpunkte mit der entwickelten Lösung geregelt werden, so dass auch ein schrittweiser Übergang zu der Regelungsstrategie von bisher umgesetzten Varianten möglich und denkbar ist. Vor allem vor dem Hintergrund des Aufwands der Umrüstungen ist dies eine sehr wichtige Erkenntnis.

Ein weiterer wesentlicher Baustein zur Sicherstellung der Übertragbarkeit ist der Austausch mit den weiteren Modellregionen, um die Projektergebnisse zur Verbesserung der dortigen Verkehrssituationen zur Verfügung zu stellen. Bspw. hat die Stadt Aachen bereits Interesse an einem Erfahrungsaustausch signalisiert.

Konzepte

Im Rahmen des Pilotprojekts sind konkret die nachfolgenden Konzepte/Leistungen entstanden (als Bestandteil des vorliegenden Berichts), die für Kommunen zur Nachnutzung interessant sein können:

- Aufbau der Kommunikationsarchitektur zwischen Lichtsignalanlagen, Echtzeitdatenerfassung, Steuerungsalgorithmus und Verkehrssystemrechner (siehe AP 2, 3, 4 und 6),
- Aufbau eines Verkehrssimulationsmodells zusammen mit der Einbindung, Auswertung und Aufbereitung von Echtzeitverkehrsdaten (siehe AP 2),
- Aufbau der Sensoren zur Echtzeitdatenerfassung von verschiedenen Verkehrsarten (siehe AP 5),
- Steuerungsalgorithmus zur optimierten Verkehrssteuerung auf Basis der Echtzeitverkehrsdaten (Siehe AP 3 und 8).

Lösungen

Durch die Nutzung standardisierter Schnittstellen ist es möglich, die Lösungsansätze auch auf Verkehrsräume anderer Komplexität zu übertragen. Dazu werden die Erfahrungen und Spezifikationen zur Implementierung der Schnittstelle zwischen den Lichtsignalanlagen und dem Verkehrssystemrechner mittels des offenen Kommunikationsstandards OCIT zur Verfügung gestellt. Erfahrungen und Ergebnisse der Gesamtarchitektur zur Kommunikation werden ebenso zur Verfügung gestellt.

Zudem sind in den jeweiligen Arbeitspaketen Hinweise zum Umgang mit folgenden Themen gegeben:

- Aufbau der Gesamtarchitektur:
 - Sicherstellung von niedriger Latenz bei der Übermittlung von Daten,
 - Bereitstellung der Daten.
- Ausstattung der Infrastruktur mit Sensoren zur Echtzeitdatenerfassung:
 - Festlegung von Standorten,
 - Aufbau der Infrastruktur für die Sensortechnik,
 - Stärken und Schwächen der eingesetzten Systeme.
- Implementierung der OCIT-Kommunikationsschnittstelle:
 - Für die zentralseitige Kommunikation und für die Kommunikation mit den Lichtsignalanlagen (OCIT-C und OCIT-O).

- Aufbau des Steuerungsalgorithmus:
 - Anbindung an den VSR,
 - Integration und Verarbeitung verschiedenartiger Sensordaten,
 - Auswertung der Verkehrsdaten,
 - Sicherstellung der Rechenzeiten des Steuerungsalgorithmus für die Anzahl an angeschlossenen LSA,
 - Konzept zum Umgang mit Latenz.

Voraussetzungen zur Umsetzbarkeit des Projekts

Die Voraussetzung, die innerhalb einer Stadt / Kommune für die Umsetzung / Übertragbarkeit des Projekts vorliegen muss, ist eine entsprechende Verkehrsinfrastruktur der Lichtsignalanlagen an den anzupassenden Knotenpunkten. Es ist eine digitale Infrastruktur zur Echtzeit-Datenerhebung aller VTN notwendig, damit eine hochgradig flexible LSA-Steuerung auf Basis innovativer Sensorik stets dem aktuellen Verkehrsgeschehen angepasst wird.

Innerhalb des Projekts wurde die Kommunikation über eine zentrale Steuerung abgebildet, d. h. es werden die Verkehrsdaten der Lichtsignalanlagen über einen zentralen Verkehrssystemrechner abgerufen und mittels einer zentralen Recheneinheit verarbeitet. Von dort werden die Schaltbefehle separat an die Lichtsignalanlagen verteilt. Damit der Verkehr flexibel, dynamisch und bedarfsgerecht gesteuert werden kann, muss die Kommunikationsinfrastruktur so ausgelegt sein, dass sämtliche Datenströme mit einer geringen Latenz bereitgestellt werden. Zudem sind analoge Anforderungen bei der Datenverarbeitung zu berücksichtigen. Eine dezentrale Lösung ohne zentrale Recheneinheit, sondern bspw. direkt in die LSA-Steuergeräte integriert, ist ebenfalls denkbar und skaliert aufgrund der einfacheren Kommunikationssystematik vermutlich noch deutlich besser.

Zudem sollten alle eingesetzten Detektoren keine personenbezogenen Daten erfassen, so dass die DSGVO³⁶ eingehalten wird. Die Steuerungen der LSA sollten folgende Ausstattungsmerkmale aufweisen:

- Offene Kommunikationsschnittstelle (OCIT) zu einem Verkehrssystemrechner,
- Unterstützung von AP-Werten zur Phasensteuerung der Lichtsignalanlage,
- Techniken zur Protokollierung und Überwachung des Verkehrsablaufs und der Sensordaten.

³⁶ DSGVO = Datenschutz-Grundverordnung

Zudem sollten analoge Voraussetzungen für den Verkehrssystemrechner gegeben sein:

- Offene Kommunikationsschnittstellen (OCIT),
- Möglichkeiten zur Anbindung des Steuerungsalgorithmus,
- Standortunabhängiger Zugriff.

Kosten der Einführung

Bei den nachfolgend dargelegten Kosten handelt es sich um Schätzungen, die sich direkt aus dem Pilotprojekt ableiten. Da innerhalb dieses Forschungsprojektes beispielsweise neue Techniken untersucht und entwickelt wurden, können einzelne Positionen noch abweichen. Dementsprechend kann diese Liste auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Rahmenbedingungen:

- Infrastrukturelle Anpassungen an den Lichtsignalanlagen (5 Kreuzungsanlagen und 1 Fußverkehrsanlage):
 - Ca. 300.000 €
- Aufbau der Echtzeitdatenerfassung (ca. 31 Sensoren)
 - Ca. 140.000 €
- Anpassungen und Ergänzungen am Verkehrssystemrechner (OCIT-Server)
 - Ca. 140.000 €
- Sonstige Kosten IT-Infrastruktur (Server, Kommunikation)
 - Ca. 30.000 €
- Anpassungen des Regelungsalgorithmus auf das gegebene Verkehrssystem (abhängig von der Anzahl zu regelnder LSA)
 - Ca. 10.000 - 30.000 €

Betrieb:

- Infrastruktur Lichtsignalanlagen: keine Extrakosten durch den alleinigen Betrieb des Optimierungsalgorithmus (laufende Kosten, Wartungsvertrag, etc.)
 - Abhängig von etwaigen Schulungen eigener Mitarbeiter
- Echtzeitdatenerfassung: Datenbereitstellung, Kosten für SIM-Karten, Wartung (Austausch Akkumulatoren)
 - Ca. 500 € (etwa alle 5 Jahre)
- Virtueller Verkehrssystemrechner (ReTCon-Online):
 - Ca. 1.000 – 4.000 € im Jahr
- Sonstige Kosten IT-Infrastruktur:
 - < 1.000 €

Die Kosten zur Pflege des Optimierungsalgorithmus können derzeit noch nicht final bewertet werden³⁷.

Generell können die hier angegebenen Werte auch je nach bereits vorhandener Infrastruktur abweichen, wenn bspw. keine vollständige Hardwareumrüstung einer LSA notwendig ist, sondern nur ein spezielles Update oder Upgrade bestimmter Komponenten.

Herausforderungen einer Umsetzung vergleichbarer Vorhaben

Im Vorfeld einer derartigen Umstrukturierung eines Verkehrsbereichs muss geprüft werden, ob offene Kommunikationsschnittstellen zwischen der Steuerung der inkludierten Lichtsignalanlagen und dem Verkehrssystemrechner vorhanden sind, bzw. eingeführt werden können. Zudem muss sichergestellt sein, dass diese Schnittstellen den Vorhaben im Projekt entsprechen, z.B. hinsichtlich Latenz und Dateninhalte. Innerhalb dieses Projekts war das nicht der Fall, sodass als alternativer Lösungsansatz ein separater (virtueller) Verkehrsrechner für das Projekt genutzt wurde.

Die Projektplanung ist generell ein sehr wichtiger Punkt einer derartigen Umsetzung. Bei Projektverzögerungen bestehen nur begrenzte Möglichkeiten zur Umwidmung von Fördermitteln bzw. zur Übertragung in das folgende Kalenderjahr was immer berücksichtigt werden sollte. Ebenso kann es bei realen Inbetriebnahmen stets zu unerwarteten Hindernissen kommen, sodass (am besten nicht ausschließlich, aber vor allem) an dieser Stelle ein gewisser Puffer vorgesehen werden sollte.

Innerhalb des Pilotprojekts sah die ursprüngliche Projektplanung bspw. eine Beteiligung der Öffentlichkeit zur Ermittlung von Immissionswerten vor. Aufgrund der Komplexität zur Ermittlung der Kennwerte nach der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes, musste wiederum ein anderer Lösungsansatz verfolgt werden (siehe AS 2.3). In dem Simulationsprogramm SUMO sind die Daten und Informationen des HBEFA hinterlegt worden. Somit ist eine Auswertung der Umweltdaten über das Simulationsmodell möglich. Vorteil dieser Variante ist, dass die Rahmenbedingungen zwischen dem Ausgangszustand und dem Endzustand identisch gewählt werden und somit die Daten vollständig gegenübergestellt werden können. Eine zusätzliche Kreuzvalidierung mit entsprechender Sensorik ist natürlich ebenfalls denkbar und sinnvoll, jedoch sollten entsprechende Mittel und Zeiträume zur Umsetzung eingeplant werden.

Beim Vorgehen der Standortwahl der Verkehrserfassungsgeräte hat sich das umgesetzte Vorgehen bewährt. Zunächst wurden erste Standorte zur grundlegenden Abdeckung des Bilanzraums gewählt und in Betrieb genommen. Im Zuge der Kalibrierung des Verkehrssimulationsmodells wurden die Standorte angepasst. Neben dem

³⁷ Stand 08/2022

Gesichtspunkt der besten Verkehrserfassung stellen Aspekte wie eine entsprechende Stromversorgung oder auch der generelle Platz zur Hardware-Unterbringung Herausforderungen dar. Die Stromversorgung kann bspw. über Nachtladungen von Beleuchtungsmasten oder Photovoltaik-Module realisiert werden. Bei Montage der Erfassungssensoren an Beleuchtungsmasten muss der Zugang zum Mastverteiler für Wartungen gegeben sein. Hierfür wurden im Projekt zusätzliche Bügel entwickelt und eingesetzt. Gleiches gilt auch für die Schaltschränke zur Unterbringung der Sensorkomponenten (Industrie-PC, Netzwerkkomponenten).

Da bislang kein dauerhafter Betrieb von mehreren Monaten umgesetzt wurde³⁸, muss davon ausgegangen werden, dass ähnlich wie bei der bisherigen Testphase weitere Unwägbarkeiten auftreten. Diese können z. B. in den Bereichen der Akzeptanz der Lösung, der Betriebsverantwortlichkeit oder auch in der Finanzierung des Betriebs liegen.

Fazit und Projektzielübersicht

Angesichts der Vielzahl an Zielen, die innerhalb des Pilotprojekts formuliert wurden, soll dieser Gesamtüberblick der Nachvollziehbarkeit dienen.

Tabelle 9: Tabellarische Übersicht der Projektziele

Projektziel	Status	Anmerkung
Senkung der Emissionen	Erreicht	Im Testbetrieb wurden die Emissionen um 5 % im Optimalfall und um 3 % im Dauerbetrieb der MPC gesenkt. In der Simulation mit verbesserter Kommunikation ist die Verbesserung mit situationsabhängig bis zu 30% noch signifikanter (siehe AP 8).
Wartezeiten stabil oder verbessert (als Indikator Verflüssigung des Verkehrs)	Erreicht	Im durchgeführten Testbetrieb sind die Wartezeiten vergleichbar, aber wiederum im verbesserten Simulationsfall signifikant reduziert (siehe AP 8).
Echtzeitdatenerfassung und -verarbeitung	Erreicht	Latenz unter 1 Sekunde und vollständige Integration in das Regelungskonzept (siehe AP 3 & 5).
Weiterentwicklung von Sensorik zur besseren Klassifizierung der VTN	Erreicht	Sowohl die eingesetzte Produktpalette als auch deren Soft- und Hardware hat sich im PILOTPROJEKT deutlich weiterentwickelt (siehe AP 5).

³⁸ Stand 08/2022

Öffnung des städtischen Verkehrsrechners (Implementierung von OCIT)	Teilweise erreicht	VSR ist geöffnet, allerdings konnten für die Projektkriterien keine ausreichende Datenqualität (Latenz und Datenaustausch) hergestellt werden (siehe AP 4).
Entwicklung von Sensorik zur Rückstauerfassung	Teilweise erreicht	Ein entsprechender Sensor wurde entwickelt und getestet, aus Zeitmangel jedoch noch nicht im Algorithmus berücksichtigt (siehe AP 3 & 5)
Entwicklung von Sensorik zur Umweltdatenerfassung	Erreicht	Die Umweltsensoren sind entwickelt (siehe AP 5). Die erhobenen Daten konnten für die Validierung jedoch nicht verwendet werden (siehe AP 2)
Ertüchtigung der Lichtsignalanlagentechnik zur Echtzeitschaltung über einen zentralen Steuerungsalgorithmus	Erreicht	Die Echtzeitsteuerung ist funktionstüchtig und getestet (siehe AP 6 & 8).
Aufbau der Gesamtarchitektur zur Kommunikation zwischen datenerfassenden und datenverarbeitenden Systemen	Teilweise erreicht	Die Kommunikation wurde eingerichtet. Da die Verbindung über Standleitungen zum städtischen Verkehrsrechner nicht mit ausreichender Qualität hergestellt werden konnte, mussten Mobilfunk-/Internet-Verbindungen genutzt werden. Diese Verbindungen weisen gewöhnlich Schwächen im Bereich der Latenz und Stabilität auf. (siehe AP 4, 6 & 8).
Bereitstellung der erfassten Daten auf der „Local Open Data Platform“	Erreicht	Die Daten der TOPO.Boxen gehen auf die Plattform automatisiert ein (in Echtzeit). Beispielhaft können Daten heruntergeladen werden (siehe AP 7).
Übertragbarkeit und Skalierbarkeit des Gesamtvorgehens bzw. Systems	Erreicht	Die Übertragbarkeit und Skalierbarkeit des Systems sind nachgewiesen. Von zunächst einer LSA wurde der Ansatz auf alle sechs LSA ausgerollt. Zudem ist über einen dezentralen Ansatz auch die weitere Skalierbarkeit gegeben (siehe AP 2, 3 & 8).

Ausblick

Bei den möglichen (Folge-)Maßnahmen, ausgemachten Problemen der derzeitigen Umsetzung und Verbesserungspotenzialen dieses Pilotprojekts setzen auch einige der möglichen Folgeprojekte und Forschungsarbeiten an. Der Feldtest ist vom Umfang her wesentlich kürzer ausgefallen als geplant und mit der Weiterentwicklung der LSA-Kommunikation, der Integration und Weiterentwicklung der neuesten Sensorik und der Erprobung von weiteren Parametersätzen der MPC-Regelung bieten sich mehrere spannende Themen an, die sogar gebündelt weitererforscht werden können. Die vollständige und umfangreiche Analyse des im Pilotprojekt begonnenen Vergleichs von LSA-Regelungsverfahren ist allein aufgrund der theoretischen Verbesserungen (z. B. Emissionseinsparungspotenzial) lohnend. Zudem sind im Bereich der zuverlässigen LSA-Kommunikation noch neue Herausforderungen entstanden. Grundsätzlich ist der offene Kommunikationsstandard OCIT vorhanden und bietet diverse Möglichkeiten der zukünftigen Nutzung. Eine Umsetzung und Integration von bspw. Regelungskonzepten in bestehende Infrastrukturen zeigt noch deutliches Handlungspotential. Auch der Gedanke der Übertragbarkeit auf andere Verkehrsgebiete bietet weitere Forschungsmöglichkeiten.

Die im Pilotprojekt entstandenen Partnerschaften werden bereits in weiteren gestarteten Projekten anderer Bereiche (robuste Sensorik; RoSSHAF) genutzt, da sich die gemeinsame Projektarbeit durch die hervorragende gegenseitige Ergänzung der verschiedenen Kompetenzen als sehr positiv und zielführend herausgestellt hat.

Zusätzlich hat das PPS aber auch neue Projektideen in dem Bereich der Verkehrstechnik, wie ein „Prognosetool zur Vorhersage von LSA-Phasen“, hervorgebracht, in denen Projektpartner Vorarbeiten des Pilotprojekts in Zukunft weiterentwickeln und nutzen wollen.

VIII. Literaturverzeichnis der im Projekt entstandenen Veröffentlichungen

- [1] K. Malena, C. Link, S. Mertin, S. Gausemeier, and A. Trächtler, “Online State Estimation for Microscopic Traffic Simulations using Multiple Data Sources,” in *7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS) 2021*, pp. 386–395.
- [2] K. Malena, C. Link, S. Mertin, S. Gausemeier, and A. Trächtler, “Validation of an Online State Estimation Concept for Microscopic Traffic Simulations,” in *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo 2021*.
- [3] K. Malena, C. Link, L. Bußemas, S. Gausemeier, and A. Trächtler, “Traffic Estimation and MPC-based Traffic Light System Control in realistic Real-Time Traffic Environments,” in *Communications in Computer and Information Science, Smart Cities, Green Technologies, and Intelligent Transport Systems*, C. Klein, M. Jarke, M. Helfert, K. Berns, and O. Gusikhin, Eds., 1st ed.: Springer Cham, 2022.
- [4] K. Malena, C. Link, S. Gausemeier, and A. Trächtler, “Vorrichtung und Verfahren zur echtzeitbasierten dynamischen Verkehrszuordnung für zumindest zwei nachfolgende Fahrbahnen (in Prüfung),” UPA 47480 P DE, Deutschland.
- [5] K. Malena, C. Link, S. Gausemeier, and A. Trächtler, “Verkehrsleitsystem für die Steuerung von Lichtsignalanlagen (in Prüfung),” UPA 47479 P DE, Deutschland

IX. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsfeld des Pilotprojekts Schlosskreuzung	15
Abbildung 2: Vogelperspektive des realen Testgebiets in a), OSM-basiertes SUMO-Netz in b) und dessen Reduktion auf Hauptstraßen mit den Standorten von TOPO-Boxen und LSA in c)	16
Abbildung 3: Gesamtsystemübersicht der LSA-Regelung im Pilotprojekt.....	19
Abbildung 4: Struktur der entwickelten mehrstufigen LSA-Regelung	20
Abbildung 5: Auswirkungen von Verzögerungen auf die Wartezeit innerhalb der entwickelten LSA-Regelung.....	22
Abbildung 6:NOSCO.hybridkamera an der Schloßkreuzung	27
Abbildung 7: Beispielaufnahmen der NOSCO.hybridkamera	28
Abbildung 8: Fotoaufnahme eines Radar-Tasters an der Schloßkreuzung	28
Abbildung 9: Prinzip der Erkennung des Radar-Tasters	29
Abbildung 10: Klassifizierungsschema für Fahrzeuge	31
Abbildung 11: Aufnahme eines winkelauflösenden Radars.....	32
Abbildung 12: Vergleichende Beispielaufnahmen des winkelauflösenden Radars an der Schloßkreuzung mit zusätzlicher Markierung der Sensierungsgebiete und Fahrzeuge	32
Abbildung 13: Winkelauflösender Radar: Vogelperspektive der Schlosskreuzung inklusive der Markierung der Sensierungsgebiete und Zonen	33
Abbildung 14: Winkelauflösender Radar im MQTT-Server mit Rückstaulänge und Zone im UI.....	33
Abbildung 15: Ablaufdiagramm der Polarisationskamera	34
Abbildung 16: Ablaufeinordnung der Elemente der Polarisationskamera.....	34
Abbildung 17: Umweltbox in Schloß Neuhaus	35
Abbildung 18: Verschiedene Darstellungen der Umweltbox	35
Abbildung 19 Index-Tabelle-Umweltbox.....	36
Abbildung 20: MQTT Prozess.....	37
Abbildung 21: Live-Übersicht des MQTT-Servers	38
Abbildung 22: Schaubild der OCIT-Kommunikation	43
Abbildung 23: Aktivitätsverlauf der LSA im westlichen Testgebiet für einen Beispieltagesausschnitt (24.05.2022)	58

Abbildung 24: Gegenüberstellung von MPC- und Bestandsverfahren bzgl. relevanter Daten aller Aufzeichnungssequenzen mit dem Merkmal hoher Verkehrsaufkommen im östlichen Teilstestgebiet	60
Abbildung 25: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der störungsfreien MPC-Regelung und des Bestandsverfahrens für das östliche Teilstestgebiet	62
Abbildung 26: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der störungsfreien MPC-Regelung und des Bestandsverfahrens für das westliche Teilstestgebiet	64
Abbildung 27: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der störungsfreien MPC-Regelung und des Bestandsverfahrens für das westliche Teilstestgebiet mit zusätzlicher Filterung bzgl. der Systemaufenthaltsdauer	65
Abbildung 28: Übersicht der durchschnittlichen MPC-Regelung verschiedener Aktivitätsraten und des Bestandsverfahrens für das östliche Teilstestgebiet bei niedrigem Verkehrsaufkommen	66
Abbildung 29: Übersicht der durchschnittlichen MPC-Regelung verschiedener Aktivitätsraten und des Bestandsverfahrens für das östliche Teilstestgebiet bei niedrigem Verkehrsaufkommen	67
Abbildung 30: Übersicht der durchschnittlichen Ergebnisse der MPC-Regelung verschiedener Aktivitätsraten und des Bestandsverfahrens für das westliche Teilstestgebiet bei niedrigem Verkehrsaufkommen.....	68
Abbildung 31: Vergleich der durchschnittlichen Feinstaubemissionen der verschiedenen Verfahren im Gesamtgebiet	69
Abbildung 32: Vergleich der durchschnittlichen Wartezeiten aller VTN der verschiedenen Verfahren im Gesamtgebiet	69
Abbildung 33: Vergleich der durchschnittlichen Buswartezeiten der verschiedenen Verfahren im Gesamtgebiet	70
Abbildung 34: Prinzipskizze Einsatzfahrzeugbeschleunigung.....	85
Abbildung 35: Beispiel einer abgesicherten OCIT-Kommunikation über projektspezifischen VPN-Tunnel.....	90
Abbildung 36: Standardisierter OpenVPN-Tunnel mit Zertifikaten auf Basis eines standardisierten Zertifikat-Profiles	91

X. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektzeitplan des Pilotprojekts	9
Tabelle 2: Beispielhafte relative Gewichtung unterschiedlicher Verkehrsteilnehmertypen.....	20
Tabelle 3: Fahrzeugtypendaten einer 10-minütigen Beispielsimulation (geringes Verkehrsaufkommen)	21
Tabelle 4: Exemplarische Ergebnisse der zuvor beschriebenen Beispielsimulation....	21
Tabelle 5: AP-Werte des Pilotprojekts	46
Tabelle 6: Zusammenfassender AP-Wert für erleichterte Kommunikation	48
Tabelle 7: Cluster Verkehrsaufkommen	57
Tabelle 8: Cluster Störungsauftreten	58
Tabelle 9: Tabellarische Übersicht der Projektziele	77
Tabelle 10 Übersicht Veranstaltungen.....	96

XI. Anlage 1: Konzept zur Vorrangschaltung von Einsatzfahrzeugen

Einführung

Martinshorn und Blaulicht sind nicht immer ausreichend, um Einsatzfahrzeuge schnell und sicher an das gewünschte Ziel zu bringen. Beim Rettungseinsatz zählt jede Sekunde. Daher sollen Einsatzfahrzeuge möglichst ungehindert die Kreuzung queren können. Hierfür wird ein System zur automatischen Vorrangschaltung für Einsatzfahrzeuge eingesetzt.

Der gesamte Ablauf zur Beeinflussung der Lichtsignalanlagen wird vollautomatisch – ohne Mitwirkung des Fahrenden – aus dem fahrenden Fahrzeug heraus ausgelöst. Die GRÜN-Vorrangschaltung für die Lichtsignalanlagen auf dem Einsatzweg erfolgt zeitoptimiert. Direkt nach der Überquerung der Kreuzung wird die Beeinflussung automatisiert aufgehoben.

Der Fahrweg wird mittels GNSS³⁹ über An- und Abmeldedaten des Einsatzfahrzeuges an Meldepunkten ermittelt. Besonders effizient arbeitet dieses System an unübersichtlichen Verkehrsknotenpunkten, da mehrere zu verschiedenen Lichtsignalanlagen gehörende Meldepunktketten ineinandergreifend abgearbeitet werden können.

Vor dem Einsatzfahrzeug fließt der Verkehr in alle Richtungen mit ab und die Fahrtrichtung für das Einsatzfahrzeug wird geräumt. Das Einsatzfahrzeug überquert immer bei GRÜN die Kreuzungsanlage. Die Querverkehre, alle Rad- und Fußverkehrsfurten werden in ROT geschaltet. Unfälle werden dadurch vermieden und die Verkehrssicherheit für alle Verkehrsteilnehmenden erhöht. Zudem kann durch das System der Einsatzort schneller erreicht werden.

Funktionsweise

Zunächst werden die Meldepunkte festgelegt. Es wird dabei zwischen Erstanmeldepunkte, Wiederholungsmeldepunkte und Abmeldepunkt unterschieden. Überfährt das Einsatzfahrzeug den festgelegten Bereich des Erstanmeldepunkts, erfolgt die Anmeldung an die entsprechende Lichtsignalanlage. Der Wiederholungsmeldepunkt dient zur Sicherstellung, dass die Anmeldung wie geplant erfolgt ist und gibt dem Einsatzfahrzeug die Rückmeldung, dass die Anmeldung an der entsprechenden Lichtsignalanlage vorliegt und verarbeitet wird. Der Abmeldepunkt dient zur Abmeldung des Einsatzfahrzeugs an der Lichtsignalanlage.

Über ein geeignetes Übertragungsmedium werden die Daten zwischen Einsatzfahrzeug und Lichtsignalanlage übertragen. Die jeweiligen Meldungen können bereits einige hundert Meter vor der Lichtsignalanlage erfolgen. Die Einsatzfahrzeuge werden mit den

³⁹ Global Navigation Satellite System (Satellitengestütztes Navigationssystem, z.B. GPS, Galileo)

Fahrzeugeinheiten ausgestattet und die Lichtsignalanlagen an den definierten Verkehrsknotenpunkten mit entsprechenden LSA-empfängern nachgerüstet.

Hat das Fahrzeug eine vorgegebene Meldepunktposition erreicht, initiiert das Fahrzeuggerät das Aussenden eines entsprechenden Funktelegramms an den LSA-Empfänger. Das Telegramm / Protokoll beinhaltet unter anderem die Meldepunktnummer, die Fahrzeugkennung sowie die Meldepunktart (Voranmeldung, Hauptanmeldung, Abmeldung).

Werden die Meldepunktpositionen in der Fahrzeugeinheit versorgt läuft die Beeinflussung der Lichtsignalanlage lokal ab. Alternativ ist es möglich, dass eine Zentrale die Position der Einsatzfahrzeuge verfolgt und bei Erreichung der Meldepunkte die Steuerbefehle an die Lichtsignalanlage abgibt.

Das integrierte GNSS, kann durch die Auswertung von Tachometerimpulsen erweitert werden, so dass auch in Tunneln und abgeschatteten Bereichen eine Positionsermittlung zuverlässig möglich ist.

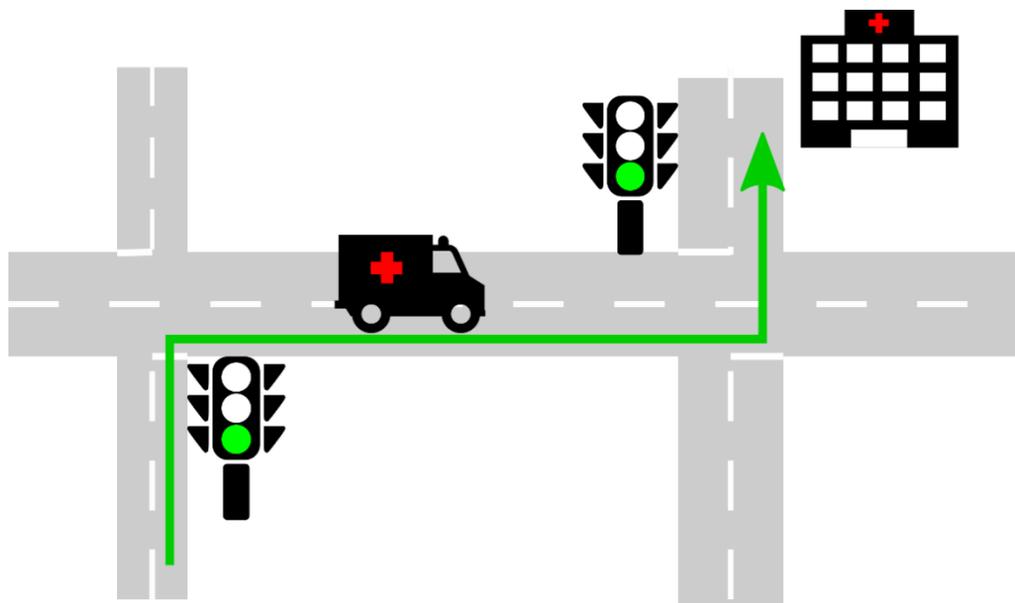


Abbildung 34: Prinzipskizze Einsatzfahrzeugbeschleunigung

An ausgewählten Verkehrsknotenpunkten (z.B. viel befahrene Kreuzungen und/oder Kreuzungen mit unübersichtlicher Knotengeometrie) werden die Lichtsignalanlagen in das System eingebunden. Die Steuerung für die Beeinflussung durch Einsatzfahrzeuge wird hierfür erweitert. Die Beeinflussung der Steuerung der Lichtsignalanlage erfolgt über vordefinierte Phasen. Die entsprechende Phase oder entsprechenden Phasen (bei mehreren Richtungen) muss, bzw. müssen im Steuergerät versorgt sein. In diesen Phasen erhält nur die Richtung aus der das Einsatzfahrzeug (oder die Einsatzfahrzeuge) die Freigabe, alle anderen Richtungen sind gesperrt. D. h. auch Rad- und Fußverkehr erhalten keine Freigabe. Somit wird die Verkehrssicherheit für alle Verkehrsteilnehmer erhöht. Es folgt eine schnelle Rückschaltung zum Normalbetrieb durch streckenabhängige oder punktgenaue Abmeldung.

Ist ein direkter Wechsel in eine der vordefinierten Phasen gewünscht, muss ein dynamischer Phasenübergang in der Logik des Steuergerätes hinterlegt werden. Durch die Abfolge der Anmeldepunkte wird sichergestellt, dass die sicherheitsrelevanten Zeiten (z. B. Zwischenzeiten) geordnet ablaufen können. Bei der Voranmeldung wird sichergestellt, dass keine neuen Signalgruppen geschaltet werden, so dass die Zwischenzeiten ablaufen können und die Lichtsignalanlage den Phasenübergang vorbereiten kann. Mit der Hauptanmeldung erfolgen die finalen Schaltungen zur entsprechenden Phase, weiterhin unter Berücksichtigung von Schutzzeiten.

Bei bereits vorhandener Beeinflussung durch den ÖPNV können die vorhandenen Komponenten auch für die Fahrwegfreischaltung der Einsatzfahrzeuge genutzt werden. Derzeit wird, wie in Paderborn, in der Regel R09-Telegramme nach VDV⁴⁰-Standard eingesetzt. In diesem Fall ist eine planerische Anpassung an der Steuerung notwendig. Für die Beeinflussung des ÖPNV und der Einsatzfahrzeuge können unterschiedliche Prioritäten verwendet werden.

Es ist zukünftig denkbar, dass bei einer Implementierung von Kommunikationseinheiten für eine „Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation“ (C2X/V2X), neue Möglichkeiten zur Gestaltung der Vorrangschaltung für Einsatzfahrzeuge umgesetzt werden können. Ob eine Kommunikation mittels Road Side Units (RSU – WLANp) oder über Mobilfunk (5G - mit eigenem Frequenzbereich für Verkehr) ist für die Funktionsweise der Vorrangschaltung nicht entscheidend. Beide Systeme bieten Vor- und Nachteile, die bei der Ausstattung von Infrastruktur und Fahrzeuge betrachtet werden müssen. Schwerpunkt von diesem Konzept ist das Prinzip der Vorrangschaltung für Einsatzfahrzeuge und nicht die Kommunikationsart zur Realisierung.

Über eine Rückstauererkennung (z.B. lokaler Radarsensor oder zentralenseitige Verkehrslageberechnung) können die Meldepunkte variabel an die jeweilige Verkehrssituation vor der Lichtsignalanlage angepasst werden. Eine derartige optimierte Meldepunktberechnung setzt voraus, dass entsprechende Verkehrsinfrastrukturdaten an die Fahrzeuge übermittelt werden können und diese im Fahrzeug verarbeitet werden können. Vorteil einer variablen Meldepunktberechnung ist die Beachtung der vorliegenden Verkehrssituation. Es kann bei Rückstau der Richtung aus der das Einsatzfahrzeug sich der Kreuzung nähert, mehr Freigabezeit erhalten, um sicherzustellen, dass der Kreuzungsbereich geräumt ist und eine Durchfahrt des Einsatzfahrzeugs sichergestellt werden kann.

⁴⁰ VDV = Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

XII. Anlage 2: IT-Sicherheit von OCIT-Systemen⁴¹

Einführung

Ein wichtiger Teil der Investitions- und Zukunftssicherung von Systemen der Straßenverkehrstechnik ist die einfache, sichere und wirtschaftliche Vernetzung ihrer Komponenten. Die Standardisierung von Schnittstellen liegt damit sowohl im Interesse der Auftragnehmer als auch der Hersteller solcher Systeme oder Komponenten.

Die ODG (OCIT Developer Group) standardisiert unter der Markenbezeichnung OCIT® Schnittstellen für verkehrstechnische Systeme. Ziel ist es, in solchen Systemen Komponenten verschiedener Hersteller zu vernetzen. Die Standardisierung umfasst im Wesentlichen die Kommunikationsprotokolle und die Daten der Schnittstellen.

OCIT-Systeme lassen sich bereits heute so in die vorhandene Infrastruktur einbetten, dass aktuelle IT-Sicherheitsrichtlinien erfüllt werden. Der aktuelle Stand des OCIT-Systems legt damit die Grundlage für zukünftige Anforderungen in der IT-Sicherheit. Der Investitions- und Zukunftssicherheit wird insbesondere dadurch Rechnung getragen, dass die IT-Sicherheit stets ein Kriterium für die Neu- und Weiterentwicklung der Schnittstellen ist.

Die Schnittstellenbereiche von OCIT

OCIT standardisiert Schnittstellen für die Bereiche „Outstations“ und „Instations“. Instations umfasst Schnittstellen zur Vernetzung von zentralen Einrichtungen. Da diese zentralen Einrichtungen für gewöhnlich in abgesicherten Netzwerkumgebungen eingebunden sind, wird der Bereich Instations hier nicht weiter betrachtet. OCIT-Outstations (kurz: OCIT-O) standardisiert im Allgemeinen eine Schnittstelle zwischen zentralen Einrichtungen und Feldgeräten. OCIT-O bietet die Möglichkeit verschiedenartige Feldgeräte der Straßenverkehrstechnik einzubinden. Aktuell ist ausschließlich das „Lichtsignalsteuergerät“ als Feldgerät definiert. Zukünftig wird auch eine Spezifikation für die sog. „IRS“ (ITS Roadside Station) als Feldgerät zur Verfügung stehen, welches ebenfalls über OCIT-O an eine Zentrale angeschlossen und mit dem die Car2X-Kommunikation zu den Fahrzeugen gemäß ETSI ITS G5 realisiert werden kann.

Mittels OCIT-O ist die sichere Bedienung, Überwachung der Gerätefunktionen sowie die Versorgung aus der Ferne möglich. OCIT-O ist aufgrund der starken Verbreitung im Markt die bedeutendste OCIT-Schnittstelle.

Eigenschaften von OCIT-Outstations

Für die sichere Übertragung der Daten zwischen Zentralen und Feldgeräten werden die aus dem Internet bekannten Protokolle TCP und IP verwendet. Diese Protokolle sind

⁴¹ Als Vorlage diente das Positionspapier der ODG zur IT-Sicherheit von OCIT-Systemen.

unabhängig von der physikalischen Übertragungstechnik (Mobilfunk, Kabelverbindungen) einsetzbar. OCIT-O kann so die rasant wachsenden Möglichkeiten der Telekommunikations- und Netzwerktechnik auch auf der Straße nutzen und verfügt damit über eine zukunftssichere technische Basis. Diese erlaubt es auch, OCIT Outstations im Laufe der Zeit an neue Anforderungen anzupassen und funktionell zu erweitern.

OCIT-O hat eine eigene Definition für das Übertragungsprotokoll der Anwenderebene, die mit den Internet-Standards koexistieren kann, das „Basis Transport Paket Protokoll Layer“ (BTPPL). BTPPL wurde mit Blick auf die in städtischen Stauernetzen häufig vorhandenen Kabelverbindungen mit teilweise eingeschränkter Übertragungsleistung entwickelt. Es arbeitet mit einem kleinen Verwaltungsdatenanteil und ermöglicht es dadurch auch diese Strecken zu nutzen. Als fester Bestandteil des Protokolls nutzt OCIT-O eine kryptographische Hashfunktion, die mittels eines Passworts einen Prüfwert für ausgewählte Protokollnachrichten erstellt, mit dessen Hilfe Feldgeräte nicht authentisierbare Nachrichten identifizieren können. Dies verhindert eine nicht autorisierte Beeinflussung dieser Feldgeräte im Rahmen dieser Kommunikation.

Übertragungswege von OCIT-Outstations

BTPPL kann mittels TCP/IP über verschiedene Übertragungswege kommunizieren. Für etliche dieser Kommunikationsarten existieren Standards und damit auch Standard-Kommunikationsgeräte. Beispiele: DSL, Ethernet, GSM, GPRS, UMTS, LTE, öffentliches Telefonnetz, Lichtwellenleiter und Standleitungsbetrieb in privaten Netzen. Im OCIT-System können sämtliche dieser Standardtechniken zur Kommunikation zwischen Feldgeräten und Zentralen genutzt werden. Die entsprechenden Festlegungen dazu im OCIT-Standard werden als OCIT-Übertragungsprofile bezeichnet. Mit den standardisierten OCIT-Übertragungsprofilen sind unterschiedliche Lichtsignalsteuergeräte verschiedener Hersteller ohne weitere Absprachen an zentralen Einrichtungen anschließbar.

Bisher für OCIT-Outstations standardisierte Übertragungsprofile:

Für OCIT-O sind bisher drei Übertragungsprofile mit folgenden Eigenschaften standardisiert:

„Profil 1 – Übertragungsprofil für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen auf fest geschalteten Übertragungswegen“

- veröffentlicht seit 2002
- Festlegungen für analoge Vollduplex-Modems
- Datenrate bis 28 kbit/s
- Reichweite bis zu 12 km

„Profil 2 – Übertragungsprofil für Wählverbindungen im Festnetz und GSM Mobilfunknetz“

- veröffentlicht seit 2005
- Festlegungen für digitale Vermittlungsnetze
- LSA-seitig üblicherweise GSM (9,6 kbit/s)
- zentralenseitig üblicherweise ISDN (64 kbit/s)
- Wählverbindung => keine Standleitung!
- Reichweite theoretisch unbegrenzt

Das Profil 2 wird von der ODG nicht weiterentwickelt und wird für neue Projekte nicht empfohlen.

„Profil 3 – Ethernet mit DHCP“ (Dynamic Host Configuration Protocol)

- veröffentlicht seit 2009
- Festlegungen für das Einbinden von Feldgeräten in das Netzwerk über Ethernet
- Zwischen den Ethernet-Endpunkten können eine Vielzahl von Übertragungstechnologien (z.B. DSL, LWL) eingesetzt werden
- Datenrate wird über die im Netzwerk beteiligten Komponenten bestimmt (Netzwerkkarten der Feldgeräte, Switches, Router, etc.)
- Reichweite theoretisch unbegrenzt

Das Profil 1 ist für abgeschlossene und damit anderweitig abzusichernde Netze konzipiert und wird daher bei nachfolgender Sicherheitsbetrachtung nicht berücksichtigt. Je nach Voraussetzung setzt der Betreiber eigene Sicherungsmaßnahmen ein oder es werden bei Bedarf zwischen Betreiber und Herstellende entsprechende Maßnahmen abgestimmt.

Das Profil 2 nutzt das öffentliche digitale Vermittlungsnetz. Die damit mögliche Rufnummernerkennung wird genutzt, um einen nicht autorisierten Zugriff auf das Steuergerät oder die Zentrale zu verhindern. Da das Profil 2 von der ODG nicht weiterentwickelt wird, wird der Einsatz für neue Projekte nicht mehr empfohlen. Für neue Projekte wird stattdessen der Einsatz von Profil 3 in Kombination mit Mobilfunk empfohlen.

Das Profil 3 eignet sich für abgeschlossene Netze, in die die Feldgeräte über Ethernet eingebunden werden können, Ethernet ist eine Datennetztechnik für lokale Datennetze, die den Datenaustausch zwischen den angeschlossenen Geräten im lokalen Datennetz ermöglicht. Mit zusätzlichen Einrichtungen wie Routern oder Umsetzern verbindet Ethernet die Geräte per Kupferkabel, Glasfaser oder Mobilfunk aber auch über sehr weite Entfernungen. Dies erlaubt den gewünschten und notwendigen Ausbau der Vernetzung verkehrstechnischer Systeme schnell, effektiv und wirtschaftlich voranzutreiben.

Kommunikation über das Internet mittels projektspezifischem kryptographischen VPN

OCIT ist aufgrund seiner IP-basierten Kommunikation bestens zur Kommunikation über das Internet geeignet. Da das Internet öffentlich ist, müssen geeignete Methoden angewandt werden, um die Datenkommunikation zu schützen. Diese notwendigen Methoden können sehr einfach projekt- oder herstellerspezifisch mit Hilfe von technisch etablierten und bewährten Lösungen realisiert werden. Das OCIT Profil 3 kann daher als Basis dienen, um Lichtsignalsteuergeräte auch über das Internet an einer Zentrale zu betreiben.

Für die Absicherung der Datenkommunikation können kryptographisch basierte VPNs (Virtual Private Network) genutzt werden. Mit Hilfe eines VPN kann im „unsicheren“ Internet ein überlagertes, abgesichertes Netzwerk aufgebaut werden und gegen unautorisierte Zugriffe abgesichert werden. Es stehen verschiedene VPN-Protokolle zur Verfügung, die dem Stand der Technik entsprechen und mit denen ein Höchstmaß an Sicherheit erzielt werden kann.

Im Zusammenspiel mit OCIT Profil 3 wird für ein kryptographisch basiertes VPN die Unterstützung von einem Kommunikationsdienstleister benötigt. Dieser Kommunikationsdienstleister hat einen OCIT-O Profil 3 transparenten Tunnel bereit zu stellen. Der Kommunikationsdienstleister kann ein zusätzlicher Projektpartner, der Zentralen- oder einer der Steuergeräteelieferanten sein. (siehe Abbildung 35)

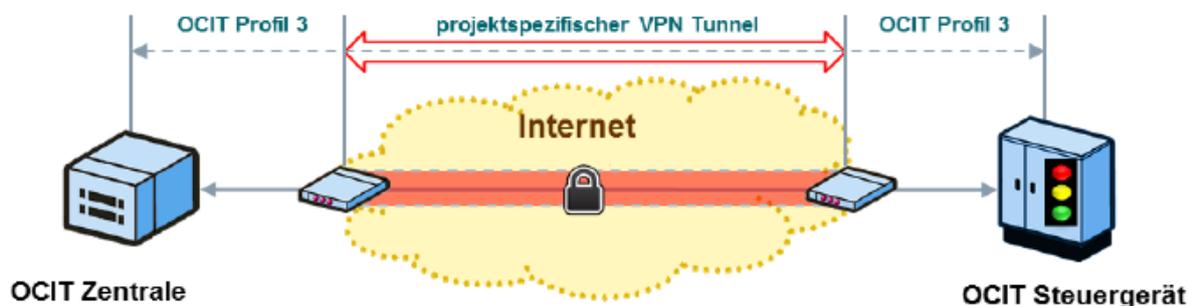


Abbildung 35: Beispiel einer abgesicherten OCIT-Kommunikation über projektspezifischen VPN-Tunnel

In einem VPN können Nachrichten in einem Netzwerk authentisiert und verschlüsselt werden. Sichere Systeme können bei geeigneter Wahl der Parameter (z.B. der Schlüssellänge) nach heutigem Kenntnisstand nicht in überschaubarer Zeit gebrochen werden. Ein etablierter VPNTunnel sichert damit die Kommunikation grundsätzlich ab.

Das zukünftige OCIT Profil 4 mit standardisiertem kryptographischen VPN

Auch wenn heute schon sichere OCIT-Datenverbindungen projekt- oder herstellerspezifisch über das Internet aufgebaut werden können, arbeitet die ODG an dem neuen Übertragungsprofil „Profil 4 – Netzkopplung mittels OpenVPN“, um auch

hier durch die Standardisierung die Interoperabilität zu vereinfachen und die Sicherheit weiter zu erhöhen.

Das OCIT Profil 4 hat folgende Standardisierungsschwerpunkte:

- OpenVPN wird als Lösung für die Etablierung eines VPN-Tunnels eingesetzt
- Es soll ein sicherer, praxistauglicher und einheitlicher Zertifikatsaustausch ermöglicht werden

OpenVPN ist eine Open-Source-Software und aufgrund seiner Sicherheitseigenschaften und einfachen Anwendbarkeit äußerst verbreitet. OpenVPN nutzt asymmetrische Verfahren für die initiale Aushandlung von kryptographischen Parametern für den VPN-Tunnel. Diese ermöglichen eine beiderseitige Authentifizierung unter Nutzung von öffentlichen und privaten Schlüsseln beider Kommunikationspartner. Der öffentliche Schlüssel wird dabei über eine vertrauenswürdige Instanz der sogenannten Zertifizierungsstelle (Certification Authority, kurz CA) zertifiziert.

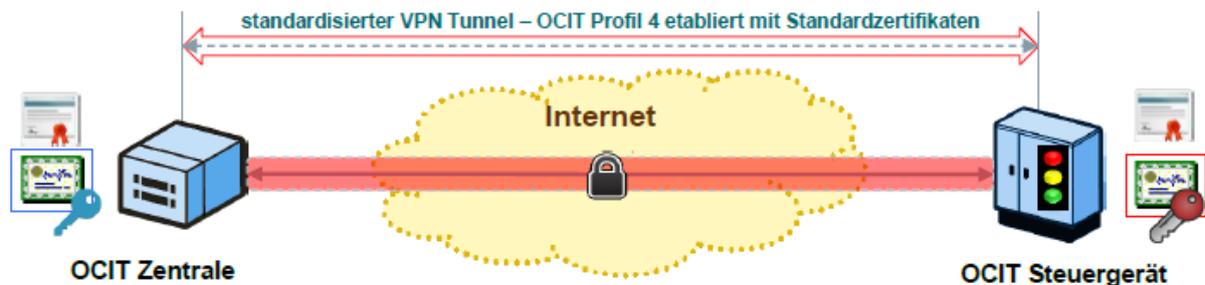


Abbildung 36: Standardisierter OpenVPN-Tunnel mit Zertifikaten auf Basis eines standardisierten Zertifikat-Profiles

OpenVPN, in einer geeigneten Konfiguration, ermöglicht die Aushandlung und Nutzung von Schlüsselmaterial für den Schutz einer Kommunikationsverbindung. Die so geschützte Verbindung kann nach aktuellem Kenntnisstand als extrem sicher angesehen werden. Von elementarer Bedeutung ist aber das Zertifikatsmanagement, mit dessen Hilfe die Aushandlung des Schlüsselmaterials geschützt wird, damit dies nicht in unbefugte Hände gelangen kann. Bei der Erarbeitung des OCIT Profils 4 werden daher die für das Zertifikatsmanagement notwendigen Formate (Schnittstellen) und Strukturen festgelegt. Alternativ kann auch eine vorhandene PKI genutzt werden, da das Profil 4 auf schon standardisierten Zertifikatsformaten aufsetzt. Es müssen also lediglich die Inhalte im Sinne des OCIT Profil 4 in den Zertifikaten ergänzt werden. Die PKI ermöglicht die Erstellung, Verteilung und ggf. das Zurückziehen von digitalen Zertifikaten und unterstützt deren Prüfung. Der Aufbau und Betrieb einer PKI erfolgt durch den Anlagenbetreiber direkt oder durch ein von ihm beauftragtes Unternehmen als PKI-Dienstleister. Im Mittelpunkt stehen dabei eine Software zum Betrieb der Zertifizierungsstelle (CA) und eine Organisation zur Ausgabe und Verteilung sowie zum regelmäßigen Austausch der Zertifikate.

Fazit zur OCIT-Schnittstelle

Mit Hilfe des OCIT Profil 3 in Kombination mit einem kryptographischen VPN können projektspezifisch sichere OCIT-Datenverbindungen über offene Netze, insbesondere über das Internet aufgebaut werden.

Heute auf dem Markt verfügbare VPN-Techniken genügen dem aktuellen Stand der Technik und bieten das erforderliche Niveau an Sicherheit für OCIT-Systeme. VPN-Techniken sind sehr stark verbreitet und gehören heutzutage zum Arbeitsalltag von IT-Fachkräften, was einen routinierten Einsatz dieser Techniken für OCIT-Systeme sicherstellt.

Mit dem zukünftigen OCIT Profil 4 wird die ODG die Netzkopplung mittels OpenVPN standardisieren. Davon werden sowohl die Betreiber als auch die Herstellenden von OCIT-Systemen im Hinblick auf die Interoperabilität und die erhöhte Sicherheit profitieren.

Das OCIT Profil 4 wird vor dem Hintergrund erarbeitet, dass existierende OCIT-Systeme später möglichst wirtschaftlich nachgerüstet werden können, was die Investitions- und Zukunftssicherheit von OCIT-Systemen einmal mehr unterstreicht.

OCIT-Systeme sind, insbesondere mit dem Profil 4, bestens gerüstet, um die künftigen Anforderungen, die sich aus der Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung – BSI-KritisV) bezüglich geschützter Kommunikation ergeben, erfüllen zu können.

Räumlichkeit der Verkehrszentrale

Die Verkehrszentrale befindet sich in einer nach der KRITIS Verordnung ausgerüsteten Lampertzzelle. Die Stadt Paderborn unterschreitet jedoch den schwellenwert von 500.000 Einwohnern, wodurch die Verkehrszentrale der Stadt Paderborn laut KRITIS Verordnung nicht zur Kritischen Infrastruktur zählt. Die Lampertzzelle ist mit einer Brandmelde- und Gas Löschanlage ausgestattet zudem besitzt die Zelle eine eigene Unterbrechungsfreie Spannungsversorgung, wodurch ein aufrechterhalt des Betriebes gewährleistet sowie ein Datenverlust durch einen Spannungsabfall ausgeschlossen werden kann.

Zu der Lampertzzelle ist der Eintritt nur für einen ausgewählten Kreis an Mitarbeitern der Stadt Paderborn gestattet. Der Zutritt ist nur mittels Persönlicher Pin Abfrage und eines RFID-Transponder möglich. Die Nachverfolgung der Zugänge ist über einen Zeitraum von mehreren Jahren gewährleistet zudem sind in der Zugangsschleuse sowie der Lampertzzelle Überwachungskameras installiert. Der Zugriff auf die Daten der Verkehrszentrale ist separiert vom Städtischen Verwaltungsnetzwerk, außerdem müssen Clienten ein gültiges VPN-Zertifikat vorweisen, um auf Daten zugreifen zu können.

Zentralenkommunikation der OCIT-Steuergeräte

Die Ansteuerung der Steuergeräte erfolgt über das städtische Steuerkabelnetz zur Verkehrszentrale über abgeschirmte Telekommunikationskabel. Die Aufschaltung der OCIT-Steuergeräte wird über ein gesondertes DSL-Modem betrieben. Dies geschieht aus Gründen der Sicherheit, um ein Zugriff auf die OCIT Kommunikation anderer Feldgeräte auszuschließen. Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Verkehrszentrale sind ISO/IEC 27001-Norm zertifiziert. Die ISO/IEC 27001-Zertifizierung der Verkehrszentrale stellt sicher, dass alle IT-Sicherheitstechnologien immer auf dem aktuellen Stand der Technik sind.

XIII. Anlage 3: Arbeitsprozesse zur Behebung von Störungen

Im Pilotprojekt wurden sechs Lichtsignalanlagen per Fernzugriff mittels eines Steuerungsalgorithmus geschaltet. Hierfür wurden alle drei Sekunden vom Steuerungsalgorithmus ein Phasenwunsch an die entsprechende LSA übermittelt. Es wurde in jedem Steuergerät sichergestellt, dass alle entsprechenden Richtlinien und Normen eingehalten werden und jederzeit ein sicherer Betrieb gegeben ist.

Bei Kommunikationsstörungen und/oder sonstigen Störungen wurde die LSA-Steuerung so programmiert, dass die Steuerung in eine sichere Rückfallebene überführt wird.

Besondere Tests wurden in Randzeiten und innerhalb der üblichen Werkszeiten durchgeführt. Somit konnte das Risiko einer Störung während Hauptverkehrszeiten und außerhalb von Betriebszeiten minimiert werden.

Beim Deaktivieren des Steuerungsalgorithmus sollte zunächst aus dem für den Steuerungsalgorithmus vorgesehenen Signalprogramm (SP 21-26) in das analoge Signalprogramm der Bestandsplanung (SP 1-6) geschaltet werden. Damit kann sichergestellt werden, dass der Übergang kontrolliert stattfindet. Ist der Übergang erfolgreich, kann der Steuerungsalgorithmus deaktiviert werden.

Innerhalb der LSA sind verschiedene Überwachungen und Rückfallebenen vorgesehen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Zum einen wird die Kommunikation zwischen Steuerungsalgorithmus und LSA ständig überwacht. Bei Ausbleiben von Schaltbefehlen des Algorithmus wird die ursprüngliche Bestandsplanung aktiviert. Das Signalprogramm (SP 21-26) bleibt dabei erhalten. Zu erkennen ist diese Rückfallebene an Statusinformationen sowohl auf dem ReTCon-Online-System als auch an der lokalen Steuerung.

Zum anderen wird auch die Reaktion des Steuerungsalgorithmus bewertet. Dies wird als Umlaufüberwachung bezeichnet. Reagiert der Steuerungsalgorithmus nicht auf bestimmte Anforderungen, die beispielsweise durch Taster oder Induktionsschleifen ausgelöst werden, schaltet die Steuerung nach einer gewissen Zeit in die Festzeitsteuerung mit den Signalprogrammen (SP 1-6) als Rückfallebene. Nachdem alle Verkehrsströme einmal freigegeben wurden, kann ein automatisierter Versuch gestartet werden die Steuerung durch den Algorithmus wieder zu aktivieren. Treten Störungen häufiger innerhalb kurzer Zeit auf, wird ein automatisierter Neustart unterbunden und die LSA bleibt in der Rückfallebene. Für einen weiteren Neustart ist ein manueller Eingriff erforderlich. Falls sich die LSA in einer Rückfalleben befindet, sollte der Steuerungsalgorithmus den Kreuzungsbereich ebenfalls nicht mehr aktiv steuern. Mit einer Zeitverzögerung und Erreichen des entsprechenden Signalprogramms kann der Steuerungsalgorithmus die Arbeit wiederaufnehmen.

Ursachen für die oben beschriebenen Störungen können neben dem Ausfall oder Fehlverhalten einzelner Komponenten auch Kommunikationsstörungen sein.

Der Steuerungsalgorithmus hat zusätzlich eine eigene Überwachung in der abgefragt wird in welchem Signalprogramm die jeweilige LSA derzeit läuft. Über das Signalprogramm kann ermittelt werden, ob und in welcher Rückfallebene die LSA sich befindet. Damit kann sichergestellt werden, dass bei einem Eingriff der Umlaufüberwachung 15 Minuten abgewartet werden, bevor über den Steuerungsalgorithmus wieder geschaltet wird.

Bei einer Störung, in der die LSA sich nicht automatisch in eine Festzeitsteuerung schalten kann, muss schnell reagiert werden können. Die Firma Stührenberg unterhält eine 24/7 Bereitschaft, über die permanent Störungen gemeldet werden können. Für den Fall, dass die Mitarbeiter der Firma Stührenberg nicht kurzfristig eingreifen können, unterhält die Stadt Paderborn ebenfalls eine 24/7 Bereitschaft.

In der Regel wird die Stadt Paderborn durch Einsatzkräfte vor Ort direkt über die Bereitschaftsnummer informiert. Die Mitarbeiter der Stadt Paderborn haben eine Kurzeinweisung zur Bedienung der Steuergeräte der Firma Stührenberg erhalten. Bei Bedarf können diese vor Ort im Rahmen der erhaltenen Schulungsinhalte eingreifen.

Bei allen weiteren gravierenden Störungen oder Ausfällen, z.B. Anfahrtsschäden, wird wie gewohnt verfahren.

XIV. Anlage 4: Übersicht der Veranstaltungen und Webseiten

Tabelle 10 Übersicht Veranstaltungen⁴²

Datum	Ort / Veranstaltung	Art
11. Februar 2020	Bezirksausschuss Schloß Neuhaus der Stadt Paderborn	Präsentation gehalten von Herrn Prof. Trächtler
11. März 2020	Digitalboard Stadt Paderborn	Präsentation gehalten von Herrn Adler
28. Mai 2020	DMR-Austauschveranstaltung zur Nachnutzung (Telefonkonferenz)	Kurzpräsentation gehalten von Herrn Adler
19. Juni 2020	2. Fachtagung Digitale Modellregionen NRW (virtuelles Event) + Videointerview	Virtuellen Messe-Stand betreut durch Herrn Adler (verschiedenste Kurzpräsentationen zum Projekt als Download) Videointerview durch Frau Dr. Gausemeier
15. Juli 2020	Besuch des Wirtschaftsministers des Landes NRW (Prof. Dr. Pinkwart) in der Stadt Paderborn	Kurzpräsentation gehalten von Herrn Prof. Trächtler
12. August 2020	Besuch des Verkehrsministers des Landes NRW (Hr. Wüst) bei der Firma RTB GmbH in Bad Lippspringe	Präsentation gehalten von Herrn Prof. Trächtler
21. August 2021	Places-festival (DMR Gelsenkirchen; das Pilotprojekt als Thema beim VR-Hackathon	Kurzpräsentation des Projekts durch Herrn Adler
11. Februar 2021	Projektaustausch vernetzte Infrastruktur NRW (innocam) als Videokonferenz	Präsentation gehalten von Herrn Malena
30. März 2021	3. Fachtagung Digitale Modellregionen NRW	Kurzpräsentation gehalten von Frau Mattiza (Stadt Delbrück)

⁴² Stand 09/2022.

22. April 2021	Digitale Zukunft OWL (Digitale Modellregion OWL) (als Online-Event) + Dreh eines Kurzvideos	Kurzpräsentationen vom Projekt als Online-Informationsmaterial
26. April 2021	Digitalausschuss der Stadt Paderborn; Anfrage der Partei „Die Grünen“: Stand des Projekts	Kurze schriftliche Beantwortung der Anfragen
11. Mai 2021	Bezirksausschuss Schloß Neuhaus / Sande der Stadt Paderborn: Anfrage der Partei „Die Grünen“: Stand des Projekts	Kurze schriftliche Beantwortung der Anfragen
9. Mai 2022	Videointerview: Digitale Modellregionen NRW des KDN im Auftrag des MWIDE	Videointerview durch Herrn Malena

Zudem werden verschiedenste Informationen auf folgenden Webseiten präsentiert:

- Stadt Paderborn: <https://digitale-heimat-pb.de/projekte/pilotprojekt-schlosskreuzung>
- Heinz Nixdorf Institut: <https://www.hni.uni-paderborn.de/rtm/forschung/>
- Stührenberg GmbH: <https://www.stuehrenberg.de/de/hauptnavigation/unternehmen/projekte-forschung-entwicklung.html>
- RTB GmbH: <https://www.rtb-bl.de/RTB/pilotprojekt-schlosskreuzung/>