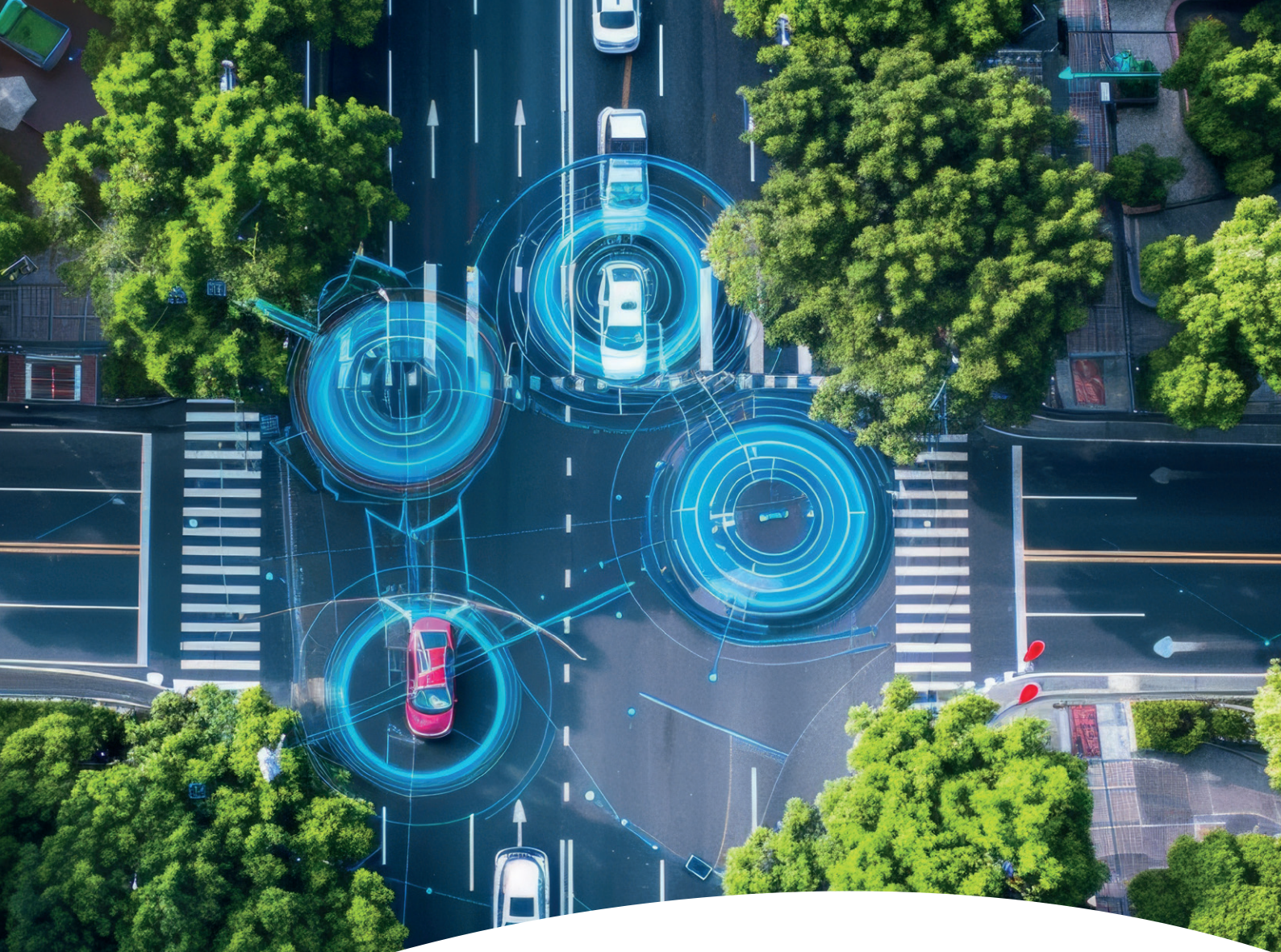




Intelligente Verkehrssteuerung

Grundlagen, Potenziale & Herausforderungen

Inhalt

1. Einleitung & Motivation	3
2. Grundlagen intelligenter Lichtsignalanlagen.....	4
3. Anwendungen und Potenziale.....	5
4. Herausforderungen und Risiken	11
5. Fazit und Ausblick	13
Literaturverzeichnis.....	14

Impressum

Autor*innen

Dr.-Ing. Kevin Malena
M. Sc. Christopher Lücke

Regelungstechnik und Mechatronik
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn

Satz und Design

FIR e. V. an der RWTH Aachen

Bildnachweise

S. 1 & S. 3: © Vitalii Shkurko – stock.adobe.com
S. 10: © Pornnapa – stock.adobe.com
S. 13: © aubriella – stock.adobe.com

Lizenzbestimmung/Copyright

Open Access: Dieses Whitepaper wird unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht (creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de).



Projekt DiSerHub
FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55 | 52074 Aachen

E-Mail: projekt.DiSerHub@fir.rwth-aachen.de
diserhub.de

1. Einleitung & Motivation

Die zunehmende Dringlichkeit einer nachhaltigen Verkehrswende wird in der aktuellen Debatte um die Städte der Zukunft und deren klimafreundliche Ausrichtung immer deutlicher. Angesichts des beschlossenen EU-weiten Verbrennerverbots ab 2035 und des wachsenden Drucks auf Städte, ihre Emissionen zu senken, steht die effiziente und umweltfreundliche Verkehrssteuerung im Mittelpunkt vieler Diskussionen. Dies betrifft nicht nur die Frage alternativer Antriebsformen, sondern auch die Notwendigkeit, den Verkehrsfluss in dicht besiedelten urbanen Räumen intelligenter zu gestalten.

Eine entscheidende Rolle kommt dabei den intelligenten Lichtsignalanlagen (LSA) zu. Diese innovativen Systeme sind in der Lage, den Verkehr in Echtzeit zu analysieren und flexibel zu steuern, um Staus zu minimieren, Emissionen zu senken und die Sicherheit zu erhöhen. Vor dem Hintergrund der prognostizierten Zunahme der täglichen Pendelstrecken im städtischen Raum um 23,2% bis 2035 und der zunehmenden Urbanisierung^[1], ist die Implementierung solcher Systeme eine vielversprechende Lösung, um die Herausforderungen des städtischen Verkehrs zu bewältigen.

Das vorliegende Whitepaper mit dem Titel „Intelligente Lichtsignalanlagen: Grundlagen, Herausforderungen & Potenziale“ untersucht die technischen Grundlagen, die rechtlichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen sowie die praktischen Herausforderungen bei der Einführung intelligenter Lichtsignalanlagen. Es zeigt auf, wie diese Technologien den Verkehrsfluss verbessern und gleichzeitig zur Reduzierung von Emissionen beitragen können.

Ein erfolgreiches Praxisbeispiel liefert das Pilotprojekt Schloßkreuzung in Paderborn, bei dem eine flexible und intelligente LSA-Regelung entwickelt und erprobt wurde^[2,3]. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt zeigen, wie das Potenzial intelligenter LSA genutzt werden kann, um Städte zukunftsfähig zu machen und eine nachhaltige Verkehrswende voranzutreiben. Ziel dieses Whitepapers ist es, Entscheidungsträgern eine fundierte Grundlage zu bieten, um den Einsatz dieser Technologien zu fördern und so langfristig einen Beitrag zur Verkehrsoptimierung und Emissionsreduktion zu leisten.



2. Grundlagen intelligenter Lichtsignalanlagen

Die Grundlagen für intelligente LSA beruhen auf der Kombination von Sensortechnologien, Echtzeit-Datenverarbeitung, fortschrittlichen Algorithmen zur Verkehrssteuerung sowie Vorgaben umsetzende Verkehrsteilnehmende. Dementsprechend hat ein derartiges System gewisse infrastrukturelle Rahmenbedingungen zu erfüllen, die in der folgenden Abbildung 1 dargestellt sind.

Sensoren wie Kameras oder Induktionsschleifen (hier auf der Fahrbahn in orange angedeutet) erfassen dabei kontinuierlich Informationen über den Verkehrsfluss, Fahrzeugdichten, Geschwindigkeiten und Fußverkehrsverhalten. Diese Daten werden entweder direkt im Steuergerät der LSA (grauer „Kasten“

in Abbildung 1) oder durch ein zentrales Verkehrsmanagementsystem in Echtzeit analysiert, um bspw. Verkehrsströme optimal zu steuern und Wartezeiten zu minimieren. Durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien wie Vehicle-to-Infrastructure (V2I) oder installierte Roadside-Units (RSU) können intelligente LSA zudem direkt mit Fahrzeugen interagieren und ihre Signale dynamisch an die aktuelle Verkehrslage anpassen. Dies ist in Abbildung 1 durch die Geschwindigkeitsempfehlung von 40 km/h angedeutet. Diese Technologien bilden das Fundament, auf dem intelligente LSA ihre Effizienz und Flexibilität aufbauen, um städtische Verkehrsnetze zu optimieren und auf diese Weise Umweltbelastungen zu reduzieren.

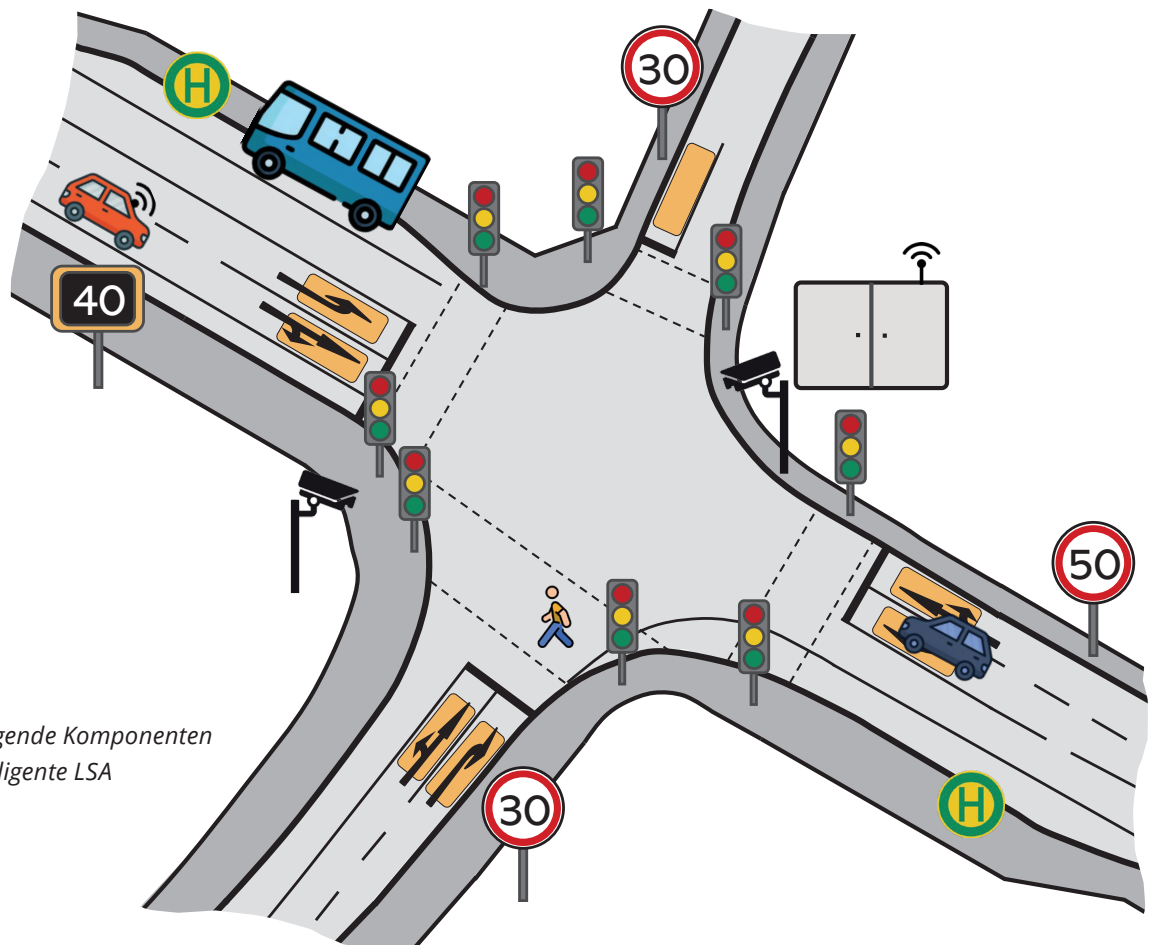


Abbildung 1: Grundlegende Komponenten im Regelkreis für intelligente LSA

3. Anwendungen und Potenziale

Intelligente Lichtsignalanlagen eröffnen vielfältige Chancen, um den Verkehr vor allem in urbanen Gebieten effizienter und sicherer zu gestalten. Durch den Einsatz moderner Technologien für Sensoren sowie insbesondere der ausgeweiteten Kommunikationsmöglichkeiten können sie den Verkehrsfluss datenbasiert und dynamisch steuern und an aktuelle Bedingungen anpassen. Mit dem Hilfsmittel der entsprechenden Kommunikation der verschiedenen Elemente (siehe Abbildung 1) lassen sich für die Anwendung intelligenter LSA u. a. die Verkehrsrekonstruktion, die LSA-Regelung und die LSA-Prognose unterscheiden.

Erweiterte Kommunikationstechnologien

Die Vehicle-to-Everything (V2X)-Kommunikation, bei der Fahrzeuge direkt mit LSA und anderen Elementen deren Umfelds interagieren ist zukunftsweisend. Die Technologie ermöglicht es, den Verkehrsfluss zu verbessern, indem beispielsweise grüne Wellen für den öffentlichen Nahverkehr oder Einsatzfahrzeuge geschaffen werden. Insbesondere für autonome Fahrzeuge spielt V2X eine Schlüsselrolle, da die LSA in Echtzeit Informationen übermitteln und so den Verkehrsfluss optimieren und die Sicherheit erhöhen können.

Ein erstes praktisches Beispiel ist der V2X-Rollout der Firma NXP, der darauf abzielt, den Verkehr sicherer und effizienter zu gestalten. NXP arbeitet mit Part-

nern wie Volkswagen zusammen, um V2X-Technologie in Fahrzeugen und Verkehrsinfrastrukturen zu integrieren. In Europa wird die DSRC-basierte V2X-Technologie (802.11p) eingesetzt, die bereits in vielen Fahrzeugmodellen wie dem Volkswagen Golf integriert ist. Diese Technologie wird auch von Infrastrukturprojekten wie dem Green4Transport-Projekt in Hamburg genutzt, um den Verkehr in stark frequentierten Bereichen zu optimieren ^[4].

Bis heute wurden die meisten technischen und praktischen Herausforderungen rund um V2X gelöst und warten darauf, dass die Industrieakteure mit dem umfassenden Einsatz beginnen. Jedoch hat jeder Anfang seine Hürden. Trotz der Überwindung aller Herausforderungen fällt es Industrieakteuren schwer, eine klare Nachfrage nach V2X vorherzusagen, da die Technologie in der Allgemeinheit wenig bekannt und die Nachfrage entsprechend begrenzt ist.

Daher sind Anforderungen durch Sicherheitsbewertungsprogramme wie das NCAP (New Car Assessment Program) sowie andere staatliche Richtlinien und Anreize entscheidende Treiber, die voraussichtlich den Einsatz der Technologie beschleunigen werden. Viele OEM werden voraussichtlich ab 2024 V2X als Standardfunktion einführen (vgl. Abbildung 2 und 3).

Dennoch bedeutet die Einführung von V2X als Standardfunktion nicht, dass Verbraucher sofort alle Vorteile genießen werden. Während der frühen Phase der Einführung (2024 – 2027) kann die Marktnachfrage aufgrund eines Mangels an Anwendungs-

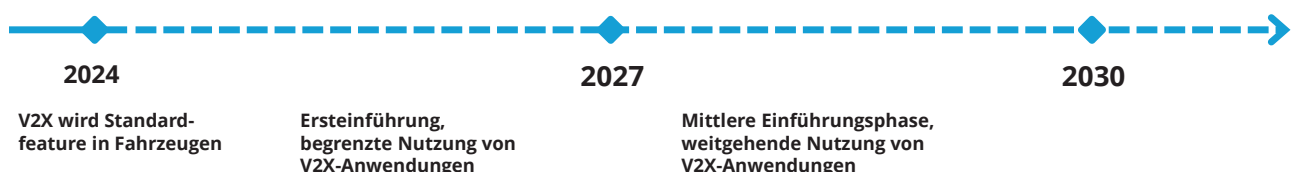


Abbildung 2: Erwartete Timeline des V2X-Rollouts nach AUTOCRYPT ^[5]

fällen begrenzt sein. In dieser Phase werden OEM und Industrieakteure ihre Bemühungen verstärken, die benutzerfreundlichen Funktionen der Technologie zu fördern und kostenlose Testzeiträume für V2X-Abonnements anzubieten. Sobald die Technologie im Fahrzeug des Durchschnittsverbrauchers ankommt, wird die Verbreitung den Markt wandeln.

Mit einer breiteren Abdeckung und mehr Anwendungsmöglichkeiten wird es wahrscheinlich in der mittleren Phase der Einführung (2027 – 2030) zu einem Anstieg der Marktnachfrage kommen. In dieser Phase wird erwartet, dass die Industrieakteure beginnen, von ihren Geschäftsmodellen zu profitieren, und die meisten Neuwagenkäufer voraussichtlich V2X-Dienste abonnieren werden.

In Kombination mit den Potenzialen zur Verkehrsrekonstruktion, LSA-Regelung und LSA-Prognose schaffen diese V2X-Ansätze eine umfassende und zukunftsfähige Verkehrssteuerung. Sie ermöglichen es, den Straßenverkehr nicht nur flüssiger und effizienter zu gestalten, sondern auch auf die Anforderungen moderner Mobilität, wie vernetzte und autonome Fahrzeuge, optimal vorbereitet zu sein.

Strategien und Anwendungen der Verkehrssteuerung

Damit eine intelligente LSA ihre Funktion erfüllen kann, ist eine Verkehrsprognose besonders hilfreich. Mithilfe historischer Verkehrsdaten und Echtzeitinformationen, z. B. erfasst durch moderne Kamerasysteme^[7], lassen sich zukünftige Verkehrssituationen vorhersagen. Der zusätzliche Aspekt der Verbreitung von Echtzeit-Verkehrsinformationen ist dabei ein weiterer Hebel für intelligente LSA. Durch die Kommunikation zwischen den LSA und RSU, vernetzten Fahrzeugen oder mobilen Geräten können Verkehrsteilnehmer kontinuierlich aktuelle Informationen über (künftige) LSA-Phasen, Verkehrstaus und alternative Routen erhalten.

Bereits mit der heutigen Infrastruktur können vielerorts dedizierte Schaltprognosen für LSA und deren Einzelsignale ermittelt werden, welche die Verkehrsteilnehmenden für eine voraussehende Reaktion nutzen können. In Deutschland wird ein derartiger Service noch nicht flächendeckend bereitgestellt, aber in ausgewählten Städten wie Kassel bietet z. B. traffic-pilot eine entsprechende Lösung an. Für zahlreiche

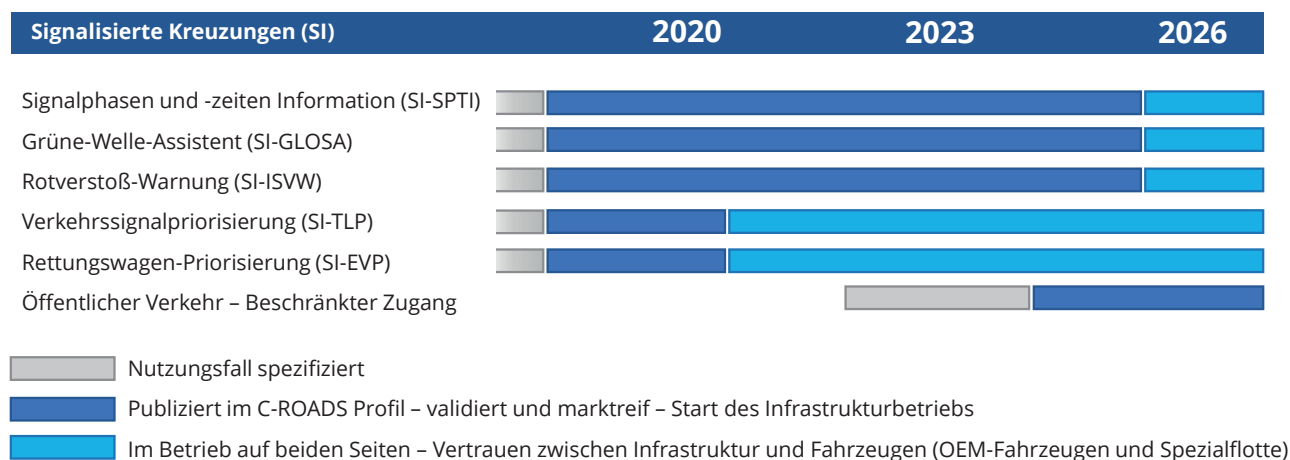


Abbildung 3: Auszug aus der detaillierten C-ITS-Use-Case-Roadmap^[6]

Knotenpunkte und verschiedene Steuerungstypen der LSA (Festzeitsteuerung und verkehrsabhängige Steuerungen durch Grünzeitverlängerung) kann per App die Prognose genutzt werden, um Grünphasen entlang der individuellen Reiseroute zu erreichen^[8]. Eine derartige „Green Light Optimal Speed Advisory“ (GLOSA) wurde ebenso im Talking Traffic Projekt in Flandern umgesetzt. Das Projekt nutzt die TLEX-Plattform der Firma Monotch. Erste Auswertungen ergeben 5 % CO₂ sowie 2 % NOx-Reduktion bei der Anfahrt auf Kreuzungen. Die Reisezeit konnte um 15 % und die durchschnittliche Zahl der Haltevorgänge um 17 % reduziert werden. Die Plattform fördert die Datenkommunikation zwischen LSA, Fahrzeugen und anderen Akteuren im Verkehrsnetzwerk, was die Koordination und Effizienz erhöhen. Schließlich werden Sicherheits- und Datenschutz durch die Einhaltung europäischer ETSI-Standards gewährleistet, sodass alle gesammelten Daten sicher und privat bleiben^[9, 10].

Allgemein ist die LSA-Regelung das Herzstück intelligenter LSA und sorgt dafür, dass die Ampelphasen flexibel und dynamisch an die aktuelle Verkehrslage angepasst werden. Statt starr nach einem festgelegten Zeitplan zu schalten, können intelligente LSA die Grün- oder Rotphasen in Echtzeit ändern, um den Verkehrsfluss zu verbessern. Erkennt die LSA bspw. ein hohes Verkehrsaufkommen auf einer Hauptstraße, verlängert sie automatisch die Grünphase, während Nebenstraßen nur bei Bedarf freigegeben werden. Auch der öffentliche Nahverkehr profitiert von dieser Technologie: Busse und Straßenbahnen können priorisiert werden, sodass sie durch eine frühzeitige Grünphase schneller passieren können. Diese Flexibilität verringert Staus, spart Zeit und schont die Umwelt durch weniger Leerlaufzeiten von Fahrzeugen an LSA.

Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen zur intelligenten LSA-Regelung, die alle das Ziel verfolgen, den Verkehrsfluss effizienter zu gestalten und Staus zu verringern. In den Richtlinien für LSA werden

Hauptmerkmale der Veränderbarkeit von Signalprogrammen unterschieden, welche von keinerlei Anpassung (Festzeitprogrammen) über Freigabezeitanpassungen, also bspw. der Verlängerung einer Grünphase, bis hin zur freien Veränderbarkeit des Signalprogramms reichen^[11].

Zu den mittlerweile „klassischen“ Methoden gehören adaptive Signalsteuerungssysteme wie SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique^[12]) und SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System^[13]), die bereits Anfang der 1980er Jahre folgende Art der Signalprogrammveränderung implementierten:

“The normal mode of coordination is real-time adjustment of cycle, split, and offset in response to detected variations in demand and capacity.”^[13]

Diese Systeme analysieren also kontinuierlich den Verkehr mithilfe von Sensoren und passen die Signalphasen dynamisch an die aktuelle Verkehrslage an. Dadurch können LSA flexibel reagieren, um Staus zu vermeiden und den Verkehrsfluss zu optimieren. SCATS wird beispielsweise in über 150 Städten weltweit eingesetzt und hat sich als effiziente Lösung für stark befahrene urbane Gebiete etabliert.

Darüber hinaus gibt es weitere kooperative Verkehrssysteme, die mehrere LSA zu einem Netzwerk verbinden. Diese oftmals zentral organisierten Systeme koordinieren die Steuerung über mehrere Knotenpunkte hinweg und ermöglichen eine bessere Synchronisation des Verkehrs, was zu einem insgesamt flüssigeren Verkehrsfluss führt. Erste Beispiele hierfür finden sich bereits in den anfänglichen 2000er Jahren in Städten wie Piräus oder Kopenhagen, wo bspw. Busse durch kooperative Systeme priorisiert werden^[14].

Moderne Systeme setzen zunehmend auf eine verbesserte Rechentechnik sowie zusätzliche Methoden wie KI, um die LSA-Regelung weiterzuentwickeln. Der

Fortschritt in der Rechentechnik erlaubt es anhand (komplexer) Modelle eine große Menge etwaiger Zukunftsszenarien in Echtzeit zu prognostizieren und evaluieren, um so die Signalprogrammbildung zu optimieren. Maschinelles Lernen ermöglicht dagegen die Analyse großer Datenmengen aus Echtzeit- und historischen Verkehrsinformationen zur Ableitung von passenden Steuerungsstrategien. Weitreichend trainierte Ansätze sind dabei unerlässlich, da sie nur so sichergestellt wird, dass auf seltene oder unvorhersehbare Ereignisse wie Unfälle oder kurzfristige Verkehrsüberlastungen vorteilhaft reagiert wird.

Eine aktuelle und sehr erfolgreiche Anwendung stellt das Pilotprojekt Schlosskreuzung dar, welches

durch die Projektpartner der Universität Paderborn, der Stadt Paderborn und den lokalen Unternehmen RTB GmbH & Co. KG und Stührenberg GmbH durchgeführt wurde^[2]. Durch Nutzung eines detaillierten digitalen Zwillings des städtischen Testverkehrsbereichs konnte ein modellprädiktiver Regelungsansatz sowohl simulativ als auch im Feld getestet werden. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in der folgenden Abbildung 4, angelehnt an^[15], dargestellt.

Das Spinnendiagramm stellt dabei für verschiedene Regelungsstrategien die Durchschnittswerte unterschiedlicher Kriterien wie Wartezeiten oder Emissionen (hier repräsentativ Feinstaub) anschau-

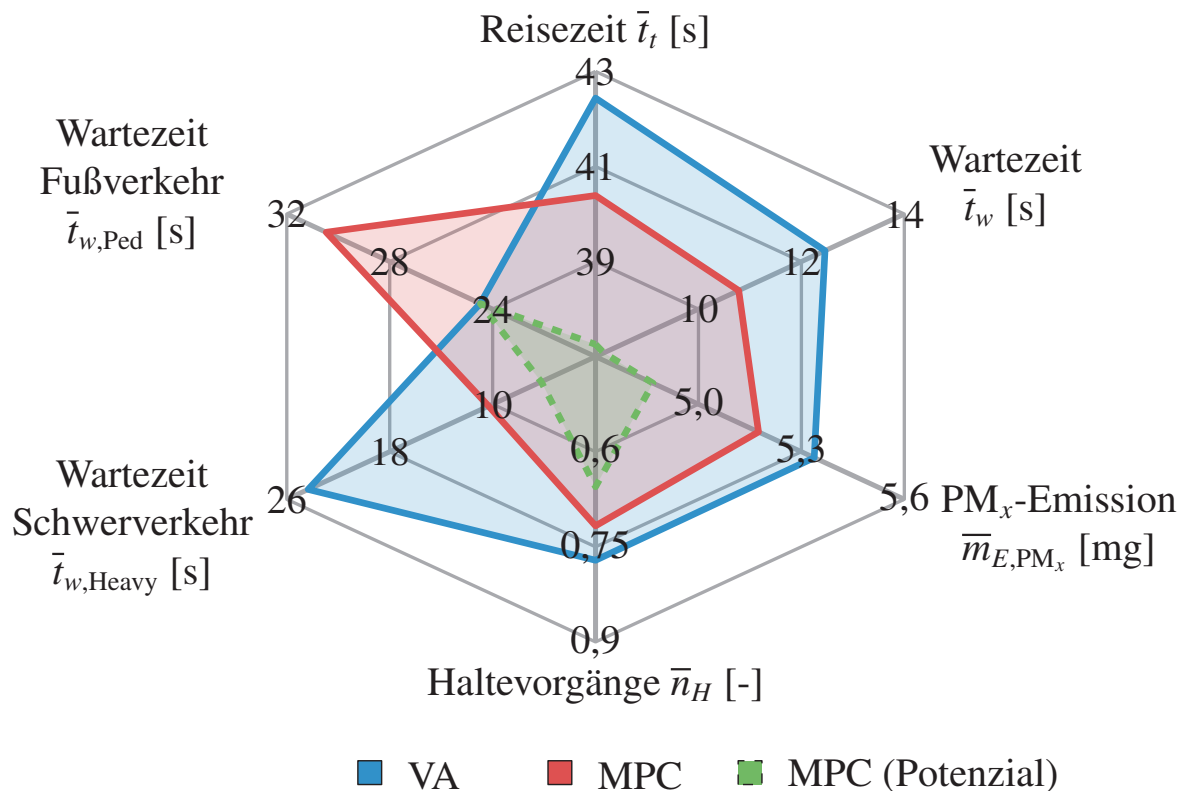


Abbildung 4: Vergleich der Feldergebnisse verschiedener Regelungsstrategien im PPS

lich gegenüber. Die erste verglichene Methode ist die etablierte verkehrsabhängige Freigabezeit-anpassung (VA), die bislang als Bestandsverfahren an den sechs beteiligten LSA eingesetzt wurde und deren Resultate im Feldtest aufgenommen wurden. Des Weiteren sind die Feldergebnisse der entwickelten modellprädiktiven Regelung mit den derzeitigen infrastrukturellen Rahmenbedingungen¹ aufgetragen. Zusätzlich sind zur Potenzialabschätzung die auf Basis der realitätsnahen Simulationen zu erwartenden Ergebnisse bei idealer² Kommunikationsinfrastruktur illustriert. Die bisherigen Ergebnisse zeigen insbesondere signifikante Ersparnisse in den Bereichen der Wartezeit (13 %), wobei explizit der Schwerverkehr anhand der MPC besser gehandhabt wurde als mit dem Bestandsverfahren. In Simulationen zeigte sich das volle Potenzial dieser Regelungsstrategie, welches durch die suboptimalen Rahmenbedingungen bei der Datenübertragung (s. Kapitel 4) im Feldtest noch nicht vollends ausgenutzt wurde.

Die vom Fraunhofer ISOB-INA in Lemgo entwickelte Ampelsteuerung nutzt als erstes regionales Beispiel Deep Reinforcement Learning, um den Verkehrsfluss zu optimieren. Dabei wird das System in einem Simulationsmodell trainiert und lernt durch viele Iterationen, welche Phasenfolgen der Ampelsteuerung den besten Verkehrsfluss erzeugen. Hochauflösende Sensoren erfassen in Echtzeit das Verkehrsgeschehen und liefern präzise Daten über die Anzahl der wartenden Fahrzeuge, ihre Geschwindigkeit und Wartezeiten. Diese Daten werden von selbstlernenden Algorithmen analysiert, die das optimale Ampelschaltverhalten ermitteln, um Staus zu reduzieren. In der Praxis soll dieser Algorithmus die Ampelschaltungen dynamisch an-

passen, mit dem Ziel kürzerer Wartezeiten und einer Reduktion von Lärm und CO₂-Emissionen. Diese innovative Technologie wurde an einer realen Kreuzung in Lemgo getestet, wobei eine durchschnittliche Reduktion der Reisezeit um etwa 10 % erzielt wurde^[16]. Eine vergleichbare weitere Umsetzung wurden in Ellwangen (Baden-Württemberg) gestartet. Das KI-basierte Projekt, das seit Juli 2024 läuft und die Schaltung von zwölf LSA anpassen soll, hat eine Implementierung aus London zum Vorbild, wo nach Einführung des Systems Yuttraffic FUSION eine Reduktion der Reisezeiten um bis zu 20 % und der Stopps um 15 % erreicht wurden^[17].

Zusammengefasst zeigen diese Anwendungen und Potenziale zur intelligenten LSA-Regelung, dass durch die Kombination von klassischen und modernen Technologien wie KI und V2X die Effizienz und Sicherheit des Verkehrs erheblich gesteigert werden können. Mit dem Fortschritt hin zu vernetzten und autonomen Fahrzeugen wird die Bedeutung solcher intelligenter Systeme in den kommenden Jahren weiterhin wachsen, insbesondere in Bezug auf die Reduktion von CO₂-Emissionen und die Verbesserung der urbanen Mobilität.

Auch mit Blick auf autonome Fahrzeuge spielen intelligente LSA zukünftig eine große Rolle und ebnen den Weg dieser neuen Technologie. Die potenzielle Interaktion von LSA und autonomen Fahrzeugen wird dabei nicht nur den Verkehrsfluss z. B. anhand der Übermittlung von Schaltprognosen verbessern, sondern auch die Sicherheit und Effizienz des gesamten Verkehrsnetzes verbessern. Ein anschauliches Beispiel sind Mitteilungen zum Bilden von Rettungsgassen o. Ä., welche direkt von den autonomen Fahrzeugen umgesetzt werden können.

¹ Die Kommunikationslatenzen des zentralen Verkehrsmanagementsystems (VMS) mit der LSA betrug insgesamt etwa 7 s, d. h. der Datentransfer von der LSA zum VMS und nach Berechnung der Stellsignale zurück zur LSA war entsprechend verzögert.

² Hier betrug die bidirektionale Verzögerung inklusive der Berechnungen weniger als 1 s.



4. Herausforderungen und Risiken

Die Einführung intelligenter LSA bietet zahlreiche Einsatzmöglichkeiten und Potenziale, bringt jedoch auch erhebliche Herausforderungen und Risiken mit sich, insbesondere im Hinblick auf Kommunikation und Vernetzung v.a. bei zentral organisierten Systemen. Dies sind Verkehrssysteme, bei denen alle Steuerungs- und Entscheidungsprozesse über eine zentrale Einheit oder Leitstelle koordiniert und überwacht werden. Im Gegensatz dazu treffen dezentrale Systeme eigenständige Entscheidungen vor Ort, bei denen einzelne Komponenten, wie LSA, auf lokale Sensoren und Datenquellen zurückgreifen.

Zentrale Steuerungssysteme ermöglichen vor allem einen guten Überblick eines gesamten Verkehrsbereichs, indem sie alle LSA über die zentrale Einheit verbinden. Falls eine solche Einheit auch Steuerungsentscheidungen basierend auf Echtzeit-Daten treffen soll, erfordert dies jedoch eine stabile, schnelle und sichere Datenübertragung. Verzögerungen oder Verbindungsabbrüche in diesem Kommunikationsprozess können den Verkehrsfluss erheblich beeinträchtigen, Staus verursachen oder sogar zu gefährlichen Situationen führen. Um diese Risiken zu minimieren, sind leistungsfähige Netzwerke unerlässlich. In vielen Regionen ist die digitale Infrastruktur jedoch nicht ausreichend entwickelt, was die Einführung und den Betrieb intelligenter LSA-Systeme verzögert oder erschwert.

Ein zentrales Thema bei der Kommunikation solcher Systeme ist demnach die Datenübertragungsqualität und -geschwindigkeit. Die Kommunikation zwischen den einzelnen LSA und der zentralen Leitstelle muss in Echtzeit erfolgen. Eine Verzögerung von nur wenigen Sekunden kann den Verkehrsfluss stören und die Effizienz des gesamten Systems untergraben. Insbesondere in urbanen Regionen mit hohem Verkehrsaufkommen ist eine stabile und latenzarme Kommunikation erforderlich, um auf schnelle Veränderungen im Verkehrsaufkom-

men reagieren zu können^[18]. Hier spielen moderne Netzwerktechnologien wie 5G eine entscheidende Rolle, da sie eine hohe Bandbreite und geringe Latenzzeiten bieten. Dennoch bleibt die Herausforderung bestehen, diese Infrastruktur flächendeckend auszubauen, insbesondere in ländlichen oder infrastrukturell benachteiligten Regionen.

Neben der Geschwindigkeit der Datenübertragung ist auch die Datensicherheit ein wesentlicher Aspekt, der bei der Implementierung zentral organisierter LSA-Systeme berücksichtigt werden muss. Da diese Systeme sensible Verkehrsdaten und Steuerungsinformationen verarbeiten, sind sie potenzielle Ziele für Cyberangriffe. Manipulationen oder Hacks könnten zu Verkehrschaos, Unfällen oder schweren Störungen des öffentlichen Lebens führen. Deshalb ist es unerlässlich, dass die Datenübertragung durch starke Verschlüsselungstechniken wie TLS/SSL oder VPNs geschützt wird. Besonders bei zentralen Systemen, die große städtische Verkehrsnetze steuern, könnten Angriffe auf das System verheerende Auswirkungen haben, da sie den gesamten Verkehrsfluss beeinflussen könnten.

Ein weiteres bedeutendes Hindernis bei der Implementierung intelligenter LSA-Systeme sind Datenschutzanforderungen, insbesondere in Ländern der Europäischen Union, in denen die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) strenge Vorschriften für die Verarbeitung personenbezogener Daten vorschreibt. Während in anderen Ländern, wie China, Kameras und invasive Technologien weit verbreitet sind, um Verkehrsüberwachung und -steuerung zu optimieren, sind solche Methoden in Europa stark reguliert und eingeschränkt. In vielen Fällen müssen alternative Technologien wie IoT-Sensoren, LIDAR oder Radar genutzt werden, um den Datenschutz zu gewährleisten. Diese Technologien sind jedoch oft komplexer und kostspieliger in der Implementierung, was zu höheren Anfangsinvestitionen führen kann. Ein Beispiel für

innovative und datenschutzfreundliche Lösungen ist das TOPO.box-System der Firma RTB, das auf Radar- und Infrarotsensoren basiert, um Bewegungen im Straßenverkehr zu erfassen, ohne personenbezogene Daten zu erfassen^[19]. Solche Systeme bieten eine vielversprechende Möglichkeit, Datenschutzanforderungen zu erfüllen, ohne auf Kameras oder andere invasive Technologien zurückzugreifen.

Ein zusätzliches Problem, das sich bei zentral organisierten LSA-Systemen ergibt, ist die Interoperabilität und Kompatibilität der eingesetzten Technologien. Unterschiedliche Städte oder Regionen verwenden häufig unterschiedliche Verkehrssysteme und arbeiten mit verschiedenen Anbietern, was die Integration zwischen bestehenden und neuen Systemen erschwert. Um eine reibungslose Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Systemen zu gewährleisten, sind standardisierte Kommunikationsprotokolle erforderlich. Wichtige Beispiele für solche Protokolle die sog. OCIT-Protokolle, die bspw. die Ansteuerung der einzelner Signalgeber festlegen (u. a. ^[20]) oder die Drahtlos-Standards IEEE 802.11p und C-V2X, welche bspw. in^[21] hinsichtlich ihrer Eignung für Platooning (siehe auch unser vorheriges Whitepaper^[22]) verglichen werden.

Nicht zu vergessen sind auch die rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen, die für den Betrieb intelligenter LSA-Systeme gelten, die in Deutschland bspw. vor allem über ^[11] geregelt werden. Neben den bereits erwähnten Datenschutzbestimmungen spielen auch Redundanz und Ausfallsicherheit eine Rolle. Da zentrale Steuerungssysteme eine Vielzahl von LSA steuern, könnte ein Ausfall der zentralen Einheit das gesamte Verkehrsnetz lahmlegen. Um dies zu verhindern, müssen Backup-Systeme und alternative Kommunikationswege etabliert werden. Die einzelnen LSA sollten bei entsprechendem Ereignis in der Lage

sein, autonom Entscheidungen auf Basis ihrer eigenen Sensordaten zu treffen. Dies gewährleistet, dass der Verkehr auch bei Netzausfällen weiter fließen kann und verhindert eine vollständige Unterbrechung der Verkehrssteuerung. Der generelle Umgang mit Verkehrssteuerungstechnologien erfordert daher nicht nur technisches Fachwissen, sondern auch ein tiefes Verständnis der rechtlichen Rahmenbedingungen, um Haftungsrisiken zu minimieren und den gesetzlichen Vorgaben zu entsprechen.

Zusammengefasst bringen intelligente LSA-Systeme erhebliche Vorteile in Bezug auf die Optimierung des Verkehrsflusses, die Reduzierung von Emissionen und die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Gleichzeitig erfordern sie jedoch umfangreiche Investitionen in moderne Netzwerktechnologien, Sicherheitsinfrastrukturen und datenschutzfreundliche Technologien. Die erfolgreiche Einführung dieser Systeme hängt von der Fähigkeit ab, technische und ethische Herausforderungen zu meistern, während gleichzeitig sichergestellt wird, dass die Kommunikation stabil, sicher und zukunftssicher gestaltet wird.

5. Fazit und Ausblick

Intelligente LSA bieten eine vielversprechende Lösung zur Optimierung des Verkehrs in Städten und zur Unterstützung einer nachhaltigen Verkehrswende. Durch die Integration moderner Sensortechnologien, Echtzeit-Datenverarbeitung und fortschrittlicher Kommunikationstechnologien wie V2X können intelligente LSA den Verkehrsfluss verbessern, Staus reduzieren und den CO₂-Ausstoß senken. Der Einsatz solcher Systeme ist besonders relevant angesichts der wachsenden Urbanisierung. Pilotprojekte, wie das Schlosskreuzungsprojekt in Paderborn, zeigen bereits, dass intelligente LSA das Potenzial haben, urbane Räume effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten.

Dennoch stehen die Einführung und der Betrieb dieser Systeme vor Herausforderungen: Die Notwendigkeit stabiler Kommunikationsnetzwerke, die Datensicherheit und der Schutz personenbezogener Informationen müssen gewährleistet werden. Zudem erfordern zentrale Steuerungssysteme leistungsfähige Infrastrukturen, insbesondere in Re-

gionen mit lückenhafter digitaler Abdeckung. Auch rechtliche und regulatorische Hürden wie Datenschutzbestimmungen spielen eine bedeutende Rolle, insbesondere in Europa.

Mit dem Fortschritt moderner Netzwerktechnologien wie 5G und der zunehmenden Verbreitung autonomer Fahrzeuge eröffnen sich wiederum neue Möglichkeiten für intelligente LSA. Die Verbindung der LSA mit Fahrzeugen, dem Fußverkehr und anderen Verkehrsteilnehmenden in Echtzeit ermöglicht ein vernetztes und dynamisches Verkehrsmanagementsystem. In der Zukunft könnten intelligente LSA nicht nur auf aktuelle Verkehrslagen reagieren, sondern auch präventiv auf kommende Verkehrsströme Einfluss nehmen, was die Effizienz weiter steigern und die Verkehrssicherheit erhöhen wird. Die erfolgreiche Implementierung derartiger intelligenter LSA benötigt daher einen Ansatz, der sowohl neueste technologische Innovationen als auch ethische und regulatorische Herausforderungen gleichermaßen berücksichtigt.



Literaturverzeichnis

- [1] Deloitte GmbH, Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035: Welche Veränderungen durch Robotaxis auf Automobilhersteller, Städte und Politik zurollen. [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/Innovation/datenland-deutschland-autonomes-fahren.pdf> (accessed: May 15 2024).
- [2] Universität Paderborn, Pilotprojekt Schlosskreuzung. [Online]. Available: <https://www.uni-paderborn.de/projekt/688> (accessed: Jan. 31 2025).
- [3] Stadt Digitale Heimat, Schlosskreuzung. [Online]. Available: https://www.paderborn.de/microsite/digitale_heimat/smart_city/Schlosskreuzung.php (accessed: Jan. 31 2025).
- [4] H. Gu, NXP, Volkswagen and Partners Continue to Accelerate the V2X Rollout. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/company/about-nxp/smarter-world-blog/BL-THE-V2X-ROLLOUT> (accessed: Feb. 3 2025).
- [5] AUTOCRYPT, „Vehicle-To-Everything: Current State and Future Prospects: V2X Deployment Progress in 2023 Prospect and Roadmap Beyond 2024,“ 2023.
- [6] C-ROADS Platform, „C-ITS Roadmap,“ 2024. [Online]. Available: https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-ROADS_C-ITS_Roadmap_v1.0.pdf
- [7] Vinotion, Intelligent video analytics, for urban mobility innovation. [Online]. Available: <https://vinotion.com/urban-crowds-and-traffic/visense/> (accessed: Jan. 31 2025).
- [8] GEVAS software GmbH, trafficpilot: RIDE THE GREEN WAVE. [Online]. Available: <https://www.trafficpilot.eu/> (accessed: Sep. 9 2024).
- [9] Be-Mobile - EN, Talking Traffic is the textbook example of how to bring major mobility projects to fruition - Infographic | Be-Mobile. [Online]. Available: <https://be-mobile.com/success-stories/talking-traffic-is-the-textbook-example-of-how-to-bring-major-mobility-projects-to-fruition-infographic-included> (accessed: Jan. 31 2025).
- [10] Monotch, Traffic Light Optimal Speed Advice Archives. [Online]. Available: <https://monotch.com/cases/traffic-light-optimal-speed-advice/> (accessed: Feb. 3 2025).
- [11] Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA: Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr, 2015th ed. Köln: FGSV Verlag GmbH, 2015.
- [12] P. B. Hunt, Di Robertson, R. D. Bretherton, R. I. Winton, Transport, and Road Research Laboratory, SCOOT: A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals: TRRL Urban Networks Division, 1981. [Online]. Available: <https://books.google.de/books?id=jUH6zAEACAAJ>
- [13] A. G. Sims and K. W. Dobinson, „The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits,“ IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 29, no. 2, pp. 130–137, 1980, doi: 10.1109/T-VT.1980.23833.

- [14] W. Brilon, T. Wietholt, and N. Wu, Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen: Abgrenzung von Einsatzbereichen von Grünen Wellen einerseits und verkehrsabhängiger Steuerung andererseits sowie Ableitung der zweckmäßigen Einsatzkriterien ; [Bericht zum Forschungsprojekt FE 77.4772004]. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, 2007.
- [15] K. Malena, „Konzipierung, Analyse und Realumsetzung eines mehrstufigen modellprädiktiven Lichtsignalanlagenregelungssystems,“ Heinz Nixdorf Institut, 2024.
- [16] Institut für industrielle Automation INA br / des Fraunhofer IOSB, Zukunft der Ampel wird weiter erforscht. [Online]. Available: https://www.iosb-ina.fraunhofer.de/de/aktuelles_news/2022/KI4LSA-Projektabschluss.html (accessed: Feb. 3 2025).
- [17] Baden-Württemberg.de, Land startet Testfeld mit KI-gesteuerten Ampeln. [Online]. Available: <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-startet-testfeld-mit-ki-gesteuerten-ampeln> (accessed: Feb. 3 2025).
- [18] K. Malena, C. Link, S. Gausemeier, and A. Trächtler, „Implementation and Results of a Multi-Stage Model Predictive Traffic Light Control System,“ in 2024 IEEE 27th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC): 24-27 Sept. 2024, Edmonton, CA, 2024.
- [19] RTB GmbH, TOPO Fahrzeugklassifizierungssysteme. [Online]. Available: https://www.rtb-bl.de/wp-content/uploads/RTB_TOPO-1.pdf (accessed: May 15 2024).
- [20] OCIT Developer Group (ODG), OCIT-LED. [Online]. Available: <https://www.ocit.org/de/ocit/schnittstellen/ocit-led/> (accessed: May 15 2024).
- [21] V. Vukadinovic et al., „3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios,“ Ad Hoc Networks, vol. 74, pp. 17–29, 2018, doi: 10.1016/j.adhoc.2018.03.004.
- [22] T. Harges, „Vernetztes Fahren in der Innenstadt: Vorteile, Herausforderungen und Kommunikationsstrategien,“ 2024. [Online]. Available: https://diserhub.de/wp-content/uploads/2024/09/ff-6f2799266bb4cfa4193c8ed7550d6ccaff-2024-09-06_DiSerHub-Whitepaper_Vernetztes-Fahren_UniPaderborn.pdf



Zuwendungsgeber:

Gefördert durch:



Förderkennzeichen: 16THB0004A

Laufzeit: 01.09.2022 – 30.06.2025

Projekträger:



VDI / VDE Innovation + Technik GmbH

5 Partner. 5 Standorte. 1 Netzwerk.



diserhub.de