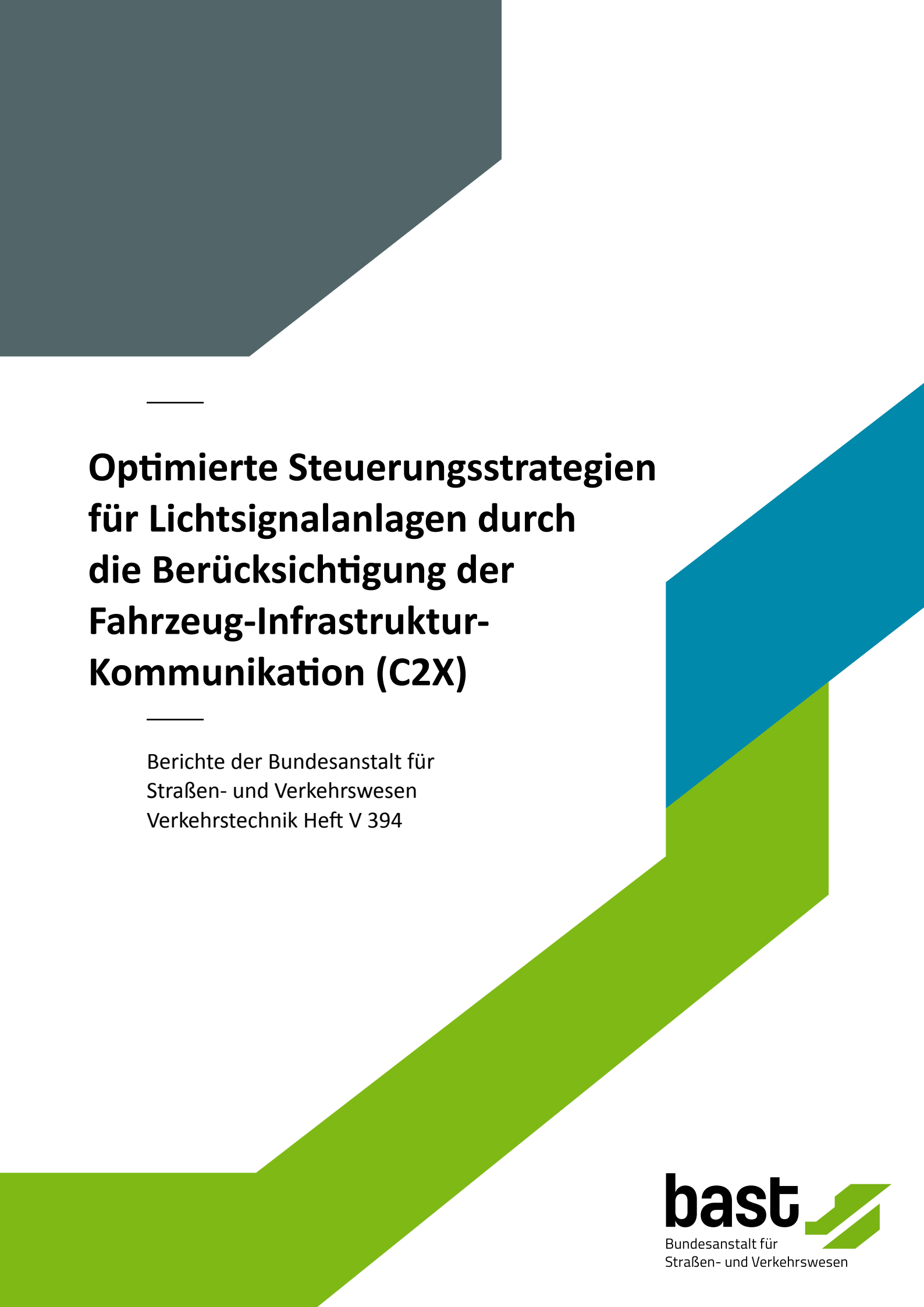




Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur- Kommunikation (C2X)

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 394

Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur- Kommunikation (C2X)

von

Tobias Schendzielorz, Paul Schneider, Matthias Künzelmann,
Natalie Sautter, Wolfgang Höger

Schlothauer & Wauer GmbH, München

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.0559

Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)

Fachbetreuung:
Jan Schappacher

Referat:
Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-839-3 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v394>

Bergisch Gladbach, März 2025

Kurzfassung – Abstract

Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)

Durch die C2X-Technologie, die aus dem Forschungsumfeld in die Städte einzuziehen beginnt, steht auch die Steuerung der Lichtsignalanlagen vor einem richtungsweisenden Evolutionsschritt. Die grundsätzliche Frage bei der Kommunikation der Fahrzeuge mit der Infrastruktur ist nicht mehr das Ob, sondern das Wann und das Wie. Es sind mehrere technische Wege denkbar, die wiederum unterschiedliche Auswirkungen auf die Städte und Kommunen haben. Zum einen kann die Durchsetzung der C2X-Kommunikation über den zukünftigen 5G-Mobilfunkstandard und die Ausrüstung der Lichtsignalanlagen mit entsprechenden Kommunikationsunits erfolgen, zum anderen ist es auch denkbar, die Lichtsignalanlagen mit Road Side Units (RSU) auszustatten, die eine Kommunikation der Fahrzeuge mittels ETSI ITS-G5 oder C-V2X mit den LSA-Steuergeräten ermöglichen. Beides hat Auswirkungen auf die Betreiber, Hersteller und Planer der Lichtsignalanlagen.

Durch die fortschreitende Digitalisierung eröffnen sich neue Datenquellen zur Detektion des Verkehrsgeschehens im Bereich von lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten. Diese technologische Entwicklung kann daher einen maßgeblichen Einfluss auf die Steuerungsverfahren haben. Das Nutzen dieser Möglichkeiten und die entsprechende Anpassung der Steuerungsverfahren ermöglicht es das Potential einer weitblickenden Anlage zu schöpfen und somit früher als bisher auf die Bedürfnisse des Verkehrsgeschehens zu reagieren. Es wäre ein Versäumnis die Verfahren nicht an die Möglichkeiten der neuen Datenquellen, welche C2X bietet, anzupassen und auf diesem Weg, zur Verbesserung des Verkehrsflusses in unseren Städten beizutragen. Daher ist es entscheidend die Steuerungsverfahren den neuen Begebenheiten anzupassen und mit der technologischen Evolution schrittzuhalten.

Eine Herausforderung ist es, diese neuen Möglichkeiten mit bestehenden Steuerungen in Einklang zu bringen, da nicht von hundertprozentiger Ausstattung des Fahrzeugbestands mit C2X-Technologie auszugehen ist. Aufgrund dieses Umstands wurden drei wichtige Voraussetzungen für die Erstellung einer C2X-LSA-Steuerung vorausgesetzt:

- Einfache Implementierung der C2X-Funktionen in bestehende Logiken
- Gleichbehandlung von C2X-Fahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen
- Anwendungsfälle/Komponenten sollen komplett in einer Logik umgesetzt werden können

Das Vorgehen des von der BAST finanzierten Projektes „Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)“ war wie folgt. Zunächst erfolgte die Einführung in den Stand der Wissenschaft und Technik. Es wurden mögliche LSA-Steuerungsverfahren erläutert und auf bereits existierende C2X-Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen näher eingegangen.

Basierend auf dieser Bestandsanalyse wurden bestehende Verbesserungspotenziale aufgezeigt und C2X Anwendungsfälle daraus abgeleitet. Die Anwendungsfälle flossen in ein neu entwickeltes Steuerungsverfahren ein. Dieses Verfahren stellt eine Evolution der Verkehrstechnik dar, weil die konventionelle Logik um eine C2X-Logik erweitert wurde. Die Auswirkungen der Einbeziehung von aktiv versendeten Fahrzeugdaten in die LSA-Steuerung auf den Verkehrsablauf wurde mittels mikroskopischen Verkehrsflusssimulation untersucht.

Für die Simulation wurden im Projekt drei Laborknotenpunkte ausgewählt außerorts (3-armig), innerorts (3-armig) und innerorts (4-armig). Nach der Erstellung einer als Vergleichspunkt geltenden Festzeit und einer verkehrsabhängigen Steuerung wurden neue C2X-Steuerungsfunktionen entwickelt. Diese Funktionen wurden im Anschluss in die Steuerungslogik eines jedes Laborknotens integriert und somit ein C2X-Steuerungsablauf umgesetzt. Die umgesetzten C2X-Steuerungen wurden im Anschluss unter unterschiedlichen Penetrationsraten und Verkehrsbelastungen in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation getestet, die Ergebnisse ausgewertet und miteinander verglichen. Es erfolgte eine Deutung der Ergebnisse und ein Ausblick/Empfehlung.

Grundsätzlich ist hervorzuheben, dass durch die Einbeziehung von C2X-Fahrzeuginformationen die beiden Auswertungskenngrößen, Halte und Verlustzeiten, für alle Knotenpunkte reduziert wurden. Die wichtigsten Ergebnisse können nach Penetrationsrate, Knotenpunktform und Verkehrsbelastung differenziert werden.

Es wurde gezeigt, dass bereits bei geringen C2X-Penetrationsraten signifikante Verbesserungen, im Hinblick auf Umweltbelastungen, durch eine Reduzierung von Halten, und Reisezeitverlusten, erreicht werden können. Hohe Penetrationsraten führten aufgrund der Vielzahl an Fahrzeuginformationen zu Verbesserungen mit einer Reduktion der Verlustzeit von bis zu 18 % und zu einer Reduktion der Halte von bis zu 26 %. Darüber hinaus kann gesagt werden, dass die Ergebnisse von der Knotenpunktform relativ unabhängig sind. Als entscheidender Punkt kristallisierte sich die Phasenanzahl heraus. Bei einer zweiphasigen Steuerung sind die Verbesserungen etwas geringer als im Vergleich zu einer dreiphasigen bzw. 7-phasigen Steuerung. Die Verkehrsbelastungen hatten einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Während sich bei einer hohen Verkehrsbelastung ähnliche Werte wie die einer Festzeitsteuerung bzw. geringe Verbesserungen gegenüber einer konventionellen verkehrsabhängigen Steuerung ergaben, kommt es mit stetiger Verringerung des Verkehrs zu einer immer größer werdenden Diskrepanz zwischen konventioneller verkehrsabhängiger Steuerung und C2X-Steuerung. Bei einer geringen Verkehrsbelastung konnte teilweise über ein Viertel der Halte im Vergleich zu einer konventionellen verkehrsabhängigen Steuerung vermieden werden.

Die Ergebnisse geben eine Richtung vor, welche Potenziale einer C2X-Steuerung unter Einbeziehung von C2X-Daten möglich wären. Da es sich um einen Steuerungszusatz handelt, der an- und abgeschaltet werden kann, ist dieses flexibel einsetzbar. Des Weiteren ist das erstellte Verfahren bereits jetzt in bestehende Steuerungen implementierbar und somit auf der Straße testbar. Die Ergebnisse des Projektes schließen somit die Lücke zwischen der Theorie über mögliche Einsatzzwecke der C2X-Daten und einem Praxistest auf der Straße.

Optimized traffic lights control strategies by considering Vehicle-to-Infrastructure Communication (V2X)

As a result of V2X technology, which is slowly beginning to move from the research environment into cities, the control of traffic signals is also facing a trend-setting evolutionary step. The fundamental question in V2I (Vehicle to Infrastructure) is no longer *whether*, but *when* and *how*. Several technical paths are possible, which in turn have different implications for cities and municipalities. On the one hand, V2X communication can be enforced via the future 5G mobile radio standard and the equipment of traffic signal systems with corresponding communication units; on the other hand, it is also conceivable to equip the traffic signal systems with roadside units (RSU) that enable vehicles to communicate with the traffic light control units using ETSI ITS-5G or C-V2X. Both have implications for the operators, manufacturers, and planners of traffic signal systems.

Advancing digitalization opens new data sources for detecting traffic events in light signal-controlled intersections. This technological development can therefore have a significant influence on control procedures. Taking advantage of these opportunities and the corresponding adaption of the control procedures make it possible to draw on the potential of a far-sighted system and thus respond to traffic needs earlier. It would be a failure not to adapt the procedures to the possibilities of the new data sources offered by V2X and thus contribute to the improvement of the traffic flow in our cities. Therefore, it is crucial to adapt the control procedures to the new circumstances and to keep up with the technological evolution.

It is a challenge to harmonize these new possibilities with existing control systems, as it cannot be assumed that the vehicle fleet will be one hundred percent equipped with C2X technology. Due to this circumstance, three important prerequisites for the creation of a C2X LSA control system were assumed:

- Easy implementation of C2X functions in existing logics.
- Equal treatment of C2X vehicles and conventional vehicles
- Use cases/components should be able to be implemented completely in one logic

The procedure of the BAST-funded project "Optimized control strategies for traffic signals by considering vehicle-infrastructure communication (C2X)" was as follows. First, an introduction to the state of the art in science and technology was given. On the one hand, possible control methods were explained and existing V2X control strategies for traffic signals were discussed in more detail.

Based on this state-of-the-art analysis, existing improvement potentials were identified and V2X use cases were derived from them. The use cases were incorporated into a newly developed control procedure. This procedure represents an evolution of traffic engineering because V2X logic was added to the conventional logic. The effects of the inclusion of actively sent vehicle data in the traffic signal control on the traffic flow were investigated by means of microscopic traffic flow simulation.

For the simulation, three laboratory intersections were selected in the project: extra-urban (3-armed), intra-urban (3-armed) and intra-urban (4-armed). After the creation of a fixed time and traffic actuated control, which was used as a point of comparison, new V2X control functions were developed. These functions were then integrated into the control logic of each intersection, thus implementing a V2X control flow. The implemented V2X controls were then tested under different penetration rates and traffic demand in a microscopic traffic flow simulation and the results were evaluated and compared. The results were interpreted, and an outlook/recommendation was made for the implementation of the

Basically, it should be emphasized that by including V2X vehicle information, the two evaluation parameters, stops and the lost times for all intersections, were reduced. The most significant results could be differentiated by, penetration rate, intersection shape and traffic demand. It was shown that even at low V2X penetration rates, significant improvements can be achieved in terms of environmental impacts by reducing stops and travel time losses. High penetration rates led to improvements of up to 18% reduction in lost time and up to 26% reduction in stops due to the large amount of vehicle information.

In addition, it can be said that results are relatively independent from the shape of the intersections. The number of phases emerged as a decisive point. With a two-phase control, the improvements are rather smaller than in comparison with a three-phase or 7-phase control. The traffic demand had a major impact on the results. While with a high traffic demand, values like those of a fixed-time control or small improvements to a conventional traffic-actuated control are obtained, with a steady decrease in traffic, there is a widening discrepancy between conventional traffic-actuated control and V2X control. With a low traffic demand, in some cases more than a quarter of the stops could be avoided compared to conventional traffic-dependent control.

The results provide direction on the potential of a V2X control involving V2X data. Since it is a control add-on that can be switched on and off, it can be used flexibly. Furthermore, the created process can already be implemented in existing controls and can therefore be tested on the road. The results of the project thus close the gap between the theory about possible uses of the V2X data and a practical test on the road.

Summary

Optimized traffic lights control strategies by considering Vehicle-to-Infrastructure Communication (V2X)

1 Context and procedure

For years, if not for decades, the control procedures for traffic lights have followed the same pattern. Thanks to the communication technology for vehicles and the infrastructure (V2X), that begins to evolve from the research environment into the cities, the control of the traffic lights is also about to take a trend-setting evolutionary step.

In addition, it is the case for many German cities, that air pollution levels currently determine their transport policies. The simultaneously growing population and the associated increase in mobility make it necessary to introduce new developments within the transport infrastructure with the aim of reducing emissions. For the motor vehicle traffic, a key measure for this is to ensure a steady traffic flow.

The necessary digitalization of our society is an irreversible process, that has been going on for many years. In the field of road traffic technology, digitization is determined by several developments:

- Increasing possibility of vehicles communicating with the infrastructure
- Development and expansion of the short-range communication and the 5G cellular standard
- Implementation of important development stages on the way to autonomous driving

The fundamental question for communication between vehicles and the infrastructure is no longer if, but when and how. There are several technical ways conceivable, which have in turn different effects on the cities and municipalities. On the one hand, V2X communication can be implemented using the future 5G cellular standard and the light signal systems can be equipped with appropriate communication units; on the other hand, it is also conceivable to equip the light signal systems with Roadside Units (RSU) for short range communication, that enable vehicles to communicate using ETSI ITS-G5 or C-V2X with traffic light control units. Both have an impact on the operators, manufacturers, and planners of the traffic light systems, while the information available stays independent from the used communication channel.

The advancing digitization opens new data sources for the detection of traffic events in light signal-controlled intersections. This technological development can become a significant influence on the control methods. Facilitating these options, in line with the corresponding adjustments of the control methods make it possible to exploit the potential of a far-sighted system and thus to respond to the needs of traffic situations earlier than a conventional detection. It would be a missed opportunity not to adapt the procedures to the possibilities of new data sources, that V2X offers, to contribute to improving the flow of traffic in our cities. Therefore, it is crucial to adapt the control procedures to the new circumstances and to keep pace with technological evolution.

It is a challenge to reconcile these new possibilities with existing controls, since the vehicle fleet cannot be assumed to be one hundred percent equipped with V2X technology in the near future. Due to this fact, three important prerequisites for the creation of a V2X-traffic light control were assumed:

- Easy implementation of the V2X functions in existing logics
- Equal treatment of V2X vehicles and conventional vehicles
- Use cases/ components should be able to be implemented completely in a logic

The main objective of the research project "Optimized control strategies for traffic signal systems by considering Vehicle-to-Infrastructure communication (V2X)" was to analyze the potential of V2X information and to develop control functions and strategies for signalized intersections based on it. The effects on the traffic flow from including actively transmitted vehicle data into the traffic signal control were investigated by means of microscopic traffic flow simulation. Furthermore, it was assumed that significant improvements in terms of environmental impact can already be achieved at low V2X penetration rates by reducing stops and travel time losses.

In the project, at first new V2X control functions are developed, which make it possible to process the CAM messages sent by the vehicles. These functions were then integrated into the control logic and thus a V2X control flow was implemented. The new V2X logic was implemented for three laboratory-intersections, one interurban (3-armed) and two urban (3-armed and 4-armed). The implemented V2X controls were

subsequently tested under different penetration rates and traffic demand in a microscopic traffic flow simulation and the results were evaluated and compared.

2 The newly developed V2X control

A decisive component of the project was the design of new control procedures and the integration of V2X data into the control of the traffic signal system. The fact, that current individual vehicle data can be accessed in real time opens new possibilities for existing control procedures.

A complete penetration rate of V2X technology across all road users or ensuring system availability will be difficult to master. For this reason, it seems reasonable to use existing traffic light control to demonstrate the potential of this additional information and to establish new innovative procedures, i.e., by using new traffic characteristics based on V2X technology, existing control systems can be improved, and their control potentials can be extended. The new functions and control concepts serve to reduce the number of stops and thus also the impacts of accelerations and decelerations. The basic ideas of the proven traffic-actuated control, the use of stages and stage transitions, the green time extension of stages and the request of stages and their switching, are still applied.

Basically, the following improvements are possible:

- Anticipatory stage request
- Adjusted green time termination and dynamic green time extension
- Traffic-adaptive stage sequencing

The basis for the new V2X control decisions is the estimated time of arrival (ETA) of the vehicles at the stop line. This value is recalculated every second for each vehicle based on the vehicle's position and speed. Furthermore, information is derived every second with the help of higher-order functions and is available for control decisions. A target stage in this context is a stage that is not currently active, but for which there is a demand. The detection range of the functions was limited to 300 m by a parameter in the logic. This is intended to simulate a realistic reception range of a RSU at a node.

For the authors, it was of crucial importance to enable a control procedure, that is comprehensible and understandable for the user, i.e. the projecting traffic engineer, the control unit manufacturer and the municipality. It was assumed that this would significantly increase the likelihood of the concept being used compared to a "black box procedure".

The procedure must be able to cope with "conventional" data sources (classic detection technologies) as well as with "new" data sources (CAM messages directly from the vehicle). The procedure must still control traffic even if no vehicle is actively sending data. The procedure should also be able to map low penetrations and weight V2X vehicles and conventional vehicles similarly.

The previous approach of structuring control in stages has not been abandoned. The traffic engineering approaches to traffic control, such as the preferential treatment of traffic flows, will still be guaranteed.

The following components are distinguished within the sequential processing of the control logic:

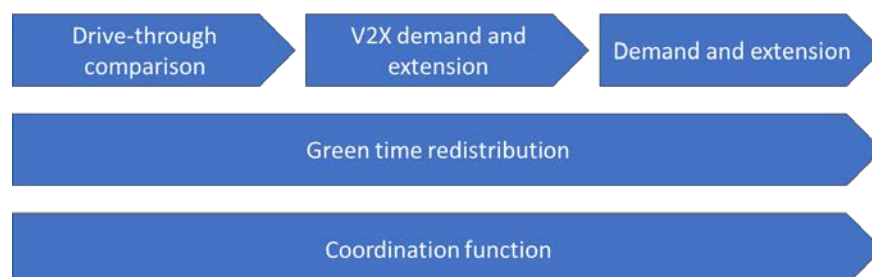


Figure 1: Sequential and parallel processing of the control logic

The drive-through comparison, the V2X request and the conventional request are processed sequentially. In principle, the green time redistribution and the coordination functions are active or considered during the entire logic processing.

Drive-through comparison

Comparison of the number of vehicles still passing through in the remaining stage duration on all lanes, considering the time demand value control (clearance time extension), with the number of possible passages on the respective lanes of all target stages, considering the duration of the stage transition, the queuing vehicles (congestion reduction), and a visual lead time. If the number of passing vehicles in a target stage is greater than that in the current stage, the current stage is aborted and the system switches to the respective target stage. This applies irrespective of a currently existing clearance time extension of the current stage (both conventional and based on time demand value control). Otherwise, the system remains in the current stage.

V2X-demand and extension

Basically, before a stage change, it is checked whether the current stage should be extended. For this purpose, both the conventional time gap control and the new time demand value control are considered. If no extension of the current stage is demanded or the maximum stage duration (or the end of the extension range in the case of coordinated controls) has been reached, a check is made of the passages of all potential target stages. A change is made to the stage where more passages are possible. Again, all lanes of the target stages, the duration of the stage transitions, as well as queuing vehicles (congestion relief) and a visual advance are considered. In the case of a V2X request, an attempt is always made to initiate the stage transition with pinpoint accuracy. The stage change should be started at the moment when the stage transition (or the start of green in the stage transition) including the visual lead corresponds to the remaining travel time of a vehicle in a requested stage. This allows the vehicle to pass the intersection without stopping and at the same time it does not lead to an unnecessarily early change into the requested stage.

Demand and extension

In the last step, the conventional stage request is made to enable conventional vehicles as well. A stage change takes place in a predefined sequence depending on the requested stages, with a green time assessment first taking place in the current stage. Here, too, both conventional extension and sizing based on the mean time demand value extension are considered.

Green time redistribution

Based on the detected vehicles, the necessary duration of the stages from the secondary approaches is calculated and, if possible, time savings are distributed to other stages. In this process, the duration of the main direction stage is not reduced in principle. Stage durations can also be redistributed between secondary- direction stages. To minimize a possible error in the case of over- or under-proportional conventional vehicles here as well, the green time redistribution is only recommended at a penetration rate of 70% or above.

Coordination function

Traffic flows are expected in a predefined time window in the conventional control system. This is mapped by the frame plans in the control system. The coordination function detects the arrival of a traffic flow that arrives earlier than predefined in the frame plans. Accordingly, the coordination function adjusts the start of the green time at the node. The frame plans can thus be modified according to the improved perception of the traffic situation by the information of the V2X vehicles. Thus, a variable start of the green time is made possible in coordinated control systems.

3 Effectiveness of V2X control over standard control

Within the scope of the project, various control components were developed at three intersections and one coordination route to cover predefined use cases. The control components V2X request, V2X extension, passage comparison, green time redistribution and coordination functions were investigated regarding their application possibilities, application limits and parameterisation and integrated and tested in a microscopic traffic flow simulation depending on the penetration rate and utilization levels.

It could be shown that the use of the CAM messages of the vehicles in the traffic control has a clear positive effect on the traffic flow. Besides the intersection traffic volume, especially the penetration rate has a decisive influence on the results. Basically, it can be stated that even at low penetration rates, up to 5% of stops could be saved. With increasing penetration rates, the number of stops could be reduced by more than 25% in some cases. At the same time, it can be observed that the loss times also decrease minimally at low penetration rates (2%) and increase by up to 10% in individual cases. At high penetration rates, the loss times could be reduced by up to 10%.

Looking at the penetration rates, it becomes apparent that the control components can be divided into two groups. The group which can be used independently of a penetration rate includes the two components V2X demand and V2X extension. Sensitivity analyses and the results of the simulation showed a positive effect of the two modules already at low penetration rates up to full vehicle equipment. The two components can bring forward the onset of green time or extend the green time due to the enhanced detection capability. These slight interventions in the control system led to the penetration-independent recommendation. The other group consists of the components green time redistribution, passage comparison and coordination functions. These functions have a relatively strong impact in the control system, which is why the proportion of V2X vehicles sending CAM messages must be sufficiently large for the decisions to be made so that the conventional vehicles are not discriminated against or so that the traffic situation is not misinterpreted by the components due to a small number of V2X vehicles. The threshold, for activating these components, was assumed to be well suited with 70% penetration rate. Further investigations could be carried out here to determine the optimal penetration rate.

The traffic demand also has a great influence on the results of the simulation. First, it can be observed that as the traffic demand decreases, the number of stops and the lost time decrease. This decrease can be explained as follows: The V2X control system can be very flexible and predictive in distributing the green times to the arriving vehicles. As the number of vehicles increases, the green time can be distributed less flexibly. This leads to a progression of the green time durations, which is why there is a small margin to avoid stops. This flexible green time distribution also includes stage swapping. This stage swap promotes low loss times by reducing stops at low load factors. As traffic volumes increase, this component leads to greater transition times, due to the unfavorable stage sequence, and thus to increasing holds or loss times. For this reason, the stage swap is no longer executed from a high traffic volume and a classically optimized stage sequence is executed.

The control parameter "average time demand value" depends on the capacity utilization. A high demand value leads to a generous green time assessment at the expense of waiting vehicles. If the traffic demand is low, the effect of the assessment on a few waiting vehicles is manageable. However, if the traffic demand increases, a high average time demand value has the effect, that the green time is extended by a few requesting vehicles with large distances at the expense of many waiting vehicles. The number of vehicles per green time is thus reduced. This in turn is reflected in an increase in lost time or an increase in the number of stopping vehicles. Therefore, different time demand values were chosen for the different traffic demand factors. For load factors lower than 0.5, an average time requirement value of 5.2 s was applied. For higher load factors, a time demand value of 3.0 s was used. Following on from this research project, further investigations are to be carried out to determine an optimum time requirement value adapted to the traffic demand. A summary of the identified parameters and limit values is shown in Figure 3-1

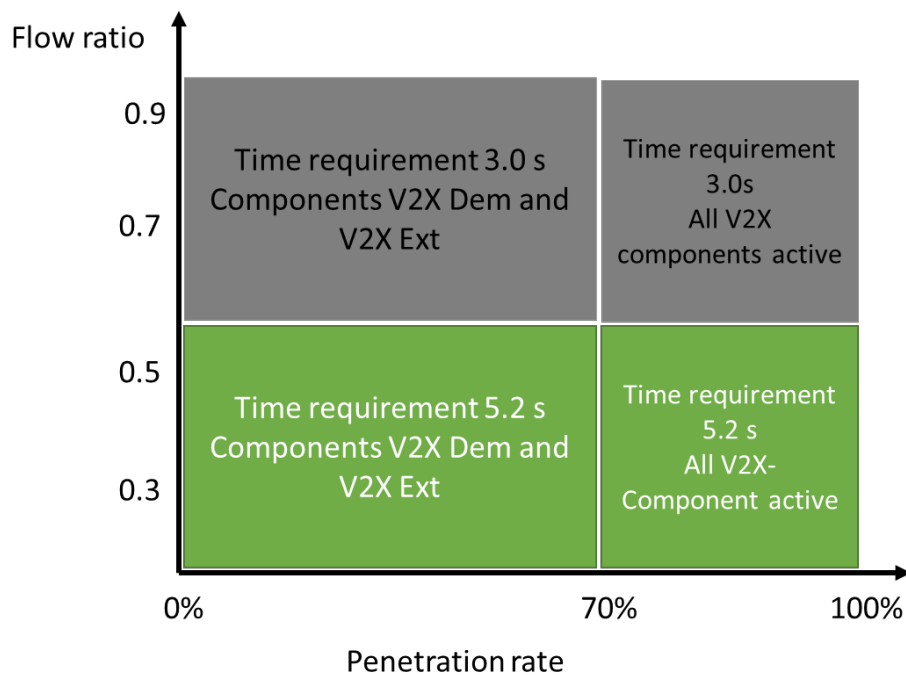


Figure 3-1: Identified parameterisation matrix

4 Summary

Besides the remaining need for research, possibilities are already available today to use vehicle information sent via CAM messages in traffic-actuated control systems and to test the effects. Actual implementation in commercial control units is also nearing completion. Even though high penetration rates will not be available for several years, some functions are already applicable at very low penetration rates and lead to improvements. Lastly, it remains to be pointed out that CAM-like vehicle information transmitted to local controllers via a traffic control center can be used in the same way.

The general networking of vehicles with each other and with the infrastructure has several positive effects. Not only control, but also safety and the free flow of traffic on the route pave the way for highly automated driving. A V2X control system is only one component of this overall system. While upgrading the existing control system, it is possible to upgrade nodes, including their control units, with V2X capability. The functions developed in this project can be easily implemented in this course, so that the costs for a new control system are relatively low. A first potential assessment of an implementable, rule based V2X control system has been realized in this project. However, the full potential has not yet been explored and there are still numerous optimization approaches. The authors see a need for further research in this area. The future of connected driving will enable new chances for solutions in all areas.

Inhalt

Abkürzungen	14
1 Einleitung	16
2 Stand der Wissenschaft und Technik	17
2.1 Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen	17
2.1.1 Kategorisierung der Verfahren und Einordnung des neuen Ansatzes	17
2.1.2 Grundbegriffe der LSA-Steuerung	19
2.1.3 Herkömmliche Detektionstechnologien	20
2.1.4 Eingriffsmöglichkeiten verkehrsabhängiger Steuerungsverfahren	22
2.2 Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen mit Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation	25
2.2.1 Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation	25
2.2.2 Kooperative Lichtsignalanlagensteuerung	28
2.2.3 Forschungsprojekte und Studien	30
2.2.4 Einsatzfahrzeug-Priorisierung in Deutschland	34
3 Konzeption und Umsetzung der neuen Steuerungsverfahren	37
3.1 Neue C2X-Steuergerätefunktionen	37
3.1.1 Grundfunktionen	38
3.1.2 Höherwertige Funktionen und Steuerungsgrößen	39
3.2 Verbesserungspotenziale und C2X Anwendungsfälle	40
3.2.1 Optimierung der Phasenanforderung	40
3.2.2 Optimierung der Freigabezeitbemessung	42
3.2.3 Aktive Freigabezeitumverteilung	44
3.2.4 Variable Auswahl der Zielphase	45
3.2.5 Abbruch der Bemessungsphase	46
3.2.6 Freigabebeginn in koordinierten Steuerungen	47
3.3 Das C2X-Steuerungsverfahren – Umsetzung der Anwendungsfälle	48
3.3.1 Anforderungen an ein Steuerungsverfahren mit C2X-Elementen	48
3.3.2 Erläuterung des Grundprinzips der Bestandslogiken/-steuerungen	48
3.3.3 Erläuterung der Logikansätze für die C2X-Funktionen	50
3.4 C2X-Steuerungsalgorithmus	52

3.4.1	Steuerungsablauf	52
3.4.2	Durchfahrtenvergleich	53
3.4.3	C2X-Anforderung und Bemessung	53
3.4.4	Anforderung und Bemessung	54
3.4.5	Freigabezeitumverteilung	55
3.4.6	Parameter der C2X-Logik	55
3.5	Einsatzfahrzeug-Priorisierung	56
3.5.1	Grundprinzipien	56
3.5.2	Funktionen	57
3.5.3	Erweiterung der Phasenlogiken	58
3.5.4	Einsatzfahrzeug-Phasen	60
3.6	Umsetzung der Steuerung im Verkehrsingenieursarbeitsplatz LISA	61
3.6.1	Realisierung der C2X-Funktionen	61
3.6.2	Anwendung der C2X-Funktionen	62
3.6.3	Validierung der Steuerungslogik	62
4	Aufbau Simulationsmodell	63
4.1	Laborknotenpunkte	63
4.1.1	Außerorts Knotenpunkt (3-armig)	64
4.1.2	Innerorts Knotenpunkt (4-armig)	55
4.1.3	Innerorts Knotenpunkt (3-armig)	68
4.1.4	Koordinierter Streckenzug (vier Knotenpunkte)	70
4.2	Aufbau der Laborumgebung	71
4.2.1	Abbildung der Laborknotenpunkte	72
4.2.2	Abbildung der C2X-Fahrzeuge und Integration in die Steuerung	73
4.2.3	Anzahl der Simulationsläufe	76
4.2.4	Definition und Umsetzung der Szenarien	77
4.3	Abbildung der Einsatzfahrzeuge für Szenario 4	79
5	Wirksamkeit der C2X-Steuerung gegenüber Standardverfahren	80
5.1	Szenario 1: Informierte Verkehrsteilnehmer	80
5.2	Szenario 2: Optimierte Steuerungsstrategie durch die Einbeziehung der verbesserten Detektion von Fahrzeugen	82
5.2.1	Ergebnisse Knoten außerorts (3-armig)	83
5.2.2	Ergebnisse Knoten innerorts (3-armig)	87
5.2.3	Ergebnisse Knoten innerorts (4-armig)	90

5.3	Szenario 3: Optimierte Steuerungsstrategie durch die Einbeziehung der verbesserten Detektion von Radfahrern	93
5.4	Szenario 4: Einsatzfahrzeug-Priorisierung	94
5.5	Szenario 5: Kombination von Szenario 2 und 3	95
5.5.1	Ergebnisse Knoten innerorts (4-armig)	95
5.5.2	Ergebnisse Koordinierter Streckenzug	98
5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	100
6	Ergebnisse und Resümee	102
6.1	Fazit der Simulationsergebnisse	102
6.2	Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit	104
6.3	Schlusswort	107
	Literatur	108
	Bilder	110
	Tabellen	112
	Formeln	113
	Anhang	114
A	Knoten 1 Außerorts (3-armig)	114
A.1	Lageplan	114
A.2	Steuerung	115
A.3	Belastungsszenarien und Signalzeitenpläne mit HBS-Bewertung	116
B	Knoten 2 innerorts (4-armig)	124
B.1	Lageplan	124
B.2	Steuerung	125
B.3	Belastungsszenarien und Signalzeitenpläne mit HBS-Bewertung	126
C	Knoten 3 innerorts (3-armig)	134
C.1	Lageplan	134
C.2	Steuerung	135
C.3	Belastungsszenarien und Signalzeitenpläne mit HBS-Bewertung	136

Abkürzungen

AVF	Automatisierten und Vernetztes Fahren
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CALM	Communication Access for Land Mobile
CAM	Cooperative Awareness Message
CEN	Comité Européen de Normalisation
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAS	Fahrerassistenzsystem (aus dem Englischen „Driver Assistant System“)
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCD	Floating Car Data
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Fz	Fahrzeug
GLOSA	Green Light Optimal Speed Advisory
GPS	Global Positioning System
HR	Haupttrichtung
ID	Identifikator
ISO	Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transportation System
IV	Individualverkehr
IVS	Intelligente Verkehrssysteme
LED	Licht emittierende Diode
LSA	Lichtsignalanlagen
LTE	Long Term Evolution
MAP	keine eigentliche Abkürzung; Nachricht, die die Topologie des Knotens beschreibt
MAPEM	MAP Extended Message
MIV	motorisierter Individualverkehr
NMIV	nichtmotorisierter Individualverkehr
NR	Nebenrichtung
OCIT	Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PÜ	Phasenübergang
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RSU	Road Side Unit
SPaT	Signal Phase and Timing Message
SPaTEM	Signal Phase and Timing Extended Message
SREM	Signal Request Extended Message

SSEM	Signal Status Extended Message
TU	Umlaufzeit
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
ZZ	Zwischenzeit

1 Einleitung

Durch die Entwicklung moderner und leistungsfähiger kabelloser Kommunikationstechnologien werden seit mehr als 20 Jahren technisch Lösungen und Möglichkeiten der Vernetzung von Fahrzeug mit der Straßeninfrastruktur erforscht. Langsam hält diese C2X-Technologie Einzug in die Steuerung des Verkehrs in unseren Städten. Das Hauptziel dieses Projektes besteht darin, das Potential von C2X-Informationen zu analysieren und darauf aufbauend Steuerungsfunktionen für signalisierte Knotenpunkte zu entwickeln. Durch die C2X-Informationen ist es möglich, den Wahrnehmungshorizont der Lichtsignalanlage (LSA) im Gegensatz zu den herkömmlichen Detektionsmöglichkeiten zu erweitern. Es soll untersucht werden, wie sich unter Nutzung von C2X-Technologien kurz- bis mittelfristig der Verkehrsablauf verbessern lässt. Hierzu wird zunächst eine Analyse der derzeitigen Steuerungsverfahren und Resultate aus der Forschung durchgeführt. Ausgewählte Knotenpunkte und Straßenzüge werden mikroskopisch mit der bestehenden Steuerung und einer neu zu entwickelnden Steuerungslogik, die die Daten aus der C2X-Kommunikation einbezieht, simuliert. Es werden unterschiedliche Verkehrsbelastungen, Ausstattungsraten und Szenarien der Informationsverarbeitung berücksichtigt. Die verkehrliche Wirkung der bestehenden Steuerungen und der neuen Verfahren werden miteinander verglichen. Des Weiteren werden wirtschaftliche Aspekte der technisch möglichen Umsetzung berücksichtigt. Die Ergebnisse des Projektes sind neue Funktionen zur lokalen regelbasierten Steuerung von Lichtsignalanlagen, welche die zusätzlichen C2X-Informationen mitberücksichtigen. Die Studie zielt nicht darauf ab, neuartige modellbasierte Steuerungsverfahren zu entwickeln. In Bezug auf den ÖPNV und die C2X-Technologie sei auf das Forschungsprojekt „Nutzung des C2X-Kommunikationsstandards IEEE 802.11p für die ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten“ (03.0553) der BAST verwiesen. Der ÖPNV findet daher in der vorliegenden Studie keine Betrachtung. Die entworfenen Steuerfunktionen werden der konventionellen Herangehensweise gegenübergestellt. Chancen und Handlungsempfehlungen für einen Ausbau der C2X-Kommunikation und die Priorisierung des Ausbaus in Deutschland werden erarbeitet.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen

2.1.1 Kategorisierung der Verfahren und Einordnung des neuen Ansatzes

Lichtsignalanlagen (LSA) werden zur Steuerung des Verkehrsablaufs an plangleichen Knotenpunkten eingesetzt, um zum einen bei wechselnder Freigabe des Konfliktbereichs in der Kreuzung die Verkehrssicherheit und zum anderen die Verkehrseffizienz durch die optimale Dauer der Freigabezeit für die einzelnen Verkehrsströme zu gewährleisten. Die in Konflikt stehenden Verkehrsströme können somit zeitlich entkoppelt werden. Neben Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz rückt derzeit immer mehr auch die Vermeidung von verkehrsbezogenen Emissionen durch die Steuerung des Verkehrs in den Fokus.

Entsprechend den Richtlinien der Lichtsignalsteuerung (RiLSA) (FGSV, 2015) werden unterschiedliche Kriterien für die Zielerreichung durch den Einsatz von LSA genannt. Die Steuerung des Verkehrs ist notwendig zum Schutz des nichtmotorisierten Individualverkehrs (NMIV) und zur Reduzierung von Unfallschwerpunkten bei Missachtung von Vorfahrt, unübersichtlichen Knotenpunkten oder überhöhten Geschwindigkeiten. Eine Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs wird durch die Reduktion von Wartezeiten für nachgeordnete Verkehre oder durch die Kontinuität des Verkehrsflusses im Rahmen Grüner Wellen erreicht. Die Qualität des Verkehrsflusses lässt sich nicht nur für den motorisierten Individualverkehr (MIV) verbessern, sondern auch für weitere Nutzergruppen wie z. B. den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) durch den Einsatz von gesonderter Beachtung und Beschleunigung dieser Fahrzeuge. Effektiv ist für alle Verkehrsteilnehmer eine Verbesserung durch den Einsatz von LSA-Steuerungen möglich. Weiterhin findet die LSA in Sonderfällen ihre Anwendung wie z. B. durch Pfortnern zum Schutz vor Überlastung von einzelnen Netzbereichen oder durch Zuflussregelung auf Schnellstraßen.

Laut RiLSA beschreibt ein Verfahren zur Steuerung des Verkehrs mittels einer LSA den Ablauf eines Signalprogramms. Ein Signalprogramm umfasst hierbei die Art der Steuerung sowie den Umfang und das Zusammenspiel von anpassbaren Steuerungsgrößen und Signalprogrammelementen.

Die eingesetzten Steuerungsverfahren können nach dem räumlichen Einsatzbereich der verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen eingeteilt werden. Es werden drei Ebenen unterschieden:

- Punktsteuerung → der isolierte Knotenpunkt mit LSA
- Liniensteuerung → die Grüne Welle auf einem Streckenzug
- Netzsteuerung → die Netzkoordinierung von mehreren LSA

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird der Schwerpunkt auf die punktuelle Steuerung einzelner LSA gelegt und zusätzlich auch die Liniensteuerung betrachtet. Auf die Steuerung im Netz wird nicht eingegangen.

Eine weitere Einteilungsmöglichkeit der Steuerungen erfolgt über die Wirkungsebene. In der makroskopischen Ebene wird den längerfristigen (i. d. R. tageszeitlichen oder wochentäglichen) bzw. großräumigen Veränderungen des Verkehrsaufkommens Rechnung getragen. Auf der mikroskopischen Ebene wird die Stochastizität des Verkehrs am Knotenpunkt in der Steuerung mitberücksichtigt. Die Steuerungseingriffe der mikroskopischen Ebene müssen sich in der Regel widerspruchsfrei in die Vorgaben der übergeordneten Ebenen einpassen, um zum Beispiel nicht "Grüne Wellen" zu stören. Eine Ausnahme bildet hier die ÖV-Priorisierung.

Neben der Steuerebene und der räumlichen Ausdehnung des Einflusses der Steuerung werden die Verfahren auch nach ihrer Anpassungsfähigkeit an die vorliegende Verkehrssituation unterschieden. D.h. es wird nach dem Grad der Zeit- bzw. Verkehrsabhängigkeit differenziert. Die Festzeitsteuerung stellt das einfachste Verfahren zur Steuerung des Verkehrs an einem Knoten mittels LSA dar. Sie reagiert nicht auf die aktuell vorliegende Verkehrssituation und ist somit statisch. Die für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten und die Planung von Festzeitsteuerungen erforderlichen Verkehrsdaten (i.d.R. Knotenstrombelastungen und Rückstaulängen) werden meist manuell durch Verkehrsbeobachtungen/-

zählungen vor Ort ermittelt. Auch hier reagiert die Anlage nicht auf die aktuell anliegende Verkehrssituation, wohl aber ist die Steuerung mittels der vorab erhobenen Dimensionierungsbelastung für die unterschiedlichen Zeiträume auf die jeweilige Verkehrsbelastung eingestellt. Diese Art der Steuerung ist einfach in der Erstellung als auch robust im Betrieb. Des Weiteren werden keine Elemente zur Datenerfassung benötigt. Der Nachteil liegt in der Unfähigkeit auf die Stochastizität des Verkehrs zu reagieren. Bei regelmäßigen zeitlichen Änderungen der Knotenstrombelastungen (z. B. Morgenspitze stadteinwärts und Abendspitze stadtauswärts) können verschiedene Festzeitsteuerungen (Signalprogramme) an festgelegten Tagen (z. B. an Werktagen, Sonn- und Feiertagen) und/oder Tageszeiten (z. B. morgens, abends, nachts) geschaltet werden. Für den Betrieb von Festzeitsteuerungen werden keine Verkehrsdaten benötigt. Eine zeitabhängige Auswahl von verschiedenen, im LSA-Steuergerät hinterlegten, Festzeitsteuerungen ist jedoch möglich. Dabei sind ggf. verlängerte Sperrzeiten der bei Signalprogrammumschaltung zu berücksichtigen, die zu längeren Wartezeiten und zu einer temporären Reduktion der Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes führen.

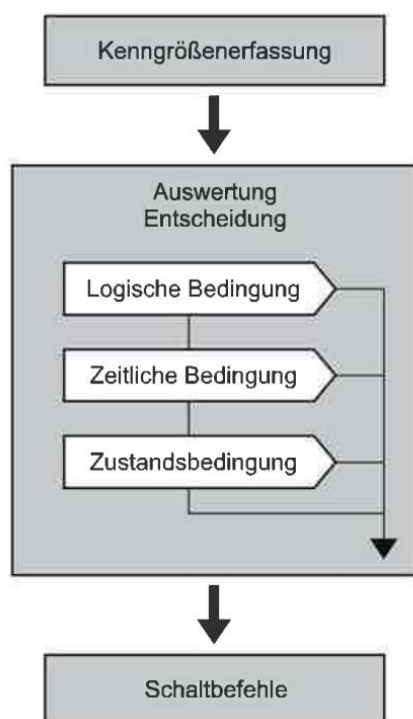


Abbildung 2-1: Regelbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens (gemäß RiLSA)

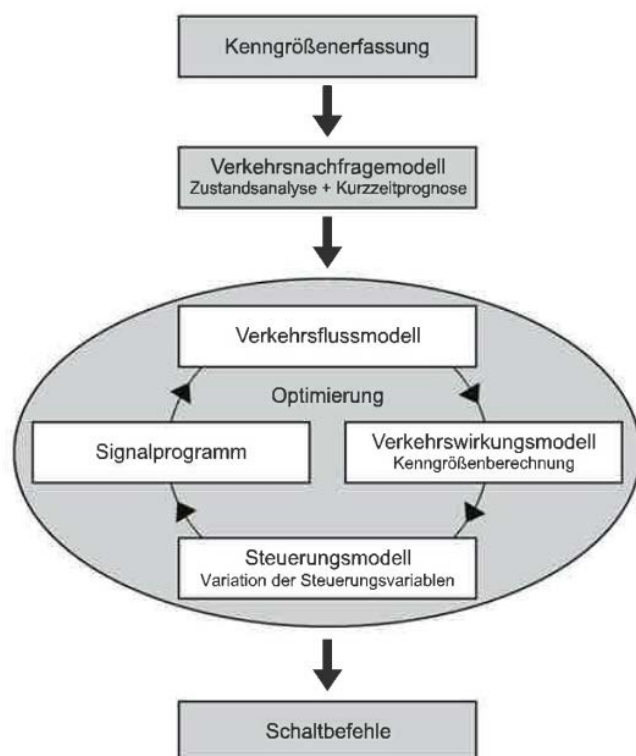


Abbildung 2-2: Modellbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens (gemäß RiLSA)

Die verkehrsabhängigen Verfahren bilden die zweite große Gruppe der Steuerungsverfahren. Es werden zwei Verfahrenstypen unterschieden, die regelbasierten Verfahren und die modellbasierten Verfahren, siehe Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2. Die regelbasierten Steuerungsverfahren sind Plausibilitätsverfahren und treffen Steuerungsentscheidungen schrittweise entsprechend der Prüfung vorab festgelegter Regeln und Entscheidungsabläufe. Beginnend am Einstiegspunkt werden die logischen Bedingungen abgefragt. Trifft die logische Bedingung zu, werden die zugehörigen zeitlichen Bedingungen geprüft. Liegt außerdem ein geeigneter Zustand vor, erfolgt eine Aktion in Form eines Schaltbefehls. Die Wirkungsweise der Logik muss nachvollziehbar beschrieben sein, die Anpassung an die Anforderungen der jeweiligen Steuerung geschieht durch Parameter.

Im Gegensatz zu regelbasierten Steuerungsverfahren stehen modellbasierte Steuerungsverfahren. Diese treffen Steuerungsentscheidungen, indem alle verfügbaren Verkehrskenngrößen in ein Verkehrsmodell einbezogen werden. Die Steuerentscheidung erfolgt auf Basis der Lösung eines Optimierungsmodells in

Richtung einer oder mehrerer Zielgrößen. Die modellbasierten Optimierungsverfahren kommen überwiegend auf der Netzebene zum Einsatz.

Für die Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Projektes werden regelbasierte Steuerungsverfahren herangezogen. Zum einen sind die Untersuchungsschritte und -ergebnisse aufgrund der geringeren Komplexität von regelbasierten Steuerungsverfahren leichter nachvollziehbar, zum anderen sind regelbasierte Steuerungen der weitest verbreitete Ansatz in Deutschland. Darüber hinaus sind diese in der RiLSA dokumentiert. In den kommunalen Fachabteilungen und den Ingenieurbüros ist der Umgang mit regelbasierten Steuerungen hinreichend bekannt und Erfahrung im Einsatz liegt vor.

Durch die Einbeziehung von fahrzeuggenerierten Informationen aus dem Umfeld des zu steuernden Knotenpunkts erweitert sich der Wahrnehmungshorizont der Detektion. Es können damit mehr Informationen über die aktuelle Verkehrssituation aufgenommen werden und in der regelbasierten Steuerung verarbeitet werden, so dass eine frühzeitige Adaption der Steuerung an das Verkehrsgeschehen erfolgen kann. Die grundlegende Überlegung bei der umgesetzten Herangehensweise ist auf Bestehendes aufzusetzen. D.h. es werden neue Informationen mit in eine verkehrsabhängige phasenorientierte Steuerung mit hinzugenommen. Die Entscheidungen innerhalb der Steuerungen werden nunmehr auf einer dichten Datengrundlage als ohne C2X gefällt. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die herkömmliche Steuerung greift, wenn keine C2X-fähigen Fahrzeuge den Knoten passieren. Das System ist somit ausfallsicher gegen ein Nichtvorhandensein von C2X-Fahrzeugen. Ein weiterer Punkt ist, dass die planenden Ingenieure ein transparentes und gewohntes Vorgehen beibehalten können. Sie projektieren wie bisher nur unter Berücksichtigung neuer Datenquellen und Steuerfunktionen.

2.1.2 Grundbegriffe der LSA-Steuerung

Zur allgemeinen Verständlichkeit und zur Sicherstellung, dass ein einheitliches Verständnis vorliegt, werden die wichtigsten Grundbegriffe der LSA-Steuerungen gemäß RiLSA zusammengefasst dargestellt.

Freigabezeit	Zeitspanne, in der ein durch einen Signalgeber signalisierter Verkehrsstrom berechtigt ist, die Haltlinie zu passieren. Die Zeitdauer, während der ein Freigabesignal gegeben wird.
Mindestfreigabezeit	Kleinste und nicht zu unterschreitende zu gebende Freigabezeit unabhängig von der Verkehrsstärke
Phase	Zusammenfassung aller Signalgeber, die für ein bestimmtes Zeitintervall gleichzeitig ein Freigabesignal anzeigen. Als Phasenfolge wird die zeitliche Reihung der verschiedenen Phasen innerhalb eines Signalprogramms bezeichnet.
Phasenübergang	Zeitdauer zwischen der zuerst endenden Signalgruppe der endenden Phase und der zuletzt beginnenden Signalgruppe der darauffolgenden Phase.
Rahmensignalplan	Ein Rahmensignalplan legt im Gegensatz zu einem Signalzeitenplan die Dauer der Signalisierungszustände nicht exakt fest, sondern definiert minimale und maximale Freigabezeitdauern für die einzelnen Signalgruppen. Innerhalb dieser definierten Rahmen können Freigabezeitverlängerungen für bestimmte Ströme durchgeführt werden.
Sättigungsverkehrsstärke	Maximal mögliche Verkehrsstärke eines Fahrstreifens während der Freigabezeit
Signalgruppe	Eine Signalgruppe besteht aus einem oder mehreren Signalgebern, die zu jeder Zeit das gleiche Signalbild für bestimmte Verkehrsströme anzeigen.
Signalprogramm	Ergebnis der Bemessung eines LSA-gesteuerten Knotenpunktes. Es wird für Festzeitsteuerungen als Signalzeitenplan, für verkehrsabhängige

	Steuerungen z.B. als Kombination aus Rahmensignalzeitenplan und Flussdiagramm der zu prüfenden Regeln dargestellt. Das Signalprogramm legt die Signalzeiten der Lichtsignalanlage hinsichtlich Dauer und Zuordnung fest.
Signalzeitenplan	Graphische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Signalisierungszustände aller Signalgruppen eines Knotenpunktes. Er stellt nur dann eine zulässige Lösung dar, wenn darin alle Zwischenzeiten eingehalten sind.
Sperrzeit	Zeitspanne zwischen dem Ende der Übergangszeit und dem Beginn der Freigabezeit, entspricht Rotzeit
Übergangszeit	Zeitintervall zwischen dem sperrenden Farbbild, i.d.R Rot und dem freigebenden Farbbild. i.d.R Grün und in umgekehrte Reihenfolge. Entsprechende Mindestdauern schreibt die RiLSA vor.
Umlaufzeit	Zeitdauer für einen vollständigen Durchlauf eines Signalprogramms
Verkehrsstrom	Besteht aus den Fahrzeugen, Radfahrern oder Fußgängern aus entweder einer einzelnen Verkehrsbeziehung innerhalb des Knotenpunktes oder aus mehreren Verkehrsbeziehungen (Mischfahrstreifen)
Versatzzeiten	Bezeichnung für den zeitlichen Versatz des Freigabezeitbeginns an aufeinanderfolgenden Knotenpunkten im Zuge von Koordinierungsmaßnahmen oder den Versatz des Freigabezeitbeginns von Signalgruppen innerhalb einer Phase eines Signalprogramms
Zwischenzeiten	Zeitdauer vom Ende der Freigabezeit eines Verkehrsstroms (räumender Verkehrsstrom) bis zum Beginn der Freigabezeit eines anderen anschließend freigegebenen einmündenden oder kreuzenden Verkehrsstroms (einfahrender Verkehrsstroms).

2.1.3 Herkömmliche Detektionstechnologien

Beim derzeitigen Stand der Technik bzw. Stand der Umsetzung an signalisierten Knotenpunkten in Deutschland, ist die Einbeziehung von Verkehrsinformationen über den MIV, die mittels lokaler Detektion erhoben werden, der Regelfall. Hinzu kommen Anforderungssysteme wie z. B. Taster für Fußgänger. Für den MIV kommen unterschiedliche Detektionstechnologien zum Einsatz. Im Umfeld eines Knotenpunktes decken die Erfassungseinheiten im Normalfall die folgenden räumliche Bereiche ab:

- 1) an der Haltlinie, meist zur Anforderung für Zweiräder,
- 2) nahe der Haltlinie, um die Anwesenheit eines Fahrzeuges aufzunehmen,
- 3) im Zulauf, um Belegungsgrad und Zeitlücken zu erheben
- 4) und in Staubereichen, um ebenso die Belegungsdauer zu erheben.

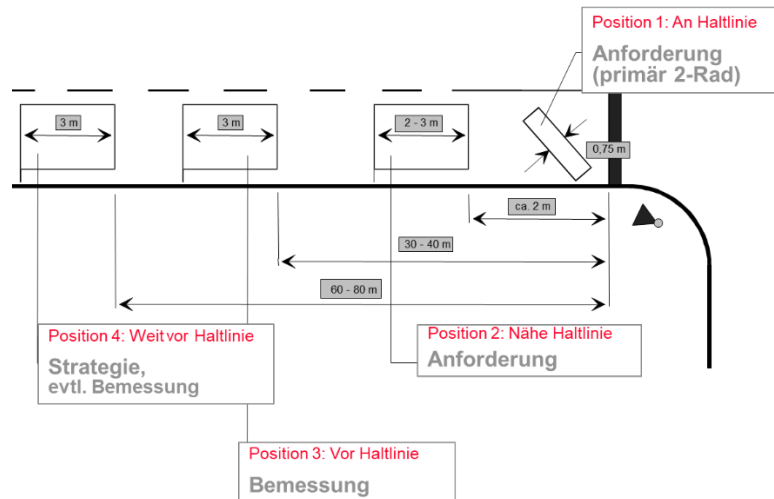


Abbildung 2-3: Positionierung Detektionsfelder für verkehrsabhängige Steuerung

Induktionsschleifendetektoren

Induktionsschleifendetektoren arbeiten nach dem Messprinzip, dass im Boden verlegte Drahtschleifen mit vordefinierter Abmessung durch Strom ein Magnetfeld erzeugen, welches bei Überfahrt eines metallischen Fahrzeuges gestört wird. Bei der Erfassung von Verkehrsdaten mit Induktionsschleifendetektoren wird zwischen Einzelschleifen- und Doppelinduktionsschleifendetektoren unterschieden. Einzelschleifen werden überwiegend dazu benutzt, spezielle Funktionen wie Anforderung, Belegung oder Zeitlücken zu messen, wohingegen Doppelinduktionsschleifen ein breiteres Spektrum lokaler Ereignisse abdecken und Einzelfahrzeugdaten aufnehmen wie Zeitlücken, Anforderung/Abmeldung, Belegung, Geschwindigkeit, Länge, Fahrtrichtung, Rotfahrer und Fahrzeugklasse (Listl, 2003).

Videodetektoren

Das Messprinzip von Videodetektoren basiert i.d.R. auf der Bildauswertung mittels verschiedener Verfahren: Entweder auf der Erkennung von Veränderungen in bestimmten Bereichen („virtuellen Schleifen“) des mittels einer Kamera erfassten Videobildes gegenüber einem Referenzbild durch Bildung eines Differenzbildes (Tripwire-Verfahren) oder der Erkennung (Segmentierung) und Verfolgung von Merkmalen/Objekten wie z. B. Fahrzeugen (Tracking-Verfahren) (Friedrich, et al., 2004).

Radardetektoren

Radardetektoren basieren auf der Objekterkennung per Mikrowelle und arbeiten üblicherweise mit einer Frequenz von 24,125 GHz. Für die Fahrzeugdetektion im Straßenverkehr werden aktive Radarsysteme eingesetzt, die – im Gegensatz zu passiven Systemen, welche die Strahlungen bekannter Sender auswerten – die Mikrowellen selbst erzeugen. Die Erfassung von Fahrzeugen mit Hilfe dieser Detektoren erfolgt unter Nutzung des Dopplereffekts, d.h. der Frequenzänderung einer elektromagnetischen Welle durch die Relativbewegung von Sender und reflektierendem Fahrzeug zueinander.

Ultraschalldetektoren

Ultraschalldetektoren bestehen ähnlich den Radardetektoren aus einer Sende- und Empfangseinheit und arbeiten mit Schallwellen im Frequenzbereich von 15 bis 40 kHz. Bei dieser Detektorart existieren zwei Messprinzipien. Zum einen gibt es die Messung der Laufzeit über das Ausstrahlen gepulster Wellenblöcke, die von einem Fahrzeug reflektiert werden. Die so gemessene Laufzeit wird mit dem Zeitwert verglichen, den die Welle zwischen Sender und Straße benötigt. Eine Fahrzeugdetektion ergibt sich hier aus der Differenz dieses Referenzwertes mit dem gemessenen Wert. Beim zweiten Prinzip kommt der Dopplereffekt, also die Messung einer Frequenzänderung infolge einer Fahrzeugbewegung, zur Anwendung. Mit Hilfe dieser Messung kann die Geschwindigkeit des vorbeifahrenden Objektes bestimmt werden (Leitzke, 2012).

Wärmebilddetektoren

Wärmebilddetektoren unterteilen sich in zwei Untergruppen, die Passiv- und die Aktivinfrarotdetektoren. Passive Infrarotdetektoren arbeiten nach dem Prinzip der kontaktlosen Temperaturmessung und reagieren auf Wärmestrahlung, erzeugen aber selbst keine Strahlung (Büttler, et al., 2010). Im Wahrnehmungsbereich von Infrarotdetektoren treten grundsätzlich verschiedene Strahlungsquellen auf. Dabei gibt es die Strahlung, die von den Objekten im Wahrnehmungsbereich des Detektors (Fahrzeuge, Körperwärme oder Straßenoberfläche) aktiv ausgesendet wird und Strahlung, die von der Sonne bzw. der Atmosphäre ausgesendet und von den Objekten (Fahrzeuge, Straßenoberfläche) reflektiert wird (Leitzke, 2012). Aktive Infrarotdetektoren basieren auf dem Prinzip der Laufzeitmessung. Dazu werden gepulste Infrarotwellen im Bereich um 850 nm ausgesendet. Während der Laserstrahl über den Detektionsbereich pendelt, wird die Fahrzeughöhe aus den einzelnen Messungen der Entfernung vom Sensor zum Fahrzeug ermittelt. Anhand der gemessenen Fahrzeughöhe lässt sich ein ungefähres Fahrzeugprofil abbilden und mit Musterprofilen vergleichen, wodurch eine Fahrzeugklassifizierung möglich ist. Zu dieser Detektorklasse gehören beispielsweise auch Laserscanner (Leitzke, 2012).

Magnetfelddetektoren

Bei Magnetfelddetektoren werden Fahrzeuge durch die Störung eines vorgegebenen Magnetfeldes erfasst, so dass das Vorhandensein und die Bewegung eines Fahrzeuges ermittelbar sind. Das Messprinzip beruht auf der Messung der magnetischen Flussdichte. Hierfür stehen zwei Messverfahren zur Verfügung: Bei Magnet-Wechselfeld-Detektoren wird die Veränderung eines magnetischen Wechselfeldes durch die Metallteile eines Fahrzeuges oder die Übertragung von Informationen durch ein vom Fahrzeug selbst erzeugtes Wechselfeld hervorgerufen, während bei einem Magnet-Gleichfeld-Detektor die Veränderung durch die Metallmasse eines Fahrzeuges erzeugt wird (Klein, et al., 2006).

Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Verkehrsdatenerfassung sowie zur Verringerung des Installations- und Wartungsaufwandes für den Bereich stationärer Detektoren können Kombinationen der einzelnen Erfassungstechnologien verwendet werden. Eingesetzt werden hauptsächlich Induktionsschleifen oder kamerabasierte Detektoren. Weitere Informationen zum Einsatz von Detektoren im Kreuzungsbereich sind im Abschlussbericht des Forschungsprojektes FE 03.0513/2013/DGB „Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten“ zu finden.

2.1.4 Eingriffsmöglichkeiten verkehrsabhängiger Steuerungsverfahren

In der Festzeitsteuerung ist keine Änderung der Signalprogrammelemente möglich. Es ist wie eingangs erwähnt eine feste Phasenfolge mit konstanten Freigabezeiten definiert. Diese Steuerungsvariante fungiert unter anderem als Rückfallebene, falls die verkehrsabhängige Steuerung ausfällt (Festzeiterersatzprogramm). Folglich ist bei dieser Steuerungsvariante keine Detektion von Verkehrsteilnehmern vorgesehen.

Für die Erstellung einer regelbasierten Logik zur Steuerung eines Knotenpunktes liefern die Erfassungseinheiten im Knotenpunktbereich an- oder absteigende Flanken. Die Flanken werden durch die, den Erfassungsbereich querenden Fahrzeuge, erzeugt. Aus diesen Flanken werden die Belegung und die Verkehrsstärke abgeleitet. Weiterhin ist die Bestimmung der Nettozeitlücke zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge möglich. Diese Kenngrößen werden für unterschiedliche Maßnahmen im Zuge von regelbasierten Steuerungen verwendet. Die folgenden Eingriffsmöglichkeiten zur LSA-Steuerung kommen gemäß RiLSA zum Einsatz:

Freigabezeitanpassung

Bei dem Verfahren der Freigabezeitanpassung handelt es sich um ein häufig eingesetztes Werkzeug der verkehrsabhängigen Steuerung, bei der Dauer von Freigabezeiten innerhalb eines Signalprogrammes geändert werden können. Wird ein solches Verfahren in der Steuerung verwendet, ist es immer notwendig eine auslösende Komponente zu implementieren. Die RiLSA empfiehlt drei Verfahren hierzu:

- Bemessung mittels der Zeitlücke
- Bemessung mittels des Belegungsgrads
- Bemessung mittels Stauerkennung

In der Regel werden im Rahmen der Freigabezeitanpassung die Nettozeitlücken zwischen Fahrzeugen gemessen. Unter der Annahme, dass ein Fahrzeugpulk endet, wird die Freigabezeit bei Überschreitung einer parametrisierbaren Zeitlücke (2-3 Sekunden) beendet. Hierzu dienen im Allgemeinen Detektoren auf Basis von Induktionsschleifen in der Fahrbahn in einem Abstand von etwa 30 bis 40 Meter zur Haltlinie oder Videokameras an den LSA-Auslegern. Diese Erfassungseinheiten werden zur Entscheidungsfindung herangezogen, ob und wie die Freigabezeit in der jeweiligen Situation angepasst werden soll. (siehe Abbildung 2-3).

Bei der Bemessung mit dem Belegungsgrad wird der Verkehrsablauf ausgewertet. Zum Einsatz kommen Langschleifen (2 m bis 5 m). Die detektierten Belegungszeiten werden hierbei zeitlich geglättet. Liegt die geglättete Belegungszeit unter einem vordefiniertem Schwellwert, erfolgt der Abbruch der Freigabezeit, wenn diese noch nicht ihren Maximalwert erreicht hat. Diese Art der Bemessung ist etwas weniger sensitiv im Vergleich zur Zeitlückensteuerung, da größere Zeitlücken, die durch den langsam anfahrenden Schwerverkehr entstehen können, nicht zum vorzeitigen Abbruch führen.

Bei der Freigabezeitanpassung mittels Stauerkennung liegen die Detektoren außerhalb von den in normalen Sperrzeiten überstauten Bereichen. Liegt die Belegungszeit des Detektors über einem gewissen Schwellwert wird dies als Stau interpretiert. Die RiLSA empfiehlt Schwellwerte von 5 s bis 15 s. Hierdurch wird verhindert, dass langsam fahrende Fahrzeug als Stauereignis eingestuft werden. Sobald ein Stau erkannt wird, kann die Freigabezeit verlängert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Stauabschätzung ist das Zählen der Fahrzeuge, die während der vorangehenden Sperrzeit ankommen. Es wird empfohlen, dieses Verfahren auf schwach belasteten Nebenrichtungen anzuwenden, um unnötig lange Freigabezeiten zu vermeiden. Zur Schätzung der Rückstaulänge mittels haltliniennaher Detektoren stellt Mück (2002) ein Verfahren vor, das auf einem von ihm nachgewiesenen Zusammenhang zwischen der Rückstaulänge und der sogenannten Füllzeit basiert. Die Füllzeit definiert Mück als das Zeitintervall zwischen Sperrzeitbeginn und Dauerbelegung des Detektors. Ein weiteres Verfahren entwickelte Santá (2015), welches die maximale Anzahl stehender Fahrzeuge an signalisierten Knotenpunkten pro Umlauf und für jeden Fahrstreifen schätzt. Zum Einsatz kommt eine multiple lineare Regression unter Verwendung der Verkehrsstärken am stromaufwärtigen Knotenpunkt als Prädiktoren und der Rückstaulänge als Kriterium. Voraussetzung für die Regression ist die Kenntnis über die tatsächlichen Rückstaulängen der vergangenen LSA-Umläufe.

Änderung der Phasenabfolge

Die einfachste Art der verkehrsabhängigen LSA-Steuerung an signalisierten Knotenpunkten ist die Anforderung einer Phase, um eine entsprechende Freigabezeit zu erhalten. Dabei werden schwach belastete Knotenströme nur dann freigegeben, wenn dort ein Fahrzeug bzw. Verkehrsteilnehmer (Fußgänger oder Radfahrer) anwesend ist. Das heißt, es genügt die Erfassung der Anwesenheit durch Detektoren oder Taster. Bei der Phasenanforderung werden Zusatzphasen nach Bedarf in eine feste Phasenfolge eingeschoben. Umgesetzt wird dies durch eine vorübergehende Freigabezeitkürzung anderer Phasen. Beim Verfahren des Phasentausches kann zwischen mehreren Phasen getauscht werden, wobei die einzelnen Elementabfolgen fest sind. Die Phasenanzahl wird dabei nicht verändert. Die RiLSA empfiehlt dieses Vorgehen, wenn bei Beschleunigungsmaßnahmen für ÖPNV-Fahrzeuge der prognostizierte Ankunftszeitpunkt nicht in das Zeitfenster einer möglichen Freigabezeitanpassung fällt.

Versatzzeitanpassung

Unter der Versatzzeitanpassung ist die Verschiebung der relativen Versätze von Freigabezeiten zu verstehen; d.h. die Anfangszeitpunkte aller Freigabezeiten innerhalb eines Umlaufs sind um einen vorgegebenen Wert veränderbar. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Freigabezeiten der einzelnen Phasen optimal auf den Zulauf von benachbarten lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten abgestimmt werden sollten.

Signalprogrammbildung

Bei der Signalprogrammbildung werden veränderbare Bestandteile des Signalprogrammes auf der Basis aktueller Messwerte verkehrsabhängig angepasst. Voraussetzung ist, dass der Knotenpunkt nicht Bestandteil einer Koordinierung mehrerer aufeinanderfolgender Knotenpunkte ist. Für die Bildung des Programms sind unter anderem die Zwischenzeiten und minimale und maximale Freigabezeiten vorzugeben. Weiterhin können die Anzahl der Phasen und die Übergänge für alle Phasenkombinationen vorgeben werden.

Die RiLSA (FGSV, 2015) gibt einen umfangreichen Überblick im Kapitel 4 Seite 37ff und fasst diesen in der untenstehenden Abbildung übersichtlich zusammen.

	Steuerungsverfahren		Ordnungszahl	Aktivierung		verkehrsabhängig veränderbare Elemente der Signalprogramme				
	Oberbegriff	Hauptmerkmal der Veränderbarkeit der Signalprogramme		zeitplanabhängig	verkehrsabhängig	Umlaufzeit	Phasenfolge	Phasenanzahl	Freigabezeiten	Versatzzeit
A: Makroskopische Steuerungsebene	Signalprogramm-auswahl	zeitplanabhängige Auswahl der Signalprogramme	A1	X		in Kombination mit einem Steuerungsverfahren der Gruppe B veränderbare Elemente des Signalprogramms				
		verkehrsabhängige Auswahl der Signalprogramme	A2		X					
	Bildung Rahmen-signalprogramm	verkehrsabhängige Bildung der Rahmen-signalprogramme	A3		X					
B: Mikroskopische Steuerungsebene	Festzeitsignal-programm		B1	Aktivierung gemäß Steuerungs-verfahren der Gruppe A						
	Signalprogramm-anpassung	Freigabezeit-anpassung	B2						X	
		Phasentausch	B3				X			
		Phasen-anforderung	B4					X	X	
		Versatzzeit-anpassung	B5							X
	Signalprogramm-bildung	freie Veränderbarkeit	B6			X	X	X	X	X

Abbildung 2-4: Übersicht der Steuerungsverfahren einer LSA laut RiLSA 2015

Die Abbildung veranschaulicht, dass die Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen durchaus vielfältig sind. Die Verfahren unterscheiden sich in der Art, wie die Steuerung der Verkehrsströme realisiert wird und im Grad der Beeinflussbarkeit oder Veränderbarkeit der Signalprogrammelemente. Ausschlaggebend für die Bearbeitung innerhalb dieses Projektes sind die Verfahren, die auf die vorhandene Verkehrssituation reagieren.

Die derzeitige Verkehrstechnik basiert aufgrund der vorhandenen Informationsbasis auf Annahmen, die im Zweifel dazu führen können, dass nicht die optimalen Entscheidungen getroffen werden. Bei der Freigabezeitbemessung wird eine laufende Phase dann beendet, wenn die am Detektor gemessene Zeitlücke einen vordefinierten Grenzwert übersteigt und weitere Bedingungen, wie z.B. der Ablauf von Mindestgrünzeiten, erfüllt sind. Dennoch kann es sein, dass eine längere Zeitlücke durch ein langsames Fahrzeug erzeugt wird oder dass ein Pulk den Knoten noch nicht erreicht hat, z. B. aufgrund von in Zweiter-Reihe parkenden Fahrzeugen oder ähnlichem. Dies hat zur Folge, dass die Bemessung der Phasenlänge nicht an die vorliegende Situation angepasst ist. Es kommt zu einem verfrühten Freigabezeitabbruch.

Nicht immer liegen strategische Detektoren in weiterer Entfernung zur Haltlinie zur Bestimmung eines Rückstaus vor. Eine Schätzung ist per se nicht immer korrekt. Dies kann zu ungewünschter Steuerung des Verkehrs führen.

Anders verhält sich die Situation bei Anforderungen. Eine Anforderung an einem haltliniennahen Detektor wird erst dann ausgelöst, wenn ein Fahrzeug auf den Detektor an der Haltlinie gefahren ist. D.h. die Information, dass ein Fahrzeug anfordert kann erst dann in der Steuerung berücksichtigt werden, wenn das Fahrzeug den Detektionsbereich belegt. Würde die Anlage früher über das sich annähernde Fahrzeug

informiert werden, könnte der Phasenübergang früher gestartet werden. Das Fahrzeug könnte somit bestenfalls ohne Halt in die Kreuzung einfahren.

Mit den derzeitigen Detektionsmöglichkeiten werden somit nur ein sehr begrenzter Raum bzw. ein sehr begrenzter zeitlicher Raum abgedeckt. Modellbasierte Verfahren versuchen diese Lücke durch Verkehrsmodellierung zu schließen und kommen meist auf Netzebene zum Einsatz. Die Versorgung der modellbasierten Verfahren ist jedoch sehr aufwendig und schwer zu durchschauen, so dass dies von potentiellen Anwendern als Barriere für eine mögliche Nutzung gesehen wird, wie das Projekt Amones unter anderem resümiert (Boltze, et al., 2011).

Handlungsbedarf ist daher gegeben. Gerade vor dem Hintergrund der verkehrsbedingten Schadstoffemissionen haben unnötige Halte und stockender Verkehrsfluss negative Auswirkungen auf die Gesellschaft. Oben dargestellte Überlegungen legen nahe, dass die Anzahl der Halte verringert werden könnte, wenn der Detektionsraum ausgedehnt wird. Die Technologien zur Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation und der damit verbunden gegenseitige Austausch von Daten eröffnen diese Möglichkeiten. Der Wahrnehmungshorizont der LSA würde sich erweitern und die Anzahl und Größe von blinden Flecken würden sich reduzieren. Dadurch steht der Steuerung mehr Zeit zur Verfügung, um frühzeitig auf das Verkehrsgeschehen reagieren zu können. Eine Reduzierung von Staulängen ist ebenfalls denkbar. Folglich ist ein geringerer CO₂-Ausstoß als auch weniger Feinstaub durch Verringerung von Brems- und Anfahrvorgänge (Reifen, Bremsen, etc.) möglich. Ein weiterer Vorteil der C2X-Technologie stellt die mögliche Reduzierung des Finanzierungsaufwandes für eine LSA dar, da kostenintensive Detektionseinrichtungen, wie oben beschrieben, nicht mehr benötigt werden.

2.2 Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen mit Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation

2.2.1 Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation

Die ausführliche Beschreibung moderner Kommunikationstechnologien ist nicht Gegenstand des Projektes. Wohl bilden diese technologischen Entwicklungen einen entscheidenden Baustein moderner und innovativer Methoden zur Steuerung der Knotenpunkte mittels LSA. Hartenstein & Laberteaux (2010) bringen es mit der Aussage auf den Punkt, dass diese Entwicklung einen Wendepunkt für das Anwendungsspektrum intelligenter Verkehrssysteme (IVS) darstellt.

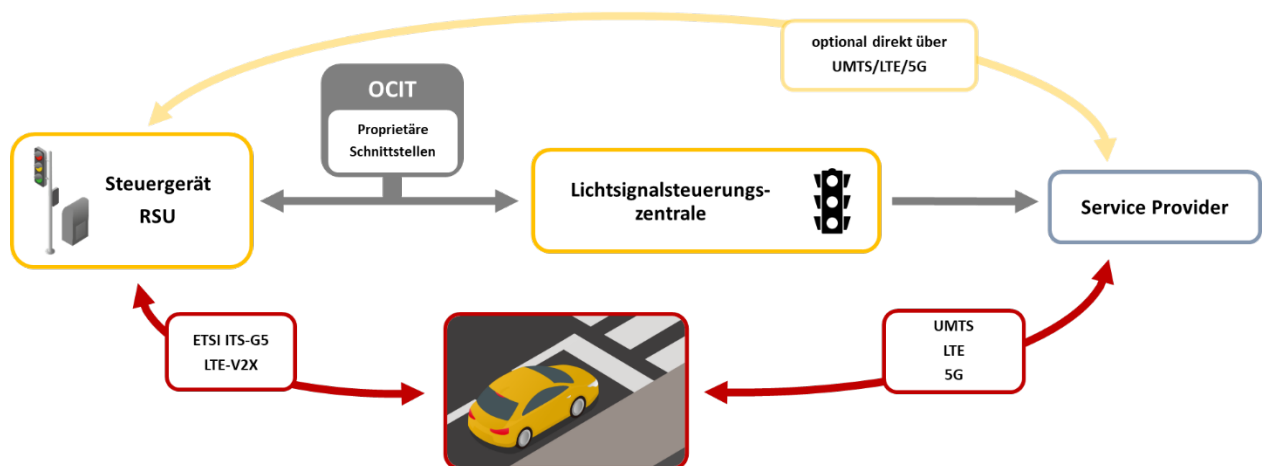


Abbildung 2-5: Mögliche Kommunikationswege mittels weiträumiger oder kleinräumiger kabelloser Datenübertragung (eigene Darstellung)

Bei der Datenübertragung vom Fahrzeug zur LSA und umgekehrt, ist zwischen weiträumigen und kleinräumigen Übertragungswegen zu differenzieren, welche unterschiedliche technische Lösungen darstellen. Weiträumig können moderne Mobilfunkstandards genutzt werden, wie UMTS, LTE oder in Zukunft die fünfte Generation der Mobilfunkstandards 5G. Die hohen Datenübertragungsraten von 1000

Mbit/s (LTE) und bei 5G bis zu 10 GBit/s sind charakteristisch für die Mobilfunkübertragung. Des Weiteren werden eine Sendemastinfrastruktur als Basisstationen und ein entsprechender Service Anbieter benötigt. Dies hat Lizenzgebühren zur Folge.

Kleinräumig kann für die direkte Kommunikation von Fahrzeug zu LSA entweder die WLAN-Technologie (ITS-G5) - oder die sich derzeit in der Erprobung befindliche Mobilfunktechnologie LTE-C2X (5GAA, 2017) genutzt werden. Bei der WLAN-Technologie handelt es sich um einen für Anwendungen intelligenter Verkehrssysteme angepassten Standard IEEE 802.11p. Über sogenannte Road Side Units bzw. OnBoard Systeme im Fahrzeug wird das Signal empfangen und weitergeleitet. Die nutzbaren Reichweiten dieser Technologie belaufen sich etwa auf 200 bis 400 Meter. Das Bestreben der europäischen Kommission den auf WLAN-Technologie basierenden Kurzstreckenübertragung ETSI ITS G5 als Standardübertragungstechnologie vorzuschreiben ist zum Zeitpunkt des Entstehens des Berichtes noch in der Schwebe. ETSI ITS G5 steht mit der auf Mobilfunktechnologie basierenden Kurzstreckenübertragung LTE-C2X¹ in Konkurrenz. D.h. die technologische Ausrichtung und auch die grundsätzliche Notwendigkeit sind derzeit offen und es ist zu prüfen, welche Technologie sich durchsetzt und als zukunftssicher erweist. Es ist anzumerken, dass die Datenübertragung über weite Räume mittels Mobilfunks nicht mit der LTE-V2V Ansatz zu verwechseln ist. Dieses umfangreiche Thema wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft, sondern auf die Webpage der Europäischen Kommission zum Einsehen der Richtlinie² verwiesen als auch auf einschlägige Fachbeträge^{3,4,5}.

Neben dem Weg der Datenübertragung sind auch entsprechende Protokolle und Datenformate vorzuhalten. Diese Standardisierungsarbeit teilen sich das European Telecommunications Standards Institute (ETSI) und das Comité Européen de Normalisation (CEN), das sehr eng mit der International Organization for Standardization (ISO) verzahnt ist. In der Standardisierungsarbeit werden auch die Themen zum Schutz personenbezogener Daten („Privacy“) und die Systemsicherheit bei der Datenübertragung („Security“) mitberücksichtigt. Im Rahmen dieser Tätigkeiten werden z. B. von der ETSI auch eine Public Key Infrastructure (PKI) zum Bereitstellen digitaler Zertifikate definiert. Im Bereich der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation oder auch C2X-Kommunikation werden die folgenden Nachrichtenformate verwendet:

CAM und DENM⁶

Mittels der Cooperative Awareness Message (CAM) werden komprimierte Statusinformationen der Fahrzeuge versendet. Die CAM ist somit eine Art Puls des Fahrzeuges. Das Sendeintervall dieser Nachrichten ist zyklisch und die Senderate kann von 1 Hz bis 10 Hz reichen. Die CAM kann unter anderem eine eindeutige Fahrzeug-ID, Fahrzeugart (Pkw, Lkw, Bus, ...), Fahrzeugposition, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Richtung (Heading), Fahrzeuglänge, Fahrzeuggewicht übertragen. ÖV-Informationen zur Bevorrechtigung können mittels eines R09-Containers als Bestandteil der CAM versendet werden. Voraussetzung ist, dass diese Daten vom Fahrzeug bereitgestellt werden. Zum Schutz personenbezogener Daten ist die ID des Fahrzeuges nicht konstant, sondern variiert, damit ein Nachverfolgen über längere Strecken nicht möglich ist. Im Bereich einer Kreuzung ist davon auszugehen, dass die ID konstant bleibt.

Über die Decentralized Environmental Notification Message (DENM) werden Informationen über ein Ereignis versendet, wie z. B. ein liegengebliebenes Fahrzeug, Geisterfahrer, Gegenstände, Menschen, etc. auf der Fahrbahn oder allgemeine Verkehrsinfos über Baustellen oder Wetterverhältnisse. Ebenfalls eine Auskunft über stark bremsende Folgefahrzeuge oder über sich annähernde Einsatzfahrzeuge ist denkbar.

¹ Weitere Bezeichnungen sind Cellular Vehicle to Vehicle" (C-V2V, oder C-V2X).

² https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=PI_COM%3AC%282019%291789 [zugegriffen 25.11.2019]

³ <https://www.heise.de/select/ct/2019/16/1564403344703807> [ct-Artikel Quersteher, zugegriffen 25.11.2019]

⁴ <https://www.heise.de/select/ct/2019/16/1564400746531369> [ct-Artikel Funksalat, zugegriffen 25.11.2019]

⁵ https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/feedback/18167/attachment/090166e5c12a3443_en [zugegriffen 25.11.2019]

⁶ CAM und DENM sind in ETSI EN 302 637 spezifiziert

Bedeutung, wenn dezentrale Infrastrukturkomponenten mit zentralen Einrichtungen kommunizieren. Im Zusammenspiel mit der heutigen Internettechnologie ist es aufgrund von Kommunikationsschnittstellen möglich, Informationen aus lokalen Lichtsignalanlagen und anderen Verkehrseinrichtungen in zentralen Verkehrsrechnern zu sammeln und Verkehrsmanagementsysteme zu entwickeln. Der im deutschen Raum am häufigsten verwendete Schnittstellenkatalog ist OCIT (Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems). Dieser Katalog ist aus einer Arbeitsgemeinschaft von unterschiedlichen Signalbaufirmen (ODG – OCIT Developer Group) entstanden. Dabei vereint der Oberbegriff OCIT verschiedene Einzelsysteme unter sich. Die Version OCIT-O 3.0 erweitert die Schnittstellenfamilie um die Übermittlung von Fahrzeugdaten mittels OCIT-O Car. Das Datenmodell orientiert sich dabei an den ETSI Spezifikationen (CAM, DENM, MAP, SPaT). Diese Version ist seit 2018 veröffentlicht (ODG, 2018).

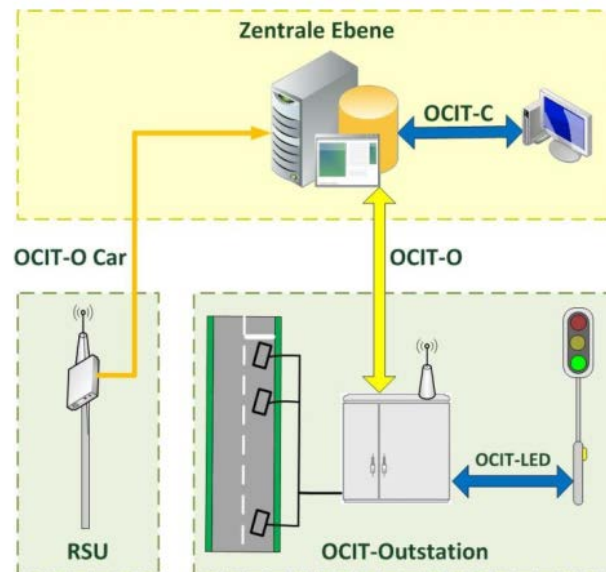


Abbildung 2-7: OCIT- Schnittstellen im Überblick (ODG, 2018)

Folgende maßgebliche Schnittstellen finden Beachtung (siehe Abbildung 2-7) (ODG, 2018):

- OCIT-Center to Center (OCIT-C) sind standardisierte Schnittstellen zwischen zentralen Komponenten und Systemen
- OCIT-Outstations (OCIT-O) sind standardisierte Schnittstellen zwischen Zentrale und Feldgeräten
- OCIT-O Car sind standardisierte Schnittstellen zwischen Roadside Unit und Zentrale zur Übertragung von Fahrzeugdaten
- OCIT-LED ist eine Schnittstelle zwischen Steuergerät und LED-Signalgebermodulen

In der Forschungsinitiative UR:BAN (UR:BAN-Konsortium, 2016) wurden in der Stadt Kassel Untersuchungen zur Latenzzeit bei der Übertragung von LSA Prozessdaten aus dem Feldgerät in die Zentrale durchgeführt. Für die Übertragung von Daten aus den Detektoren, der Signalisierungszustände, der Signalgruppen und der Umlaufsekunde ergaben sich Zeiten bis zu 10 s, Daten aus den ÖV-Meldeketten benötigten für die Übertragung bis zu 20 s. Durch eine Softwareänderung seitens des Herstellers reduzierte sich die Latenzzeit auf ca. 6-7 s. Vor allem für die Prognose von LSA-Zuständen auf Zentralenebene sind diese Zeiten sehr lang. Gemäß Aussagen der Projektbeteiligten sollten für eine optimale Prognose der Schaltzustände eine Latenzzeit von max. 2 s angestrebt werden. Daher werden derzeit für zeitkritische Anwendungen wie die LSA-Prognose oft proprietäre Schnittstellen angewendet (siehe Abbildung 2-5).

2.2.2 Kooperative Lichtsignalanlagensteuerung

Durch die Entwicklung leistungsfähiger Kommunikationstechnologien wurde der Konzeption und Umsetzung kooperativer Lichtsignalanlagensteuerungen die Tür geöffnet. Laut Schade (2010) ist ein „Kooperatives System“ eine Untermenge eines „Intelligenten Verkehrssystems“ (IVS), das zwischen Fahrzeugen und Infrastruktureinrichtungen des IVS kommuniziert und Informationen austauscht, um

Hinweise zu geben und das Umsetzen von Maßnahmen zu erleichtern und zu unterstützen. Ziel ist hier die Verbesserung von Sicherheit, Nachhaltigkeit, Effizienz und Komfort über die Möglichkeiten hinaus, die ein autarkes System bietet.

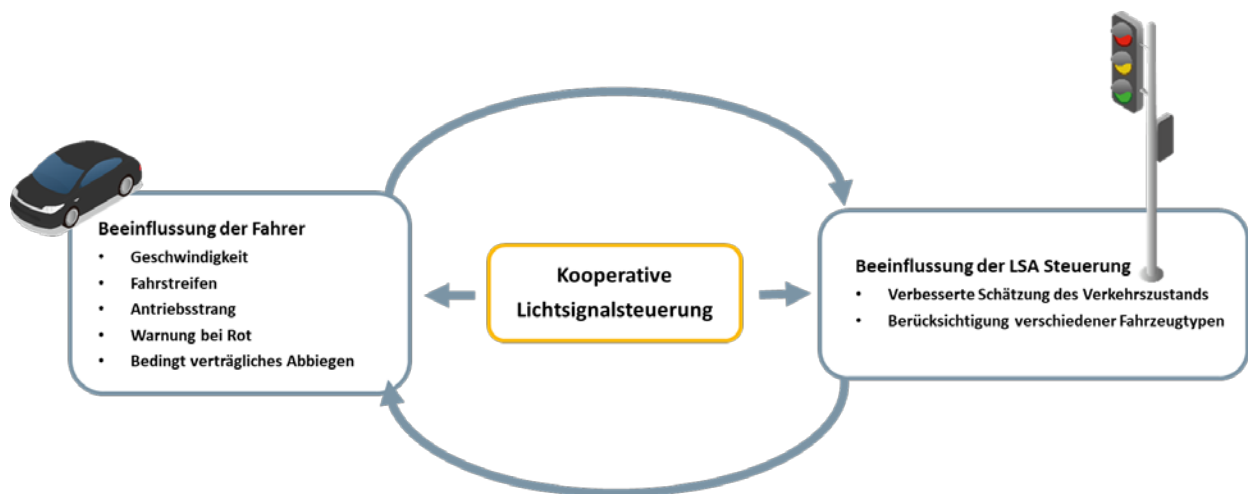


Abbildung 2-8: Beeinflussungsmöglichkeiten durch kooperative Lichtsignalsteuerungen (Santá, et al., 2014)

Bei der Kooperation von Fahrzeug und LSA entsteht ein „Kreislauf“ (siehe Abbildung 2-8), sprich die LSA erhält Informationen über den Verkehrszustand von infrastrukturseitigen Detektoren und vom Fahrzeug selbst. Der Fahrer wiederum erkennt den Signalisierungszustand über den Blick auf den Signalgeber als auch über erweiterte Informationen, die seinem Fahrzeug zugänglich gemacht werden. Bei der Anpassung der Steuerung wird berücksichtigt, dass die Fahrer informiert sind. Dieser Kreislauf kann gesamtheitlich oder nur mit der einen oder anderen Hälfte umgesetzt werden; d.h. entweder werden Daten vom Fahrzeug erhalten (Variante 1) oder Daten über die LSA-Steuerung versendet (Variante 2) oder es werden beide Kommunikationsströme umgesetzt (Variante 3) (Kaths, 2017). Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist ausschließlich die Variante (1). Für diese Variante wird ein neues regelbasiertes Steuerungsverfahren entwickelt und dieses in unterschiedlichen Szenarien mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation getestet. Zu den Varianten (2) und (3) werden keine Simulationen durchgeführt. Wohl werden diese im Kapitel 6 „Wirksamkeit von Kooperativen Lichtsignalanlagen“ und Kapitel 7 „Handlungsempfehlungen“ mittels der Auswertung vergangener Studien und Forschungsarbeiten berücksichtigt.

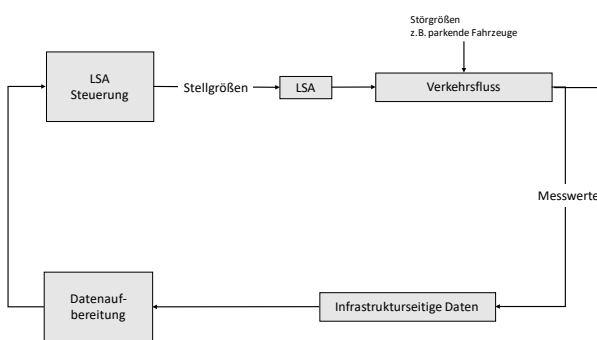


Abbildung 2-9: Klassischer Regelkreis der LSA-Steuerung in Anlehnung an Papageorgiou, et al. (2003)

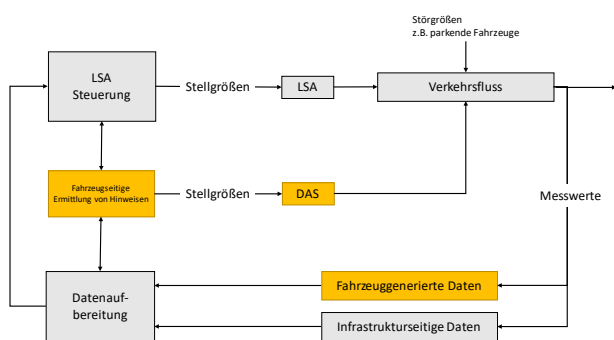


Abbildung 2-10: Ergänzter Regelkreis der kooperativen LSA in Anlehnung an Santá, et al. (2014)

Die Steuerung des Verkehrsflusses wird somit komplexer. Der klassische Regelkreis (Abbildung 2-9) der LSA-Steuerung ist um die Komponente des Fahrzeugs als Datenquelle und Fahrerassistenzsystem (DAS⁸) zu erweitern (Abbildung 2-10). Die Menge der fahrzeuggenerierten Daten hängt hierbei von der Ausstattungsrate der Fahrzeuge ab. Daher wird in den nachfolgenden Untersuchungen auch mit

⁸ In Abgrenzung zum Begriff FAS „Funktionsüberwachungs- und Analysesystem“ wird auf die englischsprachige Bezeichnung „driver assistant system“ zurückgegriffen.

unterschiedlichen Ausstattungsraten gearbeitet werden. Zu erwähnen ist an dieser Stelle noch das automatisierte bzw. autonome Fahren. Der dargestellte Regelkreis unterliegt der Annahme, dass der Fahrer Informationen erhält und auf diese reagiert. Dies kann er auch unterlassen. Ein Übersteuern des Regelkreises durch einen Automaten ist im Normalfall eher unwahrscheinlich. Im Fall des autonomen Fahrens liegen zudem höhere Anforderungen an die zu übertragenden Daten von der LSA zum Fahrzeug vor, sprich diese müssen was den Ist-Zustand der Signalisierung anbelangt, zu 100 Prozent verlässlich sein. Bis dato hat diese Art der Daten lediglich informativen Charakter, da der Fahrer selbst entscheidet.

2.2.3 Forschungsprojekte und Studien

Die Erweiterung des Regelkreises durch die Mittel der C2X-Technologie, welche in Echtzeit Daten über die Position, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und weitere Informationen über ein Fahrzeug in der Umgebung eines Knotenpunktes zur Verfügung stellen, hat eine Reihe von Forschungsprojekten und Forschungsstudien angestoßen bzw. notwendig gemacht. Im Folgenden ist ein kurzer Abriss dieser Forschungsarbeit zu finden.

Forschungsprojekte

In den beiden Schwesterprojekte CVIS (2006–2010) und SAFESPOT (2006–2010) wurde der Einsatz von modernen Kommunikationstechnologien an signalisierten Knotenpunkten erforscht. Das Ziel von CVIS war es, die Übertragung von Daten mittels ITS-G5 eingebettet im Communication Access for Land Mobile (CALM) weiterzuentwickeln und Anwendungen zur Erhöhung der Verkehrseffizienz unter anderem auch in der Stadt voranzutreiben. SAFESPOT verfolgte das Ziel, die Verkehrssicherheit mittels des kleinräumigen Austauschs von Daten über Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation zu erhöhen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes TRAVOLUTION (2006–2008) wurden mit der Restrotanzeige und der sogenannten „Dynamischen Grüne Welle“ zwei Anwendungsfälle in Ingolstadt umgesetzt. „Die Restrotanzeige gibt dem Fahrer die verbleibende Wartezeit bei Rot an. Bei der Dynamischen Grünen Welle wird dem Fahrer vor Erreichen der Kreuzung ein Geschwindigkeitsbereich angezeigt, innerhalb dessen er ohne Halt die Kreuzung passieren kann, unter der Voraussetzung, dass unerwartete Störungen wie z. B. langsam fahrende Fahrzeuge ausbleiben“ (Braun, et al., 2009).

Im Rahmen des Forschungsprojekts Aktiv (2006–2010) wurde sowohl eine Beeinflussung der Fahrer als auch der Signalsteuerung umgesetzt und untersucht. Dabei wurden mobile Endgeräte genutzt, um fahrzeuggenerierte Daten zu versenden und eine Anzeige von Restrot- und Restgrünzeiten sowie von Geschwindigkeitsempfehlungen zu ermöglichen. Die fahrzeuggenerierten Daten wurden zur Anpassung der Lichtsignalsteuerung als auch zur Schätzung des Rückstaus verwendet.

Innerhalb des Projekts KOLINE (2009–2012) wurden die fahrzeuggenerierten Daten zur netzweiten Optimierung der Signalprogramme genutzt (Bley, et al., 2011). Auch hier wurde die Steuerung angepasst als auch die Länge des Rückstaus geschätzt.

Im Forschungsprojekte simTD (2008–2013) wurden kooperative Anwendungen für die Szenarios Autobahn, Landstraße und Stadtstraße großräumig und über einen längeren Zeitraum untersucht. Für den städtischen Bereich wurden in Frankfurt dazu 23 Knotenpunkte mit Kommunikationstechnik ausgestattet (simTD-Konsortium, 2010). Dort wurden ebenfalls die Restrotanzeige und die fahrzeugseitige Geschwindigkeitsempfehlung erprobt und die fahrzeuggenerierten Daten zur Verbesserung der Signalsteuerung eingesetzt. Dies erfolgte auf lokaler Ebene als auch auf Netzebene zur Ermittlung von Rahmensignalplänen.

Im europäischen Projekt eCoMove (2010–2014) wurde im Rahmen der kooperativen Lichtsignalsteuerung u.a. die Anwendung „ecoGreen Wave“ umgesetzt. Diese Applikation ist dadurch charakterisiert, dass (1) die Koordinierungsgeschwindigkeit abhängig von der aktuellen Verkehrssituation innerhalb gewisser Grenzen veränderbar ist und (2) die Fahrzeugpuls unter Verwendung von Fahrempfehlungen für die

Fahrer beeinflusst werden. Dies ermöglicht eine optimale Geschwindigkeitsanpassung der Fahrzeuge, um auf dem betreffenden Streckenabschnitt im Grünband zu fahren (Lüßmann, et al., 2014).

Im Forschungsprojekt UR:BAN (2012–2015) zielte das Teilprojekt „Smarte Kreuzung“ auf eine ausgeglichene Nutzung verschiedener Verkehrsmodi ab. Dies sollte mittels innovativer Technologien geschehen, welche die Kapazität einer Kreuzung erhöhen und gleichzeitig die Emissionen verringern, indem die Fahraufgaben an einem Knotenpunkt effizienter ablaufen. Dazu sollte eine Kreuzung der Zukunft eine Vielzahl an Fahrzeug- und Infrastrukturapplikationen erhalten, u.a. wurde ein Einfahrtassistent entwickelt, der andere Verkehrsteilnehmer auf heranfahrende Einsatzfahrzeuge aufmerksam macht und gleichzeitig die LSA insofern beeinflusst, dass feindlicher Querverkehr gestoppt wird. Im Teilprojekt „Urbane Straße“ wurden Basiskomponenten für die flächendeckende Daten- und Informationsbereitstellung der Infrastruktur an die Fahrzeuge mit Fokus auf der Bereitstellung einer Vorausschau für Lichtsignalschaltzeitpunkte, der im urbanen Straßennetz befindlichen Lichtsignalanlagen entwickelt. Bei einem Pkw-basierten Grüne-Welle-Band löst sich der Lkw-Pulk wegen der niedrigen Fahrgeschwindigkeit auf. Dieses Thema wurden mit zwei Lösungsansätzen für ein Lkw-Pulk Management adressiert: LSA-Optimierung unter Berücksichtigung von Lkw-Pulks und Geschwindigkeitsanpassung im Lkw durch Kommunikation zwischen Fahrzeug und LSA (UR:BAN-Konsortium, 2015).

Im Rahmen des VITAL Projektes wurden zwei neu entwickelte Steuerungsverfahren für LSA zusammengefasst. Eines der beiden Steuerungsverfahren basiert auf Verlustzeiten. Hierbei wird der Mehraufwand einen Knoten zu passieren gegenüber einer Fahrt der gleichen Strecke ohne Knotenpunkt gegenübergestellt. Nun wird innerhalb eines möglichen Verlängerungszeitraumes die Freigabezeit soweit verlängert bis die Verlustzeit in der betroffenen Richtung minimal wird. Im Anschluss wird in die nächste Phase gewechselt und der Ablauf wiederholt sich. Das zweite Steuerungsverfahren hat das Ziel die Gesamtwartzeit am Knotenpunkt zu minimieren, indem die Freigabezeitanpassung und das GLOSA-Prinzip (Green Light Optimal Speed Advisory) kombiniert werden. Das bedeutet, dass im Fahrzeug Hinweise zu Signalzeiten der aktuellen Phase angezeigt werden und gleichzeitig eine Geschwindigkeitsempfehlung zum haltlosen Passieren des Knotens gegeben wird. Zusätzlich registriert die LSA kurzfristige zukünftige Fahrzeugankünfte und verlängert innerhalb möglicher Verlängerungszeiträume die Freigabezeit der aktuellen Phase. Für die Feststellung des Mehrwertes dieser neuen Steuerungsverfahren wurde auf Basis eines realen Knotenpunktes in der Stadt Halle eine Simulation mit dem Programm Sumo (Simulation of Urban Mobility) durchgeführt. Hierbei fungieren die Steuerungsalgorithmen als Aufsatz auf die bereits vorhandene Steuerung und führen in der Simulation zu einer Reduzierung der Verlustzeit um 5 % bis 13 % im Vergleich zur bereits vorhandenen verkehrsabhängigen Steuerung. Die Auswertung und Evaluierung erfolgte über Mitschnitte vom zentralen Verkehrsrechner der Stadt, welcher alle nötigen Kenngrößen wie Detektorbelegungen, Umlaufzeiten und Verlustzeiten erfasste. Maßgebend für die Evaluierung war die signalgruppenfeine Verlustzeit, welche abhängig von verschiedenen Auslastungsgraden gemeinsam für beide Versuchsknoten untersucht wurde. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigten in Halle deutliche Reduzierungen der Verlustzeit an der Signalgruppe mit einem zuerst hohen Wert. Eine Unterscheidung nach verschiedenen Belastungsintensitäten zeigte ein größeres Potenzial mit steigenden Fahrzeugzahlen. Am Braunschweiger Versuchsknoten stellten sich ebenfalls mit beiden Steuerungsverfahren Reduzierungen der Verlustzeiten am gesamten Knoten ein. Als weiteren Forschungsbedarf wird die Implementierung solcher Verfahren in koordinierte Streckenabschnitte genannt (Oertel, et al., 2017).

Grundidee des Projektes KoMoD (2017–2019) ist die praxisnahe Erprobung neuer Technologien zur Fahrzeug-Infrastruktur-Vernetzung sowie des hoch- und vollautomatisierten Fahrens im digitalen Testfeld Düsseldorf. Ein wesentlicher Fokus liegt im Zusammenspiel mehrerer Fahrerassistenzfunktionen in realen Fahrsituationen. Unter anderem wurde auch der Anwendungsfall der kooperativen LSA umgesetzt. Ein mit einer Onboard-Unit ausgestattetes Fahrzeug nähert sich einer LSA. Während der Zufahrt auf die LSA erhält das Fahrzeug Nachrichten über Mobilfunk und/oder über ITS G5 zur Kreuzungstopologie (MAP) sowie Zustands- und Prognoseinformationen (SPaT). Die für den Fahrer relevanten Informationen werden im Fahrzeug zur Anzeige gebracht. Mit Hilfe dieser Informationen kann der Fahrer seine Geschwindigkeit entsprechend anpassen, um unnötige Brems- und Beschleunigungsvorgänge zu vermeiden. Im Falle eines

unvermeidbaren Halts, wird dem Fahrer die für ihn relevante Reststoppzeit angezeigt. Für die Datenübertragung zum Fahrzeug wurden die Mobilfunkkommunikation und ITS G5 Kommunikation verwendet. Bei der Mobilfunkkommunikation werden die oben genannten Nachrichten von einem Service Provider ins Fahrzeug übertragen. Bei der ITS G5 Kommunikation übermittelt die Road Side Unit (RSU) die Daten, sobald sich das Fahrzeug im Empfangsbereich befindet (KoMoD-Konsortium, 2019).

Das Forschungsprojekt VERONIKA (2017–2019) hat zum Ziel, durch die Vernetzung von Fahrzeugen, insbesondere des ÖV, und Lichtsignalanlagen sowie deren Steuerung auf dem digitalen Testfeld Kassel einen emissionsreduzierten Verkehr zu erreichen. Hierzu sollen Fahrzeuge des ÖV mit eigens entwickelten On-Board-Units sowie die Infrastruktur mit Road Side Units ausgerüstet werden, um eine direkte Kommunikation und den Austausch von operativen Daten zu ermöglichen. Neben der Entwicklung von Applikationen und Steuerungsprogrammen sind Untersuchungen für die Erstellung von Relevanz-, Schaltzeit- und Ankunftszeitprognosen vorgesehen (Hoyer, 2019).

Das Verbundprojekt "Die digital vernetzte Protokollstrecke - urbanes Testfeld automatisiertes und vernetztes Fahren in Berlin (DIGINET-PS) (2017–2019)" trägt die Systemforschung zum automatisierten und vernetzten Fahren in den urbanen Raum. Ziel ist die Erforschung eines ganzheitlichen Referenzframeworks, das automatisierten Fahrzeugen gleichermaßen statisches Wissen über Straßenverlauf und Verkehrsführung, als auch dynamisches Wissen über die eigene Position und Verkehrssituation sowie prädiktives Wissen zur Vorhersage des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer übermittelt. Das Testfeld "City-West" in Berlin-Charlottenburg wird für diese Funktionen durch Verkehrs- und Parkraumüberwachung, Kommunikation mit Lichtsignalanlagen, ein intelligentes Beleuchtungskonzept und eine Kommunikationsinfrastruktur ertüchtigt (DIGINET-PS-Konsortium, 2019).

Das Projekt Bidirektionale multimodale Vernetzung (BiDiMoVe) (2018-2020) hat sich u.a. zum Ziel gesetzt, Linienbusse an Lichtsignalanlagen situationsabhängig (z. B. bei Verspätungen) gegenüber den anderen Verkehrsteilnehmern zu bevorzugen. Außerdem wird die Erprobung eines Abbiegeassistenten für das Busfahrpersonal erfolgen, der vor parallel verkehrendem Rad- und Fußverkehr warnen soll. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die IT-Sicherheit derartigen Kommunikationssystem, um diese von Angriffen von außen zu schützen (LSBG-Hamburg, 2019).

Forschungsstudien

Neumann (2010) entwickelte eine Methode mittels FCD die Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen zu schätzen. Dazu werden GPS-Daten einzelner Fahrzeuge in Vergleich zu der jeweiligen Verkehrsdichte gesetzt, um die gesuchten Verkehrskenngrößen abzuleiten. Die Grundlage dafür ist die Beobachtung, dass Positionsmeldungen von Fahrzeugen mit der jeweiligen lokal vorliegenden Verkehrsdichte korreliert. Beispielsweise lassen sich wiederkehrende Warteschlangen an LSA an einer Verdichtung an FCD-Meldungen ablesen. An dieser Stelle verwendet Neumann ein Warteschlangenmodell im Rahmen eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells. Daraus folgend wird unter Verwendung einer Maximum-Likelihood-Schätzung der mögliche Verkehrszustand mit der maximalen Wahrscheinlichkeit gewählt und die Warteschlangenlänge geschätzt. Im weiteren Verlauf werden mit Hilfe von realen und simulierten Daten systematisch die Potentiale dieses Verfahrens evaluiert. Aus der Arbeit resultiert die Erkenntnis, dass bereits geringe Ausstattungsraten von Fahrzeugen für vielversprechende Verbesserungen sorgen können und diese Methode ebenfalls an Knoten ohne LSA eingesetzt werden könnte. Außerdem weist die Methodik eine hohe Robustheit auf, sodass vorherrschende Parameter, wie Freigabezeiten nur grob festgelegt werden müssen, ohne einen erheblichen Qualitätsverlust zu erleiden. Weiterhin verursacht der Datenschutz bei dieser Vorgehensweise keine Probleme, da die einzelnen Fahrzeuge nicht identifiziert werden müssen. Neumann bezieht sich in seiner Arbeit mehrmals auf die Notwendigkeit der Datenfusion. Durch eine Fusion von FCD, C2X und Detektionsdaten ließe sich die Aussage über Rückstaulängen und andere Verkehrskenngrößen deutlich konkretisieren. Abschließend gibt er einen Ausblick auf die weiteren Möglichkeiten in der Anwendung dieses Ansatzes. Beispielsweise wäre die Ermittlung weiterer Kenngrößen wie Wartezeiten oder Emissionen interessant. Zusätzlich weist er darauf hin, dass dieses Verfahren implizit die Verkehrsnachfrage im Netz liefert und somit indirekt ebenfalls Verkehrsbelastungen

ermittelt werden könnten. Im Weiteren wäre eine Verwendung zur individuellen Routenplanung und auch der adaptiven LSA-Steuerung denkbar.

Venkatanarayana, et al. (2011) haben ein LSA-Steuerungsverfahren entwickelt, dass fahrzeuggenerierte Daten nutzt und für übersättigte Verkehrssituationen geeignet ist. Das Verfahren ermittelt die Rückstaulänge in Echtzeit und passt dann entsprechend die Versatzzeit und das Verhältnis von Freigabe- zu Sperrzeit der stromaufwärts liegenden Kreuzung. Die Freigabezeit wird aufgrund der Echtzeitschätzung des stromabwärts befindlichen Rückstaus entweder verzögert oder gekürzt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Durchfluss im Netz um 13,4 % gesteigert werden konnte, es 26,5 % weniger Verzögerungen gab und 40,9 % weniger Halte auftraten. Das Verfahren wurde jedoch nur für Einbahnstraßen mit zwei Phasensystem getestet.

He, et al. (2012) haben einen auf Abstand zum Vorderfahrzeug basierten Algorithmus genutzt, um Pseudopulks in einem Netz zu identifizieren. Ein lineares Programm wurde erstellt, um die zukünftigen Signalzeitenpläne zu erstellen, die auf dem derzeitigen Signalisierungsstatus, Pulkinformationen und Priorisierungsanforderung bestehen. Anhand von Simulationen konnte die Verringerung der Wartezeit sowohl für gesättigte und ungesättigte Verkehrszustände nachgewiesen werden. Die Versuche zeigten, dass eine Durchdringungsrate von 40 % notwendig ist, Ergebnisse zu erzielen.

Menig (2012) beschreibt in seiner Arbeit ein Verfahren zur Optimierung von LSA-Fahrzeug-Systemen durch den Austausch von Daten unter den beiden Systemkomponenten. Die Fahrzeuge stellen Daten über Geschwindigkeit, Position, Fahrzeugtyp und Abbiegerichtung zur Verfügung. Von der LSA wird angenommen, dass der aktuelle Zustand und wie lange dieser schon besteht zugänglich ist. Menig stellt eine mikroskopische Optimierung vor, welche die Mindestgeschwindigkeiten der Fahrzeuge maximiert. Angepasst werden die Freigabezeiten unter Berücksichtigung der Minimal- und Maximaldauern. Im Vergleich zur Festzeitsteuerung konnten die Verlustzeiten um 35 % gesenkt werden. Menig führt auch eine makroskopische Optimierung ein, welche die Fundamentalgrößen des Verkehrsflusses zur Abbildung des Verkehrs nutzt. Ziel ist die Minimierung der Verlustzeiten durch Gruppierung der Fahrzeuge entsprechend der Steuerung. Auch hier konnte durch Mikrosimulationen eine Reduzierung der Verlustzeit bis zu 57 % nachgewiesen werden.

Auch Day, et al. (2017) entwickelten ein auf die Optimierung der Versatzzeit ausgerichtetes Verfahren unter Anpassung der Freigabezeiteinteile. Zur Bestimmung der Versatzzeit wurde ein lineares Optimierungsmodell eingesetzt. Das Ergebnis wurde dann als Randbedingung im dynamischen Optimierungsmodell genutzt, mit dem optimale Freigabezeiteinteile ermittelt wurden. Mit einer 50%igen Ausstattungsrate in Fahrzeugen übertrafen die Ergebnisse des Verfahrens die der verkehrsabhängigen Steuerung. Mit einer Ausstattungsrate von unter 50 % verschlechterten sich die Ergebnisse.

Das von Nafi & Khan (2012) vorgestellte Verfahren nutzt fahrzeuggenerierte Daten, um basierend auf der Verkehrsdichte die Signalzeiten anzupassen. In Simulationsstudien wurde nachgewiesen, dass sich die Wartezeiten im Vergleich zur Festzeitsteuerung reduzierten.

Einen anderen Ansatz entwickelten Cheng, et al. (2017). Sie nutzten den bidirektionalen Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Steuerung, um die Fahrzeuge, welche sich auf demselben Fahrstreifen befinden, in kleine Gruppen zusammenzufassen. Diesen Gruppen werden anschließend entsprechende Zeitslots zugewiesen, um den Knotenpunkt zu queren. Es wurde komplett auf die Signalisierung mittels Signalgebern verzichtet. Um die Gruppen zu bilden wurde ein selbstlernendes neuronales Netzwerk mit Fuzzylogik eingesetzt. Die Studie lief unter der Annahme, dass jedes Fahrzeug ausgestattet ist. In Simulationsexperimenten wurde nachgewiesen, dass das Verfahren die Wartezeiten im Vergleich zur LSA-Steuerung um 40 % reduzieren kann.

Astarita, et al. (2017) veröffentlichen einen Artikel über den Nutzen von adaptiven LSA-Systemen im Zusammenhang mit Floating Car Data (FCD). Hierbei wird auf das Potenzial von FCD in der Verkehrssteuerung aufmerksam gemacht und darauf, dass bereits zahlreiche Geschwindigkeits- und Positionsdaten über GNSS und Bluetooth von mobilen Endgeräten wie Navigationsgeräte oder mobile Telefone existieren. Eine Problematik hierbei ist, dass solche Daten oft in der Hand von privaten

Konzernen, wie z.B. Google oder TomTom sind. Daher werden in öffentlichen Forschungsprojekten oft Fahrzeuge verwendet, welche mit einer Sendeeinheit ausgestattet werden, wozu auch eine Empfangseinheit in der Verkehrsinfrastruktur nötig ist. Generell bietet die Technologie aufgrund immer steigender Übertragungsraten gegenüber den herkömmlichen Detektoren den Vorteil, dass mehrere Fahrzeuge gleichzeitig mit Geschwindigkeit und Position erfasst werden können und dadurch ganz neue Möglichkeiten für die Steuerungsalgorithmen entstehen. In dem Artikel werden dazu zwei Varianten von Algorithmen unterschieden. Die erste Variante arbeitet mit gemischten Daten aus FCD und lokalen Detektionsmöglichkeiten. Die zweite Variante bezieht sich nur auf FCD und versucht die tatsächliche Anzahl an Verkehrsteilnehmern und das Fahrverhalten anhand von wenigen Daten hochzurechnen. Im Weiteren werden mit dem Programm Tritone mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Ausstattungsgraden und Belastungen simuliert. Ebenfalls wird eine Fehlerquote bei der Positionierung berücksichtigt und nachgeahmt. Der Steuerungsalgorithmus arbeitet so, dass die Richtung mit den am meisten ausgestatteten Fahrzeugen bis zu einer maximalen Zeit Freigabe erhält und sofern kein Fahrzeug ausgestattet ist, ein Festzeitprogramm mit einer minimalen Freigabezeit von 4 s abläuft. Daraus ergibt sich, dass nicht ausgestattete Fahrzeuge bis zu einem gesamten Ausstattungsgrad von 35 % eine höhere Reisezeit haben. Ab einer Ausstattungsrate von 35 % sinkt die Reisezeit für alle Verkehrsteilnehmer. Es wird zudem darauf hingewiesen, dass weiterhin vor allem praktischer Forschungsbedarf besteht.

Kaths (2017) betrachtet die kooperative Lichtsignalsteuerung als Integration von Fahrzeugen in die Steuerung vernetzter Verkehrssysteme. Sein vorgestelltes Verfahren preXible optimiert mittels einer modellbasierten prädiktiven Regelung die Schaltzeitpunkte und Annäherungsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge und erstellt somit eine im eigentlichen Sinne kooperative Steuerung. Das Verfahren wurde so entworfen, dass es auch im Bereich von Ausstattungsgraden in Fahrzeugen unterhalb der Vollausrüstung für eine kooperative Lichtsignalsteuerung nutzen lässt. Dies wurde durch die Verwendung von Induktionsschleifen ermöglicht. Kaths entwickelte eine signalgruppenorientierte Steuerung, welche aufgrund des modellbasierten Ansatzes einen vorausschauenden Charakter aufweist. Bei Vollausrüstung gegenüber der Variante ohne vernetzte Fahrzeuge konnte Kaths eine Reduktion der Reisezeit um bis zu 24 % nachweisen.

Liang, et al. (2018) haben ein Verfahren vorgestellt, das fahrzeuggenerierte Daten nutzt, um Pulks zu erkennen, die sowohl aus ausgestatteten und nichtausgestatteten Fahrzeugen bestehen. Die Freigabezeiten wurden entsprechend angepasst, um die Rate, mit der diese Pulks die Kreuzungen queren so anzupassen, dass sich die Gesamtwartzeit der Fahrzeuge minimiert. Die Fahrzeuglängsführung des ersten Fahrzeugs im Pulk wurde durch entsprechende Beschleunigungs- und Verzögerungshinweise beeinflusst. Das erste Fahrzeug war in der dieser Studie ein autonom fahrendes Fahrzeug. Positive Effekte konnten durch Simulationen nachgewiesen werden. Diese Effekte reduzierten sich, sobald die Ausstattungsrate von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen (AVF) weniger als 40 % erreichte.

Wie die Übersicht über die Projekt- und Forschungslandschaft zeigt, bieten sich viele Möglichkeiten das vernetzte und auch automatisierte Fahren zur Verbesserung des Verkehrsflusses in Städten einzusetzen. Die vorgestellten Verfahren stellen nur einen Auszug dar. Deutlich wird, dass sowohl an der Beeinflussung der Steuerung, der Beeinflussung des Fahrers und beidem gleichzeitig gearbeitet wird. Viele Studien bewegen sich im Rahmen von Mikrosimulationen, da in der Realität die technischen Voraussetzungen, sowohl was die Ausstattung der Fahrzeuge als auch die Ausstattung der Infrastruktur betrifft, nicht gegeben ist. Die meisten Forschungs-/Förderprojekte erproben die technische Umsetzbarkeit etwaiger Lösungen. Das Verfahren, welches im Rahmen dieses Projektes entwickelt wird, wird ebenso in einer Simulationsumgebung getestet. Den Entwicklern ist es zugleich wichtig, dass das Verfahren auch in der Realität unkompliziert umsetzbar ist. Daher wird das Verfahren direkt in der Simulation emuliert, als ob ein reales Steuergerät versorgt werden würde.

2.2.4 Einsatzfahrzeug-Priorisierung in Deutschland

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Umfrage über die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in Deutschland durchgeführt. 46 Städte und Kommunen sowie 18 Feuerwehrestationen nahmen an der Umfrage teil.

Insgesamt konnten durch die Umfrage Rückschlüsse über die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in 43 Städten in Deutschland gewonnen werden. Abbildung 2-11 zeigt für alle 43 Städte, ob diese eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung anwenden und wenn ja, unter Verwendung welcher Technologien. In einer Stadt findet dabei häufig mehr als eine Technologie Anwendung, weswegen in Abbildung 2-11 auch Kombinationen von Technologien dargestellt werden. Fahrzeuggestützte Systeme, die über ein Infrarot-Signal die Einsatzfahrzeug-Priorisierung auslösen, werden im Gegensatz zu der USA in Deutschland nicht verwendet. 33 % der Städte gaben an, derzeit noch keine Einsatzfahrzeug-Priorisierung im aktiven Betrieb zu haben, wie in Abbildung 2-12 dargestellt.

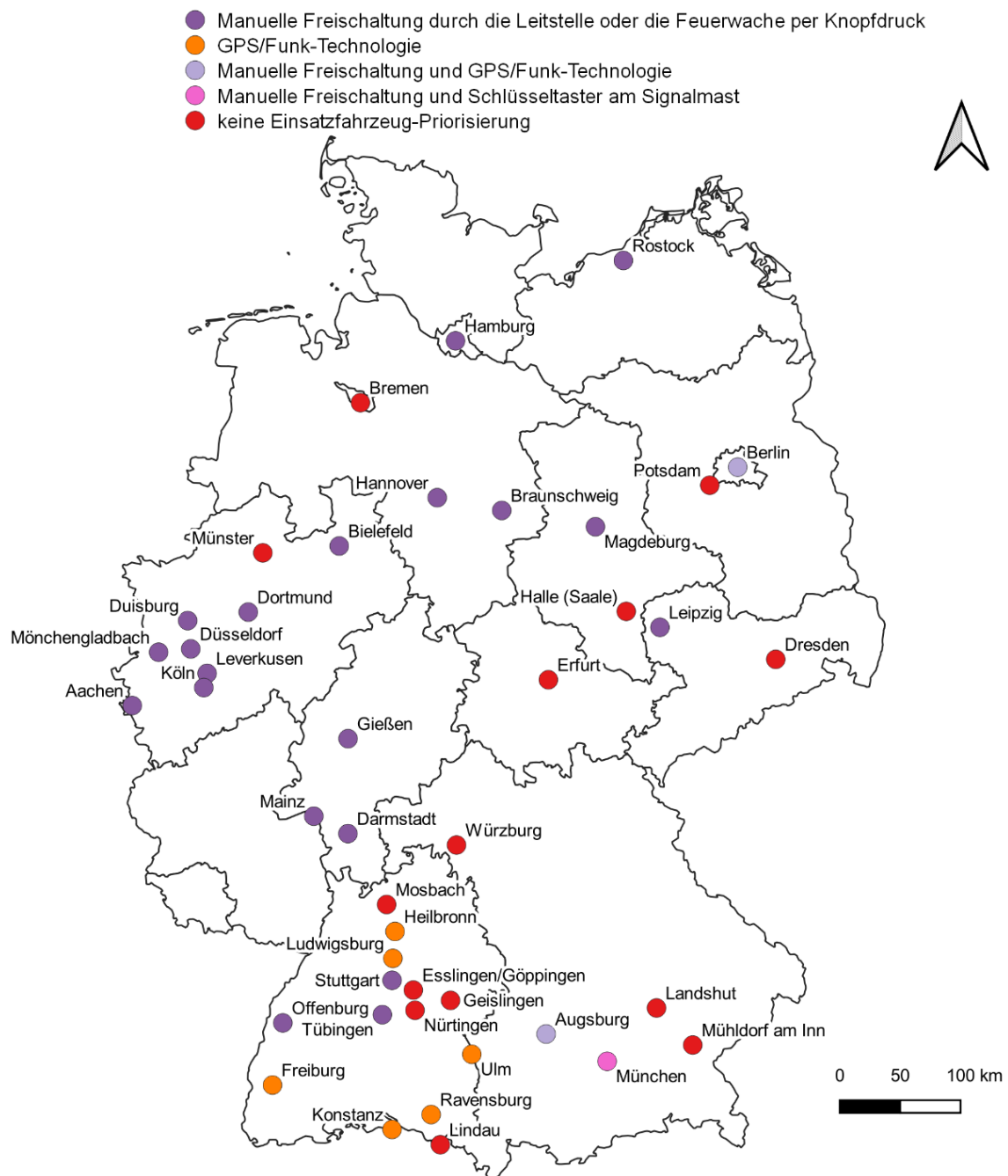


Abbildung 2-11: Technologien der Einsatzfahrzeug-Priorisierung Deutschland

Hinsichtlich des Fortschritts der Einsatzfahrzeug-Priorisierung sind vor allem die 35 % der Städte von Bedeutung, die eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung an mehr als fünf Kreuzungen anwenden. Die manuelle Aktivierung der Einsatzfahrzeug-Priorisierung über Schalter in den Feuerwachen oder der Leitstelle ist mit 46 % die häufigste Technologie. Eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung über die GPS/Funk-Technologie

findet bei 14 % der Städte Anwendung. Aus den Kommentaren, die die Städte bei der Umfrage hinterlassen haben, lässt sich schließen, dass die Einsatzfahrzeug-Priorisierung ein aktuelles Thema mit hoher Bedeutung ist. Viele Städte, die derzeit noch keine Einsatzfahrzeug-Priorisierung durchführen, planen dies in Zukunft zu tun. Andere Städte wollen ihre derzeitige Einsatzfahrzeug-Priorisierung auf weitere Kreuzungen ausweiten oder fortschrittlichere Technologien für die Einsatzfahrzeug-Priorisierung einführen, z.B. weg von der manuellen Aktivierung hin zur GPS/Funk-Technologie. Im Besonderen hervorzuheben sind die Städte Ludwigsburg und Braunschweig, die derzeit eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung basierend auf C2X-Kommunikation implementieren.

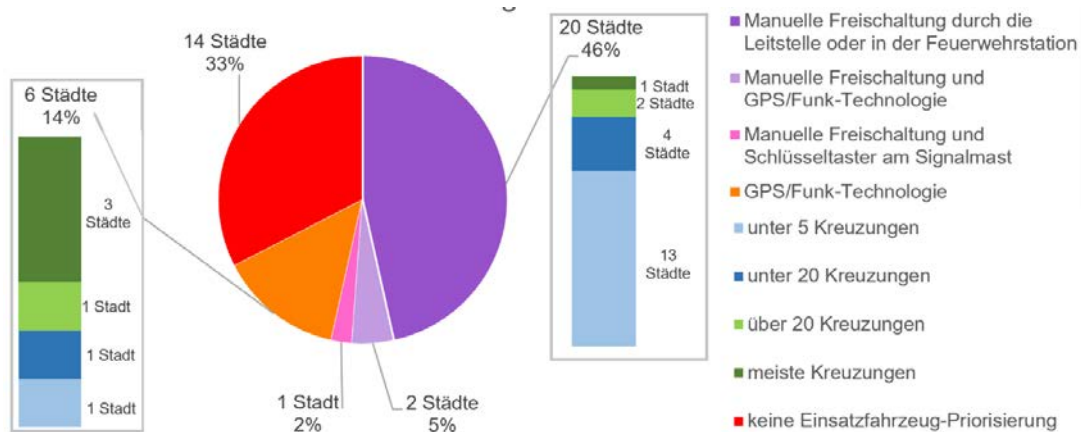


Abbildung 2-12: Verbreitung und Technologien der Einsatzfahrzeug-Priorisierung in Deutschland

3 Konzeption und Umsetzung der neuen Steuerungsverfahren

Die Möglichkeit auf aktuelle Einzelfahrzeugdaten in Echtzeit zugreifen zu können eröffnet neue Möglichkeiten in den bisherigen Steuerungsverfahren. Neben den zumeist diskret wirkenden Detektoren (Induktionsschleifen, Kamera, etc.) kann so eine kontinuierliche Messung ausgestatteter Fahrzeuge erfolgen. Anders als bei ÖV-Meldetelegrammen können, basierend auf den Informationen der CAM-Nachrichten, einzelne Fahrzeuge verfolgt und in den Gesamtkontext der Verkehrslage integriert werden. Im Gegensatz zu Floating Car Data (FCD) von etablierten Anbietern kann die Übertragung hierbei lokal und ohne signifikante Latenzen erfolgen. Folglich können CAM-Nachrichten zur Steuerung des Verkehrs mittels LSA herangezogen werden.

Eine vollständige Durchdringungsrate der C2X-Technologie über alle Verkehrsteilnehmer hinweg bzw. das Sicherstellen der Systemverfügbarkeit wird nur schwer zu beherrschen sein. Aus diesem Grund erscheint es als sinnvoll, anhand bestehender LSA-Steuerungen die Potentiale dieser zusätzlichen Informationen darzustellen und neue innovative Verfahren zu etablieren. D.h. durch die Verwendung neuer Verkehrskenngrößen aufgrund der C2X-Technologie können vorhandene Steuerungen verbessert und deren Steuerpotentiale erweitert werden.

Durch den Einsatz herkömmlicher Detektionstechnik, kann der Verkehrsplaner bis dato die Verkehrssituation nicht immer korrekt einschätzen und die verkehrlich besten Rückschlüsse ziehen. Die Detektoren messen zumeist nur an diskreten Messquerschnitten und ermöglichen so nicht die Verkehrslage auf dem gesamten Streckenabschnitt darzustellen. Auch kommen Detektoren nur in unmittelbarer Nähe zum Knotenpunkt zum Einsatz, da Detektoren in größerer Entfernung entweder technisch schwierig bzw. nur mit einem großen finanziellen Aufwand zu realisieren sind. Vernetzte Fahrzeuge können hier wichtige Zusatzinformationen liefern, um dieses Informationsdefizit zu beseitigen. Grundlegend sind folgende Verbesserungen möglich:

Konventionelle LSA Steuerung	Verbesserung durch C2X-Funktionen
Anforderungsdetektoren	Vorrausschauende Phasenanforderung
Bemessungsdetektoren	Angepasster Freigabezeitabbruch Dynamische Freigabezeitverlängerung
Starre Phasenfolge	Verkehrsadaptive Phasenfolge

Tabelle 3-1: Potentiale neuer Steuerungsverfahren

Grundsätzlich sollen die neuen Funktionen und Steuerungskonzepte dazu dienen die Anzahl der Halte- und damit auch der Anfahrtsvorgänge zu reduzieren. Dabei soll der Grundgedanke der erprobten verkehrsabhängigen Steuerung

- Nutzung von Phasen und Phasenübergängen,
- Freigabezeitbemessung von Phasen,
- Phasenforderungen und Phasentausche

weiterhin angewendet werden.

3.1 Neue C2X-Steuergerätefunktionen

Die Kommunikation mit dem vernetzten Verkehrsteilnehmer wird bidirektional erfolgen, wobei das vernetzte und/oder automatisierte Fahrzeug, durch aktiven Informationsaustausch in die Lage versetzt wird einen signalisierten Knotenpunkt sicher und komfortabel befahren zu können. Hierbei kommen die bereits in Kapitel 2.2 genannten Nachrichten zum Einsatz.

Neben der Assistenzfunktion im Einzelfahrzeug besteht auch die Möglichkeit mit den neuen Informationen die LSA-Steuerung zu unterstützen. Somit ergibt sich die Möglichkeit die Effizienz des aktuellen

Steuerungsverfahrens zu erhöhen und damit den Verkehrsfluss aller Verkehrsteilnehmer am Knotenpunkt positiv zu beeinflussen. Für Entscheidungen, welche für die Verkehrsregelung an signalisierten Knotenpunkten herangezogen werden können, erscheinen die MAP und CAM-Nachrichten derzeit am vielversprechendsten. Dabei ist grundlegend zwischen zwei verschiedene Informationstypen zu unterscheiden.

- Statische Informationen, welche die Topologie der Kreuzung beschreiben (MAP) und damit zeitunkritisch sind.
- Dynamische Informationen, diese beziehen sich z.B. auf die Position der einzelnen Fahrzeuge (CAM) und werden ständig aktualisiert.

Im Folgenden werden die Grundfunktionen, welche auf der MAP und CAM Nachricht basieren, näher erläutert. Die beschriebenen Funktionen stellen eine Erweiterung der bisherigen Steuerungsfunktionen dar, mit denen verkehrsabhängige Steuerungen innerhalb eines Verkehrsingenieurarbeitsplatzes beschrieben und im Steuergerät umgesetzt werden.

3.1.1 Grundfunktionen

Basierend auf dem Inhalt der MAP-Nachricht erscheint es sinnvoll die verfügbaren Informationen über Fahrrelationen (Fahrstreifen) und die zugewiesene Signalgruppen mithilfe von einer statischen Funktion zu integrieren. Hierbei sollen Attribute der Fahrstreifen (Parameter In) direkt abrufbar sein, um so in der Steuerungslogik direkt darauf referenzieren zu können. Die folgende Grundfunktion sollte dazu im Verkehrsingenieursarbeitsplatz zur Verfügung gestellt werden.

Funktion	Parameter	Beschreibung
MapLaneSgr1(ID)	ID– Fahrstreifennummer	Signalgruppe des Fahrstreifens auslesen

Tabelle 3-2: Statische Grundfunktion zum Einlesen MAP-Nachricht

Des Weiteren sind noch weitere Funktionen auf Basis der MAP-Informationen wie beispielsweise die Abfrage der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf einem Fahrstreifen bzw. die Fahrstreifenlänge denkbar. Diese Optionen sind für die weitere Verwendung im Rahmen der Untersuchung nicht notwendig und eine Umsetzung wurde deshalb nicht weiterverfolgt.

In der CAM-Nachricht, welche die Fahrzeuge zyklisch versenden, befinden sich zahlreiche Informationen die zum Steuern/Regeln eines signalisierten Knotenpunktes herangezogen werden können. Im Allgemeinen sind für die Steuerung die Inhalte der CAM-Nachricht (Zeit, Position, Geschwindigkeit) und daraus abgeleitete Kenngrößen (Abstand zur Haltlinie, Ankunftszeitpunkt) von besonderem Interesse.

Es wird davon ausgegangen, dass die CAM-Nachrichten bereits in der RSU oder Verkehrszentrale prozessiert worden sind und ein Map-Matching auf die verfügbare Geometrie des Knotenpunktes, welche in der MAP beschrieben wird, stattgefunden hat. Somit kann in den Steuergerätefunktionen direkt auf Informationen einzelner Fahrzeuge zugegriffen werden. Dabei können Fahrzeugcluster auf

- einem Fahrstreifen oder
- auf einem Knotenpunktarm

zusammengefasst werden. Da im Rahmen der Untersuchung die Annahme getroffen wird, dass eine fahrstreifengenaue Lokalisierung der Einzelfahrzeuge möglich ist, wird im Folgenden die Clusterung der Fahrzeuge auf einem Fahrstreifen beschrieben.

Für die Steuerung steht eine Liste aller Fahrzeuge zur Verfügung, die auf einem Fahrstreifen des relevanten Knotenpunktes lokalisiert wurden. Diese Fahrzeugliste hat folgende – auf CAM-Nachrichten basierende – Informationen je Fahrzeug:

- Distanz zur Haltelinie
- Aktuelle Geschwindigkeit
- Fahrzeugtyp
- Ankunftszeit (ETA – Estimated Time of Arrival)

Die Geschwindigkeit und der Fahrzeugtyp sind direkt aus CAM-Nachrichten auslesbar. Die Distanz zur Haltelinie muss aus den vorhandenen Geokoordinaten aus der CAM-Nachricht mittels eines MAP-Matching-Algorithmus ermittelt werden. Dabei wird versucht, die Geokoordinaten einem Fahrstreifen (MAP-Lane) zuzuordnen. In der verwendeten Simulationsumgebung ist statt Geokoordinaten der direkt der von einem Fahrzeug genutzte Fahrstreifen auslesbar.

Die Ankunftszeit eines Fahrzeugs (ETA) wird im Zuge des Projektes direkt aus der aktuellen Distanz zur Haltelinie und der aktuellen Geschwindigkeit berechnet. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass im verwendeten simulativen Ansatz die Fahrzeuge die maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit befolgen. In der Realität sollte an dieser Stelle die Berechnung eines Fahrzeug-ETA auf die maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit limitiert werden. Die Folge einer unlimitierten Geschwindigkeitsberechnung wäre eine verzerrte ETA Berechnung und einer „Belohnung“ schneller Verkehrsteilnehmer mit vorgezogenem Grünbeginn. Für Einsatzfahrzeuge müssen an dieser Stelle Ausnahmen gemacht werden. Eine ETA-Berechnung mit sehr geringen Geschwindigkeiten würde zu extrem hohen ETA-Werten führen, welche die Steuerung zu falschen Aktionen führen würde. Deshalb wird für stehende - und sehr langsam fahrende Fahrzeuge (≤ 1 m/s) kein ETA berechnet.

Funktion	Parameter	Beschreibung
CamStDist(typ, ID, pos)	typ – Quellobjekt ID – Fahrstreifennummer pos – Position in Liste	Distanz des gewählten Fahrzeuges (Fahrzeugtypunabhängig; kann jeden Stationtyp übermitteln) zur Haltelinie in Meter
CamStSpeed(typ, ID, pos)	typ – Quellobjekt ID – Fahrstreifennummer pos – Position in Liste	Aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit des gewählten Fahrzeuges in m/s
CamStCount(typ, ID)	typ – Quellobjekt ID – Fahrstreifennummer	Anzahl der CAM-sendenden Fahrzeuge auf gewählten Fahrstreifen
CamStType(typ, ID, pos)	typ – Quellobjekt ID – Fahrstreifennummer pos – Position in Liste	Stationstyp des gewählten Fahrzeuges

Tabelle 3-3: Dynamische Grundfunktionen zum Einlesen der CAM-Nachricht

Darüber hinaus wären noch weitere Funktionen auf Basis der CAM-Informationen wie beispielweise der Richtungswunsch sowie Fahrzeugdimensionen denkbar. Für diese Abfrage muss aber garantiert werden, dass die notwendigen Informationen vom Fahrzeug bereitgestellt werden. Andernfalls kann es zur Missinterpretation durch die LSA-Steuerung kommen. Des Weiteren ist der Fahrtrichtungswunsch in CAM-Nachrichten gemäß Spezifikation nur dadurch erkennbar, dass der Status der Blinker („an“ oder „aus“) vom Fahrzeug übertragen wird. Dies ist jedoch kein zuverlässiger Indikator, da z. B. auch Fahrstreifenwechsel als Abbiegewunsch interpretiert werden können. Eine detaillierte Untersuchung des Themenkomplexes „Steuerungen mit und ohne Fahrtrichtungswunsch“ steht noch aus und ist nicht Teil der Untersuchung.

3.1.2 Höherwertige Funktionen und Steuerungsgrößen

Typischerweise werden bei der Beschreibung von verkehrsabhängigen Steuerungen weitere Funktionen definiert, die sich aus den Grundfunktionen zusammensetzen und eine einfachere Bearbeitung ermöglichen. Die Funktionen benötigen keine zusätzlichen Informationen als die der beschriebenen Grundfunktionen. Sie gruppieren die elementaren Unterfunktionen und erleichtert somit die Handhabbarkeit

der einzelnen Funktion. Dies führt zu einer übersichtlichen Gestaltung der Steuerungslogik und erleichtert die Lesbarkeit und Nachvollziehbarkeit der entworfenen Logik.

Grundlage für alle Steuerungsentscheidungen ist der Ankunftszeitpunkt der Fahrzeuge (ETA). Dieser Wert wird sekundlich für jedes Fahrzeug neu berechnet. Weiterhin werden mit Hilfe von höherwertigen Funktionen außerdem sekundlich folgende Informationen ermittelt und stehen für Steuerentscheidungen zur Verfügung:

- Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge auf einem Fahrstreifen in einer Zielphase bei sofortigem Phasenwechsel
 - o Ohne Berücksichtigung einer Bemessungsfunktion
 - o Berücksichtigung einer parametrisierbaren Zielphasen-Dauer
 - o Berücksichtigung der Phasenübergangsdauer, Sichtvorlauf und Dauer des Stauabbaus
- Anzahl der stehenden Fahrzeuge auf einem Fahrstreifen in einer Zielphase
- Position (Index) des ersten Fahrzeuges auf einem Fahrstreifen in einer Zielphase, das bei einem sofortigem Phasenwechsel den Knotenpunkt ohne Halt passieren kann
 - o Berücksichtigung der Phasenübergangsdauer, Sichtvorlauf und Dauer des Stauabbaus
- Zeitlücke (ETA-Differenz) zwischen dem ersten durchfahrenden Fahrzeug und dem letzten stehenden Fahrzeug auf einem Fahrstreifen in der Zielphase
- Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge auf einem Fahrstreifen in einer Zielphase bei sofortigem Phasenwechsel und bei Berücksichtigung der C2X-Bemessung (s. Zeitbedarfswert-Steuerung)
 - o Berücksichtigung der Bemessungsfunktion
 - o Berücksichtigung einer parametrisierbaren Zielphasen-Dauer
 - o Berücksichtigung der Phasenübergangsdauer, Sichtvorlauf und Dauer des Stauabbaus
- Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge auf einem Fahrstreifen in der aktuellen Phase
 - o Berücksichtigung der Bemessungsfunktion
 - o Berücksichtigung der verbleibenden maximalen Phasendauer

Eine Zielphase ist in diesem Kontext eine Phase, die derzeit nicht aktiv ist, für die aber eine Anforderung vorhanden ist. Die Detektionsreichweite der Funktionen wurde durch einen Parameter in der Logik auf 300 m limitiert. Damit soll ein realistischer Empfangsbereich einer RSU an einem Knotenpunkt simuliert werden

3.2 Verbesserungspotenziale und C2X Anwendungsfälle

Im Folgenden werden verschiedene Anwendungsfälle beschrieben, die im Rahmen der Untersuchung betrachtet wurden.

3.2.1 Optimierung der Phasenanforderung

In konventionellen VA-Steuerungen werden zur Anforderung einer bestimmten Fahrtrichtung zumeist haltliniennahe Induktionsschleifen (Anforderungsschleifen) eingesetzt. So wird das Vorhandensein eines ferromagnetischen Stoffes erkannt (Fahrzeuge) und eine Belegung (occupancy) kann angegeben werden. Es stehen grundsätzlich zwei Informationen zur Verfügung. Zum einen, ob der Fahrstreifen belegt ist und

zum anderen, wie lange das erste Fahrzeug dort schon steht (Wartezeit). Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die detektierten Fahrzeuge eindeutig einem Fahrstreifen zugewiesen werden können. Ein Nachteil besteht darin, dass die Anforderung eines Fahrzeuges erst bei Eintreffen am Knotenpunkt erfolgen kann, womit die Zeit bis zur Gewährung der Freigabe einige Zeit vergehen kann. In der nachfolgenden Abbildung ist der Sachverhalt dargestellt für ein Fahrzeug, das zur Umlaufsekunde 0 am Knotenpunkt eintrifft und von der Signalgruppe K1L bedient wird.

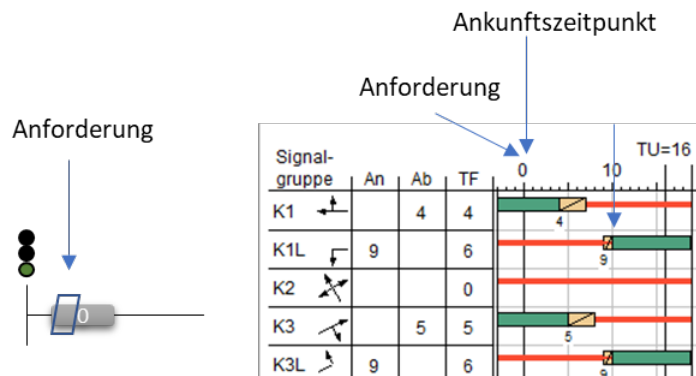


Abbildung 3-1: Konventionelle Anforderung mit Haltliniennahen Detektoren

Eine weitere Option besteht darin die Bemessungsschleifen für die Anforderung zu verwenden, die im Allgemeinen die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen messen. Sie befinden sich deutlich weiter vor der Haltlinie. Die Anforderung kann jetzt deutlich früher stattfinden (in Abhängigkeit der Streckengeschwindigkeit) und zwischen der Ankunft am Knotenpunkt und der Freigabe vergeht weniger Zeit als in der vorangegangenen Variante.

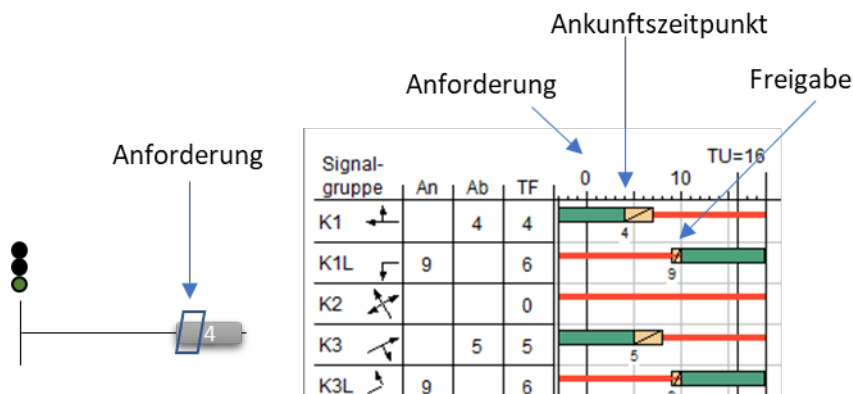


Abbildung 3-2: Anforderung auf Basis der Bemessungsdetektoren

Eine Verbesserung der Phasenanforderung mittels C2X-Funktionen besteht also darin, die Zeit einzelner Fahrzeuge zum Erreichen der Haltlinie zu messen und so die Anforderung zum idealen Zeitpunkt in der Steuerungslogik auszuführen. In der folgenden Abbildung ist ein Erreichen der Haltlinie nach Beginn der Freigabezeit realisiert („Fliegender Start“). Somit können die Wirkung von Verfahren, wie GLOSA, auch systematisch in der Steuerung unterstützt und verbessert werden.

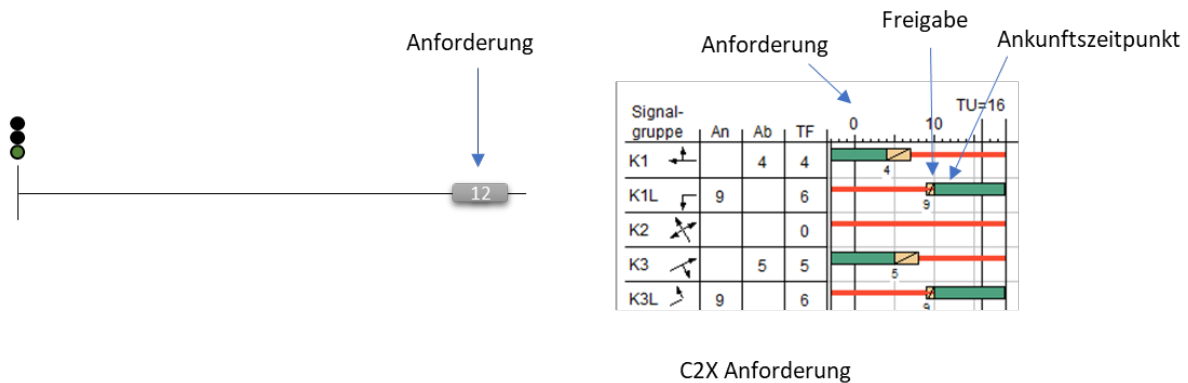


Abbildung 3-3: Anforderung auf Basis von C2X-Informationen

3.2.2 Optimierung der Freigabezeitbemessung

Im Allgemeinen wird in VA-Steuerungen die benötigte Freigabezeit einer Fahrtrichtung mithilfe von Bemessungsschleifen überwacht. Dabei wird eine Funktion konfiguriert, welche die n Zeitlücke zwischen Fahrzeugen zyklisch misst. Bei einer Überschreitung eines festgelegten Grenzwertes wird der Abbruch einer Freigabephase eingeleitet.

Die eingesetzten Bemessungsschleifen können nur an einem diskreten Messquerschnitt messen, d.h. es werden Überfahrten gemessen und ausgewertet. Eine Abbildung der Verkehrssituation auf der gesamten Strecke ist nicht möglich. Fahrzeugpuls, welche sich auf der Strecke befinden aber erst verzögert am Knotenpunkt ankommen, können durch diesen Ansatz nicht berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll das Zeitlückenverfahren zu erweitern. Bei der Freigabezeitbemessung auf Basis des mittleren Zeitbedarfswertes (im Folgenden „Zeitbedarfswert-Steuerung“) wird die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen bezogen auf den Ankunftszeitpunkt (ETA) berücksichtigt. Es wird ein mittlerer Zeitbedarf t_z ermittelt welcher sich aus dem Quotienten aus notwendiger Freigabezeit t_{FG} und Anzahl der abfließenden Fahrzeuge q ermitteln lässt. Dabei wird immer ein Fahrstreifen betrachtet.

$$t_z = \frac{t_{FG}}{q}$$

In der folgenden Abbildung ist das prinzipielle Vorgehen illustriert. Dabei wird der mittlere Zeitbedarfswert einem definierbaren Parameter gegenübergestellt, der beispielhaft bei 3s liegt.

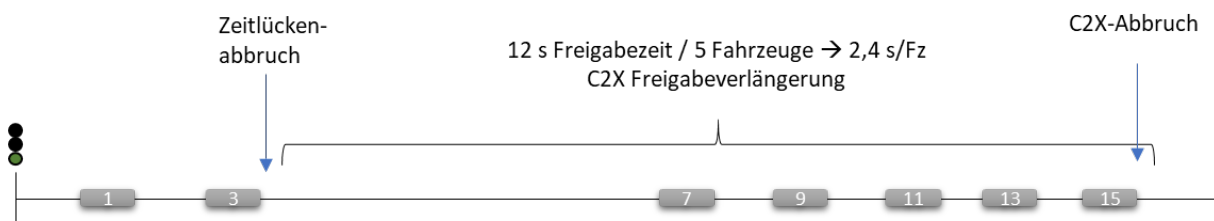


Abbildung 3-4: Zeitbedarfswert-Steuerung – Freigabezeitverlängerung (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA)

Die Zeitbedarfswert-Steuerung ist auch bei geringen Ausstattungsraten anwendbar. Dabei kommt es in der gleichen Situation und bei beispielhaft 2 konventionellen Fahrzeugen wie in der Abbildung 3-5 dargestellt zu keiner längeren Freigabezeitbemessung als bei der konventionellen Zeitlückensteuerung.

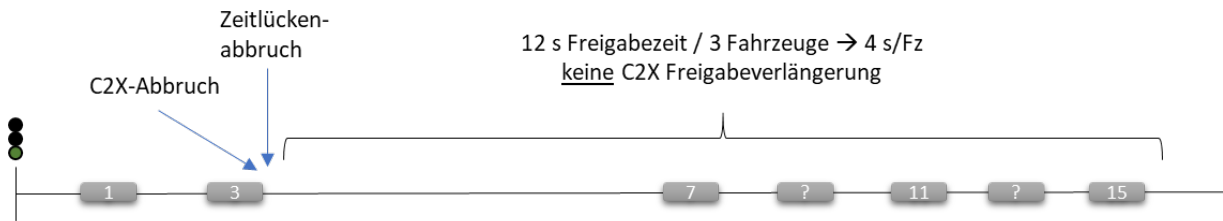
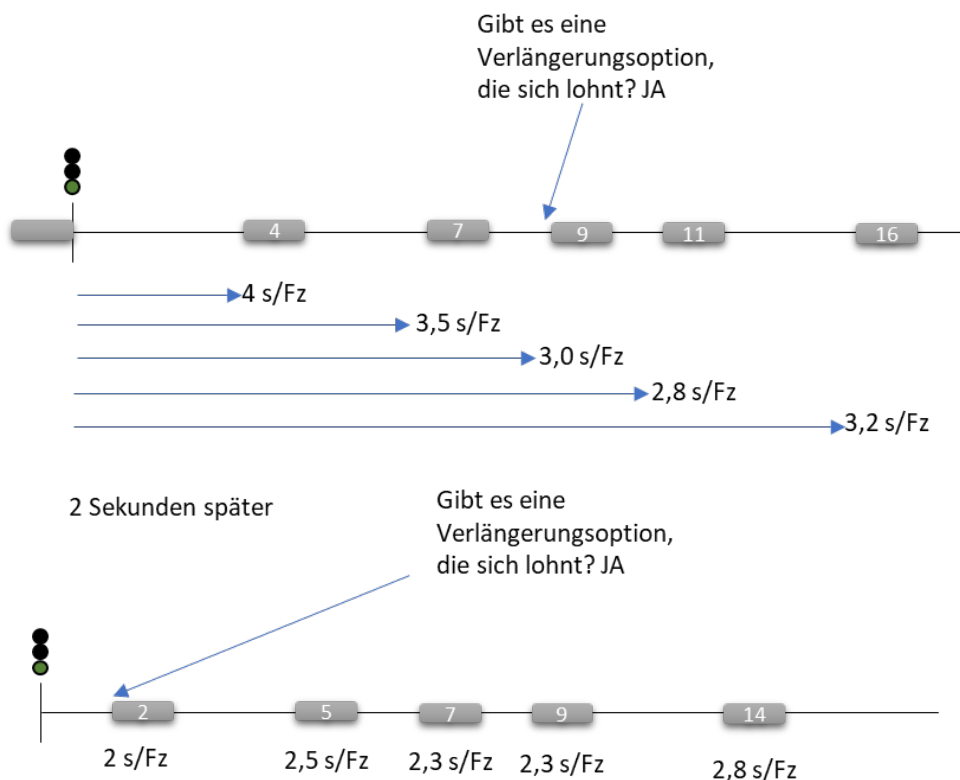


Abbildung 3-5: Zeitbedarfswert-Steuerung – Freigabezeitabbruch bei Ausstattungsrate < 100% (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA)

Die Zeitbedarfswert-Steuerung soll als zusätzliche Maßnahme zu einer konventionellen Zeitlückensteuerung genutzt werden. Eine Freigabezeitverlängerung durch die konventionelle Zeitlückensteuerung wird immer berücksichtigt. Die Zeitbedarfswert-Steuerung führt ggf. zu einer längeren Freigabezeit, jedoch nie zu einer kürzeren Freigabezeit.

Es wird von der Haltelinie aus gesehen für jedes Fahrzeug der mittlere Zeitbedarfswert berechnet, der sich ergibt, wenn die Freigabezeit bis zur Ankunft des betrachteten Fahrzeugs verlängert wird. Dabei können das betrachtete Fahrzeug und alle sich davor befindenden Fahrzeuge abfließen. Sobald sich – innerhalb der maximal zulässigen Phasendauer – eine Freigabezeitverlängerung für ein Fahrzeug „lohnt“, soll die Freigabezeit in der aktuellen Sekunde verlängert werden. Dabei wird der mittlere Zeitbedarfswert mit einem Grenzwert verglichen und sekundlich neu entschieden. Ein Freigabezeitabbruch soll dann erfolgen, wenn sich für kein Fahrzeug ein mittlerer Zeitbedarfswert ergibt, der kleiner als der Grenzwert ist.



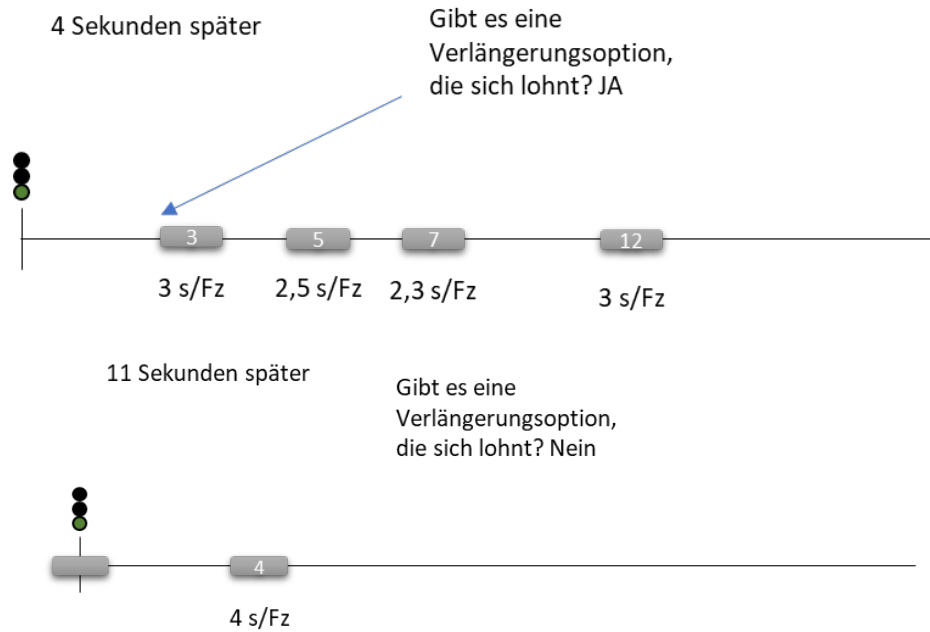


Abbildung 3-6: Zeitlicher Ablauf der Berechnung der mittleren Fahrzeugzeitlücke (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA)

3.2.3 Aktive Freigabezeitumverteilung

In koordinierten verkehrsabhängigen Steuerungen werden die durch einen Freigabezeitabbruch der Nebenrichtung ungenutzte Freigabezeit erst zu Beginn der Hauptrichtung im Folgeumlauf genutzt.

Wie in Abbildung 3-7 ersichtlich wird das Ende von der Signalgruppe K1L von 29 s (oben) auf 24s (unten) reduziert. Die gewonnen 5 Sekunden kommen der Hauptrichtung K1 zugute. Der Freigabebeginn verfrüht sich um 5 Sekunden. Das Problem liegt darin, dass die Freigabezeit verspätet der Hauptrichtung zugekommen ist und ggf. Fahrzeuge am Ende der Hauptrichtungsfreigabe bei Rot zum Stehen kommen. Diese Fahrzeuge hätten bei einer längeren Freigabe den Knotenpunkt ohne Halt passieren können.

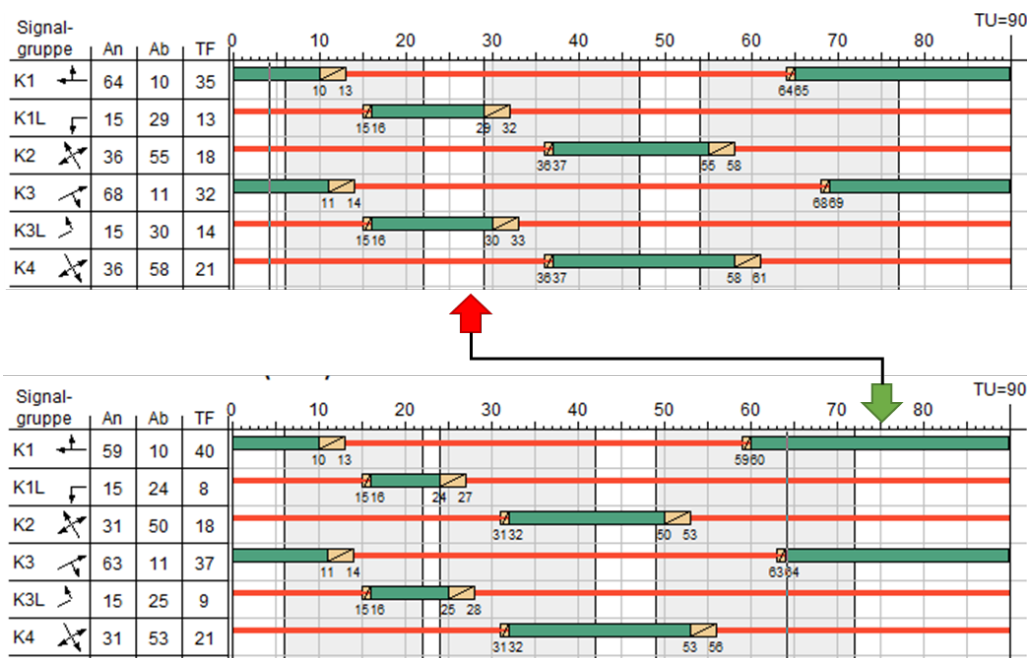


Abbildung 3-7: Freigabezeitverschiebung von der Nebenrichtung in die Hauptrichtung

Bei der aktiven Freigabezeitumverteilung soll bereits vor dem Start eines Phasenwechsels die notwendige Freigabezeit der folgenden Phasen berechnet werden. Dies ist möglich, da die Fahrzeuge, die sich auf den Knotenpunkt zubewegen bereits bekannt sind. Falls eine Folgephase weniger Freigabezeit benötigt als diese im Normalfall (entsprechenden der Freigabezeit-Parametrisierung) erhält, kann diese eingesparte Freigabezeit für eine Freigabezeitverlängerung der aktuellen Phase verwendet werden.

Bei vollverkehrsabhängigen Steuerungen führt ein Freigabezeitabbruch zur Verkürzung der Umlaufzeit. Dadurch erhalten andere Phasen nicht mehr Freigabe, jedoch erhöht sich der Freigabezeitanteil. Prinzipiell kann dieser Ansatz auch bei vollverkehrsabhängigen Steuerungen verwendet werden und die Umlaufzeit bei einem Freigabezeitabbruch beibehalten werden.

3.2.4 Variable Auswahl der Zielphase

Mithilfe von C2X-Funktionen kann eine Unterstützung bei der Auswahl der nächsten Phase bereitgestellt werden. Dabei kann der reguläre Phasenablauf besser an die individuelle Verkehrssituation angepasst werden, da Informationen zu den Einzelfahrzeugen auf der Strecke existieren. In der folgenden Abbildung ist dieser Sachverhalt dargestellt. Ziel ist es, immer in die Phase zu wechseln, in der mehr Durchfahrten ohne Halt möglich sind.

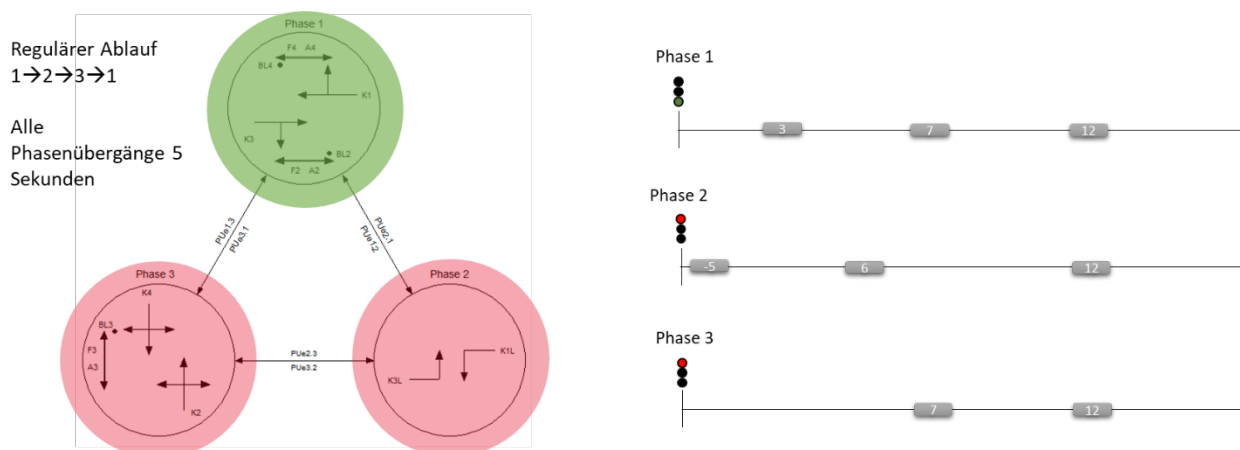


Abbildung 3-8: Auswahl der nächsten Phase mit C2X

Für die Entscheidung wird die Anzahl der Fahrzeuge bestimmt, die innerhalb einer Phase den Knotenpunkt passieren können. Dabei werden auch die Fahrzeuge berücksichtigt, die bis zum Freigabebeginn einer Signalgruppe zum Stehen gekommen sind. Diese müssen während der Freigabe zunächst abfließen. Auch während dieser Stauabbau-Zeit können weitere Fahrzeuge zum Halten kommen. Erst nach dem Abbau des gesamten Rückstaus können Fahrzeuge ohne Halt den Knotenpunkt passieren.

In folgendem Beispiel werden die durchfahrenden Fahrzeuge bei einem Wechsel in Phase 2 oder Phase 3 verglichen, wobei ein Phasenübergang im Beispiel 5 s dauert. Weiterhin wird im Beispiel vereinfacht mit einem Zeitbedarfswert von 2 s gerechnet. In Phase 2 kann das dritte Fahrzeug durchfahren. Das erste Fahrzeug steht bereits und das zweite Fahrzeug wird zwangsläufig zum Stehen kommen. In Phase 3 steht kein Fahrzeug und es werden bei einem sofortigen Phasenwechsel zwei Fahrzeuge ohne Halt den Knotenpunkt passieren können.

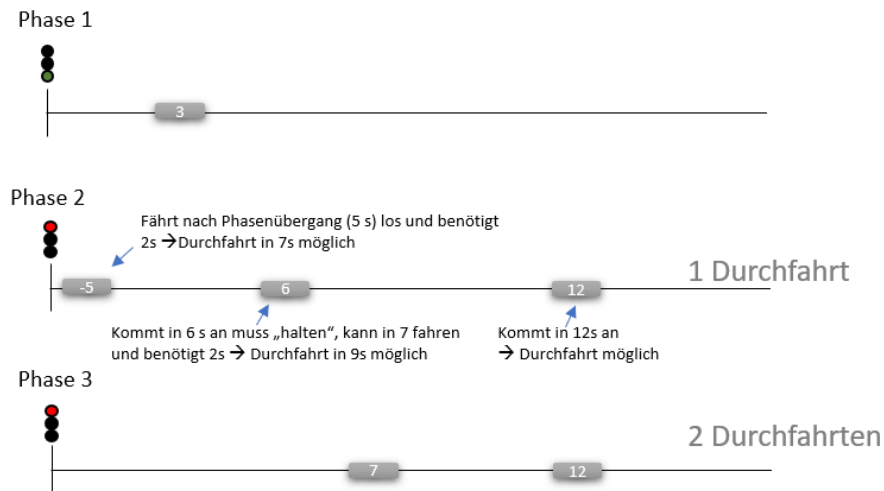


Abbildung 3-9: Auswahl der nächsten Phase mit C2X (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA bzw. Wartezeit (negativ))

3.2.5 Abbruch der Bemessungsphase

Aufbauend auf der variablen Auswahl der Zielphase soll zusätzlich ein Vergleich der Durchfahrten der aktuellen Phase und der potenziellen Zielphasen durchgeführt werden. Dabei soll ein Phasenwechsel dann durchgeführt werden, wenn in einer potenziellen Zielphase mehr Durchfahrten möglich sind als in der aktuellen Phase. Dies soll auch dann gelten, wenn in der aktuellen Phase noch eine Freigabezeitverlängerung gewünscht ist.

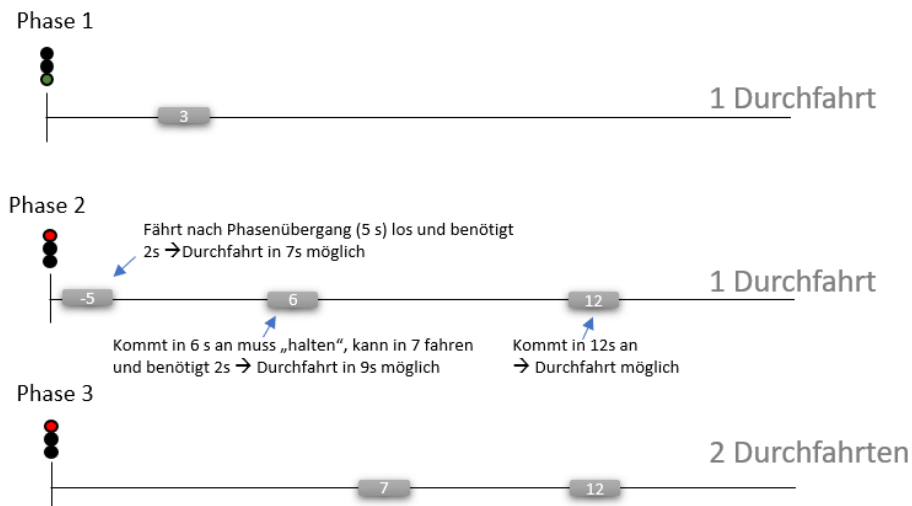


Abbildung 3-10: Auswahl der nächsten Phase und Abbruch der Bemessungsphase mit C2X (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA bzw. Wartezeit (negativ))

Bei der Erweiterung des Beispiels wird nun auch die Anzahl der Durchfahrten in der aktuellen Phase 1 berücksichtigt. Hier ist lediglich eine Durchfahrt möglich, so dass auch bei vorhandener Freigabezeitbemessung die Phase 1 zugunsten der Phase 3 abgebrochen werden soll.

3.2.6 Variabler Freigabebeginn in koordinierten Steuerungen

In koordinierten Steuerungen wird mit Hilfe von Zeitbereichen sichergestellt, dass der Freigabebeginn der koordinierten Richtung dann erfolgt, wenn ein Pulk theoretisch den Knotenpunkt erreichen müsste. Dabei ergeben sich in zwei Fällen Verbesserungspotential.

Zum einen kann in einer koordinierten Steuerung erst dann ein Freigabeabbruch durch eine Bemessungsfunktion angewendet werden, wenn auch der koordinierte Pulk (bzw. Pulke beider Richtungen) theoretisch an der Haltlinie sein müsste. Andernfalls würde man eine Phase bereits vor dem Erreichen des Pulkes an der Haltlinie abbrechen. Um dies zu realisieren wird bei koordinierten Steuerungen der früheste Abbruch der Hauptrichtungsphase durch einen Zeitbereich definiert. Tritt der Fall ein, dass kein Pulk im Zulauf auf den Knoten ist, würde eine Phase bis zur theoretischen Pulkankunft gehalten werden. Durch die Kenntnis der auf den Knotenpunkt zufahrenden Fahrzeuge muss nicht auf die theoretische Pulkankunft gewartet werden bis eine Freigabezeitbemessung aktiv werden kann.

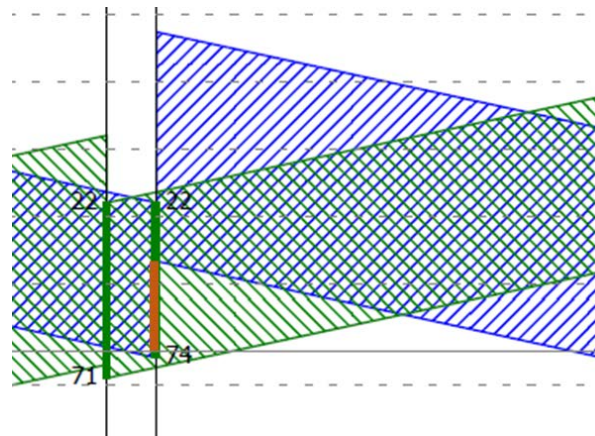


Abbildung 3-11: Theoretische Pulkankunft der Gegenrichtung (Blau) und frühester Freigabeabbruch in Sekunde 12

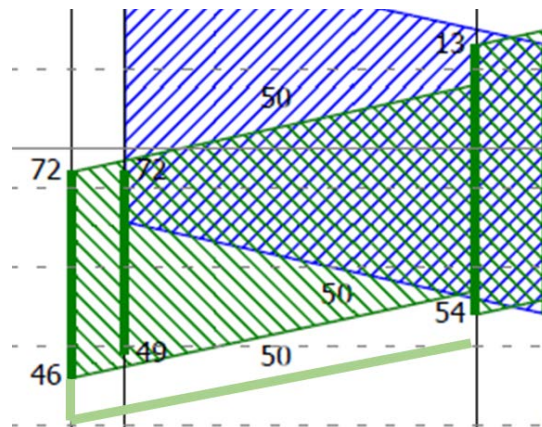


Abbildung 3-12: Verfrühte Pulkankunft der koordinierten Richtung (Grün)

Eine weitere Situation kann durch einen früheren Freigabezeitbeginn der koordinierten Richtung am vorhergehenden Knotenpunkt verursacht werden. Dies führt dazu, dass ein Pulk früher als erwartet am Knotenpunkt ankommt und aufgrund dessen zum Halten kommt, da die Hauptrichtung noch keine Freigabe erhalten hat. Diese Situation wird durch die Anwendungsfall „Abbruch der Bemessungsphase“ abgesichert. Weiterhin ist es auch möglich, dass ein Pulk verspätet am Knotenpunkt eintrifft. In diesem Fall würde zu früh in die koordinierte Phase gewechselt werden und eine ggf. gewünschte Freigabeverlängerung einer Nebenrichtungsphase nicht realisiert werden können. Da die Fahrzeuge im Zulauf auf den Knotenpunkt bekannt sind, kann bei einer verspäteten Pulkankunft eine zusätzliche Freigabezeitverlängerung für die Nebenrichtung realisiert werden, falls dort Bedarf besteht.

3.3 Das C2X-Steuerungsverfahren – Umsetzung der Anwendungsfälle

In diesem Kapitel werden das Grundprinzip der C2X-Steuerung als auch die C2X-Funktionsgruppen der Steuerungslogik erläutert. Um ein Verständnis für den Ansatz der C2X-Logik zu erhalten wird es als notwendig erachtet, die Steuerung der Bestandslogik kurz zu erläutern, um anschließend auf den Ansatz der C2X-Logik einzugehen. Zunächst wird daher auf den grundlegenden Aufbau der Bestandslogiken der Laborknotenpunkte eingegangen. Dies wird vorweggegriffen, um ein Verständnis für die Logik aufzubauen. Erläutert wird die Logik anhand eines Ablaufdiagramms. Im Folgenden werden die Ansatzpunkte und Konzepte vorgestellt mit der Konkretisierung auf ein Konzept. Abschließend wird das Konzept detaillierter beschrieben, unter der Verwendung der im Kapitel 3.1 genannten Funktionen. Die Funktionsgruppen in der Logik werden mithilfe der Anwendungsbeispiele näher erläutert, sodass sich ein Gesamtbild der C2X-Logik herausstellt. Zunächst seien nochmals kurz die Anforderungen an ein C2X-Steuerungsverfahren gemäß dem Verständnis der Autoren zusammengefasst.

3.3.1 Anforderungen an ein Steuerungsverfahren mit C2X-Elementen

Für die Autoren ist es von entscheidender Bedeutung ein Steuerungsverfahren zu ermöglichen, das für den Anwender, sprich projektierenden Verkehrsingenieur, Steuergerätehersteller und auch Kommune, nachvollziehbar und verständlich ist. Es wird angenommen, dass dies die Einsatzwahrscheinlichkeit des Konzeptes deutlich erhöht im Vergleich zu einem „Black Box-Verfahren“.

Das Verfahren muss mit „herkömmlichen“ Datenquellen (klassische Detektionstechnologien) genauso wie mit „neuen“ Datenquellen (CAM-Nachrichten direkt vom Fahrzeug) zurechtkommen. Das Verfahren muss den Verkehr noch steuern, auch wenn kein Fahrzeug aktiv Daten sendet. Das Verfahren soll auch geringe Penetrationen abbilden können und C2X-Fahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge ähnlich gewichten.

Der bisherige Ansatz der Strukturierung der Steuerung in Phasen soll nicht aufgeben werden. Dies soll der Akzeptanz des Konzeptes bei den Anwendern dienen.

Die verkehrstechnischen Ansätze zur Steuerung des Verkehrs, wie zum Beispiel die bevorrechtigte Behandlung von Verkehrsströmen muss weiterhin gewährleistet sein.

3.3.2 Erläuterung des Grundprinzips der Bestandslogiken/-steuerungen

Die Steuerungsweisen der Laborknotenpunkte sind trotz der Unterschiede in Größe, Geometrie und Ausstattung ähnlich. Die Ähnlichkeit besteht im Aufbau des Phasenplans in Haupt- und Nebenrichtung und auch in der Hierarchie des Ablaufdiagramms der Phasenlogik.

Phasenfolgeplan

In jedem Knotenpunkt gibt es Phasen für die Hauptrichtung (HR) die Nebenrichtung(en) (NR). Die Hauptphase signalisiert alle Signalgruppen der Hauptrichtung und wird in allen Knotenpunkten als „1“ bezeichnet. Diese Phase dient auch als Einschaltphase. Die Steuerungen sind als Dauergrünsteuerungen der HR konzipiert. Die Phasendauer der Phase wird durch die Mindestfreigabezeit der Fußgänger bestimmt. Ist die Phasendauer länger als die Freigabezeiten der Fußgänger, kann in eine andere Phase geschaltet werden. Kommt es zu einer Anforderung in einer Nebenrichtung, kann direkt in eine Nebenrichtungsphase geschaltet werden unter der Bedingung, dass keine Bemessung der HR stattfindet. Ist die Bedingung für die Bemessung der Hauptphase erfüllt, kommt es an den Bemessungsdetektoren nicht zu einem Zeitlückenabbruch von 3 s. Es wird immer die Phase 11 (geklonte Phase 1) ohne die Fußgängersignalgruppen geschaltet. Dies wird in der Praxis angewandt, um die langen Zwischenzeiten (ZZ) der Fußgänger, welche in den Phasenübergängen in die Nebenrichtungen existieren, zu umgehen. Die Phase 11 wird als reine Bemessungsphase nur aktiv, wenn es eine Anforderung der Nebenrichtung mit einem Bemessungswunsch gibt. Die Dauer der Phase 11 wird durch ein Rahmenende oder einen festgelegten Parametersatz definiert. Aus der Phase 11 kann nicht in Phase 1 zurückgeschaltet werden.

In der Phase 11 wird in die weiteren Phasen der Nebenrichtung gewechselt. Die Phase 11 besitzt die größte Anzahl an Phasenübergängen und Entscheidungen.

Die Phasen der Nebenrichtung sind je nach Anzahl der Fahrstreifen und Signalgruppen an den Knotenpunkten in unterschiedlicher Anzahl vorhanden. Alle Phasen der Nebenrichtung laufen auf Anforderung, d.h. die Phasen werden aktiv, sobald es eine Anforderung erkannt wurde. Alle Phasen mit der gleichen Anfangsziffer (bspw. 1, 11 und 12) werden als Phasengruppe im Weiteren bezeichnet. Zusätzlich gibt es an den Knotenpunkten außerorts und innerorts „groß“ die Nebenrichtungen einen Phasentausch. Ein Phasentausch findet statt, sobald für die erste Nebenrichtungsphasengruppe keine Anforderung erfolgte und direkt in die zweite Nebenrichtungsphasengruppe geschaltet wurde. Kommt es dann zur Anforderung wird die Nebenrichtungsphasengruppe vor die Hauptphase geschaltet, sprich getauscht bevor in die HR zurückgeschaltet wird. Der Phasentausch wird in der verkehrsabhängigen Steuerung mit denselben Phasen und boolesche Variablen gesteuert. Grundsätzlich ist die Phasenfolge erstellt worden, um die geringsten ZZ-Verlustzeiten zu generieren. Es ist zu unterscheiden zwischen den Phasen der HR und der NR. Die Haupttrichtung hat keine definierte Höchstdauer und die NR werden durch Rahmenenden oder Parameterwerte limitiert.

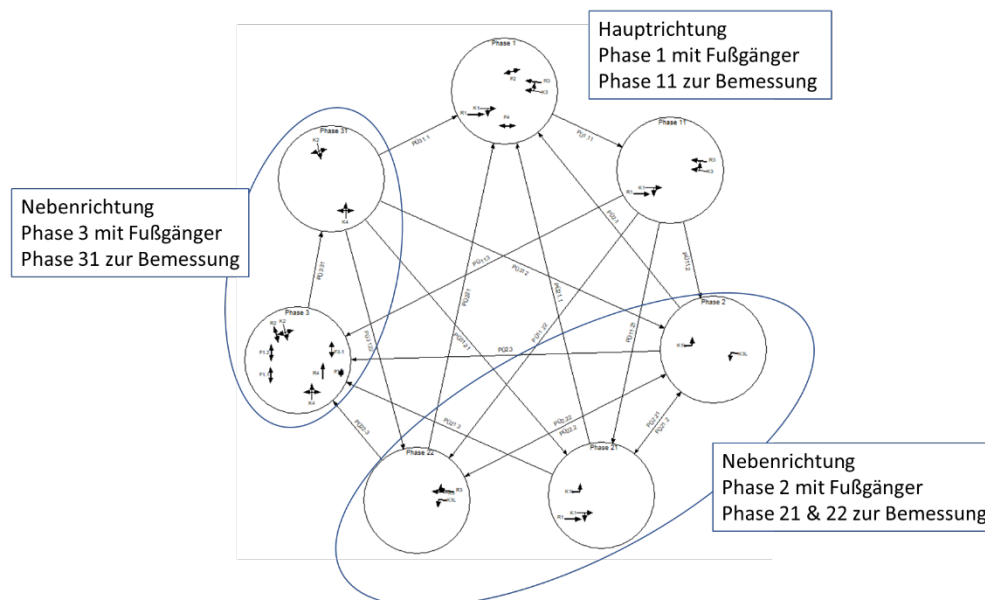


Abbildung 3-13: Phasenfolgeplan

Hierarchie in einer Phasenlogik

Das Ablaufdiagramm der Logik wird sekundlich durchlaufen. Wird eine Funktion innerhalb der Logik aufgerufen, wird sie entsprechend bei diesem Logikdurchlauf ausgeführt (Abbildung 3-14). Eine Phasenlogik gliedert sich grob in drei Teile. Die **erste Entscheidungsebene** ist die Abfrage über die Mindestgrünzeiten. Werden die Mindestgrünzeiten ausgewählter Signalgruppen nicht erfüllt wird in der Phase verblieben.

Die **zweite Entscheidungsebene** ist die Bemessung. Die Phase wird bemessen durch die zugewiesenen Bemessungsdetektoren bis die maximale Phasendauer, festgelegt über einen Parameter oder über einen zeitlichen Rahmenplan, erreicht ist.

Liegt kein Bemessungswunsch mehr vor oder ist die maximale Dauer erreicht, wird die **dritte Entscheidungsebene** erreicht. Es werden die möglichen Anforderungsabfragen für die weiteren Phasen abgearbeitet. Fordert keine Phase an, wird die Haupttrichtungsphase geschaltet bzw. in der HR-Phase verblieben.

Bestandslogik

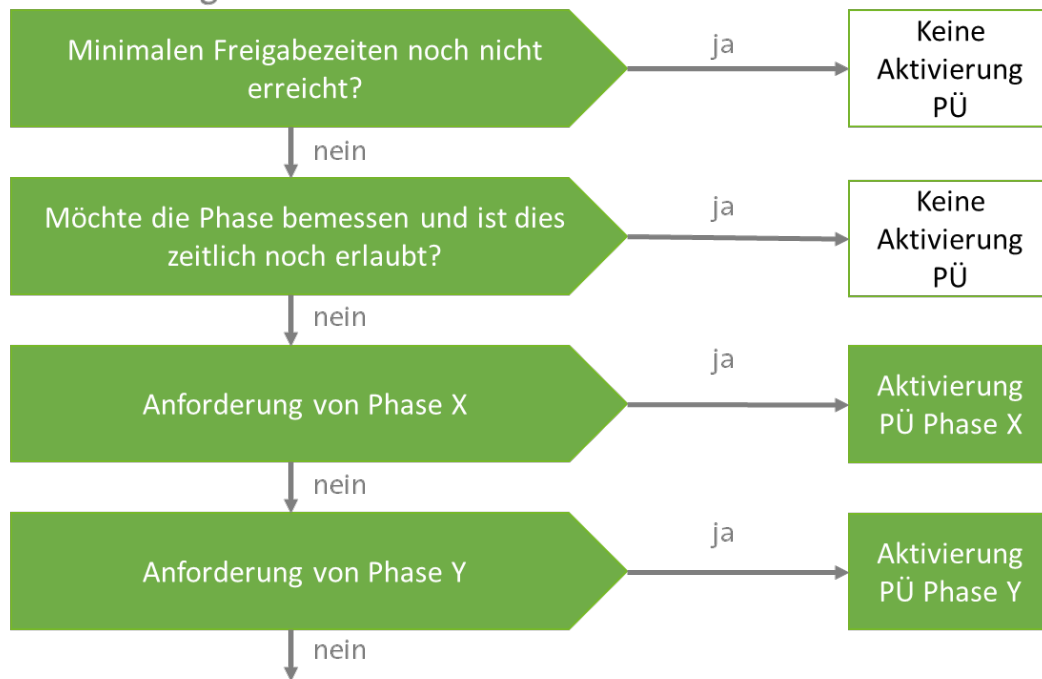


Abbildung 3-14: Konzeptionelle Hierarchie der Phasenlogik

3.3.3 Erläuterung der Logikansätze für die C2X-Funktionen

Die Vernetzung von Fahrzeugen mit Lichtsignalanlagen ermöglicht die Integration neuer Datenquellen und Informationen in der Steuerung einer LSA. Eine Herausforderung ist es, diese neuen Möglichkeiten mit bestehenden Steuerungen in Einklang zu bringen, da nicht von hundertprozentiger Ausstattung des Fahrzeugbestands mit C2X-Technologie auszugehen ist. Aufgrund dieses Umstands wurden drei wichtige Voraussetzungen für die Erstellung einer C2X-LSA-Steuerung vorausgesetzt:

- Einfache Implementierung der C2X-Funktionen in bestehende Logiken
- Gleichbehandlung von C2X-Fahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen
- Anwendungsfälle/Komponenten sollen komplett in einer Logik umgesetzt werden können

Bei der Entwicklung des C2X-Steuerungsverfahrens bzw. bei der Erstellung der Steuerungslogik wurden unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben. Ebenso werden die Gründe genannt, weshalb ein Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.

Konzept 1 – Infiltration (Mischung von konventionellen und C2X Funktionalitäten)

Die C2X-Funktionen werden direkt mit den Bestandsfunktionen kombiniert und die Bestandslogik somit von den C2X-Funktionen infiltriert. Damit ist eine besonders einfache Integration in bestehende Steuerungen möglich, da die benutzten Steuergerätefunktionen identisch sind. Die Vorteile des Konzepts sind:

- Bestandslogik bleibt erhalten
- Bestehende Logiken können weiterhin benutzt werden. Dies führt zu einer einfachen Implementierung.
- C2X ist nicht notwendig, damit die Logik/Steuerung funktioniert. Die Bestandlogik bleibt als Rückfallebene erhalten

Problematisch ist jedoch, dass nicht ausschließlich C2X-Funktionen oder konventionelle Funktionen benutzt werden können. Es zeigte sich im Projektverlauf jedoch, dass diese Flexibilität zwingend notwendig ist. Aus diesem Grund wurde das Konzept verworfen.

Konzept 2 – Vorschaltung von C2X Funktionalitäten

Beim Konzept 2, der Vorschaltung, wird vor dem Ablauf der Bestandslogik der Logikbaustein mit den C2X-Funktionen gesetzt. D.h. zunächst werden die C2X-Daten liefernden Fahrzeuge berücksichtigt und im Folgenden die herkömmlichen Datenquellen. Die Bestandlogik bleibt bei diesem Vorgehen unberührt, wohl aber werden C2X-Fahrzeuge bevorzugt behandelt. Folgende Vorteile weist das Konzept 2 auf:

- Bestandslogik bleibt erhalten.
- Klare Trennung der Bestandslogik und C2X-Logik.
- Bestehende Logiken können einfach erweitert werden. Dies führt zu einer einfachen Implementierung.
- C2X ist nicht notwendig, damit die Logik/Steuerung funktioniert. Die Bestandlogik bleibt als Rückfallebene erhalten

Nachteil dieses Konzepts:

- C2X-Fahrzeuge werden bevorzugt behandelt auch vor Fahrzeugen des öffentlichen Personennahverkehrs
- C2X Funktionen können nur bedingt mit konventionellen Funktionalitäten verknüpft werden

Konzept 3 - Kombination

Des Konzept 3 kombiniert beide erwähnten Konzepte. Teilweise werden C2X-Funktionen in der Abarbeitungssequenz vor konventionellen Steuerungsfunktionen abgearbeitet und teilweise werden konventionelle Funktionen mit C2X-Funktionen kombiniert.

Insbesondere die konventionelle Freigabezeitbemessung kann relativ einfach mit der neuen Zeitbedarfswert-Steuerung kombiniert werden. Dies ermöglicht eine besonders einfache Integration und bedarf keiner besonderen Flexibilität. Funktionen, die sich auf eine C2X-Anforderung im weitesten Sinne beziehen, müssen separat integriert werden, da hier spezielle Anforderungen wie Auslastungsgrad und Penetrationsrate berücksichtigt werden müssen. Diese Funktionen werden vor der konventionellen Bemessung separat abgearbeitet. Dies führt zu einem gewissen Mehraufwand bei der Integration, ist aber aufgrund der notwendigen Flexibilität erforderlich.

3.4 C2X-Steuerungsalgorithmus

In diesem Kapitel werden die Funktionen beschrieben, die aufbauend auf den Grundfunktionen und Steuerungsgrößen (vgl. Kapitel 3.1) die konzeptionell betrachteten Anwendungsfälle (Kapitel 3.3) realisieren.

3.4.1 Steuerungsablauf

Es werden innerhalb der sequenziellen Abarbeitung der Steuerungslogik folgende Komponenten unterschieden:

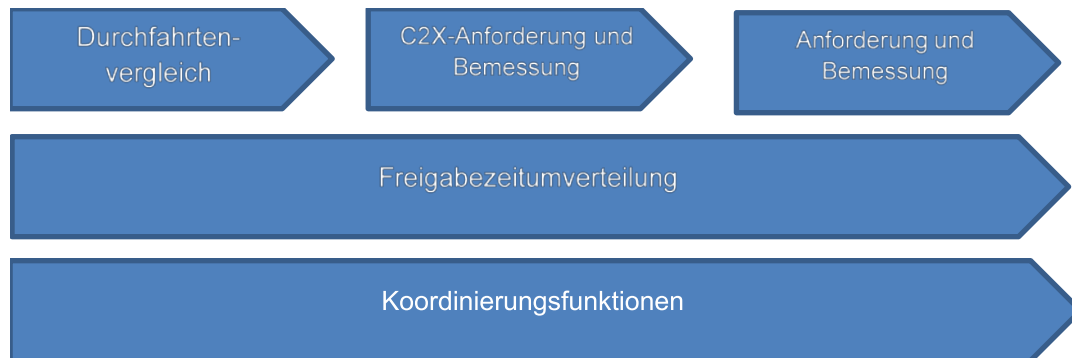


Abbildung 3-15: Sequenzielle und parallele Abarbeitung der Steuerungslogik

Der Durchfahrtenvergleich, die C2X-Anforderung und die konventionelle Anforderung werden sequenziell abgearbeitet. Die Freigabezeitumverteilung sowie die Koordinierungsfunktionen sind prinzipiell während der gesamten Logikabarbeitung aktiv bzw. werden berücksichtigt.

Die in den folgenden Kapiteln genannten Komponenten werden auf Basis der gemessenen C2X-Penetrationsrate dazugeschaltet, wie die folgende Abbildung zeigt.

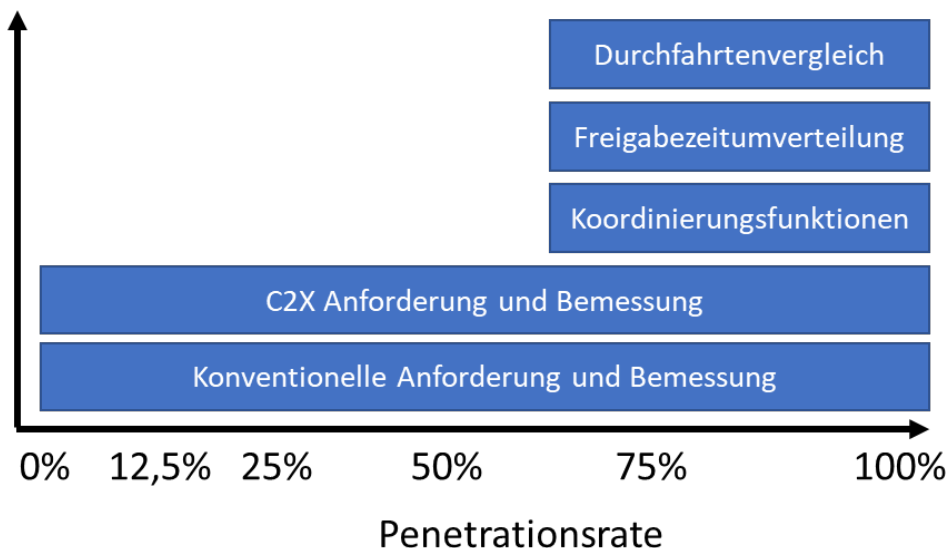


Abbildung 3-16: C2X-Steuerungskomponenten in Abhängigkeit der Penetrationsrate

Die Gruppe der konventionellen Anforderung und Bemessung erfolgt mit der C2X-Anforderung und C2X-Bemessung bei einer Penetrationsrate von 0 %. Die zweite Gruppe, welche die Komponenten des Durchfahrtenvergleichs, der Freigabezeitumverteilung und den Koordinierungsfunktionen umfasst, wird ab einer Penetrationsrate von 75 % aktiviert. Der Hintergrund für diese Trennung ist die Intensität des

Eingriffes der Komponenten in Verbindung mit einer geringen C2X-Penetrationsraten. Durch diese Staffelung werden mögliche negative Auswirkungen auf die konventionellen Fahrzeuge vermieden.

3.4.2 Durchfahrtenvergleich

Vergleich der Anzahl der in der verbleibenden Phasendauer noch durchfahrenden Fahrzeuge auf allen Fahrstreifen unter Berücksichtigung der Zeitbedarfswert-Steuerung (Freigabezeitbemessung)

und

der Anzahl der möglichen Durchfahrten auf den jeweiligen Fahrstreifen aller Zielphasen unter Berücksichtigung der Dauer des Phasenübergangs, der stehenden Fahrzeuge (Stauabbau), und eines Sichtvorlaufes.

Ist die Anzahl der durchfahrenden Fahrzeuge in einer Zielphase größer als die in der aktuellen Phase, wird die aktuelle Phase abgebrochen und in die jeweilige Zielphase gewechselt. Dies gilt unabhängig von einer aktuell vorhandenen Freigabezeitbemessung der aktuellen Phase (sowohl konventionell als auch auf Basis der Zeitbedarfswert-Steuerung). Andernfalls wird in der aktuellen Phase verblieben.

Weitere Entscheidungskriterien:

- Ein Phasenwechsel wird erst eingeleitet, wenn ein Wechsel notwendig ist (nicht zu früh) oder keine Freigabezeitbemessung aktiv ist.
- Aufgrund der inaktiven Freigabezeitbemessung muss sichergestellt werden, dass alle Fahrzeuge der aktuellen Phase, die bereits gehalten haben, in der Phase abfließen können. Dazu wird die Anzahl der Fahrzeuge beim Phasenwechsel gespeichert und mit einem Zeitbedarfswert von 1,8 s multipliziert. Das Ergebnis wird als Mindestphasendauer berücksichtigt. Andernfalls würden Fahrzeuge unter Umständen mehrfach halten müssen, wenn die Phase schon sehr früh abgebrochen werden würde.
Die Mindestphasendauer und auch die Tatsache, dass es sich um eine sehr „harte“ Maßnahme handelt, führt dazu, dass der Durchfahrtenvergleich erst ab einer Penetrationsrate von rund 70% angewendet werden kann, da der mögliche Fehler durch z. B. überproportional viele konventionelle Fahrzeuge zu einer Fehlentscheidung führt.

3.4.3 C2X-Anforderung und Bemessung

Grundsätzlich wird vor einem Phasenwechsel geprüft, ob die aktuelle Phase bemessen werden soll. Dazu wird sowohl die konventionelle Zeitlückensteuerung als auch die neue Zeitbedarfswert-Steuerung berücksichtigt.

Falls keine Bemessung der aktuellen Phase erforderlich ist oder die maximale Phasendauer (bzw. das Ende des Verlängerungsbereiches bei koordinierten Steuerungen) erreicht ist, erfolgt eine Prüfung der Durchfahrten aller potenziellen Zielphasen. Es wird in die Phase gewechselt, bei der mehr Durchfahrten möglich sind. Auch hier werden alle Fahrstreifen der Zielphasen, die Dauer der Phasenübergänge sowie die stehenden Fahrzeuge (Stauabbau) und ein Sichtvorlauf berücksichtigt.

Weitere Entscheidungskriterien:

- Ein Phasenwechsel wird erst eingeleitet, wenn ein Wechsel notwendig ist (nicht zu früh) oder wenn bereits Fahrzeuge in der Zielphase zum Halten gekommen sind.
- Der Vergleich der Durchfahrten bzw. ein daraus resultierender Phasentausch wird bei hohen Auslastungsgraden erst ab einer Penetrationsrate von rund 70% angewendet, damit der mögliche Fehler durch z. B. überproportional viele konventionelle Fahrzeuge nicht zu einer Fehlentscheidung bei kritischen Auslastungen führt.
- Es erfolgt grundsätzlich die Prüfung des Auslastungsgrades, was ggf. dazu führt, dass ein Phasentausch nicht zulässig ist, da ein Phasentausch mit ungünstigen Zwischenzeiten zu einer Überlastung führen kann.

Bei einer C2X-Anforderung wird grundsätzlich versucht punktgenau den Phasenübergang einzuleiten. Der Phasenwechsel soll in dem Moment gestartet werden, in dem der Phasenübergang (bzw. der Grünbeginn im Phasenübergang) + Sichtvorlauf = der Restfahrzeit eines Fahrzeuges in einer angeforderten Phase ist, damit das Fahrzeug den Knotenpunkt ohne Halt passieren kann und es gleichzeitig nicht zu einem unnötig frühen Wechsel kommt.

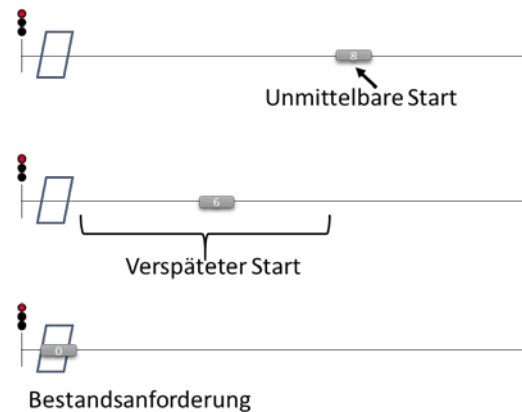


Abbildung 3-17: Unterschiedliche Zeitpunkte der Anforderung

Durch vorangegangene Bedingungen wie Mindestfreigabezeiten oder Bemessungswünsche kann der sofortige Phasenwechsel um wenige Sekunden verpasst werden. In diesem Fall kann zwar kein Halt mehr verhindert werden, jedoch ist es trotzdem möglich mit einem „verspäteten“ Wechsel zumindest die Wartezeit zu reduzieren, wenn der Phasenwechsel gestartet wird bevor ein Fahrzeug den Anforderungsdetektor erreicht. Die reine C2X-Anforderung – ohne den Vergleich von Durchfahrten in verschiedenen Phasen – kann grundsätzlich schon bei geringsten Penetrationsraten angewendet werden und führt bereits beim ersten Fahrzeug zu einer möglichen Verbesserung.

Die Bemessung auf Basis des mittleren Zeitbedarfswertes (vgl. Kapitel 3.2.2) wird nicht nur für die Verlängerung der aktuellen Phase verwendet, sondern auch beim Vergleich der Durchfahrten zwischen den Zielphasen. Dabei werden in den Zielphasen nur die Fahrzeuge als „durchfahrend“ gewertet, für die auch die Bemessung auf Basis des mittleren Zeitbedarfswertes eintreten würde. So wird verhindert, dass in eine Phase gewechselt wird, in der erst in einem großen zeitlichen Abstand viele Fahrzeuge zufließen, aber kurzfristig kein Fahrzeug ankommt.

3.4.4 Anforderung und Bemessung

Im letzten Schritt erfolgt die konventionelle Phasenanforderung, um auch konventionellen Fahrzeuge eine Freigabe zu ermöglichen. Ein Phasenwechsel erfolgt in Abhängigkeit der angeforderten Phasen in einer vordefinierten Reihenfolge, wobei in der aktuellen Phase zunächst eine Freigabezeitbemessung erfolgt. Auch hier wird sowohl die konventionelle als auch die Bemessung auf Basis des mittleren Zeitbedarfswertes berücksichtigt. Das bedeutet auch, dass die Bemessung auf Basis des mittleren Zeitbedarfswertes allein – ohne weitere C2X Funktionen genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Grenzwert, bei dem eine Bemessung erfolgt in Abhängigkeit des Auslastungsgrades bestimmt werden muss. Bei geringen Auslastungen kann eine Bemessung auch bei einem hohen mittleren Zeitbedarfswert erfolgen. Dies führt zu einer starken Verringerung der Halte, aber auch zu einem hohen Anteil von ungenutzter Freigabezeit. Diese ungenutzte Freigabezeit kann bei hohen Auslastungsgraden ggf. nicht in Kauf genommen werden. Daher kann eine Bemessung nur bis zu einem geringeren Grenzwert erfolgen.

Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass in den gering ausgelasteten Programmen ein Grenzwert von 4 bis 5 Sekunden die Anzahl der Halte am stärksten reduziert. In hoch ausgelasteten Programmen konnte

gezeigt werden, dass der Grenzwert auf 3 Sekunden reduziert werden musste, um Überlastungssituationen zu vermeiden.

3.4.5 Freigabezeitumverteilung

Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, wird anhand der vorhandenen Fahrzeuge die notwendige Dauer der Nebenrichtungsphasen berechnet und ggf. Ersparnisse auf andere Phasen verteilt. Dabei wird die Dauer der Hauptrichtungsphase grundsätzlich nicht reduziert. Es können auch Phasendauern zwischen Nebenrichtungsphasen umverteilt werden. Um auch hier einen möglichen Fehler bei über- oder unterproportional auftretenden konventionellen Fahrzeugen zu minimieren, wird die Freigabezeitumverteilung erst bei einer Penetrationsrate von 70 % empfohlen.

In vollverkehrsabhängigen Steuerungen wirkt sich die Freigabezeitumverteilung auf die maximalen Phasendauern aus. In koordinierten Steuerungen werden entsprechend die Erlaubnisbereiche modifiziert. In beiden Fällen wirkt sich die Freigabezeitumverteilung auf den gesamten Logikablauf aus und läuft parallel zu den vorher beschriebenen Komponenten. Falls keine Bemessung der aktuellen Phase erforderlich ist oder die maximale Phasendauer (bzw. das Ende des Verlängerungsbereiches bei koordinierten Steuerungen) erreicht ist erfolgt eine Prüfung der Durchfahrten aller potenziellen Zielphasen.

3.4.6 Parameter der C2X-Logik

Die Steuerungslogiken wurden so implementiert, dass diese einzeln ein- und ausschaltbar sind. Im Zuge der Analyse der unterschiedlichen Komponenten zeigte sich im Rahmen von Sensitivitätsanalysen, dass der Einsatz einzelner Komponenten nicht immer zu positiven Effekten führte. Die relevanten Einflussgrößen für den Einsatz einzelner Komponenten sind

- die Penetrationsrate von C-ITS Fahrzeugen und
- die Auslastung des Knotenpunktes (bzw. einzelner Phasen).

Weiterhin ist der mittlere Zeitbedarfswert eine entscheidende Größe und wird bei mehreren Komponenten verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass die Parametrisierung abhängig vom Auslastungsgrad ist und weiteren detaillierten Sensitivitätsanalysen bedarf. Bei geringen Auslastungsgraden führen hohe mittlere Zeitbedarfswerte dazu, dass häufig eine Phasenverlängerung durchgeführt wird. Dies führt zwar zu ineffizienten Freigabezeiten (also Freigabezeiten von mehreren Sekunden ohne durchfahrendes Fahrzeug), aber gleichzeitig auch zu einer massiven Verringerung der Halte. Bei steigender Knotenpunktauslastung können diese ineffizienten Freigabezeiten nicht mehr in Kauf genommen werden und führen früher zu einer Überlastung des Knotenpunktes als ein konventioneller Zeitlückenabbruch. Daher müssen bei steigenden Knotenpunktauslastungen die mittleren Zeitbedarfswerte für eine Freigabezeitverlängerung reduziert werden, was gleichzeitig dazu führt, dass weniger Halte verhindert werden können.

Da die Penetrationsrate von wesentlicher Bedeutung ist, wurde in den Steuerungen eine automatische Ermittlung der Penetrationsrate implementiert, die so auch in der Realität möglich ist. Dabei werden sowohl die identifizierten C2X-Fahrzeuge als auch die an einem Detektor gezählten Fahrzeuge (C2X und konventionell) gegenübergestellt. So konnte für jeden Fahrstreifen und in jeder Sekunde die Penetrationsrate bestimmt werden. Das Ein- und Ausschalten einzelner Komponenten innerhalb der Logik konnte so automatisiert durchgeführt werden.

Die Ermittlung der Auslastung eines Knotenpunktes bzw. einzelner Phasen ist schwieriger zu realisieren. Eine Möglichkeit die Auslastung eines Knotenpunktes zu ermitteln, ist die Messung von Rückstaulängen bei Freigabezeitbeginn. Hierzu kann ein Schwellwert definiert werden, bei dessen Überschreitung eine Phase als hoch ausgelastet angesehen wird. Die Rückstaulängenermittlung ist bei hohen C2X-Penetrationsraten sehr einfach, jedoch ohne zusätzliche Detektion bei geringen Penetrationsraten sehr ungenau.

3.5 Einsatzfahrzeug-Priorisierung

3.5.1 Grundprinzipien

Bei einer Einsatzfahrzeug-Priorisierung wird ein Eingriff in die Lichtsignalsteuerung vorgenommen, in dessen Folge für ein nahendes Einsatzfahrzeug grün geschaltet wird. Der Querverkehr sowie der Fußgänger- bzw. Radverkehr an der Kreuzung werden gesperrt, um dem Einsatzfahrzeug ein sicheres und schnelles Überqueren der Kreuzung zu ermöglichen. Abbildung 3-18 stellt die Ziele aller Beteiligten in Zusammenhang mit der Einsatzfahrzeug-Priorisierung dar.



Abbildung 3-18: Ziele der Einsatzfahrzeug-Priorisierung

Für Einsatzfahrzeuge ermöglicht die Einsatzfahrzeug-Priorisierung kürzere Hilfsfristen sowie ein sicheres Überqueren der Kreuzung. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung entlastet dabei auch den Fahrer des Einsatzfahrzeuges, da er sich der Sperrung des Querverkehrs an der Kreuzung sicher sein kann. Auch für die anderen Verkehrsteilnehmer erhöht sich mit der Einsatzfahrzeug-Priorisierung die Sicherheit. Die Sperrung schützt die anderen Verkehrsteilnehmer und verhindert somit Irritationen und Konflikte mit dem Einsatzfahrzeug. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung bringt allerdings auch Nachteile für die anderen Verkehrsteilnehmer mit sich. Durch die Sperrung entstehen hohe Wartezeiten. Aus Sicht der anderen Verkehrsteilnehmer sollte die Einsatzfahrzeug-Priorisierung dementsprechend nicht unnötig früh starten und eine Steuerungsstrategie verfolgen, die eine schnelle Rückkehr zum normalen Verkehrszustand nach der Priorisierung fördert. Dem steht die Motivation gegenüber, die Einsatzfahrzeug-Priorisierung so früh zu starten, dass sich die Schlange an Fahrzeugen vor dem nahenden Einsatzfahrzeug vor dessen Ankunft auflöst, damit das Einsatzfahrzeug höhere Geschwindigkeiten erreichen kann.

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Einsatzfahrzeug-Priorisierung als losgelöstes Szenario betrachtet, das durch Erweiterungen der beschriebenen Logiken umgesetzt wurde. Um den Mehrwert der C2X-Kommunikation zu identifizieren, wurden eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung basierend auf der Funk-Technologie, implementiert in der Bestandssteuerung, und eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung basierend auf der C2X-Kommunikation, implementiert in der C2X-Steuerung, miteinander verglichen.

Ein erster wichtiger Grundsatz bei der Einsatzfahrzeug-Priorisierung ist, dass die Einsatzfahrzeuge aus allen Richtungen, d.h. von allen Kreuzungsarmen, priorisiert werden. Da Einsatzfahrzeuge bei der Anfrage zu einer Priorisierung nicht übermitteln, welche Route sie nehmen werden, ist es erforderlich für alle Verkehrsströme des Kreuzungsarmes, auf dem sich ein Einsatzfahrzeug nähert, frei zu geben. Das Schalten von Grün für den Kreuzungsarm, auf dem sich das Einsatzfahrzeug annähert, und das Schalten von Rot für die anderen Kreuzungsarme erfolgt in separaten Einsatzfahrzeug-Phasen. Bei einer dreiarmligen Kreuzung beispielsweise kommen für die Einsatzfahrzeug-Priorisierung drei separate Einsatzfahrzeug-Phasen hinzu, wie Abbildung 3-19 anhand des Phasenfolgeplans darstellt. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung muss weiterhin jederzeit gestartet werden können, weswegen von jeder normalen Phase ein Übergang in alle Einsatzfahrzeug-Phasen möglich sein muss. In Abbildung 3-19 sind alle Phasenübergänge, die im Rahmen der Einsatzfahrzeug-Priorisierung hinzukommen, rot dargestellt. Nach einer Einsatzfahrzeug-Priorisierung ist es das oberste Ziel in eine Phase zu wechseln, die eine

schnelle Rückkehr zum normalen Verkehrszustand fördert. Dementsprechend sind von einer Einsatzfahrzeug-Phase viele Übergänge zu anderen Phasen möglich, siehe Abbildung 3-19.

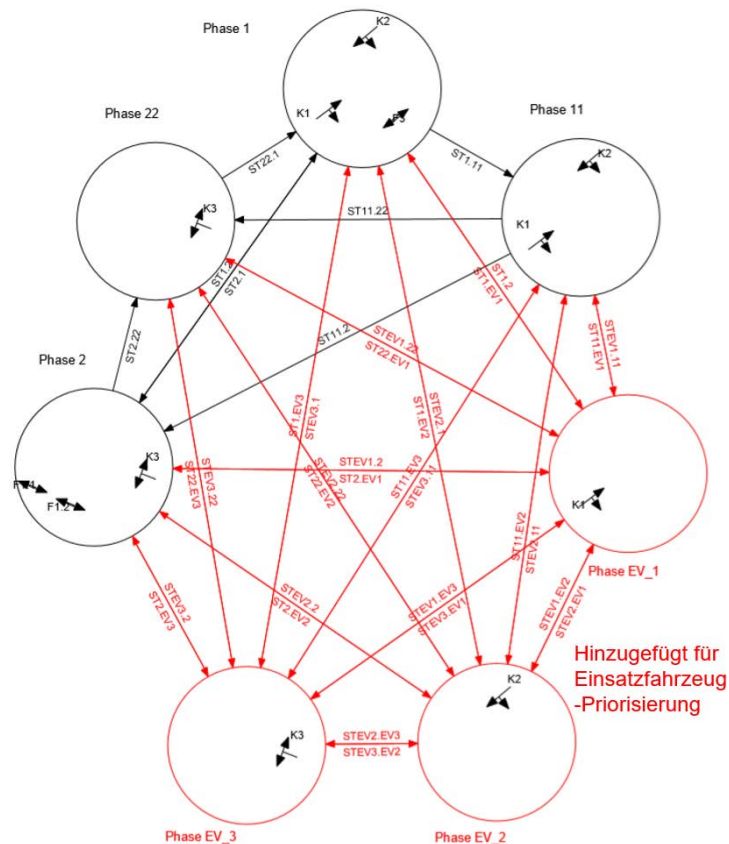


Abbildung 3-19. Phasenfolgeplan mit Einsatzfahrzeug-Priorisierung

3.5.2 Funktionen

Für die Umsetzung der Einsatzfahrzeug-Priorisierung sind zusätzliche Funktionen, die in der Logik aufgerufen werden, erforderlich, siehe Tabelle 3-4. Die Funktionen für die Bestandssteuerung und die C2X-Steuerung unterscheiden sich hinsichtlich ihres Aufbaus, der Übergabeparameter usw., jedoch nicht hinsichtlich ihres Zwecks. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in der Bestandssteuerung beruht auf der Funk-Technologie und wird über Meldepunkte initiiert. Dementsprechend sind Meldestrecken in der Regel Teil der Übergabeparameter für die Funktionen. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in der C2X-Steuerung basiert auf den von Fahrzeugen gesendeten CAM-Informationen (Fahrzeugtyp, Lane, Geschwindigkeit etc.). Da diese Informationen in der Logik mit den Fahrstreifen verknüpft sind, werden Lanes statt Meldestrecken übergeben.

Wenn eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung angefragt wird, wird die Priorisierung, d.h. der Wechsel in die Einsatzfahrzeug-Phase, nicht zwingend unmittelbar gestartet. Die Funktion (C2X)EvAnfo startet die Priorisierung erst, wenn die verbleibende Restfahrzeit zur Haltlinie des Einsatzfahrzeuges kleiner oder gleich der Summe aus Phasenübergangsdauer und Vorlaufzeit ist. Die Vorlaufzeit ist die Zeit, die für das Räumen der Fahrzeuge vor und auf der Kreuzung vorgesehen ist. Durch das Einbeziehen der Vorlaufzeit soll eine möglichst freie Fahrt für das nahende Einsatzfahrzeug gewährleistet werden. Bei der Bestandssteuerung ist die Vorlaufzeit auf 30 Sekunden vordefiniert. Dies führt dazu, dass insbesondere bei geringer Belastung häufig zu früh in die Einsatzfahrzeug-Phase gewechselt wird, was Grünzeitverluste und unnötige Wartezeiten für den Querverkehr mit sich bringt. Bei der C2X-Steuerung kann die Vorlaufzeit dynamisch berechnet werden, d.h. in Abhängigkeit der Fahrzeuge, die das nahende Einsatzfahrzeug ausbremsen, siehe C2XPreStart in Tabelle 3-4. Je mehr langsame Fahrzeuge vor dem Einsatzfahrzeug fahren, desto höher ist die erforderliche Vorlaufzeit. Die Informationen aus der C2X-Kommunikation können überdies dazu genutzt werden, die Einsatzfahrzeuge genauer zu überwachen und im Besonderen die

verbleibende Restfahrzeit in Echtzeit zu bestimmen. Bei der Bestandssteuerung wird die verbleibende Restfahrzeit der Einsatzfahrzeuge nicht in Echtzeit betrachtet, sondern durch Herunterzählen einer vordefinierten Zeit geschätzt. Begonnen wird mit dem Herunterzählen nach dem Passieren des Meldepunktes.

Bestandssteuerung	C2X-Steuerung	Beschreibung
EvAnfo	C2XEvAnfo	Start der Einsatzfahrzeug-Priorisierung mit Wechsel in Einsatzfahrzeug-Phase
-	C2XPreStart	Dynamische Berechnung der Vorlaufzeit für die Einsatzfahrzeug-Priorisierung
EvVerl	C2XEvVerl	Verlängerung der aktuellen Einsatzfahrzeug-Phase
StAfterEv	StageAfterEv	Auswahl der nächsten Phase nach der Einsatzfahrzeug-Priorisierung auf der Grundlage der durchschnittlichen Wartezeit
AvWtSt	C2XAvWtSt	Durchschnittliche Wartezeit aller Signalgruppen einer Phase

Tabelle 3-4: Funktionen für die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in der Bestandssteuerung und der C2X-Steuerung

Sobald eine Einsatzfahrzeug-Phase aktiv ist, wird jede Sekunde geprüft, ob die Einsatzfahrzeug-Phase verlängert werden soll oder nicht. Dies erfolgt mithilfe der Funktion (C2X)EvVerl. Eine Verlängerung wird grundsätzlich dann vorgenommen, wenn sich das Einsatzfahrzeug noch nicht abgemeldet hat bzw. noch nicht die Haltlinie überquert hat. Wenn das Einsatzfahrzeug noch auf der Meldestrecke bzw. der Lane detektiert wird, wird zusätzlich geprüft, ob eine maximale Freigabezeit für die Einsatzfahrzeug-Phase eingehalten wird. Die Summe aus der aktuellen Dauer der Einsatzfahrzeug-Phase und der verbleibenden Restfahrzeit des Einsatzfahrzeuges darf dabei nicht größer als 90 Sekunden sein. Dadurch wird verhindert, dass die Einsatzfahrzeug-Priorisierung ohne Zeitbegrenzung weitergeführt wird, obwohl das Einsatzfahrzeug durch eine große Störung im Verkehr z.B. einen Unfall aufgehalten wird.

Wenn die Einsatzfahrzeug-Priorisierung beendet wird, bestimmt die Funktion St(age)AfterEv, in welche normale Phase als nächstes gewechselt wird. In der Simulation hat sich gezeigt, dass die Rückkehr zum normalen Verkehrszustand am besten dadurch gefördert wird, in dem in die Phase gewechselt wird, welche die Signalgruppen mit der höchsten durchschnittlichen Wartezeit enthält. In der Funktion St(age)AfterEv wird daher durch Aufruf von (C2X)AvWtSt für jede mögliche Phase die durchschnittliche Wartezeit unter Berücksichtigung aller Signalgruppen berechnet. Schlussendlich wird in die Phase gewechselt, die die höchste durchschnittliche Wartezeit aufweist.

3.5.3 Erweiterung der Phasenlogiken

Eine Einsatzfahrzeug-Priorisierung muss von jeder normalen Phase gestartet werden können. Daher wird in jeder Phasenlogik geprüft, ob in eine der Einsatzfahrzeug-Phasen gewechselt werden muss. Entsprechend der hohen Priorität der Einsatzfahrzeug-Priorisierung ist diese Prüfung den anderen Elementen der Logik, wie in Kapitel 3.5.4 beschrieben, vorangestellt. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in der C2X-Steuerung ist ausschließlich auf C2X-fähige Einsatzfahrzeuge ausgelegt. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass bei den Einsatzfahrzeugen mit positivem Beispiel vorangegangen wird und die Ausstattung mit der C2X-Technologie parallel oder kurz nach der Ausstattung der Infrastruktur vorgenommen wird. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in der Bestandssteuerung ist analog nur für Einsatzfahrzeuge ausgelegt, die über die Funk-Technologie und Meldepunkte die Priorisierung anfragen können. Analog zu den anderen Abschnitten der Phasenlogik wird der Modifikationsparameter C2X_EvAnfo verwendet, um die Einsatzfahrzeug-Priorisierung zu aktivieren oder deaktivieren. Grundsätzlich muss jede Einsatzfahrzeug-Phase auf Anforderung geprüft werden.

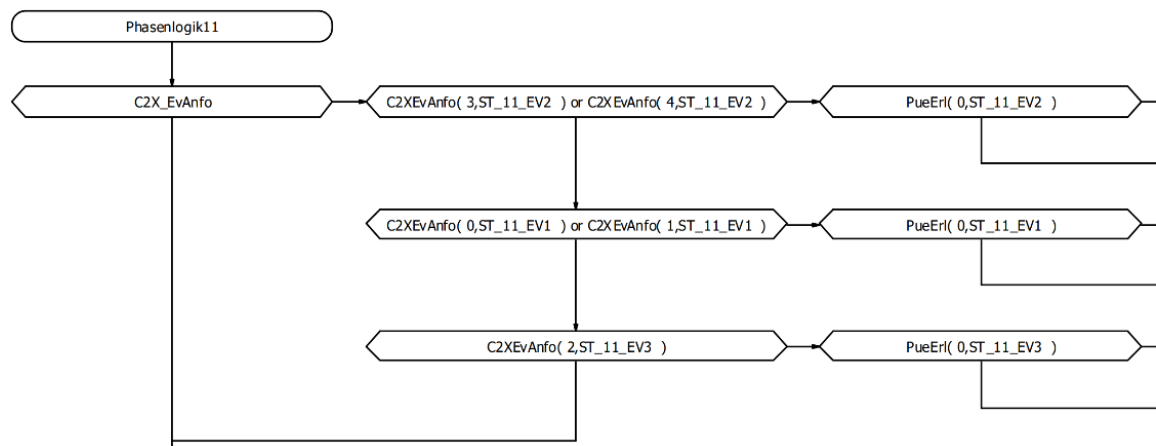


Abbildung 3-20: Elemente der Einsatzfahrzeug-Priorisierung C2X-Steuerung

Die Anforderung für eine Einsatzfahrzeug-Phase liegt vor, wenn sich auf einer der ihr zugehörigen Lanes ein Einsatzfahrzeug nah genug an der Kreuzung befindet, um die Priorisierung zu starten. Dies wird mit der Funktion C2XEvAnfo geprüft. Bei der Bestandssteuerung wird nicht jede Lane, sondern jede Meldestrecke geprüft. Im Falle von mehreren gleichzeitig eingehenden Anfragen zur Einsatzfahrzeug-Priorisierung gilt grundsätzlich das „first come – first served“ Prinzip. Falls alle Anfragen zu derselben Zeit eingehen sollten, entscheidet die Reihenfolge in der Logik indirekt, in welche Einsatzfahrzeug-Phase zuerst gewechselt wird. Im Beispiel von Abbildung 3-20 ist die Reihenfolge Einsatzfahrzeug-Phase 2, vor Einsatzfahrzeug-Phase 1, vor Einsatzfahrzeug-Phase 3. Im Anhang ist für jeden Laborknotenpunkt beispielhaft jeweils die Logik der ersten Phase inklusive der Logik-Elemente für die Einsatzfahrzeug-Priorisierung abgebildet.

3.5.4 Einsatzfahrzeug-Phasen

Abbildung 3-21 stellt die Logik einer Einsatzfahrzeug-Phase in der C2X-Steuerung dar. Der Aufbau der Einsatzfahrzeug-Phasenlogik in der Bestandssteuerung ist analog und verwendet die in Tabelle 3-4 für die Bestandssteuerung aufgelisteten Funktionen.

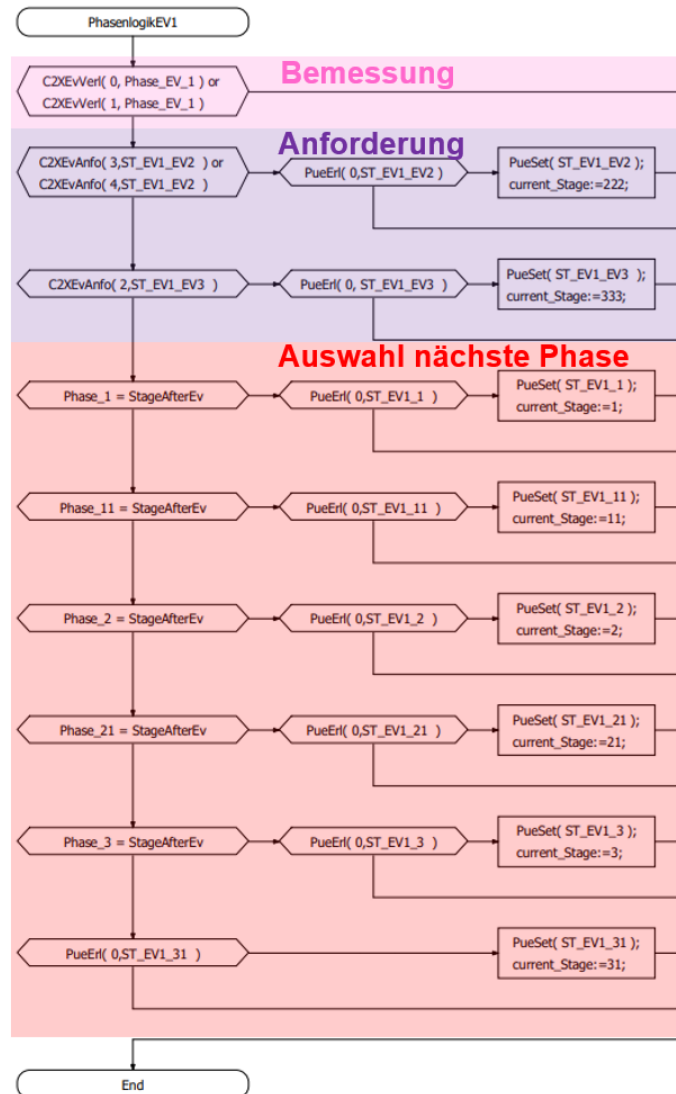


Abbildung 3-21: Zusammensetzung der Einsatzfahrzeug-Phasenlogik mit C2X-Funktionen

Im ersten Abschnitt der Einsatzfahrzeug-Phasenlogik wird bemessen, d.h. es wird mithilfe der Funktion C2XEvVerl geprüft, ob die Einsatzfahrzeug-Phase verlängert werden muss. Es wird verlängert, wenn für eine der Lanes, die der Einsatzfahrzeug-Phase zugeordnet sind, true zurückgegeben wird. Wenn die aktuelle Einsatzfahrzeug-Phase nicht verlängert werden soll, wird im nächsten Schritt geprüft, ob eine Anforderung von anderen Einsatzfahrzeug-Phasen vorliegt. In Abbildung 3-21 wird C2XEvAnfo jeweils für alle Lanes von Einsatzfahrzeug-Phase 2 und 3 aufgerufen. Wenn für mindestens eine der Lanes true zurückgegeben wird, wird nach Prüfung der minimalen Grünzeiten (Funktion PueErl) der Übergang in die entsprechende Einsatzfahrzeug-Phase gestartet (Funktion PueSet).

Wenn auch keine Anforderung von einer anderen Einsatzfahrzeug-Phase vorliegt, wird die Einsatzfahrzeug-Priorisierung beendet und eine geeignete nächste Phase ausgewählt. Wie bereits in Kapitel 3.5.2 erläutert, wird mithilfe der Funktion `StageAfterEv` bestimmt, welche Phase die höchste durchschnittliche Wartezeit unter Berücksichtigung aller Signalgruppen aufweist und demnach die schnelle Rückkehr in den normalen Verkehrszustand am meisten fördert. Nach Prüfung der minimalen Grünzeiten etc. wird schließlich der Übergang in die Phase gestartet, die `StageAfterEv` zurückgibt.

3.6 Umsetzung der Steuerung im Verkehrsingenieursarbeitsplatz LISA

Die Nutzung von C2X-Funktionen im Steuergerät ist derzeit komplex und schwierig umzusetzen. Zum einen benötigt es neue Hardware für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (z.B. Kombination RSU/OBU). Andererseits müssen die Daten der verschiedenen Nachrichtentypen so aufbereitet werden, dass diese für eine Entscheidungsfindung herangezogen werden können und die Daten ihren Weg vom Fahrzeug über die RSU in die Logik finden und dort auch interpretiert werden können.

Damit der Verkehrsplaner die neuen C2X-Informationen funktional in der Steuerungslogik anwenden kann, wurden die Verarbeitungsschritte generalisiert und in Funktionsblöcke strukturiert. Die in Kapitel 3.1.1, und 3.1.2 vorgestellten Funktionen werden daher als Bestandteil der Open Method Library (OML) im Verkehrsingenieursarbeitsplatz LISA implementiert werden. Somit stehen diese neuen Funktionen künftig dem Verkehrsplaner bei der Erstellung von VA-Steuerungen zur Verfügung.

3.6.1 Realisierung der C2X-Funktionen

Die Implementierung erfolgt derart, dass die erwähnten Funktionen in einer eigenen Bibliothek (v2x library) definiert werden. In der folgenden Abbildung ist illustriert, wie sich diese neue Bibliothek in LISA einfügen wird.

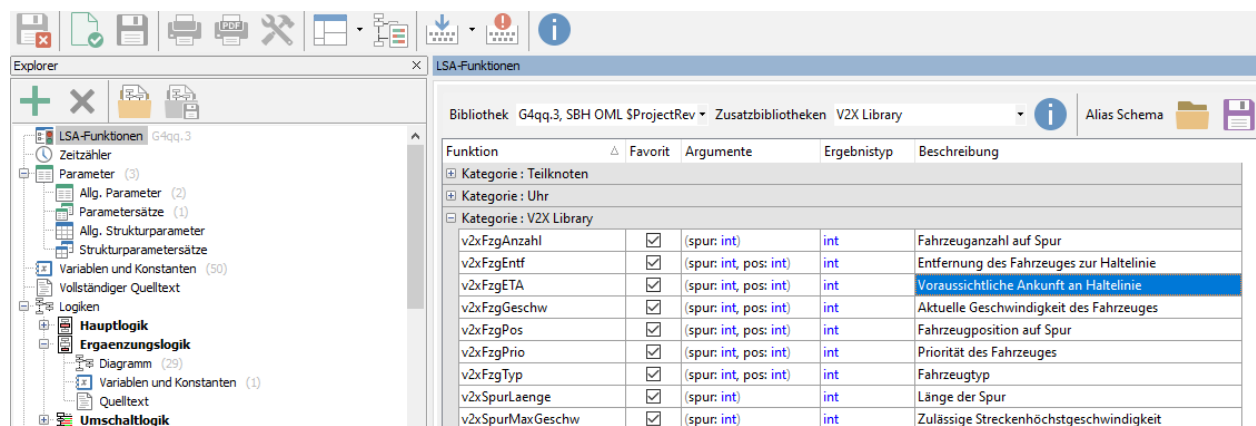


Abbildung 3-22: Neue OML-Bibliothek in LISA

Für die spätere Umsetzung im Steuergerät werden die geforderten OML-Funktionen zusammen mit dem Steuergerätehersteller abgestimmt, und implementiert und freigegeben. Somit können die neuen VA-Steuerungen auf den Feldgeräten direktversorgt werden.

3.6.2 Anwendung der C2X-Funktionen

Die C2X-Funktionen stehen in LISA zur Verfügung und können im Struktogramm bzw. direkt in der Logik (Java, C) eingesetzt werden. In der folgenden Abbildung ist ein Beispiel angegeben, wie eine vorhandene VA-Steuerung mithilfe der neuen Funktionen optimiert werden kann.

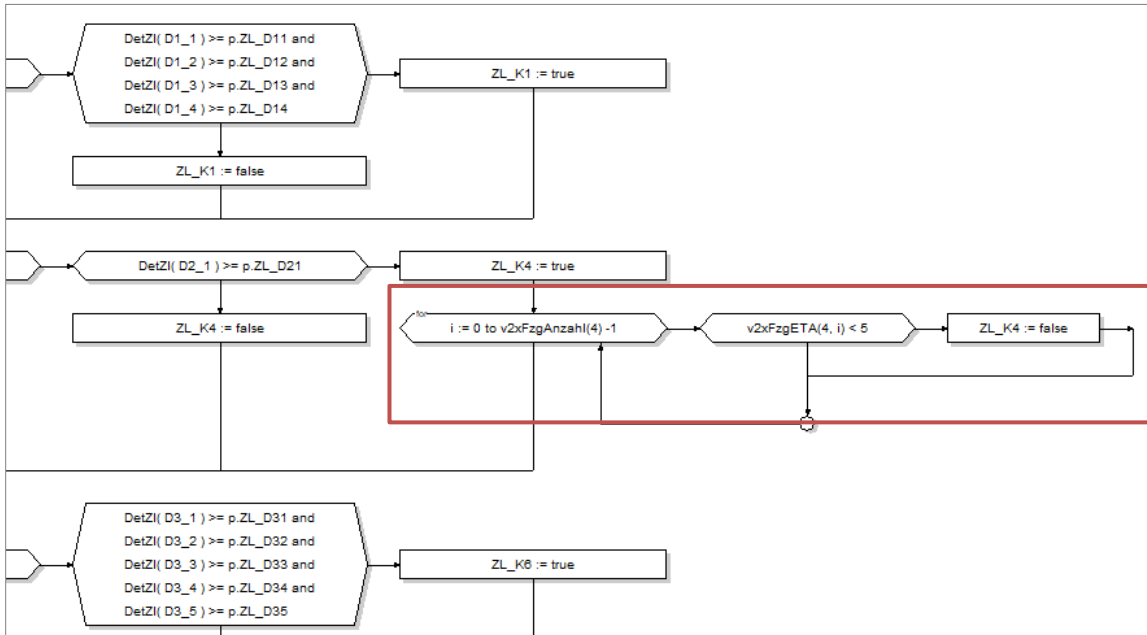


Abbildung 3-23: Einsatz der v2x Library in LISA

In dem vorliegenden Beispiel findet eine Optimierung des Zeitlückenkriteriums statt, so dass Fahrzeuge unmittelbar vor dem Bemessungsdetektor (Ankunftszeit < 5 Sekunden) noch eine Freigabezeitverlängerung bekommen können.

3.6.3 Validierung der Steuerungslogik

Die funktionale Wirkung der neuen VA-Steuerung, unter Einsatz der neuen OML-Bibliothek, lässt sich im LISA-Testplatz evaluieren. Darüber hinaus kann durch die Kopplung von LISA z.B. mit VISSIM auch eine umfangreiche mikroskopische Verkehrsflusssimulation ermöglicht werden.

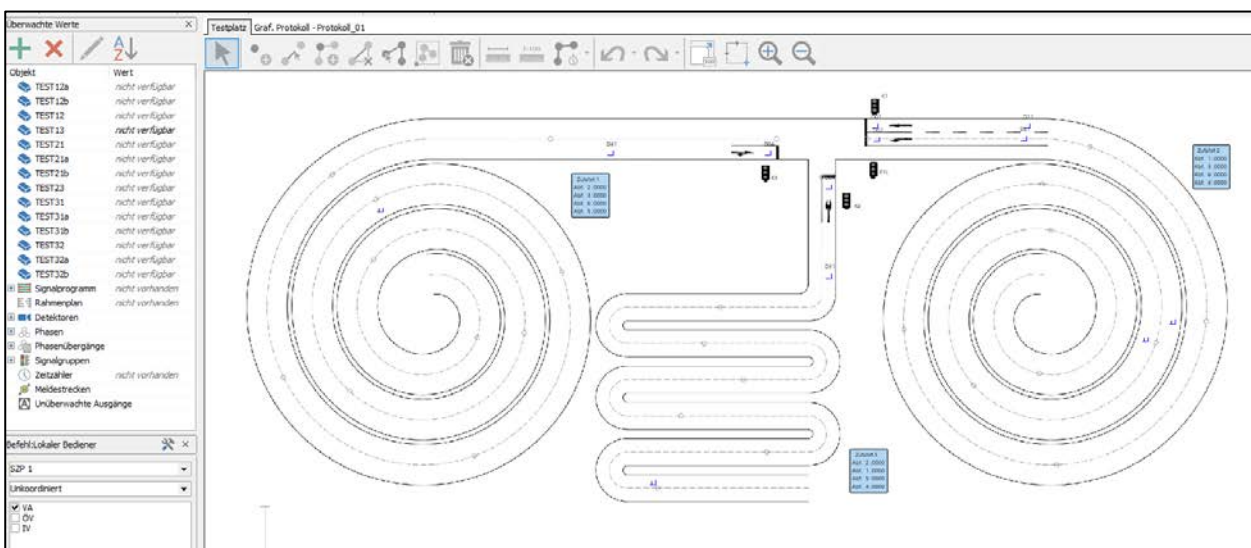


Abbildung 3-24: Simulation neuer C2X Funktionen im LISA Testplatz

4 Aufbau Simulationsmodell

Die in Kapitel 3 entworfenen neuen Funktionen zur Steuerung des Verkehrs unter Berücksichtigung von C2X-Informationen werden mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation getestet. Das Kapitel 4 beschreibt die ausgewählten Knotenpunkte und den grundsätzlichen Aufbau der Simulationsumgebung. Die einzelnen Simulationsszenarien, deren Ergebnisse und Bewertung sind Bestandteil des Kapitel 5.

4.1 Laborknotenpunkte

Lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte kommen in den unterschiedlichsten Varianten und unter unterschiedlichsten Umgebungen vor. Aus Aufwandsgründen wurde davon abgesehen für die Untersuchungen statistisch signifikante Knotenpunkte als Repräsentanten zu identifizieren bzw. zu gestalten. Stattdessen wurden drei Knotenpunktrepräsentanten gewählt, welche sich in der Topologie, Geschwindigkeiten, Verkehrsströme und der Steuerung unterscheiden und von denen angenommen wird, dass sie relativ häufige Erscheinungsformen darstellen. Für die Untersuchung der C2X-Steuerfunktionen unter Laborbedingungen mittels VISSIM wurden die folgenden drei Knotenpunkte basierend auf realen Knotenpunkten aufbereitet.

1. Signalisierter Knotenpunkt außerorts (3-armig) mit klassischer Detektion (Haupttrichtung Bemessung, Nebenrichtung Anforderung und Bemessung)
2. Signalisierter Knotenpunkt innerorts (4-armig) mit klassischer Detektion (Haupttrichtung Bemessung, gesicherter Linksabbieger Anforderung/Bemessung, Nebenrichtung Anforderung/Bemessung)
3. Signalisierter Knotenpunkt innerorts (3-armig) mit klassischer Detektion (Haupttrichtung Bemessung, bedingtverträgliche Ströme, Nebenrichtung Anforderung/Bemessung)

Da neben den einzelnen Knotenpunkten auch der koordinierter Streckenzug eine häufig angewandte Form der Verkehrssteuerung ist, wurden aus den beiden einzelnen innerstädtischen Knotenpunkten noch ein koordinierter Streckenzug gebildet und in den Untersuchungsraum mitaufgenommen.

4. Koordinierter innerstädtischer Straßenzug (vier Knotenpunkte) mit variierenden Teilpunktabstände

In Bezug auf die Steuerung der Knotenpunkte ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Steuerungen bewusst weitestgehend alle Möglichkeiten der klassischen phasenorientierten Steuerung ausschöpfen und somit flexibel gestaltet wurden. Somit lässt sich der Zugewinn der C2X-Informationen deutlich darstellen. Weiterhin werden Argumente, welche zum Inhalt haben, dass mit einer konventionellen Detektion auch eine Verbesserung erreicht worden wäre, entkräftet. Die ÖV-Priorisierung wird nicht berücksichtigt, da dies Gegenstand des Schwesterprojekts der BAST „Forschungsprojekt „Nutzung des C2X-Kommunikationsstandards IEEE 802.11p für die ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten“ (03.0553) ist.

Neben der Art der Knotenpunkte bzw. des Streckenzuges spielt auch die Verkehrsbelastung eine entscheidende Rolle zur Bewertung der Steuerung. Es werden daher folgende Zustände getrennt voneinander simuliert und ausgewertet:

- | | |
|-------------------------|--|
| • Geringe Belastungen | entspricht einem Auslastungsgrad von ca. 0,3 |
| • Mittlere Belastungen | entspricht einem Auslastungsgrad von ca. 0,5 |
| • Hohe Belastungen | entspricht einem Auslastungsgrad von ca. 0,7 |
| • Sehr hohe Belastungen | entspricht einem Auslastungsgrad von ca. 0,9 |

Die Verkehrsbelastungen wurden auf Basis des Auslastungsgrades nach HBS 2015 für jeden SZP individuell erstellt. Die geringe Belastung mit einem Auslastungsgrad für die Kfz-Signalgruppen von ca. 0,3 bildet Schwachverkehr ab. Die mittlere Belastung mit einem Auslastungsgrad von ca. 0,5 repräsentiert einen Tagesverkehr bspw. Verkehr während der Mittagszeit. Mit einem Auslastungsgrad von 0,7 wird hohe Belastung der Spitzenstunde dargestellt. Von sehr hoher Belastung wird bei einem Auslastungsgrad von 0,9 ausgegangen. Von der Simulation einer Überlastung wurde abgesehen, da ansonsten eine

Koordinierung nicht mehr hätte realisiert werden können. Im Nachfolgenden werden die Laborknoten kurz beschrieben. Eine ausführliche Auflistung und die Darstellung aller relevanten Details zur Topologie, Belastung und Steuerung sind im Anhang zu finden.

4.1.1 Außerorts Knotenpunkt (3-armig)

Topologie

Der Knotenpunkt besteht aus drei Armen. Auf der Hauptrichtung (HR) gilt eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h, auf der Nebenrichtung (NR) 50 km/h. In der Hauptrichtung liegt aus beiden Richtungen jeweils ein Geradeausfahrstreifen vor und zusätzlich jeweils ein separater Fahrstreifen für die Links- und Rechtsabbieger. Aus der Nebenrichtung teilen sich Links- und Rechtseinbieger einen Fahrstreifen.

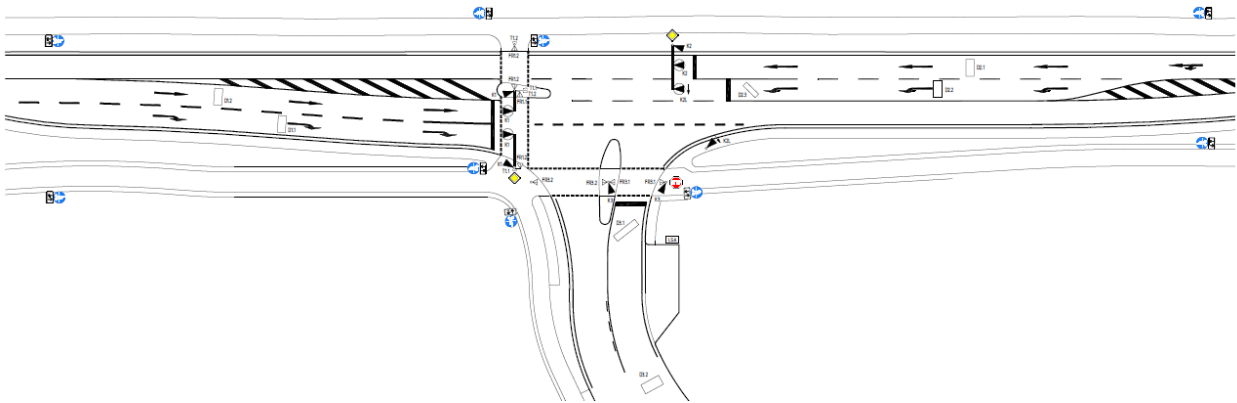


Abbildung 4-1: Lageplan Knoten 1 Außerorts (3-armig)

Der Fahrradverkehr wird auf separaten Radwegen neben der Fahrbahn geführt, sprich Radverkehr ist getrennt vom Kfz-Verkehr. Zum Queren der Haupt- und Nebenrichtung stehen dem Rad- und Fußgängerverkehr LSA-geführte Furten am Nebenarm und am westlichen Hauptarm zur Verfügung. Am östlichen Hauptarm befindet sich keine Furt. Beide Furten weisen eine Mittelinsel auf. Die Rad- und Fußgängerfurten sind voneinander getrennt.

Klassische Detektion und Steuerung

Für die Detektion des Verkehrs sind die folgenden Detektoren vorgesehen:

- Bemessungsdetektoren in der Hauptrichtung für Geradeaus ca. 35,0 m vor Haltlinie
- Bemessungsdetektoren in der Hauptrichtung für Rechts- und Linksabbieger ca. 25,0 m vor Haltlinie
- Anforderungsdetektor in der Hauptrichtung für Linksabbieger ca. 2,5 m vor Haltlinie
- Bemessungsdetektor in der Nebenrichtung ca. 20,0 m vor Haltlinie
- Anforderungsdetektor in der Nebenrichtung ca. 2,0 m vor Haltlinie
- Freigabe der LSA Rad/Fußgänger am Hauptarm mittels Taster und nur auf Anforderung
- Freigabe für LSA Rad/ Fußgänger am Nebenarm ist parallel zur Hauptrichtung des Kfz geschaltet, ohne Taster
- Zähl-detektoren in der Hauptrichtung für Geradeaus ca. 200 m vor Haltlinie

Die Steuerung besteht aus drei Phasen. Phase 1, 2 und 3 bilden den Festzeitkorpus der Steuerung. Der Phasentausch ist möglich. Linksabbieger werden gesichert auf Anforderung geführt. Es stehen eine Variante mit 75 Sekunden und eine mit 100 Sekunden Umlaufzeit zur Verfügung. Nachfolgend sind der Phasenfolgeplan und ein Beispiel eines Signalzeitenplans für den Knoten aufgeführt.

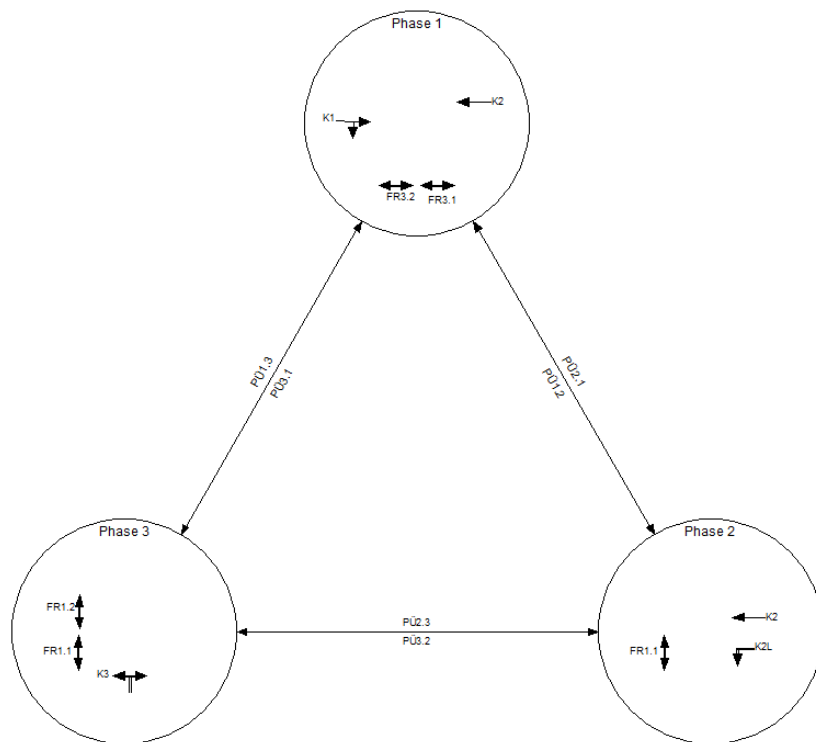


Abbildung 4-2: Phasenfolgeplan Knoten 1 Außerorts (3-armig)

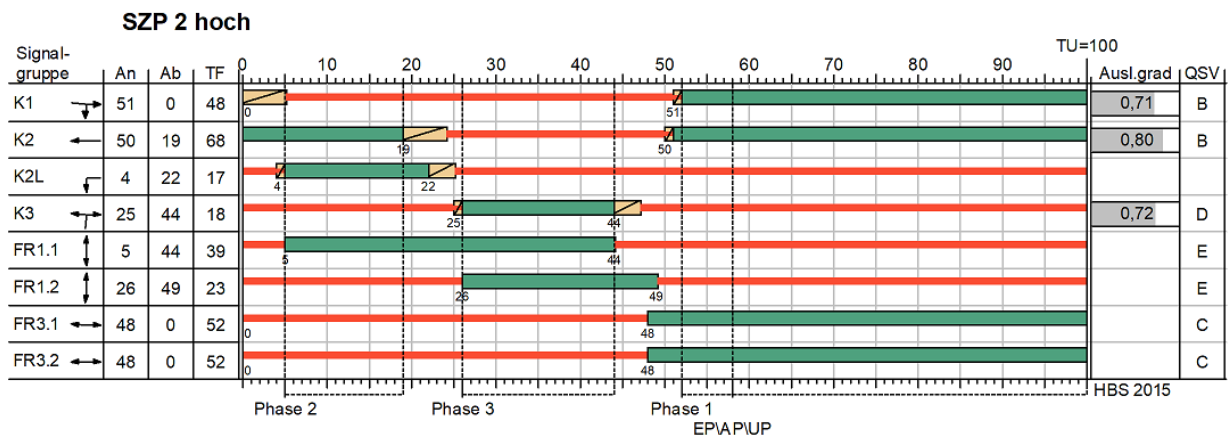


Abbildung 4-3: Signalzeitenplan Knoten 1 Außerorts (3-armig) für hohe Belastungen

4.1.2 Innerorts Knotenpunkt (4-armig)

Topologie

Der 4-armig Knotenpunkt setzt sich am westlichen Hauptarm auf freier Strecke aus zwei Fahrstreifen zusammen. Am Knotenpunkt erfolgt eine Aufteilung in einen Linksabbiegerfahrstreifen, einen Geradeausfahrstreifen und einen gemeinsamen Geradeaus- und Rechtsabbiegerfahrstreifen. Der östliche Hauptarm ist auf freier Strecke zweistreifig ausgebaut, am Knotenpunkt erfolgt eine Aufteilung in vier Fahrstreifen, Linksabbieger, zwei Geradeausfahrstreifen und einen Rechtsabbieger. Die Fahrstreifen der Nebenrichtungen teilen sich am Knotenpunkt in einen Linksabbieger- und in einen gemeinsamen Geradeaus- und Rechtsabbiegerfahrstreifen auf. Die Geschwindigkeit ist auf allen Armen 50 km/h. Der Radverkehr wird separat neben der Fahrbahn geführt. Alle Arme können auf LSA-gesicherten Furten

gequert werden. Die Radfurten sind von den Fußgängerfurten getrennt. Für Fußgänger besteht auch an allen Armen eine Quermöglichkeit. In der Nebenrichtung queren die Fußgänger die Hauptfahrbahn mit Mittelinsel.

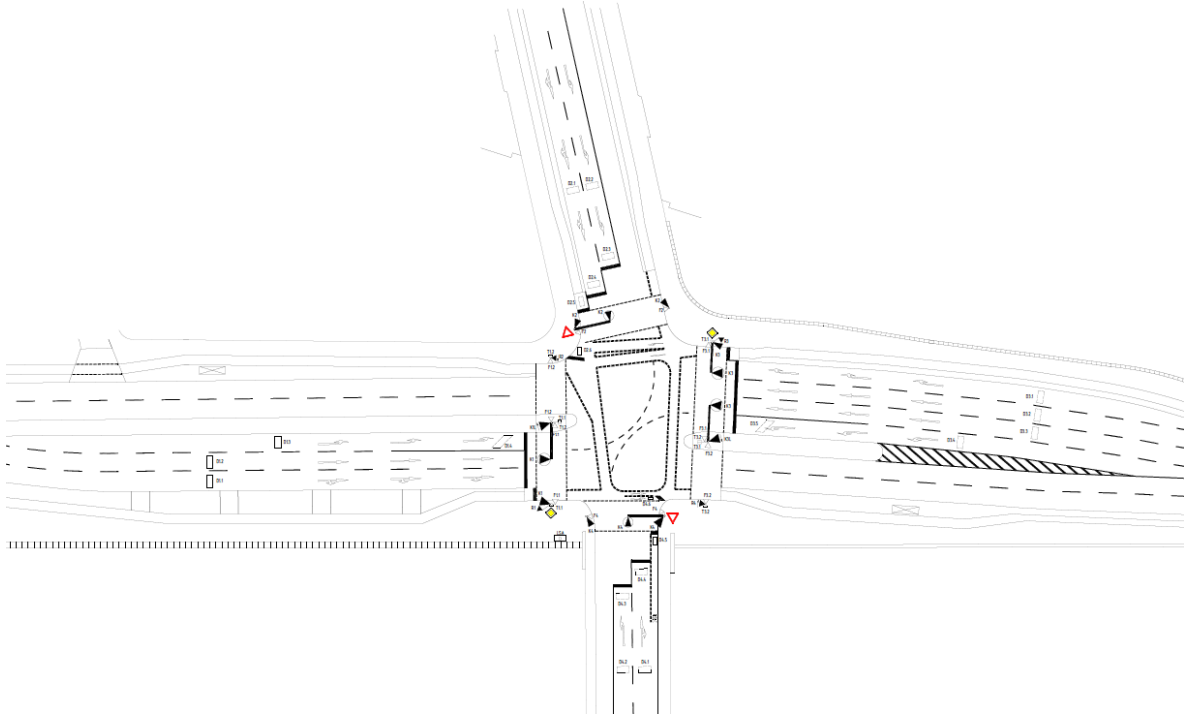


Abbildung 4-4: Lageplan Knoten 2 Innerorts (4-armig)

Klassische Detektion und Steuerung

Für die Detektion des Verkehrs sind die folgenden Detektoren vorgesehen

- Bemessungsdetektoren in der Hauptrichtung für Geradeaus ca. 50,0 m vor Haltlinie
- Bemessungsdetektoren in der Hauptrichtung für Abbieger ca. 50,0 m vor Haltlinie
- Anforderungsdetektor in der Hauptrichtung für Linksabbieger ca. 2,5 m vor Haltlinie
- Bemessungsdetektor in der Nebenrichtung ca. 37,0 – 40,0 m vor Haltlinie
- Anforderungsdetektor in der Nebenrichtung ca. 2,0 m vor Haltlinie
- Freigabe für LSA Rad am Nebenarm ist parallel zur Hauptrichtung des Kfz geschaltet, ohne Taster
- Freigabe der LSA Rad am Hauptarm mittels Taster und nur auf Anforderung
- Separate LSA und Detektor für Radfahrer in Nebenrichtung aus der Hauptrichtung Für das indirekte Linksabbiegen aus der Hauptrichtung in die Nebenrichtung
- Freigabe der Fußgänger LSA am Nebenarm (in Hauptrichtung) ist parallel zur Hauptrichtung des Kfz geschaltet, ohne Taster
- Freigabe der Fußgänger LSA am Hauptarm (in Nebenrichtung) mittels Taster
- Zähl-detektoren in der Hauptrichtung für Geradeaus ca. 200 m vor Haltlinie

Die Steuerung besteht aus sieben Phasen. Phase 1, 2 und 3 bilden den Festzeitkorpus der Steuerung. Die restlichen vier Phasen geben der Steuerung die notwendige Flexibilität. Der Phasentausch ist möglich. Linksabbieger werden auf Anforderung gesichert geführt. Der Radverkehr hat eine eigene Signalisierung, indirektes Linksabbiegen durch Anforderung (Radfahrertasche) und Anforderung aus der NR. Es stehen eine Variante mit 75 Sekunden und eine mit 100 Sekunden Umlaufzeit zur Verfügung. Nachfolgend ist der Phasenfolgeplan mit in Rot gekennzeichneten Hauptphasen und ein Beispiel eines Signalzeitenplans für den Knoten aufgeführt.

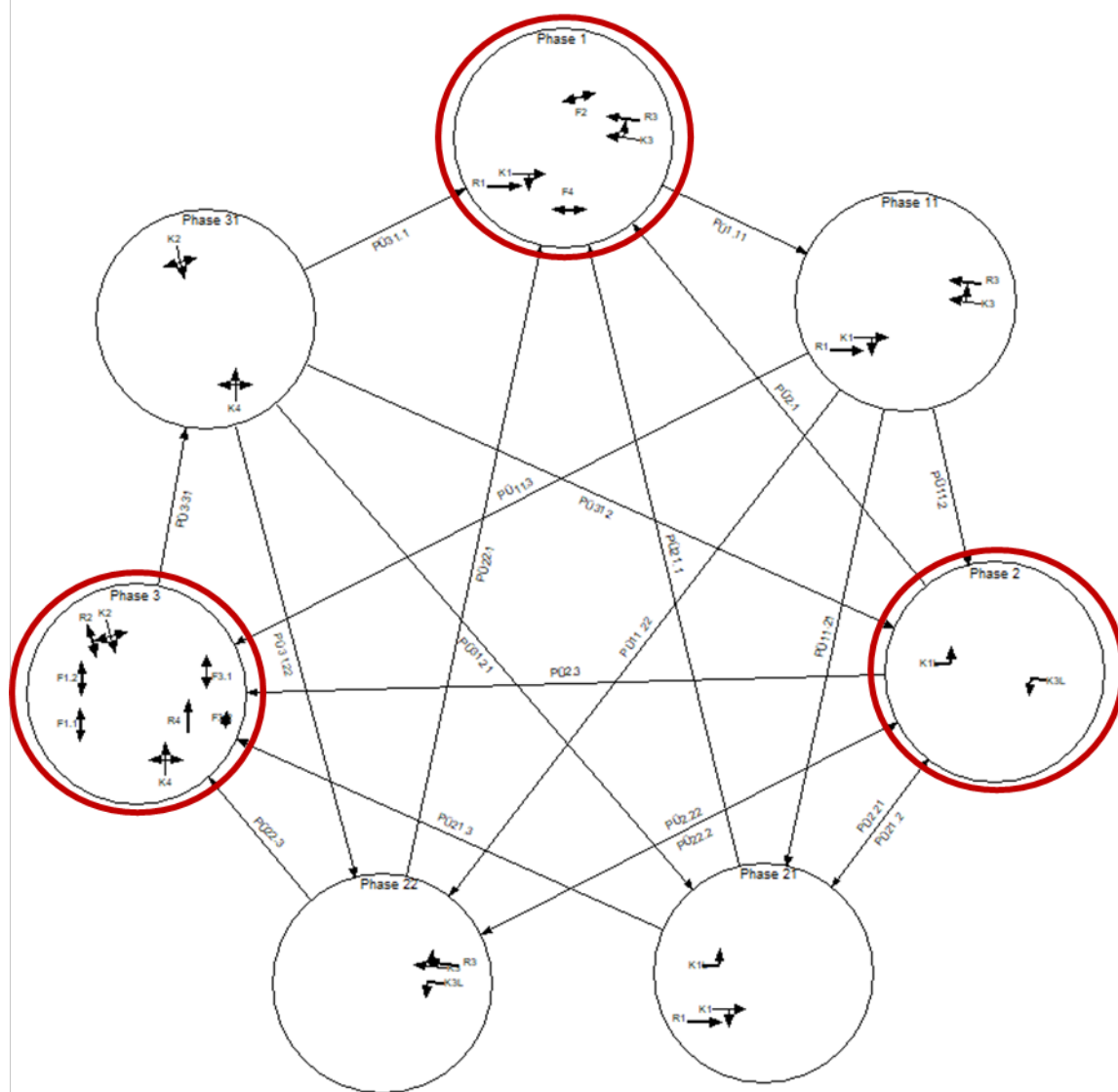


Abbildung 4-5: Phasenfolgeplan Konten 2 Innerorts (4-armig)

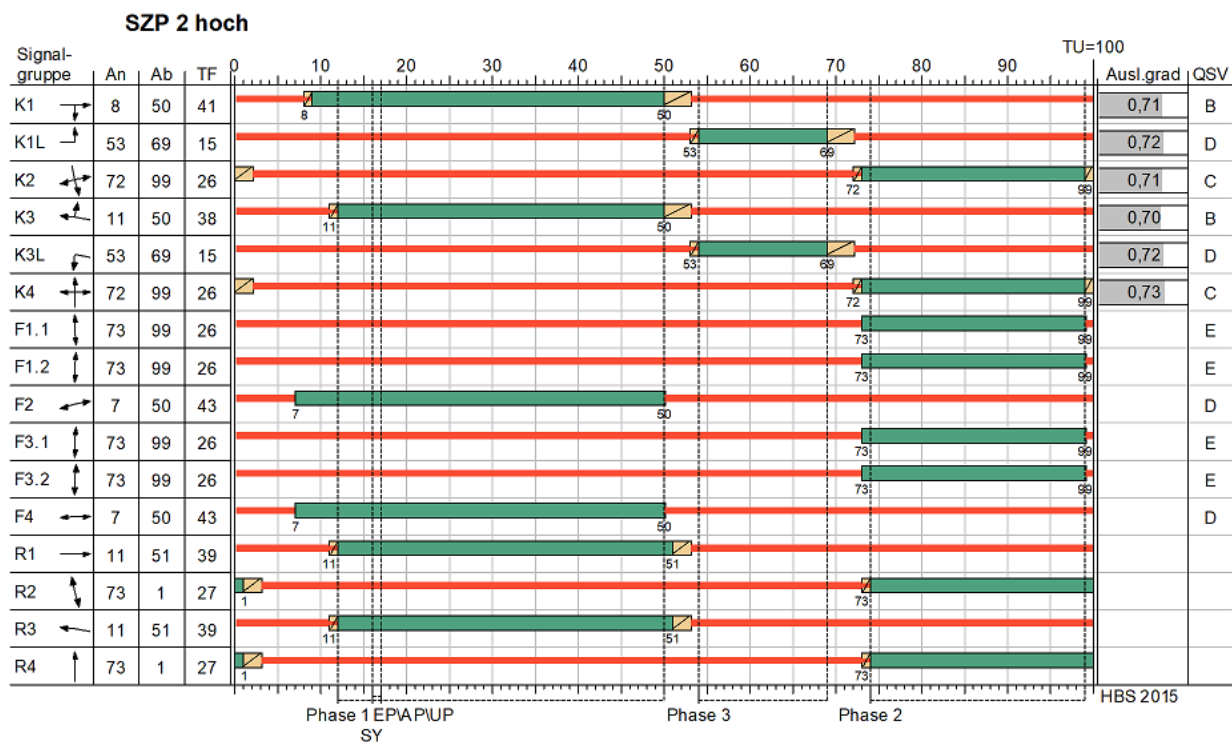


Abbildung 4-6: Signalzeitenplan Knoten 2 Innerorts (4-armig) für sehr hohe Belastungen

4.1.3 Innerorts Knotenpunkt (3-armig)

Topologie

Der Knotenpunkt besteht aus drei Armen auf den eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h gilt. Der westliche Arm besteht aus zwei Fahrstreifen, ein Geradeausfahrstreifen und ein gemeinsamer Geradeaus- und Rechtsabbiegerfahrstreifen. Der östliche Arm ist auf freier Strecke zweistreifig, am Knotenpunkt werden die Linksabbieger auf einen separaten Fahrstreifen geführt und für die Geradeausfahrer stehen zwei Fahrstreifen zur Verfügung. Der Nebenarm besteht auf freier Strecke aus einem Fahrstreifen in der Zu- und Abfahrt. Am Knotenpunkt erfolgt eine Aufteilung in einen separaten Links- und Rechtsabbiegerfahrstreifen. Für den Radverkehr sind keine eigenen Fahrstreifen vorgesehen, d.h. der Radverkehr wird auf der Hauptfahrbahn mitgeführt. Die Fußgänger werden über Furten am westlichen Hauptarm und am Nebenarm gesichert geführt.

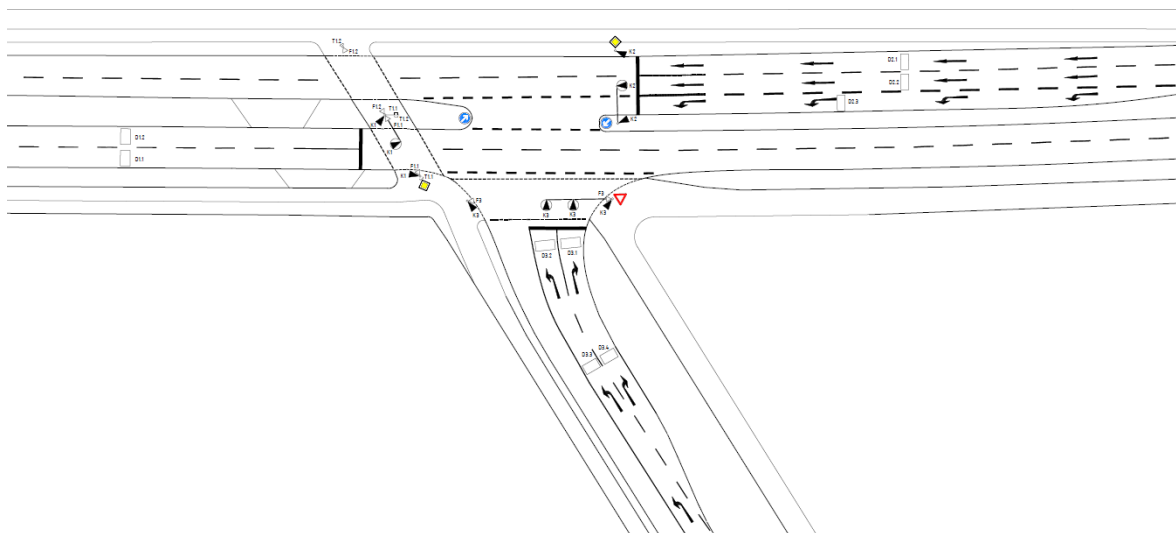


Abbildung 4-7: Lageplan Konten 3 Innerorts (3-armig)

Klassische Detektion und Steuerung

Für die Detektion des Verkehrs sind die folgenden Detektoren vorgesehen:

- Bemessungsdetektoren in der Hauptrichtung für Geradeaus ca. 35,0 m vor Haltlinie
- Bemessungsdetektoren in der Hauptrichtung für Linksabbieger ca. 25,0 m vor Haltlinie
- Bemessungsdetektor in der Nebenrichtung ca. 20,0 m vor Haltlinie
- Anforderungsdetektor in der Nebenrichtung ca. 2,0 m vor Haltlinie
- Freigabe der Fußgänger LSA am Hauptarm mittels Taster und nur auf Anforderung
- Freigabe der Fußgänger LSA am Nebenarm ist parallel zur Hauptrichtung des Kfz geschaltet, ohne Taster
- Zähl-detektoren in der Hauptrichtung für Geradeaus ca. 200 m vor Haltlinie

Die Steuerung besteht aus vier Phasen. Phase 1 und 2 bilden den Festzeitkorpus der Steuerung. Die restlichen beiden Phasen geben der Steuerung die notwendige Flexibilität. Linksabbieger sind bedingt verträglich zum entgegenkommenden Geradeausverkehr der Hauptfahrbahn. Es stehen eine Variante mit 75 Sekunden und mit 100 Sekunden Umlaufzeit zur Verfügung. Nachfolgend ist der Phasenfolgeplan mit in Rot gekennzeichneten Hauptphasen und ein Beispiel eines Signalzeitenplans für den Knoten aufgeführt.

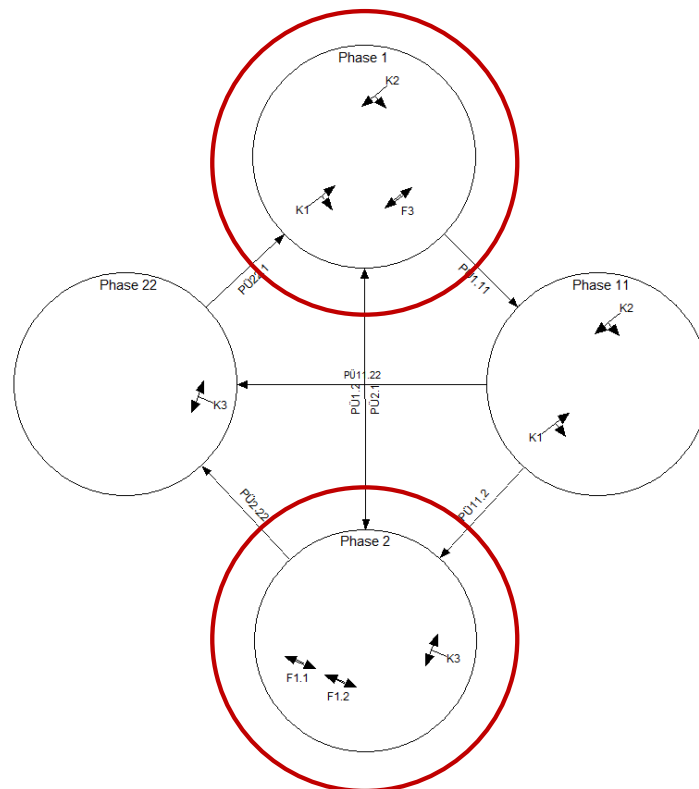


Abbildung 4-8: Phasenfolgeplan Konten 3 Innerorts (3-armig)

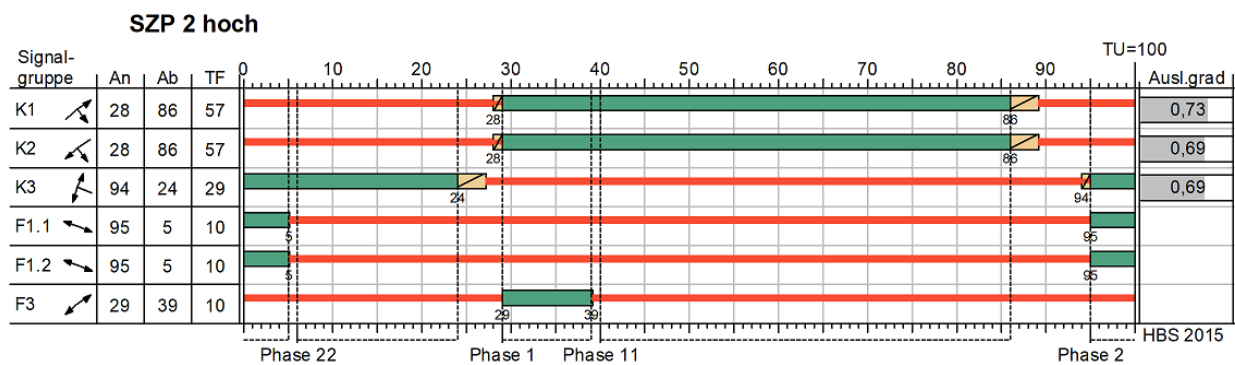


Abbildung 4-9: Signalzeitenplan Knoten 3 Innerorts (3-armig) für normale Belastungen

4.1.4 Koordinierter Streckenzug (vier Knotenpunkte)

Der koordinierter Streckenzug besteht aus den beiden Knotenpunkttypen innerorts, die abwechselnd aufeinander folgen. Die Koordinierungsrichtung ist von Westen nach Osten. Insgesamt besteht der koordinierte Streckenzug aus vier Knoten mit unterschiedlichen Abständen (siehe Abbildung 4-10). Es ergibt sich insgesamt eine Netzlänge von fast einem Kilometer. Die Koordinierungsgeschwindigkeit beträgt 50 km/h.

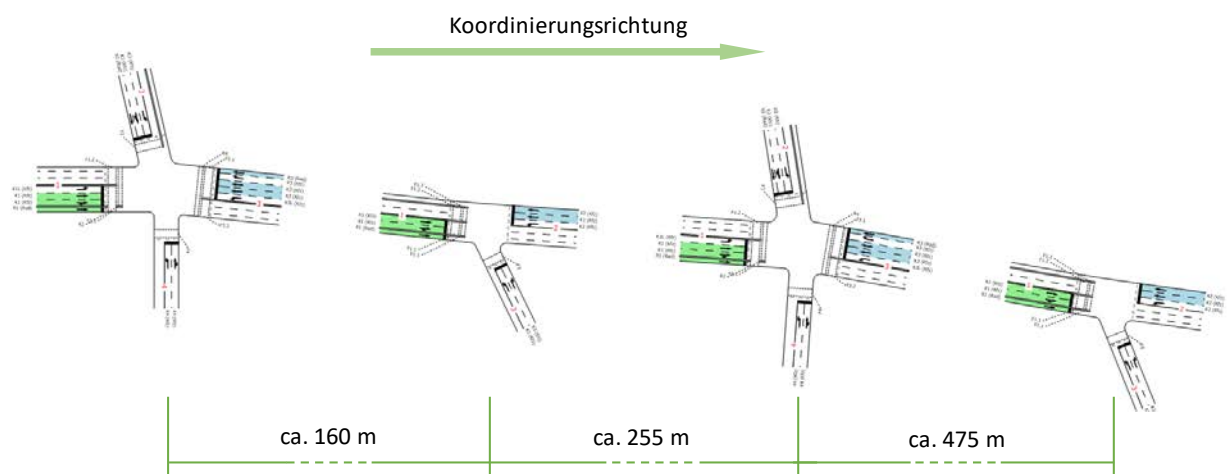


Abbildung 4-10: Koordinierter Streckenzug (vier Knotenpunkte)

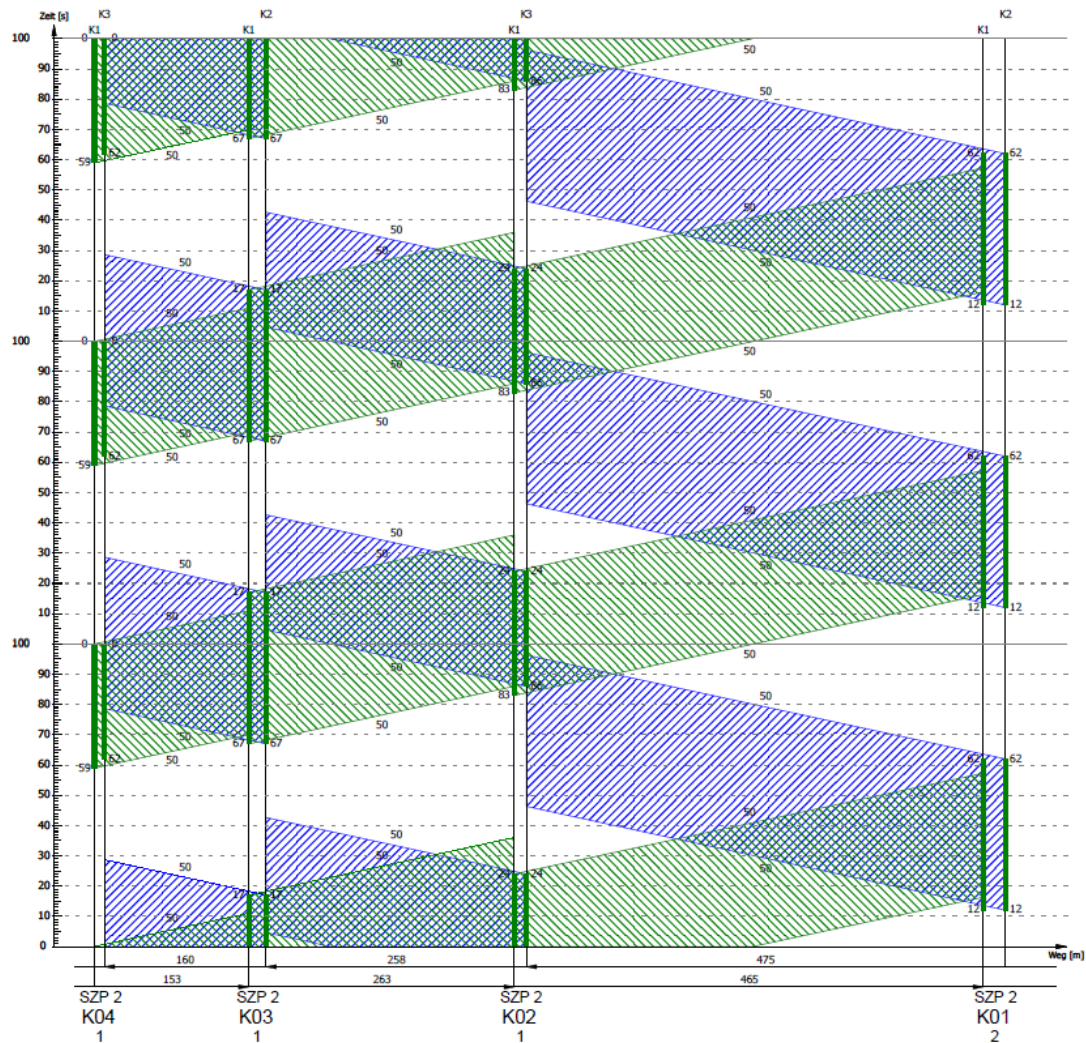


Abbildung 4-11: Zeit-Weg-Diagramm Laborstreckenzuges pro Knoten (TU = 100 sek)

4.2 Aufbau der Laborumgebung

Für den Aufbau der Laborumgebung, sprich die Abbildung der Laborknotenpunkte und des koordinierten Streckenzuges, wird auf das Werkzeug zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation VISSIM zurückgegriffen. Mittels VISSIM werden die Geometrie der Knotenpunkte bzw. das Netz, die Verkehrsbelastungen, die verkehrstechnische Steuerung und auch die C2X-fähigen Fahrzeuge abgebildet. Die Kalibrierung des Simulationsmodells erfolgte durch Anpassung der Attributierung von Verhaltensparametern der einzelnen Fahrzeugobjekte. Diese Parameter beschreiben die Geschwindigkeitswahl durch Anpassung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung, das Fahrzeugfolgeverhalten durch Anpassung u.a. der Zeitlücke zum vorausfahrenden Kraftfahrzeug und das Fahrstreifenwechselverhalten durch Anpassung u.a. der maximalen Verzögerung bei notwendigem Fahrstreifenwechsel.

Die Kalibrierung wurde durchgeführt, indem die Verkehrszahlen der einzelnen festgelegten Belastungsszenarien mit der Verkehrszählung aus VISSIM verglichen wurde. Es wurde eine Abweichung kleiner gleich 5 % erreicht und das Modell gilt somit für die Laborexperimente als hinreichend valide.

4.2.1 Abbildung der Laborknotenpunkte

Die Knotenpunkte und deren Steuerung wurden im Verkehrsingenieurarbeitsplatz LISA angelegt und projiziert. Die Skizze in Abbildung 4-12 zeigt die jedem Fahrstreifen zugeordneten Fahrlinien als auch die zugehörigen Signalgruppen für den Kfz-Verkehr. Auch sind die Furten für Radfahrer (rot) und Fußgänger (grün) zu erkennen. Die Lage der Haltlinien als auch die Lage der Detektoren sind in dem der Skizze zugrunde liegenden Lageplan des Knoten abgebildet.

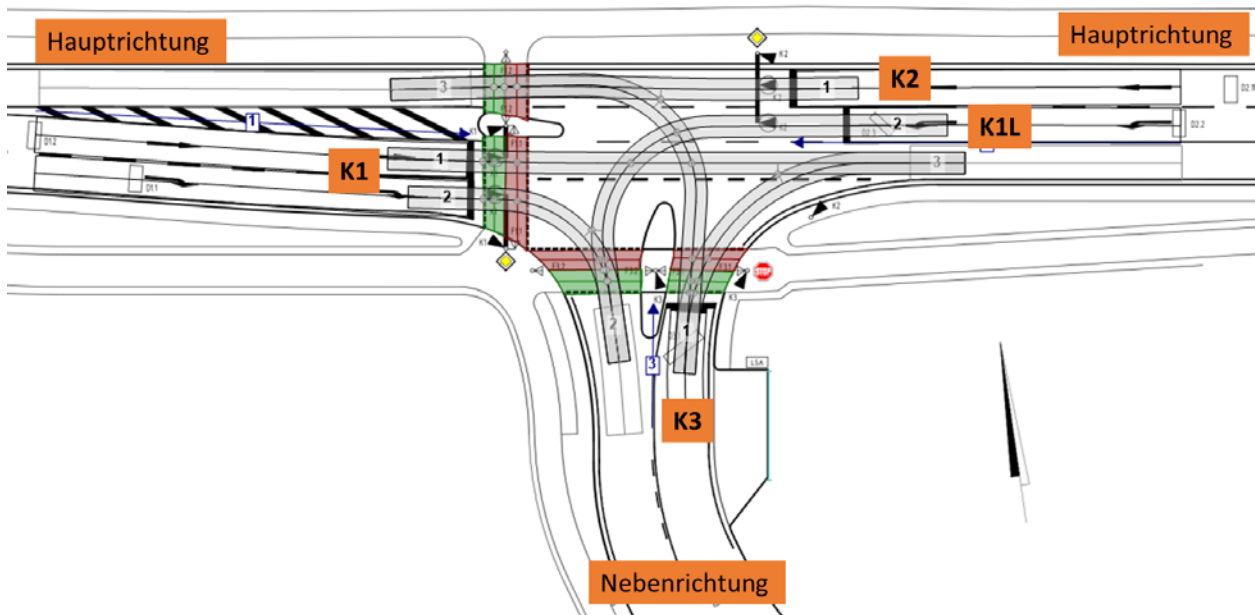


Abbildung 4-12: Knotenpunktskizze Knoten 1

Basierend auf den Lageplänen der einzelnen Knotenpunkte wurden die Simulationsnetze aufgebaut. Wichtig für die Integration der Steuerung in die Simulationsumgebung ist, dass schon beim Modellaufbau dieselben Bezeichnungen der Detektoren und Signalgruppen verwendet werden, wie in der zu integrierenden Steuerlogik. In Abbildung 4-13 sind die Bemessungsdetektoren (blau), die Anforderungsdetektoren (gelb) sowie die Zähl-detektoren (violett) dargestellt.

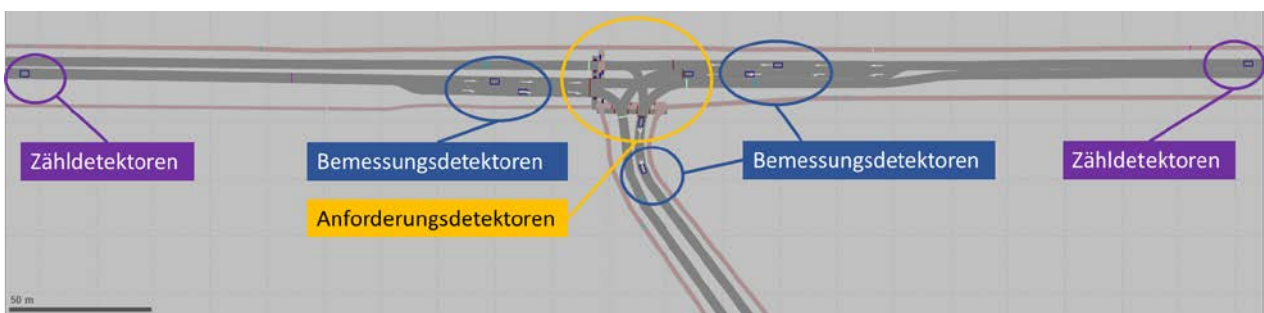


Abbildung 4-13: VISSIM Netzmodell (Detail) Knoten 1 mit Detektion für die LSA-Steuerung

Zur Vorbereitung der Auswertungen als auch zum Teil für die Kalibrierung wurden neben der Detektion für die Steuerung, die Laborknoten mit Messquerschnitten für die Erfassung von Stauungen und der Fahrzeugmenge ausgestattet.

Bei der späteren Auswertung der Simulationen werden von VISSIM erzeugte Kenngrößen herangezogen. Es werden Verlustzeiten und Verkehrsmengen gemessen. Für die Kalibrierung wurden Knotenpunktzählungen verwendet. Laut der Beschreibung im VISSIM Benutzerhandbuch setzt sich eine

Knotenpunktzählung aus einer Querschnittszählung an den festgelegten Knotengrenzen und aus einer Routenverfolgung der Fahrzeuge während des Ein- und Ausfahrens aus dem Bereich zusammen.

Es werden maßgeblich drei Kenngrößen (Halte, Durchfahrten und Verlustzeit, für Details siehe Kapitel 5) für die Bewertung der Simulationen herangezogen. Die vierte Größe (Anzahl an Fahrten) gilt als Normierungswert. Der Erfassungsbereich der Kenngrößen wurde auf etwa 500 m Fahrstreifenlänge jedes Armes festgelegt.

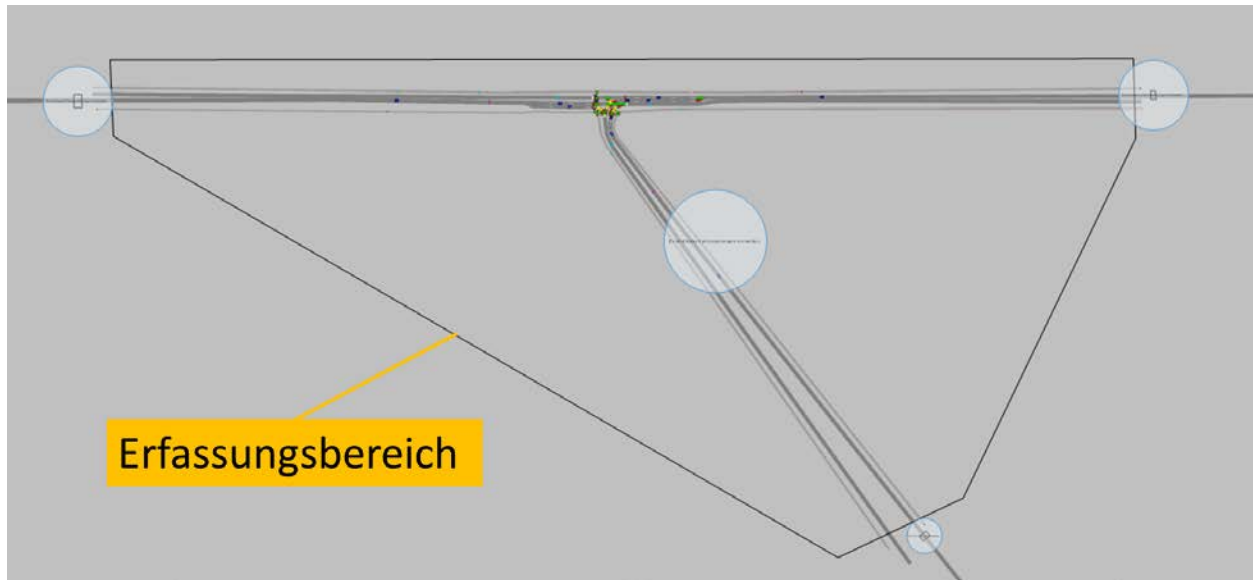


Abbildung 4-14: VISSIM Netzmodell für die VISSIM-Auswertung

Während der Simulationsläufe findet eine laufzeitparallele Auswertung statt. Damit sich das Netz mit Fahrzeugen füllt, ist der eigentlichen Simulation bis zur Simulationssekunde 900 ein Vorlauf vorgeschaltet. Von Simulationssekunde 900 bis 4500 (entspricht einer Simulationsstunde) werden die Messungen durchgeführt.

4.2.2 Abbildung der C2X-Fahrzeuge und Integration in die Steuerung

Der Datenaustausch zwischen VISSIM und LISA erfolgt über die bereits vorhandene und nun erweiterte LISA-VISSIM-Schnittstelle. Die Erweiterung der LISA-VISSIM-Schnittstelle umfasst den Austausch der C2X-Fahrzeuge von VISSIM nach LISA. Neben der klassischen Steuerung an den Laborknoten werden die entwickelten Steuerungsfunktionen in die VISSIM-Simulation aufgenommen. Dies beinhaltet die verbesserte Detektion von Verkehrsteilnehmern mittels der C2X-Kommunikation.

Grundsätzlich hat die LISA-VISSIM-Bibliothek die Funktion, mit LISA projektierte Lichtsignalanlagen innerhalb von VISSIM zu testen. Nach der Erstellung eines LISA-Exports für VISSIM in Form von mehreren Dateien können über den in VISSIM integrierten OMTC⁹-Server die Anlagen in der Simulation berücksichtigt werden. Der Datenaustausch findet in der „klassischen-Version“ in Form von Detektormesswerten und Lichtsignalprogrammen statt, siehe Abbildung 4-15.

Dieser Ansatz wird auch für die Simulationsexperimente mit den neu entwickelten C2X-Steuerungsfunktionen genutzt. Durch dieses „Software-in-the-Loop Prinzip“ kann die Steuerlogik entsprechend ihrer späteren Implementierung auf einem realen Steuergerät in der virtuellen Umgebung getestet werden. Dies gewährleistet eine praxisnahe Erprobung der Steuerung, wie dies auch jetzt schon bei Verwendung von konventioneller Detektion zur Steuerung der Fall ist. In Realität versenden die C2X-fähigen Fahrzeuge CAM-Nachrichten, welche von einer RSU-Steuergerät Einheit entgegengenommen werden. In der RSU werden die Daten weiteraufbereitet und dem Steuergerät entsprechend zur Verfügung

⁹ Open Methode for Traffic Control; ist eine LISA-eigene Entwicklungsumgebung

gestellt. Diese Datenprozesskette wird im Simulationsmodell vereinfacht dargestellt. Das heißt es werden die Datenüberträge durch die Luftschnittstelle, Verbindungsausfälle, Verlust von Datenpaketen oder fehlerhaft Daten nicht im Modell berücksichtigt. Der verwendete Ansatz unterliegt der Annahme eines idealen Datenaustausches.

Aus der Mikrosimulation werden die Fahrzeugdaten abgegriffen und direkt der Steuerlogik zur Verfügung gestellt. Hierzu war es nötig, zusätzliche Möglichkeiten zu implementieren, mit denen auf Fahrzeugdaten aus der VISSIM-Simulation vom OMTC-Server zugegriffen werden kann. Durch die angepasste Schnittstelle werden Fahrzeugdaten auf definierten Fahrstreifen an die OMTC Schnittstelle von VISSIM nach LISA übergeben. Die Fahrzeugdaten werden von der VISSIM-Simulation erzeugt und sekundlich angepasst.

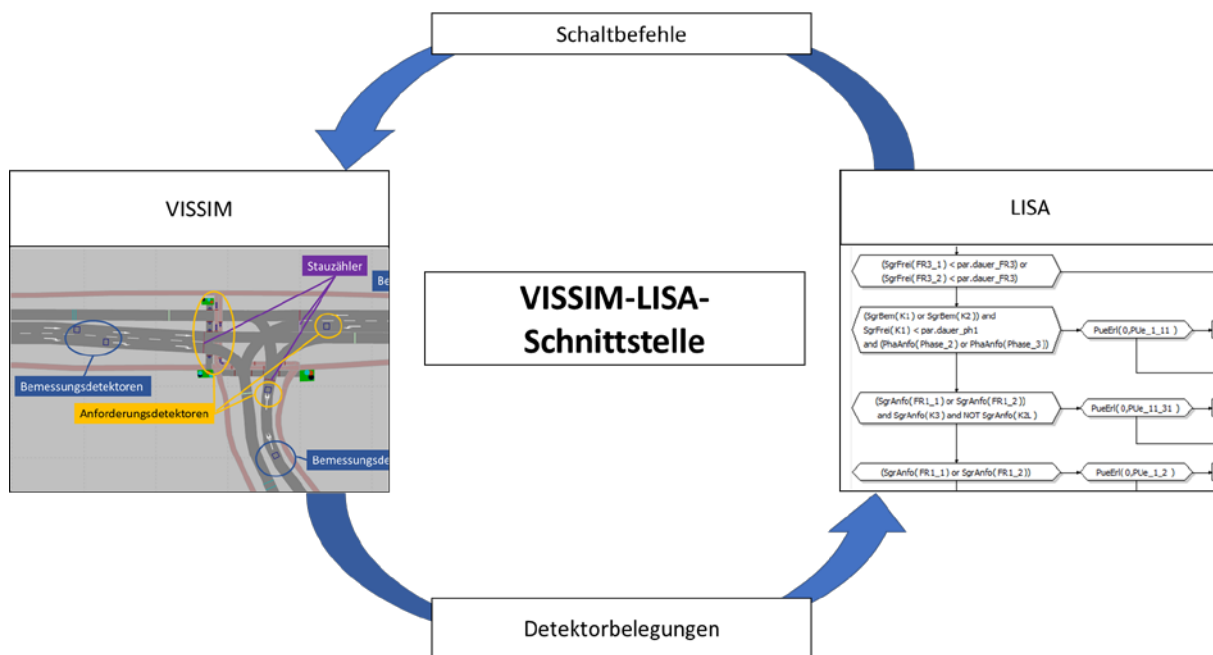


Abbildung 4-15: Klassische Schnittstelle und Steuerung

Im konkreten Fall übergibt VISSIM alle Fahrzeuge an die OMTC-Schnittstelle mit den dazugehörigen Fahrzeugdaten wie beispielsweise den Abstand eines Fahrzeugs zur vorausliegenden Haltlinie auf dem derzeit befindlichen Fahrstreifen, die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs, welches sich vor der jeweilige Lichtsignalanlage befinden. Die Schnittstelle fügt diese Daten in die bereitgestellten Datenstrukturen ein. Die Verarbeitung der Fahrzeuginformationen in der Logik erfolgt in einem Detektionsbereich frühestens in einer Entfernung von 300 m und reicht bis zur Haltlinie einer Signalgruppe. Tritt der Fall ein, dass zwei Knotenpunkte in einem geringeren Abstand als die 300 m zueinander liegen, so reduziert sich der Detektionsraum auf den Abstand der beiden Knoten. Die 300 m stellen sicher, dass bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h mindestens 15 s und bei 50 km/h mehr als 20 s Erfassungszeitbereich für C2X-fähige Fahrzeuge zur Verfügung steht. Weiterhin sei angemerkt, dass der Start des Detektionsbereichs je nach Knotenpunkt und Knotenpunktabständen zueinander insbesondere im Fall des Straßenzugs variiert.

Die Übertragung der Attribute eines Fahrzeuges wie Geschwindigkeit, Abstand zur Haltlinie erfolgt innerhalb eines sekundlichen VT-Taktes. Eine Unterscheidung zwischen normalen Fahrzeugen (ohne C2X-Kommunikationseinrichtungen) und C2X-Fahrzeugen kann in VISSIM über die Auswahl der Ausrüstung LSA-Kommun. Angegeben werden und wird dementsprechend an den OMTC-Server übergeben. Verschiedene Penetrationsraten sind über entsprechende Zuordnung von Fahrzeugtypen zu realisieren und von der Logik der LSA innerhalb des OMTC-Servers zu berücksichtigen. In der LISA-Logik werden die Fahrzeuginformationen über die in Kapitel 3.1.1 Grundfunktionen aufgerufen.

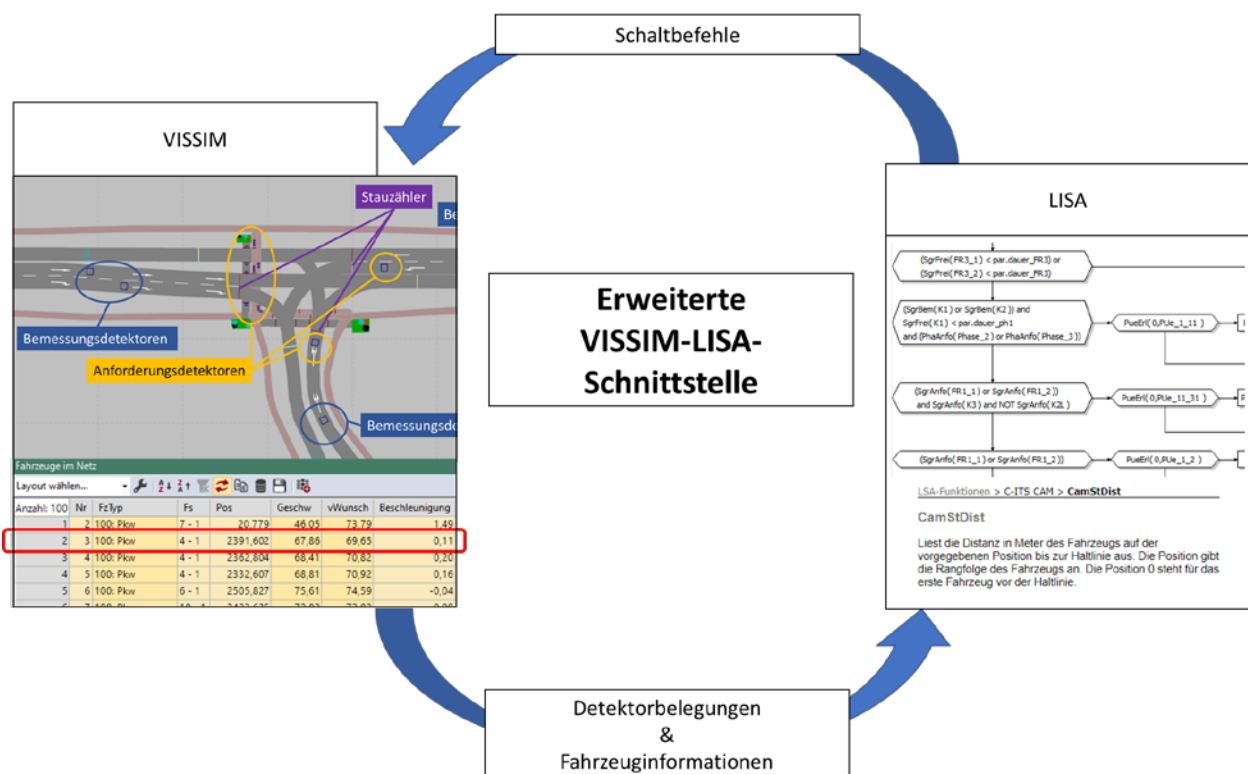


Abbildung 4-16: Schnittstelle und Steuerung C2X-fähig

Die genannten Verkehrsbelastungen (gering, normal, hoch, sehr hoch) sollen mit jeweils unterschiedlichen Penetrationsgraden simuliert werden. Zur Umsetzung der Penetrationsgrade der C2X-fähigen Fahrzeuge, wurde ein weiterer Fahrzeugtyp mit den identischen Eigenschaften definiert und mit dem Ausrüstungstyp „LSA-Kommun.“ Ausgestattet. Mit der relativen Belastung wurde der Anteil der C2X-Fahrzeuge am gesamten Fahrzeugkollektiv realisiert und so die Penetrationsrate abgebildet. In Abbildung 4-17 wird eine Penetrationsrate der C2X-Fahrzeuge von 25 % dargestellt.

Anzahl: 2	FzTyp	WuGeschwVert	RelBel	FzTyp\Ausrüst
1	100: Pkw	50: 50 km/h	0,750	
2	120: Pkw...	50: 50 km/h	0,250	LSA-Kommun.

Abbildung 4-17: Aufteilung der Fahrzeugtypen mit und ohne C2X-Fähigkeit

Der ETA „Estimated time of arrival“ wird in LISA aus den beiden Attributen „Abstand zur Haltlinie“ und „Geschwindigkeit“ aus den beiden Funktionen CamStDist und CamStSpeed errechnet. Der ETA wird nicht direkt aus VISSIM nach LISA versorgt. Hierzu wird in LISA für alle Fahrzeuge die Ankunftszeit über die folgende Formel gebildet:

$$v = \frac{x}{t}; \quad t = \frac{x}{v}$$

Formel 1: Bestimmung der Ankunftszeit

Das ETA als auch weitere Fahrzeugdaten können in der LISA-Logik mithilfe der Funktionen direkt abgefragt werden.

4.2.3 Anzahl der Simulationsläufe

Gemäß den Vorgaben der „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ (FGSV 2006) wurden zunächst Voruntersuchungen der vier Belastungsszenarien für die vier Laborknotenpunkte durchgeführt. In der Voruntersuchung wird die Standardabweichung einer betrachteten Kenngröße ermittelt. Zur Identifikation der Anzahl der Simulationsdurchläufe wurde die Verlustzeit als Kenngröße gewählt.

Zur Ermittlung der Anzahl der Simulationsdurchläufe wurden im ersten Schritt die Belastungsszenarien betrachtet mit der höchsten Standardabweichung (hier der Belastungsfall „sehr hohe Belastung“). Die Ermittlung einer dem Konfidenzniveau entsprechenden Anzahl an Simulationsläufen erfordert bei einer hohen Standardabweichung eine höhere Anzahl an Simulationsläufen. Simulationsszenarien mit einer geringeren Variabilität werden somit automatisch mit einer statisch sicheren Anzahl an Simulationsläufen belegt.

1. Schritt: Bestimmung der Standardabweichung s und s^2 der Varianz der zu untersuchenden Kenngröße aus den Ergebnissen der Voruntersuchung.

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Formel 2: Bestimmung der Standardabweichung

mit

- s = Standardabweichung
- x_i = Variable, deren Standardabweichung gesucht ist, hier Verlustzeit
- $\bar{x}$ = Mittelwert aus den Simulationsläufen
- n = Anzahl an Simulationsläufen

2. Schritt: Iterative Bestimmung der Anzahl an Simulationsläufen. Hierfür wurden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt: Konfidenzniveau von 95 %. Gewünschtes Konfidenzintervall C von 20s. Bei einem Mittelwert von 274 sec entspricht dies etwa einem Fehler von $\pm 3,5\%$. Die erforderliche Anzahl an Simulationsläufe n wurde iterativ bestimmt:

$$n \geq \frac{t(\alpha, n - 1)^2 \cdot s^2}{C^2}$$

Formel 3: Iterative Bestimmung der Anzahl der Simulationsläufe

mit

- C = gewünschtes Konfidenzintervall
- $t(\alpha, n - 1)$ = Variable, deren Standardabweichung gesucht ist, hier Verlustzeit
- s = Standardabweichung der untersuchten Kenngröße aus Voruntersuchung
- n = Anzahl an Simulationsläufen

	s^2			
95 %	802	20	7	Außerorts (sehr hohe Belastung)
95 %	1009	20	9	Innerorts 3-armig (sehr hohe Belastung)
95 %	1451	20	15	Innerorts 4-armig (sehr hohe Belastung)
95 %	1534,5	20	15	Netz (sehr hohe Belastung)

Tabelle 4-1: Anzahl Simulationsläufe

Es gilt anzunehmen, dass das Konfidenzintervall von $C = 20\text{ s}$ für die worst-case Situation wegen des stockenden und dadurch zeitverlusttreibenden Verkehrsflusses ausreichend ist. Es wird davon ausgegangen, dass die errechnete Anzahl an Simulationsdurchläufen bei Szenarien mit geringerer Standardabweichung zu einem höheren Konfidenzniveau führt.

4.2.4 Definition und Umsetzung der Szenarien

Neben der Auswahl der Knotenpunkte, der unterschiedlichen Verkehrsbelastungen und der Entwicklung der neuen Steuerfunktionen stellt sich auch die Frage nach der Durchdringungsrate des Verkehrs mit C2X-fähigen Fahrzeugen. Ziel ist es die Wirkungen auf den Verkehrsfluss und somit die Effektivität der Steuerung bei Einbeziehung der C2X-Informationen zu bewerten. Um dies in einer handhabbaren Weise umzusetzen wurden unterschiedliche Szenarien und Szenarienkombinationen definiert.

1. Szenario: Informierte Verkehrsteilnehmer

Die Information seitens der Infrastruktur an die Verkehrsteilnehmer bietet Hinweise, die ein verkehrlich optimiertes Handeln ermöglichen. Die Anzeige von Schaltzeitprognosen einer LSA oder Geschwindigkeitsempfehlungen beziehungsweise Grüne-Welle-Assistenten für das Passieren eines oder mehrerer aufeinander folgende Knotenpunkte sind hierbei denkbar. Dieses Szenario wird nur theoretisch erarbeitet auf Grund der hohen Komplexität.

2. Szenario: Optimierte Steuerungsstrategie durch die Einbeziehung der verbesserten Detektion von Fahrzeugen

Die aktive Übermittlung von Informationen aus den Fahrzeugen an die Infrastruktur stellt eine Alternative zu lokal verbauten Detektoren dar. Im Gegensatz zu lokal verbauten Detektionsquerschnitten ist somit eine Echtzeitinformation über die Verkehrssituation im Knotenpunkt und in dessen Zufahrten möglich. Dieses Szenario wird mit 0 %, 12,5 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Durchdringungsrate an C2X-Fahrzeugen für die drei Knotenpunkte simuliert.

3. Szenario: Optimierte Steuerungsstrategie durch die Einbeziehung der verbesserten Detektion von Fußgängern und Radfahrern

Die entwickelten C2X-Kommunikationsstandards ermöglichen nicht nur die Vernetzung von Fahrzeugen mit der Infrastruktur, sondern auch die Nutzung von mobilen Endgeräten. Hierdurch können Fußgänger und Fahrradfahrer effektiv und frühzeitig detektiert werden.

Dieses Szenario wird mittels der unterschiedlichen Durchdringungsraten der Radfahrer 0 %, 12,5 %, 50 % und 100 % für den großen innerörtlichen Knotenpunkt simuliert. An diesem Knotenpunkt werden die Radfahrer der Hauptrichtung auf eigens signalisierten Fahrstreifen geführt. Hierdurch hat der Radfahrer einen zusätzlichen Einfluss im Gegensatz zur gemeinsamen Signalisierung mit dem Kfz-/Fußverkehr. Eine an die LSA kommunizierte Position von Fußgängern wurde nicht im Szenario berücksichtigt, da der Richtungswunsch der Fußgänger nicht eindeutig erkennbar ist.

4. Szenario: Einsatzfahrzeug-Priorisierung

Einsatzfahrzeuge wie beispielsweise von Feuerwehr, Rettungsdiensten und Polizei haben ein besonderes Interesse daran, im Einsatzfall Knotenpunkte schnell und sicher zu überqueren. Dies kann mit Hilfe einer speziell für diesen Fall optimierten Signalisierung unterstützt werden.

Dieses Szenario wird losgelöst von den anderen Kombinationen betrachtet, da das Passieren eines Einsatzfahrzeugs an einem Knotenpunkt ein stochastisches Ereignis darstellt. Vor dem Hintergrund verschiedener Belastungen und Kreuzungstypen, wird eine reguläre Einsatzfahrzeug-Priorisierung basierend auf der Funk-Technologie mit einer Einsatzfahrzeug-Priorisierung basierend auf C2X-Kommunikation verglichen. Es soll untersucht werden, ob die neuen Steuerungsmodule nach einem starken Feuerwehreingriff früher wieder zum „Normalzustand“ am Knoten führen.

5. Szenario: Kombination

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts ist es von großem Interesse Erkenntnisse über die Wirkung der einzelnen Szenarien zu gewinnen. In der Praxis ist es aber sehr wahrscheinlich, dass bei einer C2X-Implementierung die Kombination mehrerer Szenarien Anwendung findet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die diversen Kombinationsmöglichkeiten und die getroffene Auswahl.

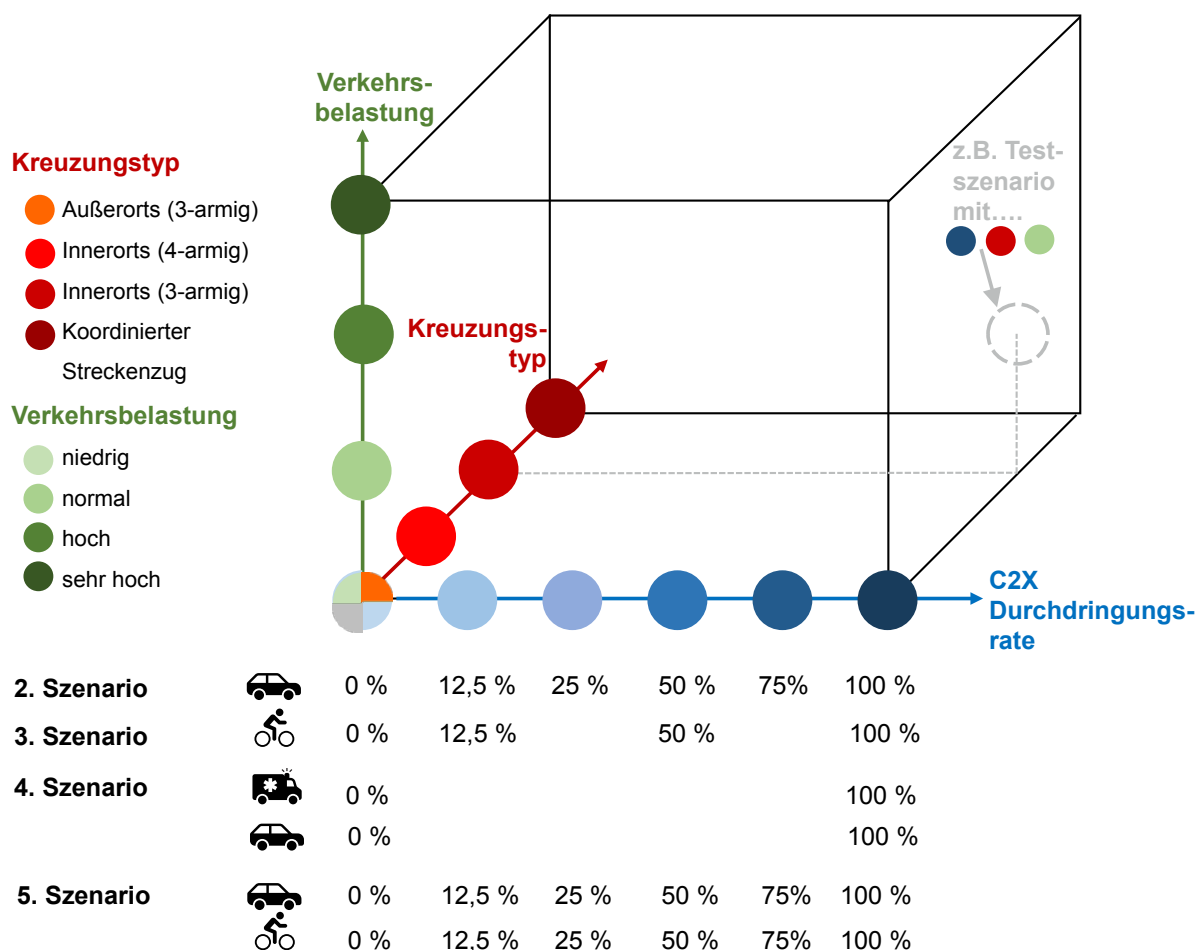


Abbildung 4-18: Testszenarien unter Kombination verschiedener C2X Penetrationsraten, Kreuzungstypen und Verkehrsbelastungen

4.3 Abbildung der Einsatzfahrzeuge für Szenario 4

Tabelle 4-2 stellt die wichtigsten Parameter bei der Modellierung der Einsatzfahrzeuge und der Simulation der Einsatzfahrzeug-Priorisierung in VISSIM dar. Für die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in der Bestandssteuerung basierend auf der Funk-Technologie werden die Einsatzfahrzeuge als ÖV-Fahrzeuge modelliert, die beim Passieren von Meldepunkten 400 Meter vor der Kreuzung die Priorisierung anfragen. Die Abmeldung erfolgt ebenfalls über Meldepunkte, die 10 Meter hinter der Kreuzung angebracht sind.

	Einsatzfahrzeug-Prio. basierend auf Funk-Technologie (0 % C2X)	Einsatzfahrzeug-Prio. basierend auf C2X-Kommunikation (100 % C2X)
Modell	ÖV-Fahrzeug mit Wunschgeschwindigkeit 80 km/h	normales Fahrzeug mit Wunschgeschwindigkeit 80 km/h
Abfahrt	geplant nach ÖV-Fahrplan	geplant nach Zeitintervallen
Check-in	400 Meter vor Kreuzung	300 Meter vor der Kreuzung (Reichweite der RSU)
Check-out	10 Meter nach Kreuzung	nach der Haltlinie

Tabelle 4-2: Modellierung von Einsatzfahrzeugen in der Simulation

Bei der Einsatzfahrzeug-Priorisierung basierend auf C2X-Kommunikation werden die Einsatzfahrzeuge als „normale“ Fahrzeuge modelliert, die indirekt die Priorisierung anfragen, sobald sie die erste CAM im 300 m Radius der RSU versenden. Die Abmeldung erfolgt ebenfalls indirekt, wenn die Einsatzfahrzeuge die Lane verlassen, d.h. die Haltlinie überqueren.

Die Sonderrechte eines Einsatzfahrzeuges, wie das Überfahren von roten LSA oder das Überholen auf der Gegenfahrbahn, sowie das entsprechende Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer, wie das Bilden einer Rettungsgasse, wird nicht simuliert. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Einsatzfahrzeug-Priorisierung die Inanspruchnahme von Sonderrechten obsolet macht. Um jedoch zu simulieren, dass Einsatzfahrzeuge die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten dürfen, wird sowohl in der Bestandssteuerung als auch in der C2X-Steuerung eine Wunschgeschwindigkeit von 80 km/h für die Einsatzfahrzeuge angesetzt.

Bei dem Knoten außerorts und dem Knoten innerorts (3-armig) fahren insgesamt 15 Einsatzfahrzeuge pro Stunde. Bei dem innerorts Knoten (4-armig) werden 24 Einsatzfahrzeuge pro Stunde in das Simulationsnetz eingespeist. Um die Vergleichbarkeit der Szenarien sicherzustellen, fahren die Einsatzfahrzeuge bei jeder Belastung sowie bei Bestands- und C2X-Steuerung zum selben Zeitpunkt los. Bei der Bestandssteuerung und damit der Einsatzfahrzeug-Priorisierung nach der Funk-Technologie wird dies über einen festen ÖV-Fahrplan umgesetzt. Bei der C2X-Steuerung hingegen wird mithilfe von Zeitintervallen sichergestellt, dass der Zufluss der Einsatzfahrzeuge zu denselben Zeitpunkten erfolgt.

5 Wirksamkeit der C2X-Steuerung gegenüber Standardverfahren

In diesem Kapitel wird die Wirksamkeit, der in der mikroskopischen Simulation umgesetzten konventionellen Steuerung (Standardverfahren) sowie der C2X-Steuerung beschrieben. Die Ergebnisse werden entsprechend den in Kapitel 4.2.4 vorgestellten fünf Szenarien zugeordnet. Mit Ausnahme des Szenarios 1 wurden alle Szenarien in einer Simulationsstudie hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht. Zur Operationalisierung der Wirksamkeit wurden die folgenden drei Kenngrößen herangezogen:

- Anzahl der Halte
- Anzahl der Durchfahrten ohne Halt
- Verlustzeit

Die Kenngrößen wurden in der Simulation für den gesamten Knotenpunkt als auch getrennt für die Haupt- und Nebenrichtung aufgezeichnet und ausgewertet. Das Betrachtungsintervall beläuft sich jeweils auf die Dauer eines Simulationslaufes von einer Stunde.

Ein Ereignis wird als Halt betrachtet, wenn das Fahrzeug innerhalb des Erfassungsbereiches (siehe Kapitel 4.2) zum absoluten Stillstand kommt, ungeachtet der Dauer des Stillstandes. Ein Fahrzeug kann mehrmals im Erfassungsbereich halten, sprich mehr als einen Halt verursachen. Passiert ein Fahrzeug ohne einen einzigen Halt den Knotenpunkt, so wird dies als Durchfahrt gewertet. Als Verlustzeit wird die Menge an Zeit betrachtet, welche sich aus der Differenz der Fahrzeit mit Beeinträchtigungen des Fahrtablaufes und der ungehinderten Fahrt entlang einer entsprechend definierten Strecke ergibt. Unter Beeinträchtigungen sind sowohl die Einflüsse durch weitere Verkehrsteilnehmer als auch die der LSA-Steuerung zu verstehen.

5.1 Szenario 1: Informierte Verkehrsteilnehmer

Dieses Szenario wird im vorliegenden Bericht ausschließlich theoretisch betrachtet, da es unterschiedliche Ausprägungen dieses Szenarios gibt, welche nicht alle mittels Simulation im Rahmen des Projekts umsetzbar sind.

Zunächst ist festzuhalten, was unter dem „informierten Verkehrsteilnehmer“ zu verstehen ist bzw. welche Information diesem von Seiten der LSA übermittelt werden kann. Am Beispiel des Kfz-Verkehrs kommuniziert im klassischen Sinne die LSA mit dem Fahrer des Fahrzeuges durch die Anzeige des Signalisierungszustandes mittels der Signalgeber an einem Knotenpunkt. Basierend auf dem Signalisierungszustand passt der Fahrer seine Fahrweise entsprechend an.

Dieser Anzeigestatus - angereichert mit zusätzlichen Informationen - kann auf elektronischem Wege ins Fahrzeug gespielt werden. D.h. es ist möglich den OnBoard-Systemen des Fahrzeuges den derzeitigen anliegenden Signalisierungszustand bezogen auf die Knotenpunktgeometrie mittels den Datenformaten SPaT und MAP zu übertragen. Zusätzlich ist es möglich die Dauer des Signalisierungszustandes kombiniert mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit zu übermitteln. Im Fahrzeug ist es mittels der empfangenen Informationen über den Signalisierungszustand der LSA in Kombination mit der Position des empfangenden Fahrzeuges möglich dem Fahrzeugführer Fahrempfehlungen auszusprechen. Das kann in einer direkten Art erfolgen, z.B. durch Hinweis auf die zu fahrende Geschwindigkeit, um die LSA noch bei Grün zu passieren, oder indirekt durch die Anzeige der wahrscheinlichen Restgründauer, auf Basis derer sich der Fahrer dann für eine Geschwindigkeit entscheiden kann. Die Anzeigemöglichkeiten dem Fahrer gegenüber sind mittels Human Machine Interfaces (HMI) vielfältig, ebenso wie das Reaktionsverhalten der Fahrer. Die realitätsnahe Abbildung in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation unterliegt daher vielen Annahmen und gestaltet sich somit schwierig.

Die Übertragung des Signalisierungszustandes mit den beiden zusätzlichen Informationen Dauer und Wahrscheinlichkeit, kann zu einer Beeinflussung des Fahrerverhaltens genutzt werden. Unter welchen Bedingungen sind diese Informationen der SPaT- und MAP-Nachricht hilfreich für den Fahrer? Zum einen erhöht es den Komfort, zum anderen erhöht die redundante Darstellung im Fahrzeug-HMI die Wahrscheinlichkeit, dass das Signal der LSA korrekt wahrgenommen wird. Im Falle einer

Geschwindigkeitsempfehlung ist die realisierbare Geschwindigkeit des Fahrzeuges stark vom vorausfahrenden Verkehr abhängig. D.h. zwei Aspekte spielen bei diesem Szenario eine ausschlaggebende Rolle: Erstens stellt sich die Frage, wie verlässlich ist die von der LSA übermittelten Informationen, zweitens ist zu überlegen, welche Möglichkeiten sich im Fahrzeug zur weiteren Informationsverarbeitung anbieten.

In Deutschland sind die Steuerungsverfahren - abgesehen von Festzeitanlagen - so ausgelegt, dass in der Regel sekundlich geprüft wird, welche VA-Bedingungen (Anforderung/Bemessung) anliegen. Diese werden entsprechend ausgewertet und gemäß der umgesetzten Steuerungslogik wird eine Entscheidung getroffen, z.B. einen Phasenübergang zu starten oder in der Phase zu bleiben. Die VA-Bedingungen können vielfältig sein, von der Erfassung per Induktion, Radar Video- oder Wärmebildkamera über den Taster für Fußgänger bis hin zur Anmeldung eines ÖV-Fahrzeuges über Meldepunkte. Alle Eingriffe durch die so erfassten Werte/Fahrzeuge sind zufällige Ereignisse. D.h. eine Vielzahl an Lichtsignalanlagen weist ein Anzeigeverhalten auf, welches keinem wiederkehrenden Muster folgt. Somit ist mit einem Prognoseverfahren zu arbeiten, welches einer Aussage trifft, wie lange ein Signalisierungszustand anhalten wird. Mittels lernender Verfahren kann ermittelt werden, wann welche Eingriffe anliegen werden. Diese Prognose unterliegt immer einer gewissen Unschärfe. Neben den verkehrs- oder fahrzeugabhängigen Eingriffen stellt sich auch noch die Frage der Reaktionszeit der Anlage auf die Steuerungslogik. Ist die Logik bekannt, kann diese ermittelt werden, ist diese nicht bekannt, ist das Lernverfahren, um die Reaktion der Steuerung zu erweitern. Das Verfahren wird dadurch komplexer, die Lerndauer sowie die Unschärfe steigen. Ist die Logik bekannt und die Information gegeben, in welcher Umlaufsekunde sich die Steuerung befindet, kann auf stabile Bereiche der Steuerung zurückgeschlossen werden, z.B. die Dauer eines Phasenüberganges oder die Mindest- bzw. Maximaldauer einer Phase.

Weiterhin ist der Übertragungsverzögerung Beachtung zu schenken. D.h. der Moment, in dem der Ist-Zustand des Schaltzustandes festgestellt wird, ist nicht unbedingt zu 100 % identisch in dem die Information dem Fahrer im Auto angezeigt wird. Auf welche Art und Weise die an das Fahrzeug übertragene Information dem Fahrer zugänglich gemacht wird obliegt allein dem Fahrzeughersteller.

Des Weiteren stellt sich auch noch die Frage wie der Fahrer bzw. das sehr diverse Fahrerkollektiv auf die angebotene Information reagiert. Eine der bekannten Anwendungen ist die Green Light Speed Advisory, auch als GLOSA bezeichnet. Dem Fahrer wird eine Geschwindigkeitsempfehlung zugänglich gemacht, der er folgen kann, um bei Freigabe den Knotenpunkt zu passieren, bzw. um unnötiges Beschleunigen zu vermeiden, falls er dies nicht mehr schaffen kann.

Neben der Herausforderung des realitätsnahen Abbildens des Fahrverhaltens in der Simulation mit der entsprechenden Anpassung des Fahrverhaltensmodells entstehen zwei Regelkreise wie diese schon in Kapitel 2.2.2 beschrieben wurden. Welcher Regelkreis reagiert nun auf den anderen? Wie werden diese Kreise aufeinander abgestimmt bzw. miteinander orchestriert?

Es steht wohl außer Zweifel, dass eine zusätzliche Information im Fahrzeug zum einen den Komfort des Fahrers erhöht, zum anderen auch das „Übersehen“ der physischen LSA verhindert wird und damit eine Anpassung der Geschwindigkeit bewirken kann. Dies ist vor allem in Belastungssituation mit geringen bis sehr wenig Verkehr der Fall, da hier der Fahrer ungeachtet von anderen Verkehrsteilnehmern seine Geschwindigkeit anpassen kann. In unterschiedlichen Projekten und Studien wurde sich bereits versucht dem Thema anzunähern, es sei exemplarisch auf die Projekte UR:BAN, KoMoD und auf die Arbeit von Kaths (2017) verwiesen.

5.2 Szenario 2: Optimierte Steuerungsstrategie durch die Einbeziehung der verbesserten Detektion von Fahrzeugen

Die aktive Übermittlung von Informationen aus den Fahrzeugen an die Infrastruktur stellt eine Alternative zu lokal verbauten Detektoren dar. Im Gegensatz zu lokal verbauten Detektionsquerschnitten ist somit eine Echtzeitinformation über die Verkehrssituation im Knotenpunkt und in dessen Zufahrten über die lokal festgelegten Detektionspunkte hinaus möglich. Der Wahrnehmungshorizont der LSA wird somit entscheidend erweitert. Dieses Szenario wurde mit 0 %, 12,5 %, 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Penetrationsrate an C2X-Fahrzeugen für drei Knotenpunkttypen simuliert. Für jeden Knotenpunkt und jede Penetrationsrate wurden vier Verkehrsbelastungsszenarien untersucht. Somit ergeben sich $6 \times 3 \times 4 = 72$ Simulationsunterszenarien. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse für den Knoten außerorts (3-armig), Knoten innerorts (3-armig) und Knoten innerorts (4-armig) vorgestellt.

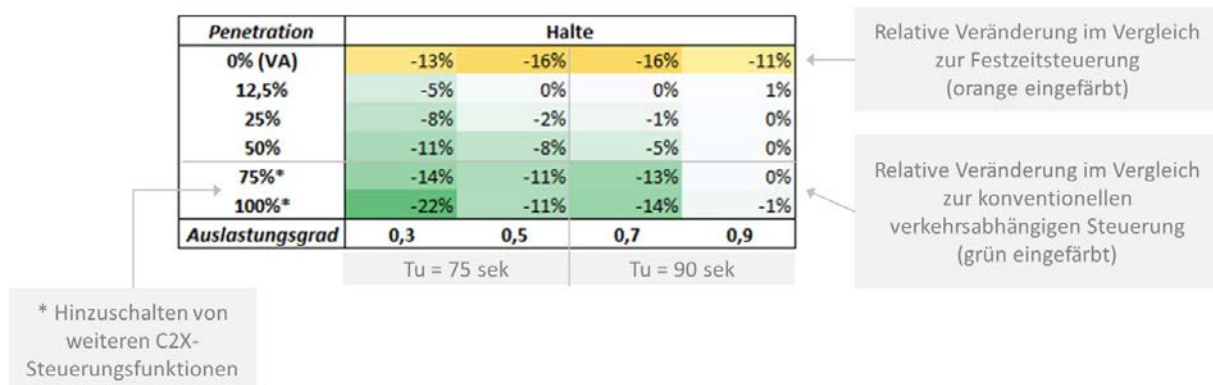


Abbildung 5-1: Erläuterung Ergebnismatrix

Die Kenngrößen werden im Folgenden in unterschiedlichen Übersichten dargestellt. Einen Überblick über die Wirkung der C2X-Steuerung auf die Kenngrößen für den gesamten Knotenpunkt gibt die Darstellung in Form einer Ergebnismatrix (Abbildung 5-1) wieder. Hierbei wird die konventionelle verkehrsabhängige (VA) Steuerung, welche einer Penetrationsrate von 0 % entspricht, zunächst mit den Ergebnissen der Festzeitsteuerung verglichen. Die weiteren Werte der Matrix zeigen die relative Veränderung der Kenngrößen im Vergleich zur konventionellen VA-Steuerung, welche durch den Einsatz der C2X-Logik bei unterschiedlichen Penetrationsraten hervorgerufen wird. Durch das * in der Ergebnismatrix wird das Hinzuschalten von weiteren C2X-Steuerungsfunktionen auf Basis der C2X-Penetrationsrate gekennzeichnet.

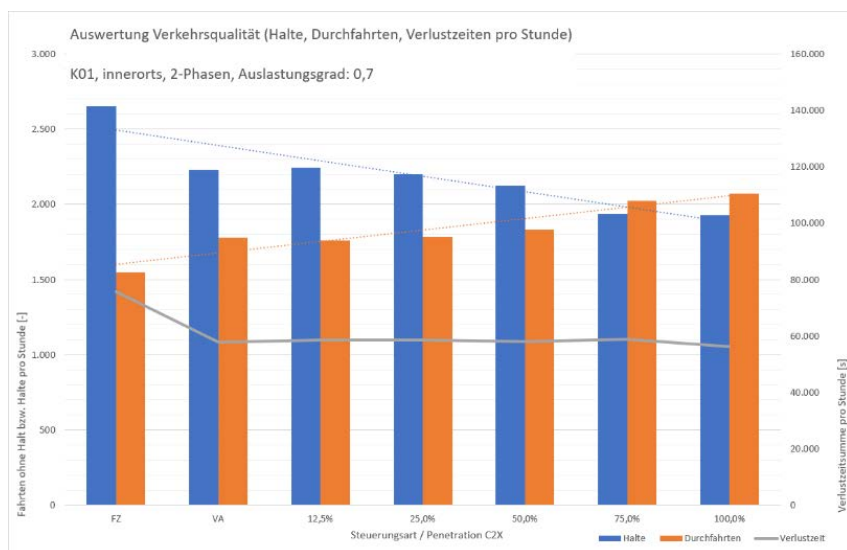


Abbildung 5-2: Erläuterung graphische Darstellung der absoluten Werte

Neben der Darstellung der relativen Veränderungen wird auch noch auf die graphische Aufbereitung der absoluten Veränderungen der Kenngrößen zurückgegriffen, wie Abbildung 5-2 zeigt. Die blauen und orangen Balken stellen die Summen der Halte bzw. der Durchfahrten pro Stunde dar. Die gestrichelten Linien in den jeweiligen Farben veranschaulichen den Trend der Veränderung. Die graue Linie gibt die Summe der Verlustzeit pro Stunde in Sekunden wieder. Es ist die Veränderung der Kenngrößen für einen Knotenpunkt bei gleichbleibender Belastung über die steigende Penetrationsrate dargestellt.

5.2.1 Ergebnisse Knoten außerorts (3-armig)

Die Ergebnismatrizen für den Knoten außerorts lassen erkennen, dass die konventionelle VA-Steuerung im Vergleich zur Festzeitsteuerung zu relativ geringer Verbesserung führt. Die auf die VA-Steuerung aufsetzende C2X-Steuerung kann weitere Verbesserungen des Verkehrsablaufs bewirken. Charakteristisch ist, dass das größte Potential bei geringen Verkehrsbelastungen und hohen Penetrationsraten zu finden ist. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die Anlage bei geringer Verkehrsbelastung noch Freigabezeit zur Verfügung hat, welche entsprechend genutzt werden kann (Abbildung 5-3) und eine Vielzahl an Fahrzeugen Informationen versendet.

<i>Penetration</i>	Halte			
0% (VA)	-3%	-3%	0%	-2%
12,5%	-4%	-3%	-1%	1%
25%	-6%	-4%	-1%	1%
50%	-10%	-10%	-7%	0%
75%*	-20%	-15%	-12%	-10%
100%*	-26%	-20%	-16%	-15%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

<i>Penetration</i>	Durchfahrten			
0% (VA)	5%	0%	-4%	5%
12,5%	2%	4%	0%	-4%
25%	4%	4%	3%	0%
50%	6%	13%	9%	22%
75%*	13%	24%	20%	135%
100%*	16%	23%	29%	148%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

<i>Penetration</i>	Verlustzeit			
0% (VA)	-32%	-12%	-18%	-6%
12,5%	-2%	-3%	1%	-1%
25%	-3%	-3%	-1%	-2%
50%	-2%	-6%	-3%	-1%
75%*	-8%	-5%	-7%	-16%
100%*	-8%	-3%	-10%	-18%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Abbildung 5-3: Ergebnismatrizen Knoten außerorts (3-armig); Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1

Es fällt auf, dass die Durchfahrten bei einer sehr hohen Verkehrsbelastung über 100 % bei höheren Penetrationsraten zunehmen, obwohl der Knoten schon eine sehr hohe Verkehrsbelastung zu bewältigen hat. Der Grund hierfür liegt in der generell sehr niedrigen Anzahl an Durchfahrten bei hohen bzw. sehr hohen Verkehrsbelastungen. Unter konventionellen VA-Bedingungen werden an diesem Knoten nur 23 Durchfahrten ohne Halt erreicht. Bei einer maximalen Penetration kann die C2X-Steuerung diesen Wert auf 57 Durchfahrten pro Stunde erhöhen. Ähnlich verhält es sich mit der Anzahl der Halte bei geringer Verkehrsbelastung. Die schon geringe Anzahl an Halten wird durch die C2X-Steuerung noch weiter reduziert (Abbildung 5-4).

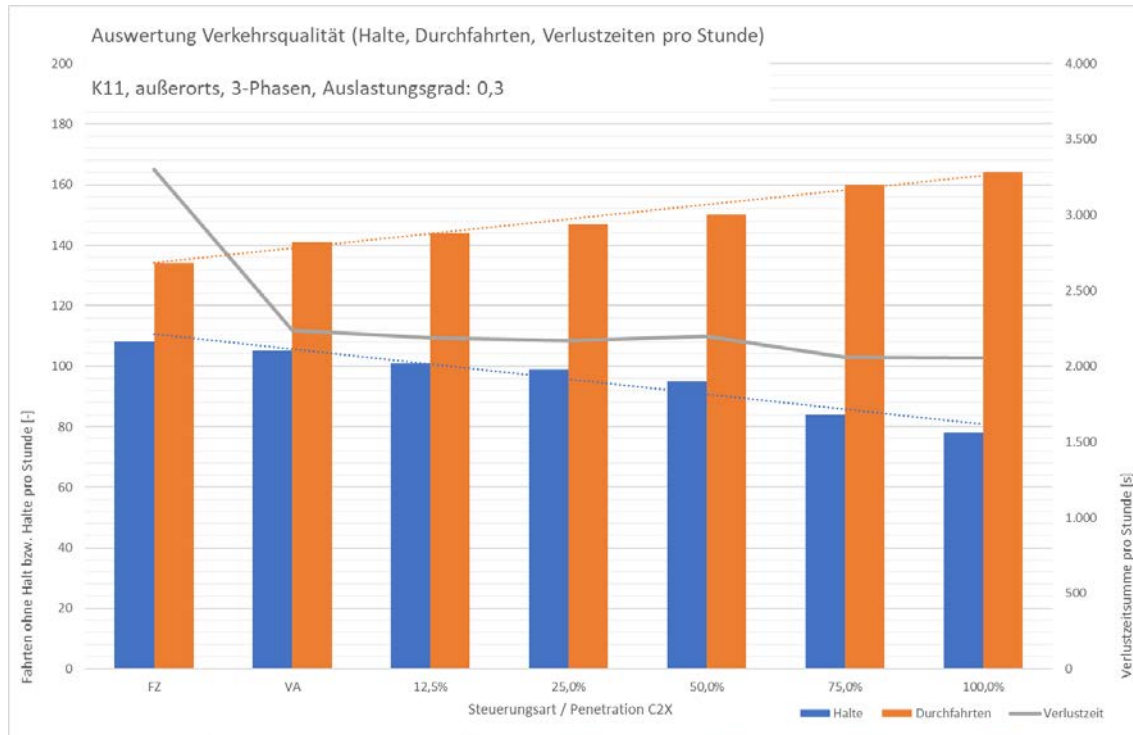


Abbildung 5-4: Ergebnis Knoten außerorts (3-armig), geringe Verkehrsbelastung

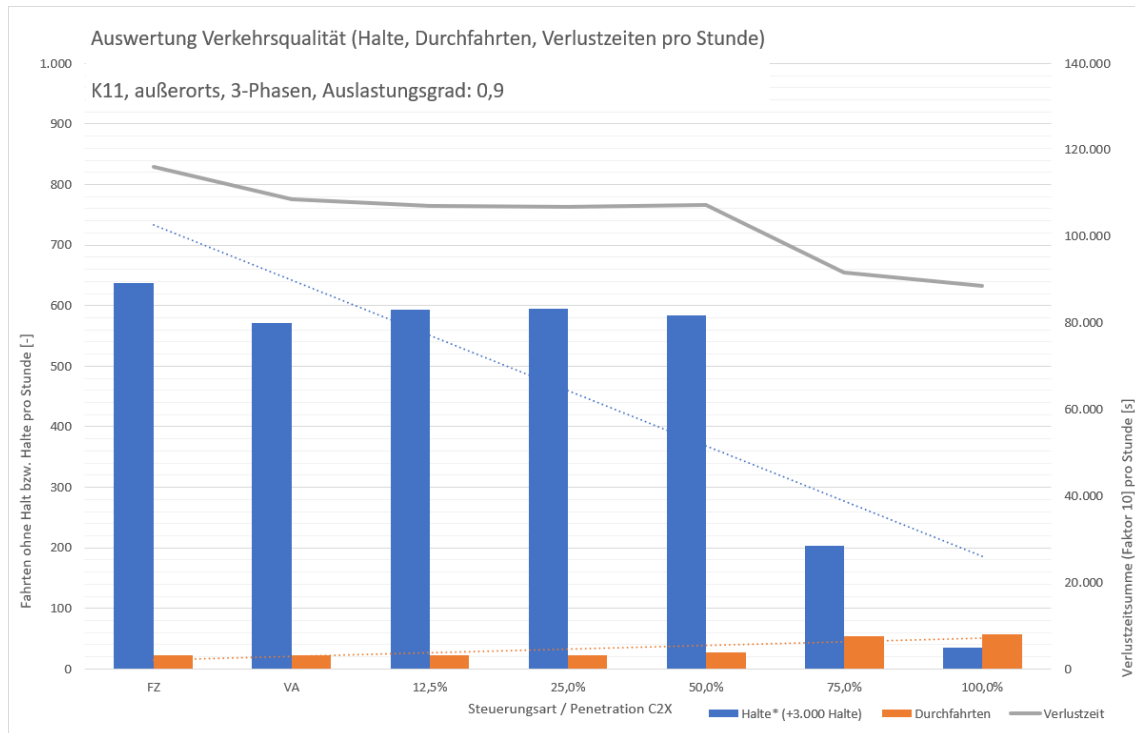


Abbildung 5-5: Ergebnis Knoten außerorts (3-armig), sehr hohe Verkehrsbelastung

Die Abbildung 5-5 zeigt die Ergebnisse der Kenngrößen Halte und Verlustzeiten. Für die Hauptrichtung (HR) gilt für alle Situationen, dass sowohl die Halte als auch die Verlustzeiten abnehmen. Für die Nebenrichtung (NR) bedeutet das, dass bei geringen Belastungen die Anzahl der Halte sinkt, aber die Verlustzeit dennoch steigt. D.h. dass der einzelne etwas länger halten muss. Bei normaler Belastung gilt dies auch bei etwa gleichbleibender Anzahl an Halten über die unterschiedlichen Penetrationsraten hinweg. Bei allen anderen Belastungen wird der Verkehrsfluss in der HR verbessert und in der NR auf einem relativ konstanten Niveau gehalten.

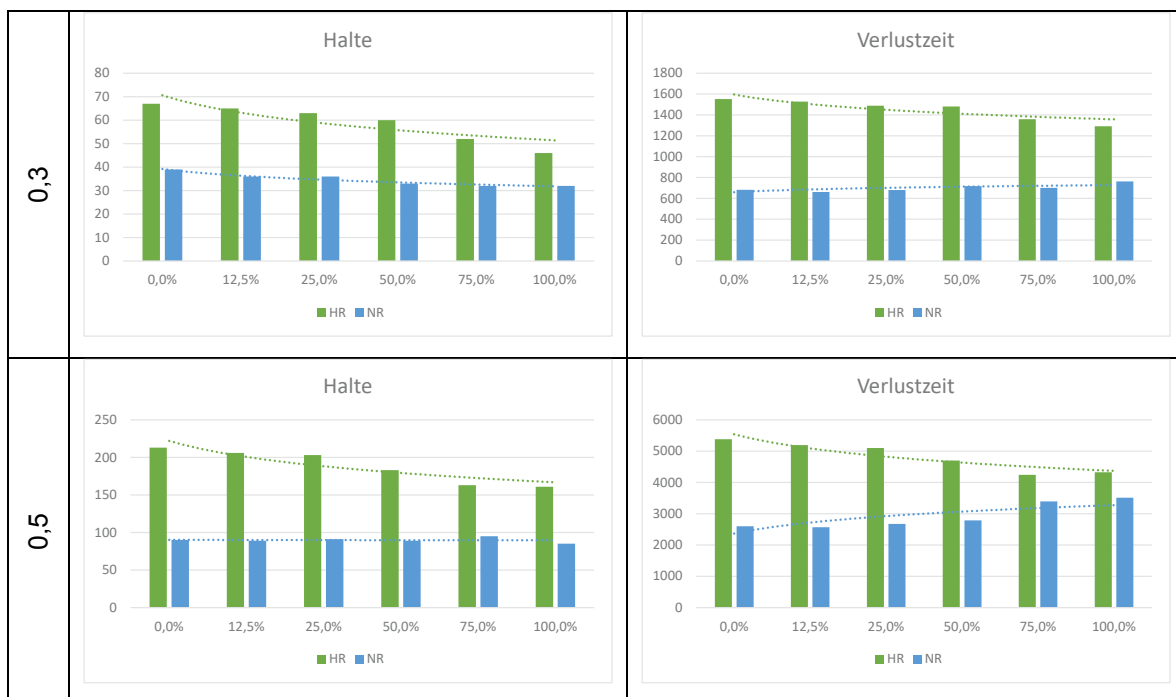




Abbildung 5-6: Ergebnisse differenziert nach HR und NR – Knoten außerorts (3-armig)

5.2.2 Ergebnisse Knoten innerorts (3-armig)

Ebenso wie beim Knoten außerorts (3-armig) kann beim Knoten innerorts (3-armig) von einer kontinuierlichen Verbesserung der Ergebnisse gesprochen werden, je geringer die Belastungen und höher die Penetrationsraten sind (Abbildung 5-7). Ist der Knotenpunkt sehr hoch belastet, bleiben auch der C2X-Steuerung nur noch wenig Freiräume. Marginale Verbesserungen lassen sich dennoch noch erkennen.

<i>Penetration</i>	Halte			
0% (VA)	-13%	-16%	-16%	-11%
12,5%	-5%	0%	0%	1%
25%	-8%	-2%	-1%	0%
50%	-11%	-8%	-5%	0%
75%*	-14%	-11%	-13%	0%
100%*	-22%	-11%	-14%	-1%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

<i>Penetration</i>	Durchfahrten			
0% (VA)	11%	17%	15%	16%
12,5%	4%	0%	-1%	-2%
25%	7%	2%	0%	-5%
50%	9%	7%	3%	-1%
75%*	12%	13%	14%	0%
100%*	17%	14%	16%	0%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

<i>Penetration</i>	Verlustzeit			
0% (VA)	-29%	-23%	-24%	-7%
12,5%	-4%	0%	1%	0%
25%	-8%	2%	1%	2%
50%	-7%	3%	0%	1%
75%*	-6%	14%	2%	4%
100%*	-8%	9%	-3%	2%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Abbildung 5-7: Ergebnismatrizen Knoten innerorts (3-armig), Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1

Auffällig ist der Sprung der Verlustzeit bei normaler Belastung und einer Penetrationsrate von 75 %. Die scheinbare Anomalie lässt sich wie folgt erklären: Bei einer normalen Belastungssituation wird die zur Verfügung stehende Freigabezeit für die HR voll in Anspruch genommen, um den Verkehr abzuwickeln. In der NR wird die Freigabezeit nicht ausgereizt. Mittels der dynamischen Freigabezeitumverteilung wird die Freigabezeit der HR vergrößert, wodurch längere Umläufe entstehen, welche wiederum zu einer höheren Wartezeit für die Fahrzeuge in der NR führen.

Dieser Effekt spiegelt sich auch in der Reduktion der Halte wider, welche bei normaler Belastung geringer ausfällt als bei hoher Belastung. Auch bei der Koordinierung ist dies zu beobachten, siehe Kapitel 5.5. Bei geringer Verkehrsbelastung kommt die HR nicht an die Grenzen der Freigabezeit und bei hohen bzw. sehr hohen Verkehrsbelastungen gibt es schlichtweg keine Freigabezeit, die es zu verteilen gilt. Dies ist ein Effekt, des Ansatzes „Fahren vor Halten“. Zu Gunsten der Reduzierung von Halten muss hier die NR etwas

länger warten. Die folgenden beiden Abbildungen stellen noch mal die absoluten Werte der Kenngrößen für geringe und sehr hohe Verkehrsbelastung dar.

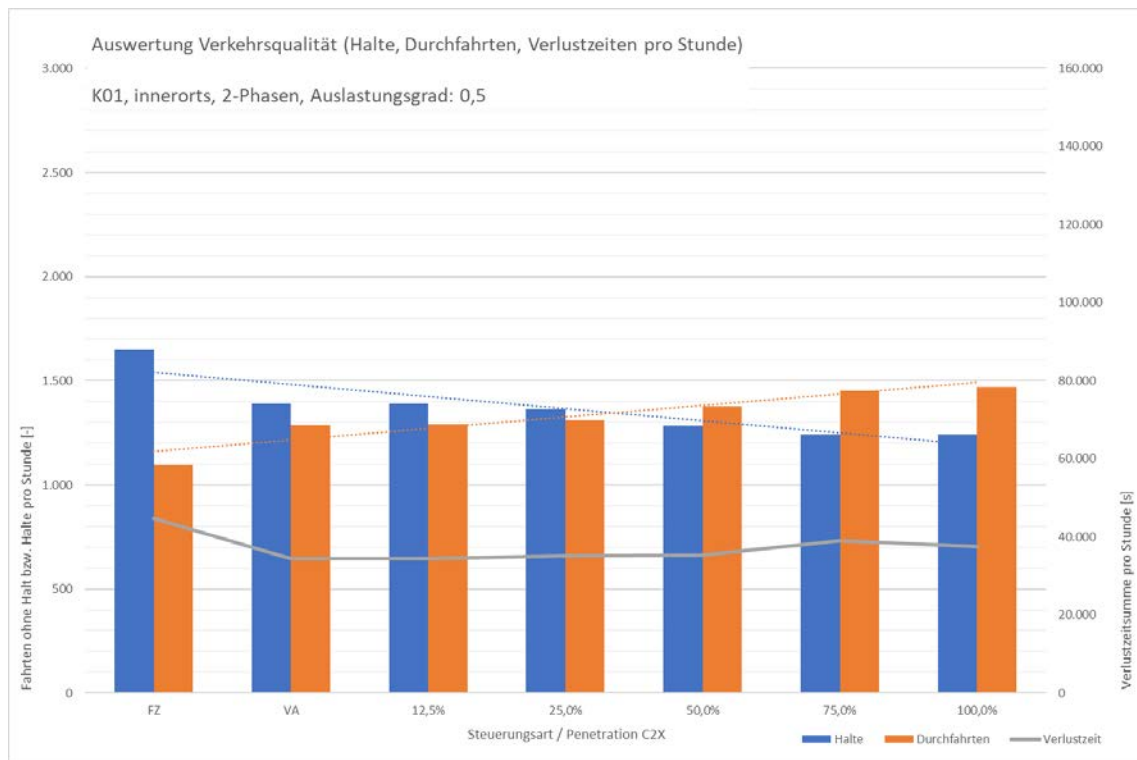


Abbildung 5-8 : Ergebnis Knoten innerorts (3-armig), geringe Verkehrsbelastung

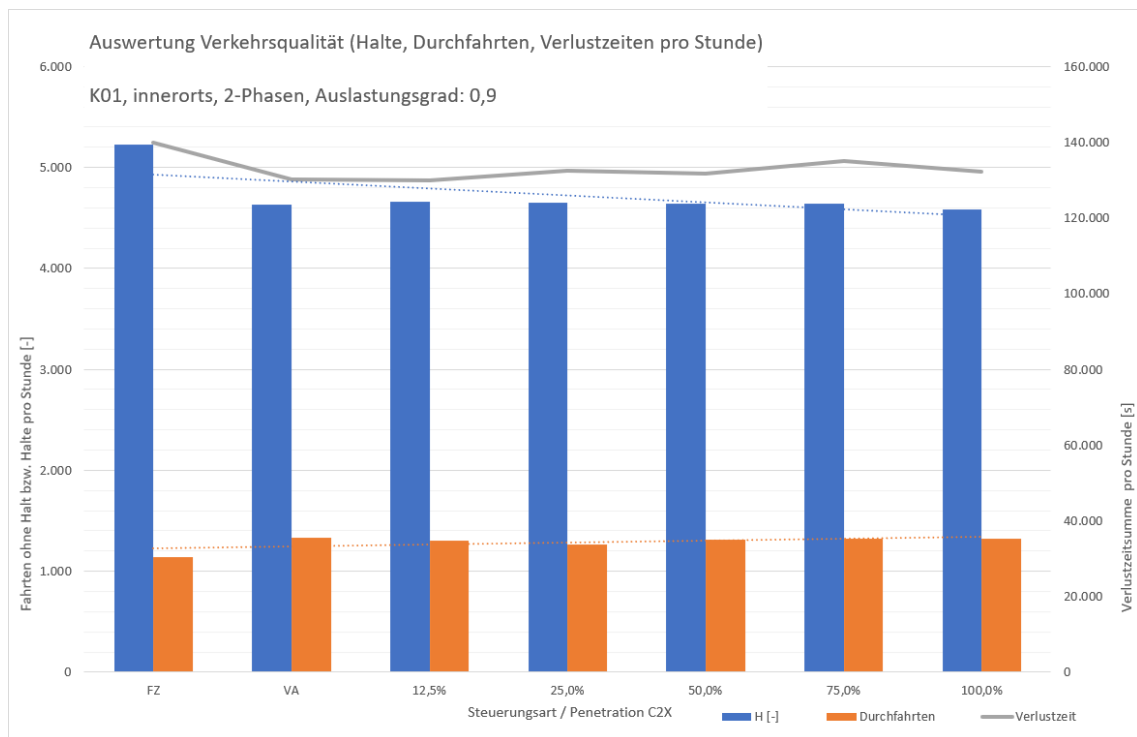


Abbildung 5-9: Ergebnis Knoten innerorts (3-armig), sehr hohe Verkehrsbelastung

Der oben beschriebene Effekt der dynamischen Freigabezeitverteilung lässt sich auch sehr deutlich am Anstieg der Verlustzeiten in der NR bei hohen Penetrationsraten unter normalen Verkehrsbedingungen erkennen (Abbildung 5-10).

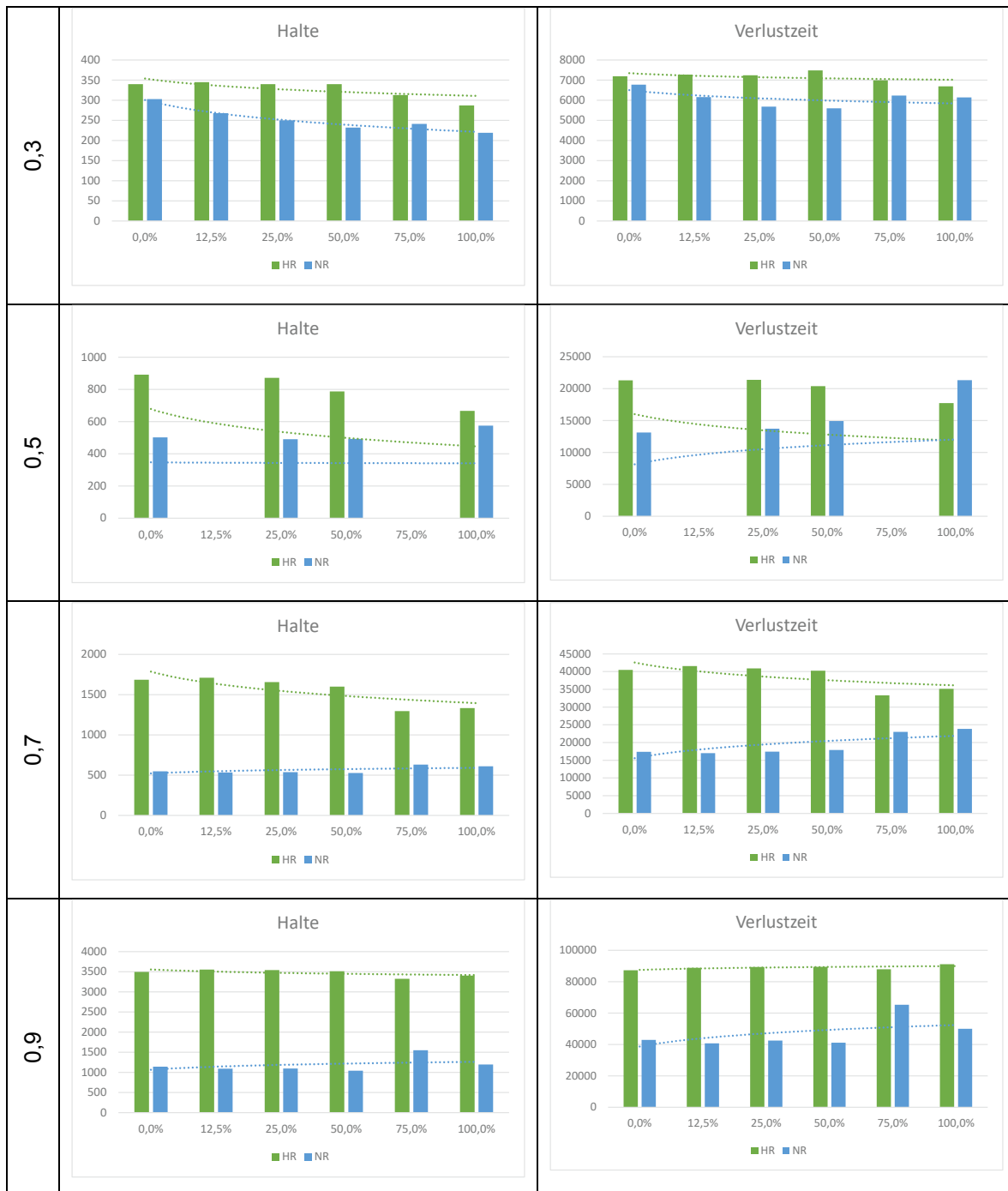


Abbildung 5-10: Ergebnisse differenziert nach HR und NR – Knoten innerorts (3-armig)

5.2.3 Ergebnisse Knoten innerorts (4-armig)

Auch für den großen 4-armigen Knoten innerorts, welcher mit 5 Phasen gesteuert wird, konnten durch den Einsatz der C2X-Steuerung Verbesserungen erzielt werden. Generell sind die gleichen Effekte, wie bei den anderen Knotenpunkten zu beobachten; je geringer die Verkehrsbelastung und je höher die Penetrationsrate, desto größer sind die positiven Effekte der C2X-Steuerung. Dennoch sei auf einen auffälligen Punkt hingewiesen: die Erhöhung der Verlustzeit bei geringen und normalen Verkehrsbelastungen bei niedrigen Penetrationsraten. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass die C2X-Bemessung der HR in dieser Verkehrssituation zu einer Vernachlässigung der NR führt. Die wenigen C2X-Fahrzeuge aus der NR können dies nicht durch eigene C2X-Bemessung ausgleichen. Dieser Effekt lässt nach, sobald die Penetrationsrate steigt oder die Verkehrsbelastung zunimmt. Zur Veranschaulichung der Dimension zeigen Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 die Werte bei geringen und sehr hohen Verkehrsbelastungen. Die Ergebnisse, getrennt nach HR und NR, ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Hier ist auch deutlich der oben beschriebene Effekt zu erkennen.

Penetration	Halte			
0% (VA)	-5%	-4%	-6%	-7%
12,5%	-1%	0%	-1%	0%
25%	0%	-1%	-2%	-1%
50%	-4%	-4%	-3%	-1%
75%*	-9%	-8%	-6%	-4%
100%*	-11%	-11%	-8%	-5%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Penetration	Durchfahrten			
0% (VA)	8%	9%	2%	27%
12,5%	1%	1%	0%	-6%
25%	1%	0%	1%	3%
50%	5%	3%	2%	36%
75%*	12%	14%	14%	35%
100%*	16%	19%	17%	47%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Penetration	Verlustzeit			
0% (VA)	-9%	2%	-6%	0%
12,5%	10%	9%	-2%	0%
25%	9%	7%	-2%	0%
50%	5%	-1%	-3%	-1%
75%*	-7%	3%	-4%	-8%
100%*	-6%	-6%	-10%	-4%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Abbildung 5-11: Ergebnismatrizen Knoten innerorts (4-armig), Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1

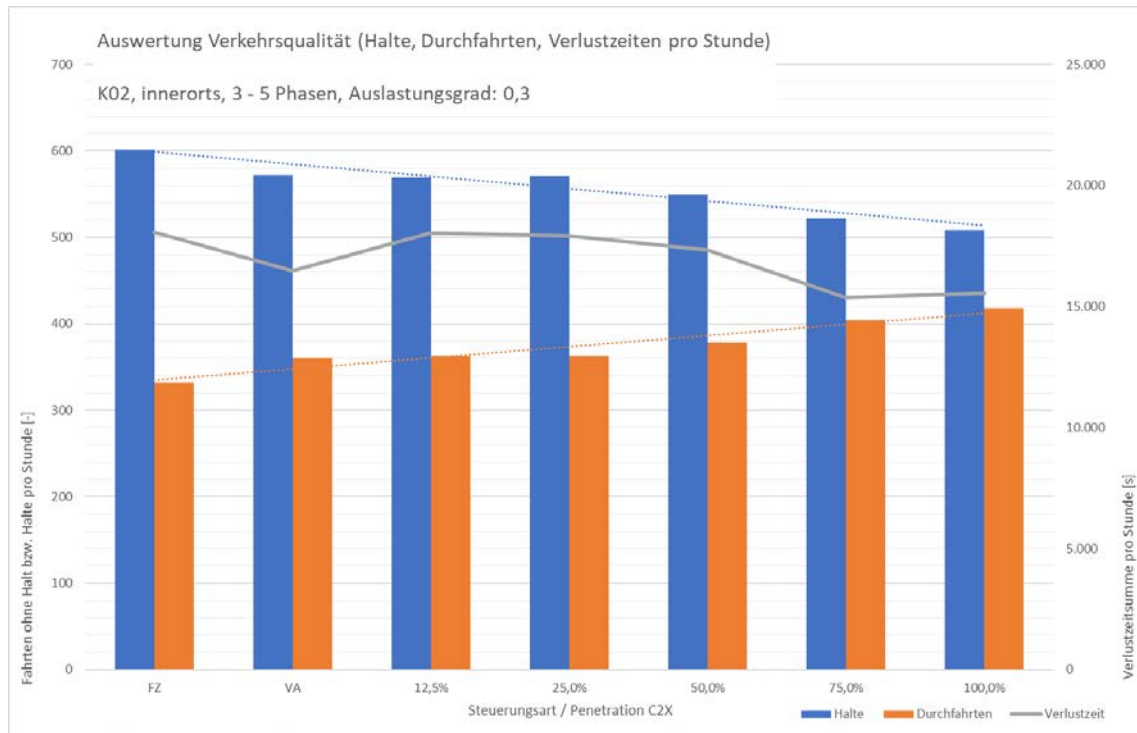


Abbildung 5-12: Ergebnis Knoten innerorts (4-armig), geringe Verkehrsbelastung

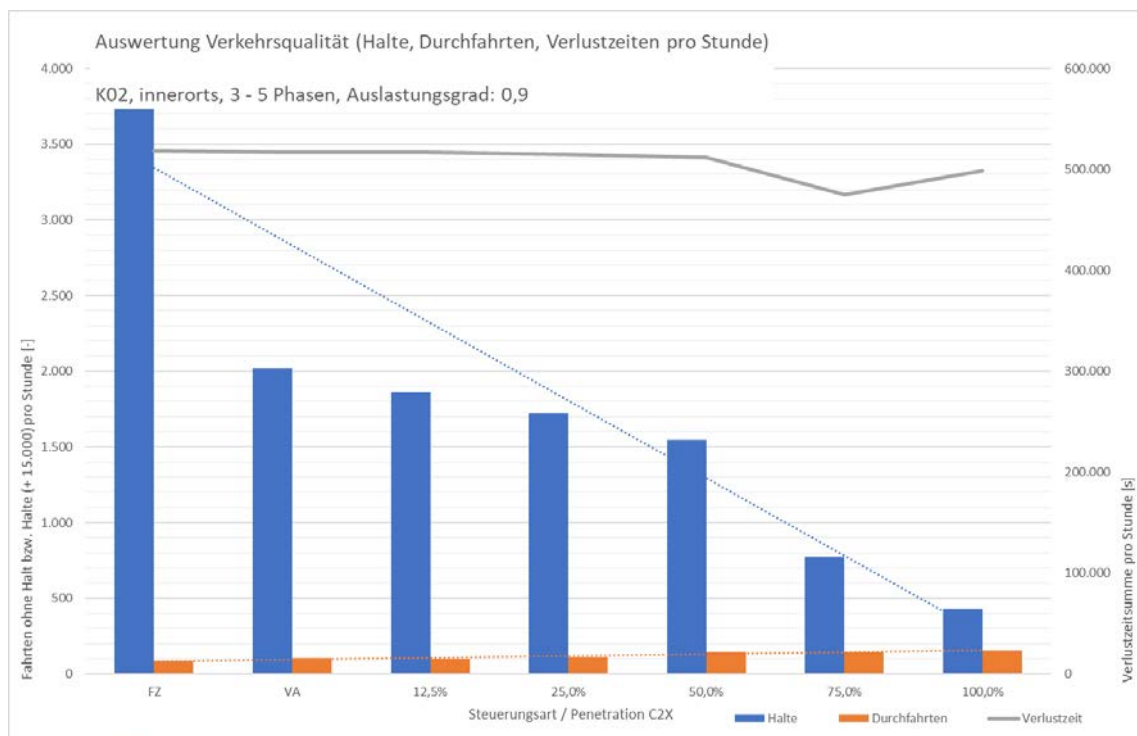


Abbildung 5-13: Ergebnis Knoten innerorts (4-armig), sehr hohe Verkehrsbelastung



Abbildung 5-14: Ergebnisse differenziert nach HR und NR – Knoten innerorts (4-armig)

5.3 Szenario 3: Optimierte Steuerungsstrategie durch die Einbeziehung der verbesserten Detektion von Radfahrern

Die entwickelten C2X-Kommunikationsstandards ermöglichen nicht nur die Vernetzung von Fahrzeugen mit der Infrastruktur, sondern auch die Nutzung von mobilen Endgeräten. Hierdurch können auch Fußgänger und Fahrradfahrer effektiv und frühzeitig detektiert werden. Dieses Szenario wird mittels der unterschiedlichen Durchdringungsraten der Radfahrer 0 %, 12,5 %, 50 % und 100 % für den 4-armigen innerörtlichen Knotenpunkt simuliert. An diesem Knotenpunkt werden die Radfahrer in der HR auf eigens signalisierten Fahrstreifen geführt. Hierdurch haben die Radfahrer einen zusätzlichen Einfluss, der entfällt, wenn Radfahrer gemeinsam mit Kfz-/Fußverkehr signalisiert werden. Eine an die LSA kommunizierte Position von Fußgängern wurde im Szenario nicht berücksichtigt, da der Richtungswunsch der Fußgänger nicht eindeutig erkennbar ist.

<i>Penetration</i>	Halte			
0% (VA)	-5%	-4%	-6%	-12%
12,5%	0%	-1%	0%	-1%
50%	0%	0%	-1%	-1%
100%*	0%	-1%	0%	-1%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

<i>Penetration</i>	Durchfahrten			
0% (VA)	8%	9%	2%	27%
12,5%	0%	1%	0%	2%
50%	0%	-1%	1%	-2%
100%*	1%	-1%	1%	-1%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

<i>Penetration</i>	Verlustzeit			
0% (VA)	-9%	2%	-6%	0%
12,5%	1%	1%	0%	0%
50%	1%	1%	-1%	0%
100%*	1%	1%	-1%	0%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Abbildung 5-15: Ergebnismatrizen Knoten innerorts (4-armig) für vernetzte Radfahrer, Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1

Generell ist anzumerken, dass ein Halt eines Radfahrers genauso behandelt wird, wie der Halt eines Kfz. Auch in Bezug auf die Bemessung wurde keine Unterscheidung getroffen. D.h. bei der Ermittlung des Zeitbedarfswertes wurde nicht zwischen Rad und Kfz differenziert. Durch die relative geringe Anzahl an Radfahrern, etwa 1-2 pro Umlauf, halten sich die Effekte in Grenzen. Wohl ist wieder der durch die C2X-Bemessung ausgelöste Effekt der Verlängerung der Freigabezeit für die HR zu leichten Ungunsten der NR zu beobachten. Es ist anzumerken, dass die Kenngrößen sich auf alle fahrenden Verkehrsteilnehmer beziehen und nicht zwischen Rad und Kfz differenziert wird. Wohl profitiert ein vernetzter Radfahrer mit hoher Wahrscheinlichkeit bei normalen und geringen Verkehrsbelastungen von einer durch ihn ausgelösten Anforderung oder Bemessung.

Es ist anzumerken, dass bei den Radfahrern kein Durchfahrtenvergleich stattfand. Dies steht nach Meinung der Autoren in keinem Verhältnis. Eine geringe Menge an Radfahrenden hätte dadurch einen sehr großen Einfluss auf die Steuerung. Es wurden lediglich C2XAnfo und C2XBem eingesetzt: Für einen Effekt bei den Radfahrern müsste man die konventionelle Kfz-Bemessung ausschalten, da deswegen den Radfahrer weniger Freigabezeit verbleibt. Daher nur geringe Effekte.

5.4 Szenario 4: Einsatzfahrzeug-Priorisierung

Bei der Evaluierung der Einsatzfahrzeug-Priorisierung werden die Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung und die Rückkehr zum Normalzustand nach dem Eingriff durch das Einsatzfahrzeug betrachtet. Verglichen wird dabei eine reguläre Einsatzfahrzeug-Priorisierung über Funk-Technologie (0 % C2X bei MIV und Einsatzfahrzeugen) mit einer Einsatzfahrzeug-Priorisierung basierend auf C2X-Kommunikation (100 % C2X bei MIV und Einsatzfahrzeugen).

Die Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung beginnt mit dem Wechsel in eine Einsatzfahrzeug-Phase und endet mit dem Wechsel in eine reguläre Phase. Abgeleitet wird die Dauer aus der sekundlichen Aufzeichnung der aktuellen Phase im Detektorprotokoll in VISSIM. Abbildung 5-16 zeigt die durchschnittliche Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung für den Knoten innerorts (3-armig) und den Knoten außerorts (3-armig) (3-armig). Die Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung reduziert sich deutlich mit der C2X-Kommunikation, für jede Verkehrsbelastung und jeden Kreuzungstyp. Die geringere Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung ist zum größten Teil auf die bei der C2X-Kommunikation dynamisch berechnete Vorlaufzeit zurückzuführen. Die geringste Senkung in der Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung mit der C2X-Kommunikation lässt sich bei jedem Kreuzungstyp bei normaler Belastung beobachten. Dies lässt vermuten, dass die vordefinierte Vorlaufzeit bei der Bestandssteuerung (0 % C2X) am ehesten für die normale Belastung geeignet ist. Bei den anderen Belastungen werden mit der C2X-Kommunikation größere Verbesserungen erzielt. Es spielt allerdings auch eine Rolle, dass die C2X-Kommunikation an den 300 m Radius der RSU gebunden ist. Die Einsatzfahrzeug-Priorisierung kann bei der C2X-Kommunikation erst 100 m später initiiert werden als bei der Bestandssteuerung (0 % C2X).

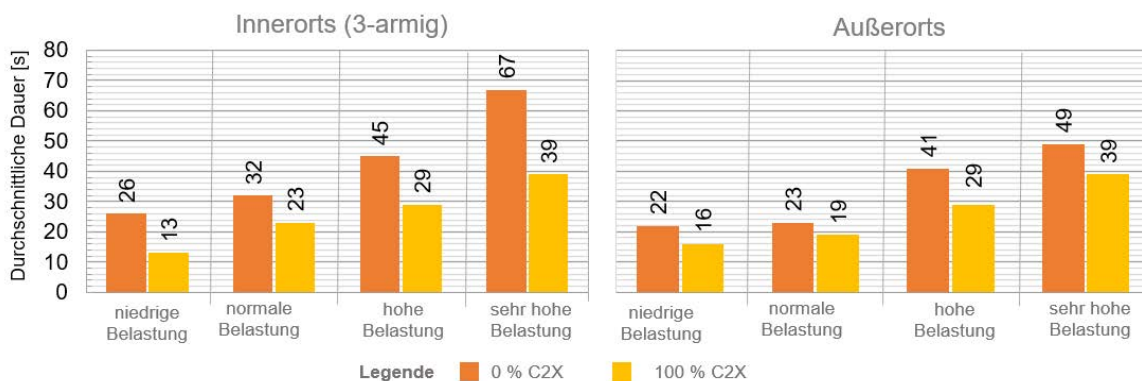


Abbildung 5-16: Durchschnittliche Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung, Knoten innerorts (3-armig) und Knoten außerorts (3-armig)

Um die Rückkehr in den Normalzustand nach der Einsatzfahrzeug-Priorisierung zu beurteilen, wird die durchschnittliche Staulänge an der Kreuzung betrachtet. Wenn eine Einsatzfahrzeug-Phase beginnt, wird der letzte durchschnittliche Staulängenwert als Referenzwert herangezogen. Nach einer Einsatzfahrzeug-Phase wird untersucht, ob und wann dieser Referenzwert vor der nächsten Einsatzfahrzeug-Priorisierung wieder erreicht wird. Bei der Rückkehr in den normalen Verkehrszustand wird zunächst unterschieden, nach wie viel Prozent der Einsatzfahrzeug-Phasen unmittelbar die nächste Priorisierung folgt und nach wie viel Prozent der Einsatzfahrzeug-Phasen vor der nächsten Priorisierung zum normalen Verkehrszustand zurückgekehrt wird oder nicht. Für die Einsatzfahrzeug-Phasen, nach denen eine Rückkehr in den normalen Verkehrszustand erfolgt, wird zusätzlich die durchschnittliche Dauer bzw. die 0.95 Quantil Dauer ausgewertet. Die Rückkehr in den normalen Verkehrszustand ist für den Knoten innerorts (3-armig) in Abbildung 5-17 dargestellt. Mit der C2X-Kommunikation erholt sich der Verkehr bei jedem Kreuzungstyp

und jeder Belastung schneller vom Eingriff des Einsatzfahrzeuges als bei der Bestandssteuerung (0 % C2X). Dies zeigt sich in einem geringeren Anteil an Einsatzfahrzeug-Phasen, nach denen vor dem nächsten Eingriff keine Rückkehr in den normalen Verkehrszustand verzeichnet werden kann. Darüber hinaus reduziert sich im Falle einer Rückkehr zum normalen Verkehrszustand die dafür benötigte Zeitdauer. Wie in Abbildung 5-17 ersichtlich, reduziert sich zum Beispiel bei normaler Belastung am Knoten innerorts (3-armig) der Anteil von Einsatzfahrzeug-Phasen ohne Rückkehr zum normalen Verkehrszustand von 18 % auf 11 %. Bei den Einsatzfahrzeug-Phasen mit Rückkehr zum normalen Verkehrszustand dauert die Rückkehr mit C2X Kommunikation durchschnittlich nur noch 26 statt 39 Sekunden. Die durchschnittliche Dauer für die Rückkehr zum normalen Verkehrszustand kann sich sogar um bis zu 60 % verringern, siehe Knoten außerorts in normaler Verkehrsbelastung. Die schnellere Erholung vom Eingriff des Einsatzfahrzeuges mit C2X-Kommunikation ist eine direkte Folge der kürzeren Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung.

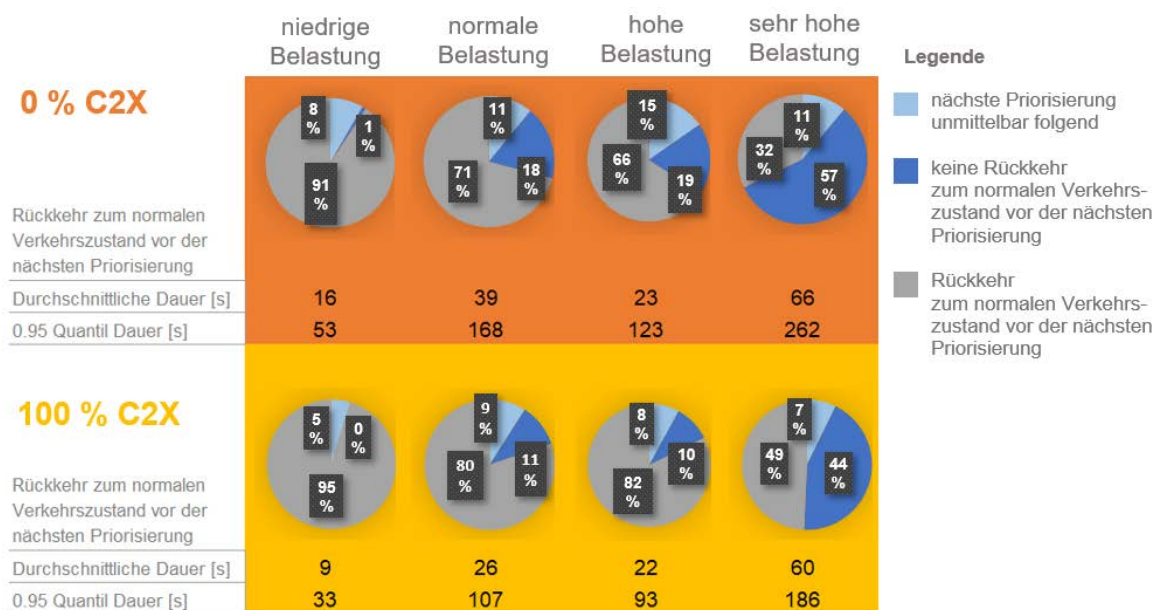


Abbildung 5-17: Rückkehr zum normalen Verkehrszustand, Knoten innerorts (3-armig)

5.5 Szenario 5: Kombination von Szenario 2 und 3

5.5.1 Ergebnisse Knoten innerorts (4-armig)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für den Knotenpunkt innerorts (4-armig) betrachtet. Die Kenngrößen sind in Abbildung 5-18 zu finden. Die Halte der verkehrsabhängigen Steuerung nehmen gegenüber der Festzeitsteuerung über alle Verkehrsbelastungen ab. Weiterhin verringern sich insgesamt die Halte der C2X-Steuerung gegenüber der verkehrsabhängigen Steuerung und mit steigender Penetration kommt es zur Verringerung der Halte. Die größten Verringerungen finden sich bei den beiden geringen Penetrationsraten. Mit der Zunahme der Verkehrsbelastung kommt es auch zur Erhöhung der Halte.

Die Durchfahrten können bereits von der Festzeitsteuerung auf die verkehrsabhängige Steuerung verringert werden und können mit steigender C2X-Penetration weiterhin erhöht werden. Große Verbesserungen treten erst ab einer Penetration von 75 % ein. Dies ist auf die Komponentenzuschaltung ab der Penetration von 75 % zurückzuführen. Die meisten Durchfahrten können zur Verkehrsbelastung sehr hoch realisiert werden. Dieser Effekt wurde bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben.

Die Verlustzeiten können vereinzelt durch den Einsatz der VA-Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung verringert werden. Grundsätzlich nehmen die Verlustzeiten ab, mit Ausnahme von geringen Penetrationsraten und geringen bzw. normaler Verkehrsbelastung. Diese Verlustzeiten nehmen zunächst

leicht zu, um bei höheren Penetrationsraten wieder zu fallen. Dieser Effekt wurde bereits in Szenario 2 beschrieben. Bei hohen und sehr hohen Belastungen ist dies nicht zu erkennen.

Penetration	Halte			
0% (VA)	-5%	-5%	-6%	-7%
12,5%	0%	0%	-1%	-1%
25%	-1%	0%	-1%	-1%
50%	-3%	-3%	-3%	-1%
75%*	-9%	-9%	-6%	-4%
100%*	-11%	-11%	-8%	-5%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Penetration	Durchfahrten			
0% (VA)	8%	9%	2%	27%
12,5%	0%	-2%	0%	7%
25%	1%	0%	-1%	10%
50%	4%	3%	2%	35%
75%*	13%	15%	13%	32%
100%*	16%	19%	16%	40%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Penetration	Verlustzeit			
0% (VA)	-9%	2%	-6%	0%
12,5%	8%	8%	-2%	0%
25%	6%	4%	-2%	0%
50%	-3%	-1%	-3%	-1%
75%*	-8%	2%	-3%	-8%
100%*	-6%	-7%	-9%	-4%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Abbildung 5-18 Szenario 5 – Ergebnismatrizen Knoten innerorts (4-armig), Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1

Grundsätzlich ähneln sich die Ergebnisse dieses Knotenpunktes aus Szenario 5 mit den Ergebnissen von Szenario 2. Die leicht unterschiedlichen Werte sind auf die veränderte Verkehrsbelastung zurückzuführen. Die Unterschiede in der Verkehrsbelastung ist eine zusätzliche Ausstattung der Radfahrer um die C2X-Fähigkeiten. Die zusätzliche Detektion der C2X-Radfahrer führt zu den leicht veränderten Ergebnissen. Dies ist auf die Steuerlogik und der Devise „Halten vor Fahren“ zurückzuführen. In der Steuerlogik kommt zur Gleichbetrachtung zwischen C2X-Radfahrer und C2X-Kfz. Denkbar wäre die Ergänzung eines Fahrzeugtyps zur Priorisierung der Radfahrer.

Auf eine Auswertung der Haupt- und Nebenrichtung wurde aufgrund der Ähnlichkeit der Ergebnisse an dieser Stelle verzichtet.

Im Weiteren werden die Ergebnisse über die Kenngrößen der beiden Verkehrsbelastungen gering und sehr hoch dargestellt. Wie schon in Szenario 2 beschrieben kommt es zu ähnlich guten Ergebnissen.

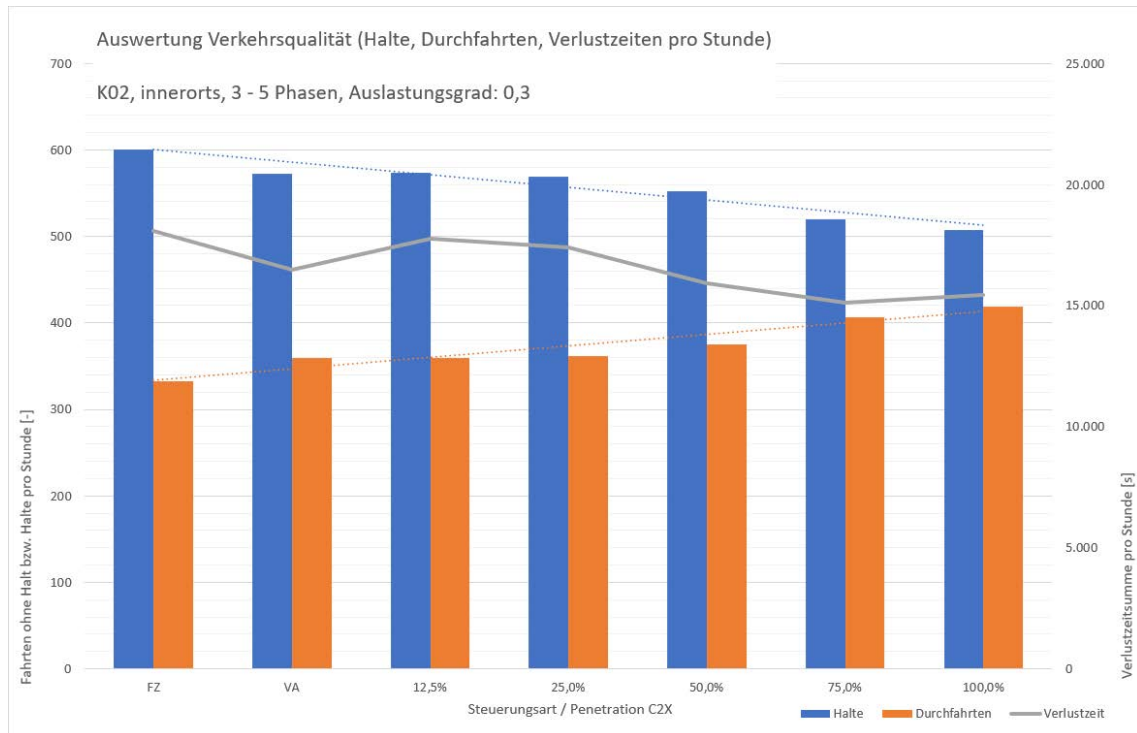


Abbildung 5-19 Szenario 5 - Verkehrsbelastung gering

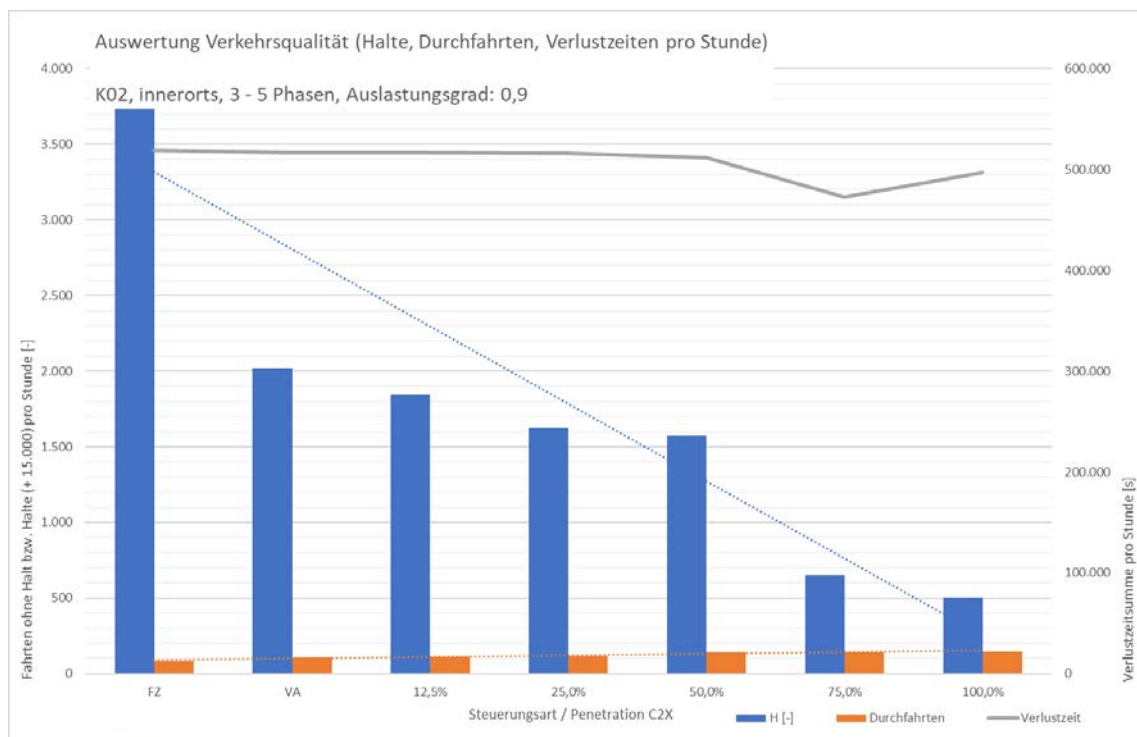


Abbildung 5-20 Szenario 5 - Verkehrsbelastung sehr hoch

5.5.2 Ergebnisse Koordinierter Streckenzug

In Abbildung 5-21 werden die Ergebnisse der Netzsimulation in zwei Tabellen aufgeführt. Die obere Tabelle enthält die prozentuale Veränderung aller Halte im Netz der C2X-Steuerung gegenüber der verkehrsabhängigen Steuerung, die untere Tabelle enthält die prozentuale Veränderung des Koordinierungsmaßes zur verkehrsabhängigen Steuerung.

Insgesamt kommt es über alle Belastungen hinweg zu einer moderaten Verringerung aller Halte im Netz. Die Zunahme der Penetrationsrate bewirkt bei allen Verkehrsbelastungen eine etwa gleich große Verbesserung. Auffällig ist die Verkehrsbelastung „Normal“. Verglichen mit den anderen Verkehrsbelastungen ist die Reduktion der Halte auf Basis der Verkehrsbelastung „Normal“ weniger stark. Dies kann dem bereits im Kapitel 5.2.2. erläuterten Effekt zugeschrieben werden. Durch die Freigabezeitverteilung kommt es dazu, dass sich die Verlängerung der Freigabezeiten der HR negativ auf die NR auswirkt und sich die Verlustzeit erhöht. Trotz des Effektes kommt es zu einer Verringerung der Halte.

Das Koordinierungsmaß verbessert sich leicht mit einer Zunahme der C2X-Penetrationsrate. Eine Verbesserung tritt größtenteils erst ab einer Penetrationsrate von 75 % ein. Die größte Verbesserung besteht auf Basis der Verkehrsbelastung „Normal“. Dies ist dem bereits beschriebenen Effekt geschuldet, dass sich durch die Freigabezeitverteilung eine Verlängerung der Freigabezeiten einstellt und es somit zur Verbesserung der beiden Koordinierungsrichtungen kommt.

<i>Penetration</i>	Halte			
12,5%	0%	-1%	0%	0%
25%	0%	-2%	0%	-4%
50%	-2%	-3%	-2%	-7%
75%*	-7%	-4%	-7%	-7%
100%*	-7%	-5%	-7%	-8%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

<i>Penetration</i>	Koordinierungsmaß			
12,5%	0%	0%	0%	0%
25%	0%	0%	0%	0%
50%	0%	2%	0%	2%
75%*	2%	4%	2%	1%
100%*	3%	6%	4%	3%
Auslastungsgrad	0,3	0,5	0,7	0,9

Abbildung 5-21: Szenario 5 Koordination – Ergebnismatrizen, Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1

In den zwei folgenden Abbildungen werden die absoluten Kenngrößenwerte der Verkehrsbelastungen gering und sehr hoch. In Abbildung 5-22 wird die Verkehrsbelastung gering dargestellt. Die in der Matrixdarstellung beschriebenen Werte werden hier unterstrichen. Das Koordinierungsmaß mit der C2X-Penetrationsrate leicht ansteigt. Die Halte nehmen hingegen leicht ab. Insgesamt handelt es sich um eine moderate Verbesserung auf Basis der Verkehrsbelastung „Gering“.

In Abbildung 5-23 kommt es auch zur Verbesserung des Koordinierungsmaßes und eine Verringerung der Halte. In dieser Abbildung wird die Verringerung des absoluten Wertes der Halte deutlich.

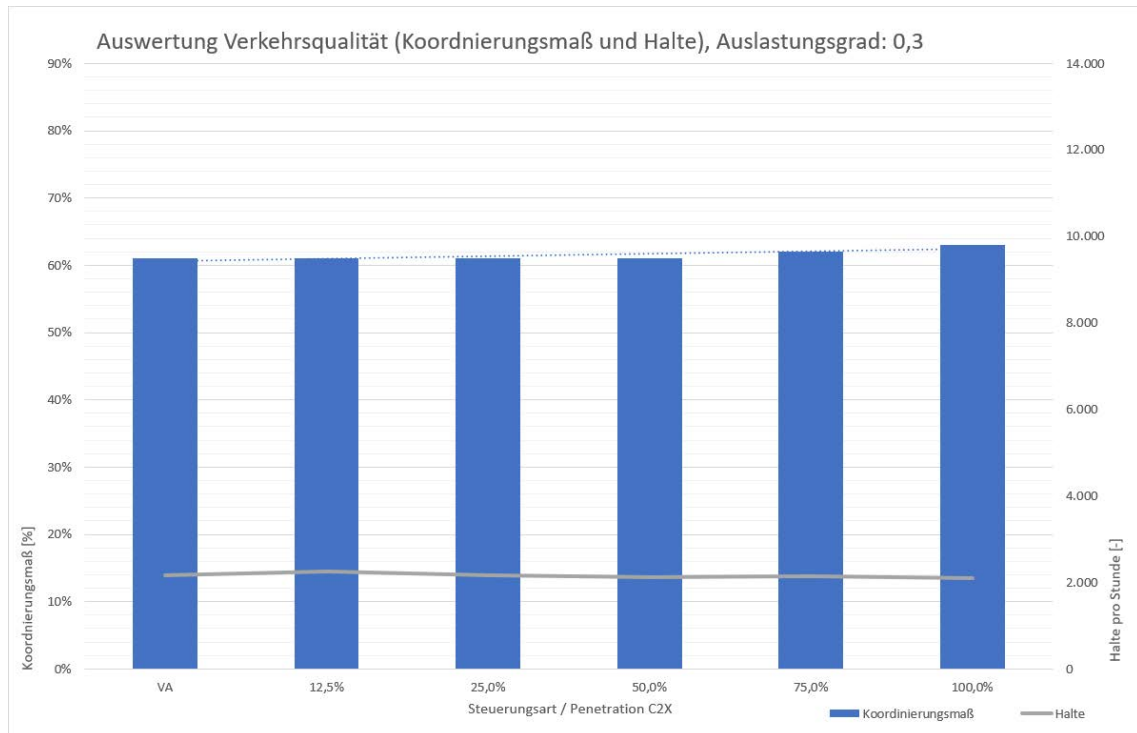


Abbildung 5-22: Szenario 5 Koordination - Verkehrsbelastung „Gering“

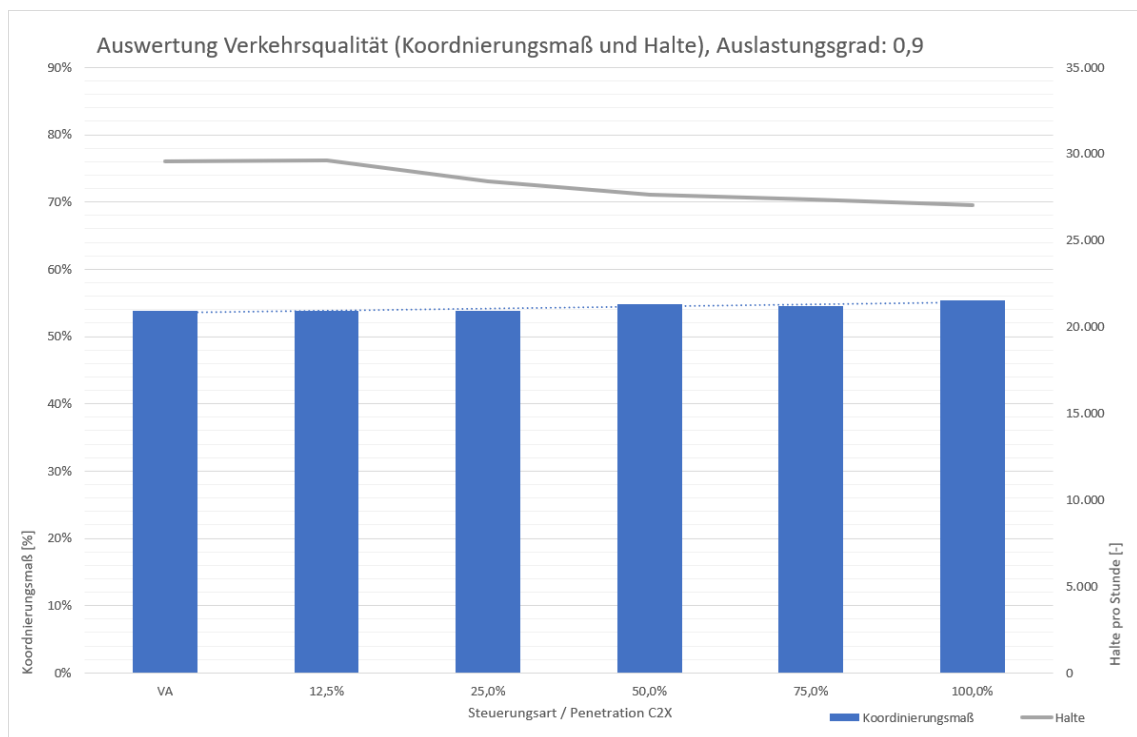


Abbildung 5-23 Szenario 5 Koordination - Verkehrsbelastung „Sehr hoch“

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass mit den CAM-Nachrichten der Fahrzeuge zahlreiche Anwendungsfälle realisiert werden können und dies einen positiven Effekt auf den Verkehrsablauf hat. Neben der Knotenpunktauslastung hat vor allem die Penetrationsrate maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass bereits bei geringen Penetrationsraten bis zu 5 % der Halte eingespart werden konnten. Mit zunehmender Penetrationsrate konnten die Anzahl der Halte um teilweise über 25 % reduziert werden. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass die Verlustzeiten bei geringen Penetrationsraten ebenfalls minimal sinken (2 %) oder in Einzelfällen um bis zu 10 % steigen. Bei hohen Penetrationsraten konnten die Verlustzeiten um bis zu 10 % reduziert werden.

Der Auslastungsgrad, sprich die Verkehrsbelastung am Knotenpunkt, ist ein weiterer maßgebender Faktor, der bei gleichen Penetrationsraten zu starken unterschiedlichen Ergebnissen führt. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass eine sinkende Auslastung die Wirksamkeit der C2X-Steuerungsfunktionen positiv beeinflusst und zu besseren Ergebnissen führt. Dies gilt sowohl für die Anzahl der Halte als auch für die Verlustzeiten. Bei Auslastungen an der Kapazitätsgrenze aller Ströme sind die Haltezeitreduzierungen erwartungsgemäß gering. Mit einer abnehmenden Auslastung steigt die Anzahl der verhinderten Halte. Dies gilt auch dann, wenn die Auslastung lediglich einzelner Signalgruppen gering ist.

Der entwickelte Steuerungsalgorithmus basiert auf unterschiedlichen Komponenten die – wie bereits beschreiben – unterschiedlichen Einsatzgrenzen unterliegen. Auch hier bilden der Auslastungsgrad und die Penetrationsrate die maßgebenden Einflussfaktoren. Bereits bei geringen Penetrationsraten können C2X-Anforderungsfunktionen und die C2X-Bemessung durch die Zeitbedarfswertsteuerung eingesetzt werden und führen zu den oben beschriebenen Verbesserungen. Lediglich bei der Zeitbedarfswertsteuerung ist zu beachten, dass eine genaue Parametrisierung des Grenzwertes „mittlerer Zeitbedarfswert“ notwendig ist, um die beschriebenen positiven Effekte zu erzielen.

Bei steigender Penetrationsrate nimmt auch der positive Einfluss der C2X-Steuerung zu, wobei sich bei Penetrationsraten über 70 % sich die Ergebnisse sprunghaft verbessern. Dieser Effekt lässt sich dadurch erklären, dass ab dieser Penetrationsrate weitere Komponenten eingesetzt werden, die bei geringeren Penetrationsraten zu negativen Effekten führen würden. Dazu zählen der Durchfahrtsvergleich und die Freigabezeitumverteilung.

Ein Vergleich der Knotenpunkte untereinander erscheint angesichts der Vielzahl von Parametern und Einflussgrößen schwierig, so dass keine direkte Aussage über Knotenpunktgeometrien oder Phasensysteme getroffen werden kann. Es bleibt zumindest festzuhalten, dass beispielsweise ein positiver Effekt durch einen Phasentausch natürlich nur bei mindestens 3 Phasen - in der Regel aufgrund von gesicherten Abbiegeströmen – möglich ist. Außerdem zeigte sich, dass Zufahrten mit vielen Fahrstreifen gegenüber Zufahrten mit wenig Fahrstreifen bei gleicher Auslastung bevorzugt behandelt werden, da die Steuerung beim Durchfahrtsvergleich die absolute Anzahl von Fahrzeugen vergleicht.

Im Anwendungsfall Priorisierung von Einsatzfahrzeugen durch den Einsatz der C2X-Steuerung konnte gezeigt werden, dass durch eine genaue Detektion der Einsatzfahrzeuge durch die C2X-Funktionen der Priorisierungseingriff dosierter durchgeführt werden kann und sich somit die Dauer der Maßnahme reduziert. Darüber hinaus konnten negative Effekte auf den Verkehrsablauf aufgrund des harten Steuerungseingriffs rascher abgefedert werden. Kürzere, dosierte Eingriffsdauer und zügiger Abbau negativer Effekte des Eingriffs führten zu einem besseren Verkehrsablauf am Gesamtknotenpunkt über den Betrachtungszeitraum.

In den Szenarien 2, 3 und 5 wurde die Ausstattung der Fahrzeugarten Pkw und Fahrrad variiert und teilweise in Kombination simuliert und ausgewertet. Grundsätzlich wurde in dieser Untersuchung der Ansatz verfolgt, dass ein Richtungswunsch der Verkehrsteilnehmer von deren Fahrstreifenlokalisierung abhängig gemacht wird. Dies bedeutet, ein Linksabbieger wird solange er sich noch auf dem Geradeausfahrstreifen befindet als Geradeausverkehr von der Steuerung interpretiert. Diese Annahme ist der Tatsache geschuldet, dass eine Richtungswunsch nicht in der CAM enthalten ist. Für Radfahrende ist diese Annahme noch schwerer zu treffen. Ein Radfahrer, der auf einem Radweg unterwegs ist, hat die

Möglichkeit am Knotenpunkt in alle Richtungen zu fahren. Dieser Umstand macht es unmöglich einen Richtungswunsch auf Basis der Fahrstreifenlokalisierung abzuleiten und wurde deshalb für den Außerortsknotenpunkt nicht angewendet. Im 3-armigen Innerortsknotenpunkt werden die Radfahrer zusammen mit dem Pkw auf dem Fahrstreifen geführt, weshalb eine getrennte Untersuchung nicht möglich war. Außerdem reagiert die C2X-Steuerung unabhängig der Fahrzeugart nur aufgrund der ETA. Einzig für den 4-armigen Innerortsknotenpunkt mit den abgetrennten Radfahrstreifen und der erwartbaren Fahrtrichtung der Radfahrer ergibt ein Vergleich Sinn. Der Knotenpunkt wurde in den Szenario 2 mit C2X-Pkw und konventionellen Radfahrern, in Szenario 3 mit konventionellen Pkw und C2X-Radfahrern und in Szenario 5 mit C2X-Pkw und C2X-Radfahrer simuliert.

Im Vergleich Szenario 2 mit 5 ist kein Trend erkennbar. Die Ausstattung der Radfahrer führt in den Verlustzeiten zu sehr geringen Verschlechterung von Szenario 2 auf 5. Grundsätzlich fällt die viel größere Anzahl der Pkw im Vergleich zu den Radfahrenden ins Gewicht, Dies unterstreicht die Ergebnisse des Szenario 3, welche nur einen geringen Einfluss der C2X-Radfahrer attestieren.

Die freien Knotenpunkte weisen bei dem Vergleich zwischen konventioneller VA und C2X eine deutlich größere Verbesserung des Verkehrsflusses auf als mit dem Vergleich des koordinierten Streckenzuges. Zum einen kann auf eine größere Flexibilität der Einzelknotenpunktsteuerung gegenüber der koordinierten Steuerung verwiesen werden, Die sich in einer Koordinierung befindlichen Knotenpunkte könne nur innerhalb der vordefinierten Rahmenpläne, sprich garfischen Parametern zur Ermöglichung einer Koordinierung, agieren. Zum anderen muss darauf hingewiesen werden, dass die Koordinierungstrecke bereits in der konventionellen Steuerung ein sehr guten Koordinierungsmaß aufwies. Dies bedeutet, dass das Verbesserungspotential durch die C2X-Steuerung sich in Grenzen hielt. Eine Untersuchung eines nicht optimierten Streckenzug mit der Option einer „live“ Optimierung während des Betriebs wäre denkbar und sicherlich wünschenswert für weitere Betrachtungen der C2X-Steuerung.

Der Durchfahrtenvergleich hat bei koordinierten Steuerungen einen kleineren Effekt als bei den Einzelknoten, da der Großteil der Fahrzeuge bei koordinierten Streckenabschnitten ohnehin während der regulären Freigabezeit gepulkt ankommt und die Freigabezeit für eine Minimierung der Halte im Optimalfall nicht modifiziert werden muss.

Weiterhin ist die Sichtweite bei einem Knotenpunkt innerhalb einer Koordinierungsstrecke im Untersuchungsraum durch die Nachbarknotenpunkte limitiert und geringer als 300m. Daher ergeben sich geringe Reaktionszeiten für die C2X-Steuerung.

6 Ergebnisse und Resümee

Im folgenden Kapitel werden die Erkenntnisse aus den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel zusammengefasst und eingeordnet. Anschließend erfolgt eine Aufstellung einer möglichen Realisierbarkeit bzw. Wirtschaftlichkeit der C2X-Steuerung. Schließlich wird ein Ausblick auf die Möglichkeiten der C2X-Technologie und der C2X-Steuerung gegeben.

6.1 Fazit der Simulationsergebnisse

Im Zuge neuer Steuerungsalgorithmen wurden an drei Knotenpunkten und einer Koordinierungsstrecke verschiedene Steuerungskomponenten entwickelt, um zuvor definierte Anwendungsfälle abzudecken. Die Steuerungskomponenten

- C2X-Anforderung,
- C2X-Bemessung,
- Durchfahrtenvergleich,
- Freigabezeitumverteilung und
- Koordinierungsfunktionen

wurden hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten, Einsatzgrenzen und Parametrisierung untersucht und in Abhängigkeit der Penetrationsrate und Auslastungsgrade in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation integriert und getestet. In Verbindung mit der Penetrationsrate und der Knotenpunkt-auslastung konnten sowohl die Halte als auch die Verlustzeiten um bis zu 10 % reduziert werden. Geringere Penetrationsraten und höhere Auslastungen führten zu entsprechend geringeren Verbesserungen.

Mit dem Blick auf die Penetrationsraten wird ersichtlich, dass die Steuerungskomponenten in zwei Gruppen eingeteilt werden können. Die Gruppe, welche unabhängig einer Penetrationsrate eingesetzt werden kann beinhaltet die beiden Komponenten C2X-Anforderung und C2X-Bemessung. Durch Sensitivanalysen und die Ergebnisse der Simulation zeigte sich eine positive Wirkung der beiden Module bereits bei geringen Penetrationsraten bis hin zur Vollausrüstung der Fahrzeuge. Die beiden Komponenten können durch die erweiterte Detektionsfähigkeit den Beginn der Grünzeit verfrühen bzw. die Gründauer verlängern. Diese leichten Eingriffe in die Steuerung führen zu der penetrationsunabhängigen Empfehlung. Die andere Gruppe bilden die Komponenten Freigabezeitumverteilung, Durchfahrtenvergleich und Koordinierungsfunktionen. Diese Funktionen greifen relativ stark in die Steuerung ein, weshalb der Anteil an CAM-Nachrichten sendenden C2X-Fahrzeugen für die Entscheidungen ausreichend groß sein muss, damit die konventionellen Fahrzeuge nicht diskriminiert werden bzw. damit die Verkehrssituation durch wenige C2X-Fahrzeuge von den Komponenten nicht falsch gedeutet wird. Die Schwelle, zum Aktivieren dieser Komponenten, wurde mit 70 % Penetrationsrate als gut geeignet angenommen. Hier könnten weitere Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen Penetrationsrate durchgeführt werden.

Die Verkehrsauslastung hat außerdem einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation. Zunächst kann festgestellt werden, dass sich mit abnehmender Verkehrsbelastung die Anzahl der Halte und die Verlustzeit reduzieren. Dieser Rückgang kann wie folgt erklärt werden: Die C2X-Steuerung kann sehr flexibel und vorausschauend die Grünzeiten auf die ankommenden Fahrzeuge verteilen. Bei zunehmender Fahrzeuganzahl kann die Grünzeit weniger flexibel verteilt werden. Dies führt zu einer Verstetigung der Grünzeitdauern, weshalb ein geringer Spielraum zur Vermeidung von Halten zur Verfügung steht. Zu dieser flexiblen Grünzeitverteilung gehört auch der Phasentausch. Dieser Phasentausch fördert geringe Verlustzeiten durch Reduktion der Halte bei geringen Auslastungen. Diese Komponente führt mit steigender Auslastung zu größeren Übergangszeiten, bedingt durch die ungünstige Phasenfolge, und somit zu steigenden Halten bzw. Verlustzeiten. Aus diesem Grund wird der Phasentausch ab einer hohen Auslastung nicht mehr ausgeführt und eine klassisch optimierte Phasenfolge ausgeführt.

Der Steuerungsparameter „mittlerer Zeitbedarfswert“ ist abhängig von der Auslastung. Ein hoher Bedarfswert führt zu einer großzügigen Grünzeitbemessung zulasten wartender Fahrzeuge. Ist die Verkehrsbelastung gering, sind die Auswirkung der Bemessung auf wenige wartende Fahrzeuge

überschaubar. Erhöht sich allerdings die Verkehrsbelastung, tritt bei einem hohen mittleren Zeitbedarfswert der Effekt ein, dass die Grünzeit durch wenige Bemessungsfahrzeuge mit großen Abständen zulasten vieler wartender Fahrzeuge verlängert wird. Die Fahrzeuganzahl je Grünzeit wird dadurch geringer. Dies spiegelt sich wiederum in einer Erhöhung der Verlustzeit bzw. einer Erhöhung der Anzahl haltender Fahrzeuge wider. Daher wurden unterschiedliche Zeitbedarfswerte für die verschiedenen Verkehrsauslastungen gewählt. Für Auslastungsgrade geringer als 0,5 wurde ein mittlerer Zeitbedarfswert von 5,2 s angesetzt. Für höhere Auslastungsgrade wurde mit einem Zeitbedarfswert von 3,0 s gearbeitet. Anknüpfend an dieses Forschungsprojekt sollte mit weiteren Untersuchungen ein optimaler, auf die Verkehrsbelastung angepasster Zeitbedarfswert, ermittelt werden. Eine Zusammenfassung der identifizierten Parameter und Grenzwerte gibt Abbildung 6-1 wieder.

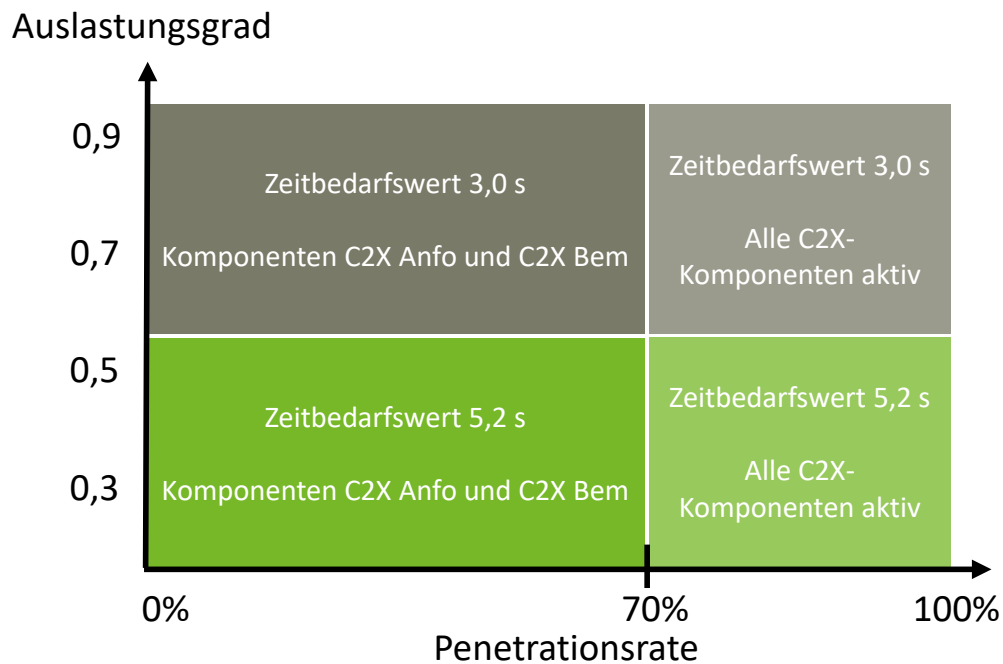


Abbildung 6-1: Identifizierte Parametrisierungsmatrix

Die Information über den Richtungswunsch der Fahrzeuge kann für die Steuerung einen erheblichen Mehrwert bilden. Es wäre möglich zwischen Geradeausfahrer und Abbieger zu unterscheiden und die entsprechenden Phasen frühzeitig zu starten. Leider ist in der Realität der Richtungswunsch über die CAM-Nachricht nicht enthalten. Mögliche Lösungen, den Richtungswunsch durch aktivierte Richtungsblinker abzuleiten, können irreführend sein und die Steuerung möglicherweise negativ durch beispielsweise überholende Fahrzeuge vor einem Knotenpunkt, beeinflussen. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde der Richtungswunsch auf Basis der Fahrzeugposition auf dem Fahrstreifen abgeleitet. In der Realität ist eine solche Ableitung aufgrund der ungenauen Geolokalisierung erschwert. Zusammengefasst können folgende drei Richtungswunschinformationen für eine C2X-Steuerung herangezogen werden:

- Optimal – Richtungswunsch wird durch Fahrzeug übermittelt
- Projekt – Richtungswunsch wird aufgrund exakter Geolokalisierung über die Fahrstreifengenaue Positionierung abgeleitet
- Realität – Richtungswunsch kann durch ungenaue Geolokalisierung nicht präzise abgeleitet werden

Eine optimale Richtungswunschinformation kann nur durch die Informationen direkt vom Fahrzeug aus übermittelt werden. Für diese Informationen müssten die CAM-Nachrichten erweitert werden, bzw. die Informationen auf anderen Wegen in die Steuerung einfließen. Der im Projekt gewählte Ansatz, durch die Geoposition eines Fahrzeugs auf dessen Richtungswunsch abzuleiten ist eine gute Alternative. Probleme bei diesem Vorgehen sind Fahrstreifen, welche von Fahrzeugen mit mehreren Fahrtrichtungen befahren

werden wie bspw. Fahrstreifen vor Aufweitungen aber auch Fahrradwege. In der Realität kann durch eine ungenaue Geolokalisierung, von derzeit mehreren Metern, mit dem heutigen Stand der Technik, nicht auf eine Position auf einem Fahrstreifen geschlossen werden. Es ist lediglich möglich, die Anzahl der Fahrzeuge eines Armes zu bestimmen. Zusammengefasst ist die Richtungswunscheinbeziehung und deren Qualität stark abhängig von den übermittelten Daten der Fahrzeuge. An dieser Stelle wird auf weiteren Forschungsbedarf zur exakten Bestimmung der Fahrzeuglokalisierung auf den Fahrstreifen hingewiesen.

Durch die Integration zusätzlicher Funktionen in Planungsprogrammen können weitere Untersuchungen durchgeführt und auch in realen Umsetzungen von Knotenpunkten geplant und getestet werden. Die neuen Möglichkeiten sollten daher der breiten Masse von Planungsbüros, Universitäten und Signalbaufirmen eröffnet werden, um diesbezügliche Potenziale auszuschöpfen.

Zum einen können die realisierten und untersuchten Anwendungsfälle weiter optimiert werden und die vorgestellten Parameter weiter untersucht werden, zum anderen sind weitere Anwendungsfälle denkbar.

Insbesondere die vorgestellten Einflussgrößen/Schwellwerte für einzelne Maßnahmen

- Penetrationsrate und
- Auslastungsgrad

können hinsichtlich der genauen Dimensionierung weitergehend untersucht werden, um weiteres Optimierungspotenzial zu erheben. Auch der Grenzwert für die vorgestellte Bemessung auf Basis des mittleren Zeitbedarfswertes kann für unterschiedliche Situationen genauer analysiert werden.

Ein weiterer Punkt, der zusätzlichen Forschungsbedarf darstellt, ist der Einfluss von kurzen Fahrstreifen im Zusammenhang mit der nicht vorhandenen Fahrtrichtungsinformation. Es ist zu untersuchen welchen Mehrwert eine Fahrtrichtungsinformation bringt und wie eine technische Umsetzung möglich wäre.

Ungeachtet des verbleibenden Forschungsbedarfes stehen bereits heute Möglichkeiten zur Verfügung, die über CAM-Nachrichten versendeten Fahrzeuginformationen in verkehrsabhängigen Steuerungen zu nutzen und die Auswirkungen zu testen. Die tatsächliche Realisierung in kommerziellen Steuergeräten steht ebenfalls kurz vor der Fertigstellung. Auch wenn hohe Penetrationsraten erst in einigen Jahren erreicht werden, sind einige Funktionen bereits bei sehr geringen Penetrationsraten einsetzbar und führen zu Verbesserungen. Zuletzt bleibt darauf hinzuweisen, dass CAM-ähnliche Fahrzeuginformationen, die über eine Verkehrszentrale an die lokalen Steuerungen übertragen werden, in gleicher Art und Weise verwendet werden können.

6.2 Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit

Bei der Steuerung von LSA unter Einbeziehung von Information des Fahrzeugs handelt es sich um C-ITS Anwendungen, die auch als kooperative Systeme, C2X oder V2X bezeichnet werden. Das bedeutet, dass Informationen/Nachrichten vom Fahrzeug zur LSA übertragen werden müssen. Um dies zu bewerkstelligen, ist sowohl die LSA als auch das Fahrzeug mit einer Kommunikationseinheit auszustatten.

Fahrzeugseitig sind eine sogenannte Onboard Unit (OBU) sowie zusätzliche Komponenten vorzusehen, welche die Inhalte der C-ITS Nachrichten für die OBU bereitstellen und anschließend von der OBU aus versenden. Das Fahrzeug muss über ein möglichst genaues Verfahren verfügen, um die eigene Geoposition zu ermitteln. Dies ist einer der wesentlichen Bestandteile der CAM-Nachricht. Im vorliegenden Bericht wurde von einem Idealzustand ausgegangen. In der Realität könnte es sein, dass das Fahrzeug keine eigene Geoposition ermitteln kann, oder aber, dass die Übertragung der CAM-Nachricht fehlschlägt. Die ersten Automobilhersteller beginnen derzeit damit diese Technologie für Neuwagen anzubieten. Unklarheit bzw. ein Unterschied besteht derzeit noch über die einzusetzende Kommunikationstechnologie. Es wird der ETSI ITS-G5 als auch der C-V2X Weg beschritten. Hierbei werden die gleichen Informationen bzw. Nachrichten über unterschiedliche Kommunikationskanäle gesendet. Diese Unklarheit wirkt sich auch auf die Infrastrukturseite aus. Die straßensteige Kommunikationseinheit (Roadsite Unit; RSU) kann entweder auf dem einen oder auf dem anderen Weg kommunizieren, aber nicht beide Kanäle gleichzeitig

bedienen. Sie sollte aber bestenfalls beides unterstützen. Dies wirkt sich mindernd auf die Penetrationsrate aus, also auf den Anteil empfangbare Nachrichten kommunizierender Fahrzeuge.

Wie die Ergebnisse gezeigt haben, hängt die Steuerung unter anderem von der Penetrationsrate ab. Schon mit geringen Raten können Verbesserungen erzielt werden. Ein Punkt welcher sich positiv auf die Entwicklung der Penetrationsrate auswirkt, ist die relative geringe Nutzungsdauer von Fahrzeugen im Vergleich zur straßenseitigen Technik. Infrastrukturseitig kann von einer Nutzungsdauer von Steuergeräten von etwa 20 bis 30 Jahren ausgegangen werden. Bei den Fahrzeugen kann von einer kontinuierlichen Erneuerung der Flotte ausgegangen werden. Das Durchschnittsalter der Pkw-Flotte liegt in Deutschland laut ADAC derzeit bei 10 Jahren [ADAC, 2021]. Wohl aber ist anzumerken, dass es immer Fahrzeuge geben wird, die nicht kommunizieren können, z.B. Oldtimer. Aus diesem Grund muss die Steuerung auch im konventionellen Modus funktionieren. Die unterschiedlichen Lebenszyklen betrachtend und der Umstand, dass die C2X-Steuerung schon bei geringen Penetrationsraten Erfolge erzielt, spricht für einen zeitnahen Beginn der Umrüstung der Infrastruktur, damit eine straßenseitige Bereitstellung der C2X-Fähigkeit bei einer Umplanung bereits eingeplant wird und somit vorhanden ist um die steigende Anzahl an kommunizierenden Fahrzeugen in die Steuerung mit aufnehmen zu können.

Auf der Infrastrukturseite sind unterschiedliche Dinge umzusetzen, um C2X-basiert zu steuern:

- Eine Kommunikationseinheit (RSU). Es ist zu bedenken, dass nicht jedes Steuergerät um eine RSU erweitert werden kann. Unter Umständen steht ein Gerätetausch am Knotenpunkt – speziell bei alten Steuergeräten – an.
- Einer MAP des Knotenpunktes um die in den CAM-Nachrichten enthaltenen Positionsangaben in den korrekten Bezug zum Knotenpunkt zu bringen und eines Map Matching-Verfahrens innerhalb der RSU.
- Die straßenseitige Technologie muss mit veralten CAM-Nachrichten umgehen können. D.h. falls die Nachricht verzögert ankommt und nicht mehr aktuell sein sollte, ist diese zu verwerfen.
- Es ist eine akzeptable Reichweite der RSU sicherzustellen, eventuell durch zusätzliche RSU. Dies ist stark von der individuellen Geometrie und Lage des Knotenpunktes abhängig.
- Die Entscheidung über die Art der Kommunikationstechnologie sollte möglichst flexibel sein, sprich die RSU sollte sowohl ETSI ITS-G5 als auch C-V2X anbieten. Es ist zu bedenken, dass der Markt der angebotenen Kommunikationstechnologien sich nochmals ändern könnte bzw. wird durch die Entwicklung im Bereich des 5G-Mobilfunks, oder auch durch weitere Fortschritte in der RSU Entwicklung wie bspw. größere Reichweiten.
- Des Weiteren ist eine eventuelle Weitergabe der lokal empfangen CAM-Nachrichten an eine Lichtsignalsteuerungszentrale (LStZ) wünschenswert, um diese dort weiter zu nutzen. D.h. entsprechende Übertragungswege und Schnittstellen des Steuergerätes zur LStZ sind zu berücksichtigen. Die OCIT-Standardwelt hält neben den proprietären Lösungen der Hersteller eine Funktionalität innerhalb OCIT-O V3.0 bereit. Somit steht für die RSU eine lizenzkostenfreie Möglichkeit zur Verfügung, die CAM-Nachrichten an ein zentrales Verkehrsmanagementsystem zu übertragen.
- Schlussendlich ist die steuernde Logik des Steuergerätes anzupassen, so dass die C2X-Nachrichten im Sinn der hier vorgestellten Steuerungsmethodik oder einer ähnlichen Methodik gewinnbringend verarbeitet werden können.
- Durch die Installation einer RSU am Knotenpunkt wird auch die Möglichkeit zur Übertragung von Signalisierungszuständen und deren Dauer mittels SPaT/MAP-Nachrichten der Weg bereitet.

Es stellt sich die Frage, ob sich dieser Aufwand lohnt. Auf der kommunalen Seite sind die Aufwände nicht zu unterschätzen. Prinzipiell ist zwischen einmaligen Anschaffungskosten und den laufenden Kosten zu unterscheiden,

Unter den einmaligen Kosten fällt die Neuanschaffung der notwendigen Hardware. Es ist eine RSU zu besorgen und eventuell auch ein neues Steuergerät. Dies führt zu einer notwendigen Neuversorgung des Gerätes mit C2X-Steuerlogik. Die Erstellung einer derartigen Logik kann noch nicht als Standard bzw. als

ein Verfahren angesehen werden für dessen Umsetzung weitreichende Erfahrung vorliegt. Dies könnte zu einer Verteuerung der Planungskosten in der Anfangszeit führen. Planende Ingenieurbüros oder auch die Kommunen selbst sind angehalten sich notwendiges Planungs-Knowhow anzueignen, um C2X-Steuerungslogiken projektieren zu können.

Neben einmaligen Kosten fallen eventuell auch Kosten für den laufenden Betrieb an, wie z. B. der zusätzliche Wartungsaufwand der C2X-Bestandteile oder auch Kommunikationsgebühren für die Kommunikation. Je nachdem welche Kommunikationsart eingesetzt wird.

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, machen sich die Vorteile der C2X-Steuerung bereits bei geringen Penetrationsraten durch eine Reduzierung der Halte und Verringerung der Verlustzeiten bemerkbar. Die Reduktion der Halte führt zu einer Verringerung der Start-Stopp Vorgänge im Zulauf auf gesteuerte Knotenpunkte. Dadurch werden weniger Schadstoffe emittiert. Selbst bei Elektrofahrzeugen kann noch von einem positiven Effekt gesprochen werden. Diese stoßen zwar nicht direkt Vorort CO₂ aus, wohl aber reduziert sich durch geringe Bremsvorgänge der Abrieb der Reifen. Dieser Abrieb trägt zu einem Teil zu Feinstaubbelastung in unseren Städten bei. Die Reduktion der Verlustzeiten wirkt sich positiv auf die Reduzierung der Reisezeiten im gesamten System aus. Insgesamt kann somit von einem Effekt gesprochen werden, der den Verkehrsfluss verbessert. Die Monetarisierung dieser Effekte und eine Kosten-Nutzen-Rechnung waren nicht Bestandteil des Projektes und wird auch als eigenständiger Forschungspunkt gesehen. Eine Untersuchung hinsichtlich der sozioökonomischen Aspekte wäre sicherlich hilfreich, auch im Sinne einer soliden Investitionsentscheidung der Kommunen.

Ein weiterer Aspekt, der für die Einführung der C2X-Technologie spricht, ist die ÖV-Priorisierung. Laut dem Forschungsprojekt „Nutzung des C2X-Kommunikationsstandards IEEE 802.11p für die ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten“ (03.0553) endet die 20kHz Kanalbandbreite für Sprach- und Datenübertragung, welche für die Übertragung von R09-Telegrammen genutzt wird, am 31.12.2028. D.h. es ist für Ersatztechnologie zu sorgen. Auch hier bietet die C2X-Technologie eine Lösung an: die Anforderung/Anmeldung des ÖV-Fahrzeuges bei der Steuerung und Quittierung der Anmeldung mittels der C2X-Nachrichten SREM und SSEM. Eine Umrüstung der straßenseitigen Infrastruktur wird über kurz oder lang somit unabdingbar sein. Hier könnten somit Synergieeffekte bei der Einführung der C2X-Technologie genutzt werden, sprich die technische Aufrüstung der lokalen LSA-Infrastruktur bedient beide Steuerungsstrategien, die ÖV-Priorisierung und die Einbeziehung der CAM-Nachrichten in die Steuerung.

6.3 Schlusswort

Ungeachtet des verbleibenden Forschungsbedarfes stehen bereits heute Möglichkeiten zur Verfügung Fahrzeuginformationen, die über CAM-Nachrichten versendet werden, in verkehrsabhängigen Steuerungen zu nutzen und die Auswirkungen zu testen. Die tatsächliche Realisierung in kommerziellen Steuergeräten steht ebenfalls kurz vor der Fertigstellung. Auch wenn hohe Penetrationsraten erst in einigen Jahren vorhanden sein werden, sind einige Funktionen bereits bei sehr geringen Penetrationsraten einsetzbar und führen zu Verbesserungen. Zuletzt bleibt darauf hinzuweisen, dass CAM-ähnliche Fahrzeuginformationen, die über eine Verkehrszentrale an die lokalen Steuerungen übertragen werden, in gleicher Art und Weise verwendet werden können.

Die generelle Vernetzung von Fahrzeugen miteinander bzw. mit der Infrastruktur hat mehrere positive Effekte. Nicht nur die Steuerung, sondern auch die Sicherheit und der freie Verkehrsablauf auf der Strecke sind Wegbereiter für das hochautomatisierte Fahren. Eine C2X-Steuerung bildet nur einen Baustein dieses Gesamtsystems. Im Zuge von Aufrüstungen der Bestandssteuerung besteht die Möglichkeit Knotenpunkte inklusive deren Steuergeräte um eine C2X-Fähigkeit aufzurüsten. Die in diesem Bericht vorgestellten Funktionen können in diesem Zuge einfach implementiert werden, sodass die Kosten für eine neue Steuerung verhältnismäßig gering sind. Eine erste Potentialabschätzung einer umsetzungsfähigen, regelbasierten C2X-Steuerung wurden in diesem Bericht vorgestellt. Allerdings ist das volle Potenzial noch nicht umfassend erforscht und es bestehen noch zahlreiche Optimierungsansätze. Hier sehen die Autoren noch weiteren Forschungsbedarf. Die Zukunft des vernetzten Fahrens wird in allen Bereichen neue Lösungsoptionen ermöglichen.

Literatur

- 5GAA, 2017. *An assessment of LTE-V2X (PC5) and 802.11p direct communications technologies for improved road safety in the EU*. [Online] Available at: <http://5gaa.org/wp-content/uploads/2017/12/5GAA-Road-safety-FINAL2017-12-05.pdf> [Zugriff am 28 Mai 2019]
- ADAC, 2021 [online] Available at: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/verkaufen-tipps/checkliste/> [Zugriff am 27 November 2021]
- Astarita, V., Giofrè, V. P., Guido, G. & Vitale, A., 2017. The Use of Adaptive Traffic Signal Systems Based on Floating Car Data. In: *Wireless Communications and Mobile Computing*. s.l.:Wiley.
- Bley, O. et al., 2011. Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung. In: *AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: s.n.
- Boltze, M. et al., 2011. AMONES: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen Teil 3: Evaluierung und Handlungsempfehlungen. *Straßenverkehrstechnik*, pp. 451-455.
- Braun, R. et al., 2009. TRAVOLUTION Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug - Kommunikation. *Straßenverkehrstechnik*, pp. 365-374.
- Büttler, R. et al., 2010. *Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen*, s.l.: Schweizerischer Verband der Straßen und Verkehrsfachleute (VSS).
- Cheng, J., Wu, W., Cao, J. & Li, K., 2017. Fuzzy Group-Based Intersection Control via Vehicular Networks for Smart Transportations. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. s.l.:s.n., p. 751 – 758.
- Day, C. M. et al., 2017. Detector-Free Optimization of Traffic Signal Offsets with Connected Vehicle Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, p. 54–68.
- DIGINET-PS-Konsortium, 2019. [Online] Available at: <http://diginet-ps.de/de/home-2/> [Zugriff am 28 Mai 2019].
- FGSV, 2015. *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*. Köln: FGSV-Verlag.
- Friedrich, B., Heinrich, T. & Pohlmann, T., 2004. *Ergänzung vorhandener Methoden der Verkehrsdatenerfassung und Verkehrszustandsbewertung durch digitale Videobilderfassung und -auswertung*, s.l.: s.n.
- Hartenstein, H. & Laberteaux, K., 2010. *VANET: Vehicular applications and inter-networking technologies*. Torkay (UK): Wiley.
- He, Q., Head, K. & Ding, J., 2012. PAMSCOD: Platoon-based Arterial Multi-modal Signal Control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp. 164-184.
- Hoyer, R., 2019. [Online] Available at: <https://veronika.uni-kassel.de/> [Zugriff am 27 Mai 2019].
- Kaths, J., 2017. *Kooperative Lichtsignalsteuerung Integration von Fahrzeugen in die Steuerung vernetzter Verkehrssysteme*. Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München: s.n.
- Klein, L., Mills, M. & Gibson, D., 2006. *Traffic Detector Handbook : Third Edition - Volume One*. Georgetown Pike: Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center.
- KoMoD-Konsortium, 2019. [Online] Available at: <https://www.komod-testfeld.org> [Zugriff am 28 Mai 2019].
- Leitzke, C., 2012. *Reisezeitermittlung im motorisierten Individualverkehr mit Hilfe drahtloser Kommunikationstechnologien*. Institut für Verkehrswesen, Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik, Universität Kassel: s.n.

- Liang, X., Guler, S. & Gayah, V., 2018. Signal Timing Optimization with Connected Vehicle Technology: Platooning to Improve Computational Efficiency. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Washington: s.n., pp. 81-92.
- Listl, G., 2003. *Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs*. Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung, Fachgebiet Verkehrstechnik, Universität Kassel: Schriftenreihe Verkehr - Heft 14.
- LSBG-Hamburg, 2019. [Online] Available at: <https://lsbg.hamburg.de/its-projekte/> [Zugriff am 28 Mai 2019].
- Lüßmann, J. et al., 2014. Impact assessment for cooperative urban traffic management applications based on microscopic traffic flow simulation. In: *Proceedings of 21th ITS World Congress*. Detroit: s.n.
- Meing, C., 2012. *Optimierung von LSA-Fahrzeug-Systemen durch die Car-2-X-Kommunikation*. Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München: s.n.
- Mück, J., 2002. Schätzverfahren für den verkehrszustand unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. In: *Tagungsband HEUREKA '02*. s.l.:FGSV.
- Nafi, N. & Khan, J., 2012. A VANET based Intelligent Road Traffic Signalling System. In: *Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference*. Brisbane, Australia: s.n.
- Neumann, T., 2010. *Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig: s.n.
- ODG, 2018. *OCIT-Outstations - Einführung in das System*. s.l.:OCIT Developer Group (ODG).
- ODG, 2018. *OCIT-Outstations Car Roadside Unit (RSU)*. s.l.:OCIT Developer Group (ODG).
- Oertel, R. et al., 2017. Steuerung von Lichtsignalanlagen auf der Basis von Fahrzeuginformationen - Umsetzung und Feldtests. In: *Tagungsband HEUREKA 17*. s.l.:FGSV.
- Papageorgiou, M. et al., 2003. Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE (Volume: 91 , Issue: 12)*.
- Santá, C., 2015. *Rückstaulängenschätzung an signalisierten Knotenpunkten durch multiple lineare Regression*. Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München: s.n.
- Santá, C., Kaths, J., Mathias, P. & Schendzielorz, T., 2014. Potenziale kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit. *Straßenverkehrstechnik*, p. 676–683.
- Schade, H.-J., 2010. *2nd ETSI TC ITS Workshop*. Sophia Antipolis, s.n.
- Schweiger, B., Raubitschek, C., Bäker, B. & Schlichter, J., 2011. ElisaTM – Car to infrastructure communication in the field. *Computer Networks*.
- simTD-Konsortium, 2010. *Versuchsplan 1.0 (Version 3.0), Deliverable 41.1*, s.l.: s.n.
- UR:BAN-Konsortium, 2015. [Online] Available at: <http://urban-online.org/de/urban.html> [Zugriff am 30 Mai 2019].
- UR:BAN-Konsortium, 2016. *UR-BAN Leitfaden für die Einrichtung kooperativer Systeme auf öffentlicher Seite*. [Online] Available at: http://www.vt.bgu.tum.de/fileadmin/w00bnf/www/Projekte/Urban/URBAN_Leitfaden.pdf [Zugriff am 30 Mai 2019]
- Venkatanarayana, R. et al., 2011. Application of IntelliDrive to Address Oversaturated Conditions on Arterials. In: *90th TRB Annual Meeting*. Washington DC: s.n.

Bilder

- Abbildung 2-1: Regelbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens (gemäß RiLSA)
Abbildung 2-2: Modellbasierte Umsetzung eines Steuerungsverfahrens (gemäß RiLSA)
Abbildung 2-3: Positionierung Detektionsfelder für verkehrsabhängige Steuerung
Abbildung 2-4: Übersicht der Steuerungsverfahren einer LSA laut RiLSA 2015
Abbildung 2-5: Mögliche Kommunikationswege mittels weiträumiger oder kleinräumiger kabelloser Datenübertragung (eigene Darstellung)
Abbildung 2-6: Kreuzungstopologie – Visualisierung in einem Verkehrsingenieursarbeitsplatz und MAP-Inhalt als kml dargestellt (eigene Darstellung)
Abbildung 2-7: OCIT- Schnittstellen im Überblick (ODG, 2018)
Abbildung 2-8: Beeinflussungsmöglichkeiten durch kooperative Lichtsignalsteuerungen (Santá, et al., 2014)
Abbildung 2-9: Klassischer Regelkreis der LSA-Steuerung in Anlehnung an Papageorgiou, et al. (2003)
Abbildung 2-10: Ergänzter Regelkreis der kooperativen LSA in Anlehnung an Santá, et al. (2014)
Abbildung 2-11 : Technologien der Einsatzfahrzeug-Priorisierung Deutschland
Abbildung 2-12: Verbreitung und Technologien der Einsatzfahrzeug-Priorisierung in Deutschland
Abbildung 3-1: Konventionelle Anforderung mit Haltliniennahen Detektoren
Abbildung 3-2: Anforderung auf Basis der Bemessungsdetektoren
Abbildung 3-3: Anforderung auf Basis von C2X-Informationen
Abbildung 3-4: Zeitbedarfswert-Steuerung – Freigabezeitverlängerung (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA)
Abbildung 3-5: Zeitbedarfswert-Steuerung – Freigabezeitabbruch bei Ausstattungsrate < 100% (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA)
Abbildung 3-6: Zeitlicher Ablauf der Berechnung der mittleren Fahrzeugzeitlücke (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA)
Abbildung 3-7: Freigabezeitverschiebung von der Nebenrichtung in die Hauptrichtung
Abbildung 3-8: Auswahl der nächsten Phase mit C2X
Abbildung 3-9: Auswahl der nächsten Phase mit C2X (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA bzw. Wartezeit (negativ))
Abbildung 3-10: Auswahl der nächsten Phase und Abbruch der Bemessungsphase mit C2X (Darstellung der Fahrzeuge mit ETA bzw. Wartezeit (negativ))
Abbildung 3-11: Theoretische Pulkankunft der Gegenrichtung (Blau) und frühester Freigabeabbruch in Sekunde 12
Abbildung 3-12: Verfrühte Pulkankunft der koordinierten Richtung (Grün)
Abbildung 3-13: Phasenfolgeplan
Abbildung 3-14: Konzeptionelle Hierarchie der Phasenlogik
Abbildung 3-15: Sequenzielle und parallele Abarbeitung der Steuerungslogik
Abbildung 3-16: C2X-Steuerungskomponenten in Abhängigkeit der Penetrationsrate
Abbildung 3-17: Unterschiedliche Zeitpunkte der Anforderung
Abbildung 3-18: Ziele der Einsatzfahrzeug-Priorisierung
Abbildung 3-19: Phasenfolgeplan mit Einsatzfahrzeug-Priorisierung
Abbildung 3-20: Elemente der Einsatzfahrzeug-Priorisierung C2X-Steuerung
Abbildung 3-21: Zusammensetzung der Einsatzfahrzeug-Phasenlogik mit C2X-Funktionen
Abbildung 3-22: Neue OML-Bibliothek in LISA
Abbildung 3-23: Einsatz der v2x Library in LISA
Abbildung 3-24: Simulation neuer C2X Funktionen im LISA Testplatz
Abbildung 4-1: Lageplan Konten 1 Außerorts (3-armig)
Abbildung 4-2: Phasenfolgeplan Konten 1 Außerorts (3-armig)
Abbildung 4-3: Signalzeitenplan Knoten 1 Außerorts (3-armig) für hohe Belastungen
Abbildung 4-4: Lageplan Konten 2 Innerorts (4-armig)
Abbildung 4-5: Phasenfolgeplan Konten 2 Innerorts (4-armig)

Abbildung 4-6: Signalzeitenplan Knoten 2 Innerorts (4-armig) für sehr hohe Belastungen
Abbildung 4-7: Lageplan Knoten 3 Innerorts (3-armig)
Abbildung 4-8: Phasenfolgeplan Knoten 3 Innerorts (3-armig)
Abbildung 4-9: Signalzeitenplan Knoten 3 Innerorts (3-armig) für normale Belastungen
Abbildung 4-10: Koordinierter Streckenzug (vier Knotenpunkte)
Abbildung 4-11: Zeit-Weg-Diagramm Laborstreckenzuges pro Knoten (TU = 100 sek)
Abbildung 4-12: Knotenpunktskizze Knoten 1
Abbildung 4-13: VISSIM Netzmodell (Detail) Knoten 1 mit Detektion für die LSA-Steuerung
Abbildung 4-14: VISSIM Netzmodell für die VISSIM-Auswertung
Abbildung 4-15: Klassische Schnittstelle und Steuerung
Abbildung 4-16: Schnittstelle und Steuerung C2X-fähig
Abbildung 4-17: Aufteilung der Fahrzeugtypen mit und ohne C2X-Fähigkeit
Abbildung 4-18: Testszenarien unter Kombination verschiedener C2X Penetrationsraten, Kreuzungstypen und Verkehrsbelastungen
Abbildung 5-1: Erläuterung Ergebnismatrix
Abbildung 5-2: Erläuterung graphische Darstellung der absoluten Werte
Abbildung 5-3: Ergebnismatrizen Knoten außerorts (3-armig); Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1
Abbildung 5-4: Ergebnis Knoten außerorts (3-armig), geringe Verkehrsbelastung
Abbildung 5-5: Ergebnis Knoten außerorts (3-armig), sehr hohe Verkehrsbelastung
Abbildung 5-6: Ergebnisse differenziert nach HR und NR – Knoten außerorts (3-armig)
Abbildung 5-7: Ergebnismatrizen Knoten innerorts (3-armig), Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1
Abbildung 5-8 : Ergebnis Knoten innerorts (3-armig), geringe Verkehrsbelastung.
Abbildung 5-9: Ergebnis Knoten innerorts (3-armig), sehr hohe Verkehrsbelastung
Abbildung 5-10: Ergebnisse differenziert nach HR und NR – Knoten innerorts (3-armig)
Abbildung 5-11: Ergebnismatrizen Knoten innerorts (4-armig), Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1
Abbildung 5-12: Ergebnis Knoten innerorts (4-armig), geringe Verkehrsbelastung
Abbildung 5-13: Ergebnis Knoten innerorts (4-armig), sehr hohe Verkehrsbelastung
Abbildung 5-14: Ergebnisse differenziert nach HR und NR – Knoten innerorts (4-armig)
Abbildung 5-15: Ergebnismatrizen Knoten innerorts (4-armig) für vernetzte Radfahrer, Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1
Abbildung 5-16: Durchschnittliche Dauer der Einsatzfahrzeug-Priorisierung, Knoten innerorts (3-armig) und Knoten außerorts (3-armig)
Abbildung 5-17: Rückkehr zum normalen Verkehrszustand, Knoten innerorts (3-armig)
Abbildung 5-18 Szenario 5 – Ergebnismatrizen Knoten innerorts (4-armig), Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1
Abbildung 5-19 Szenario 5 - Verkehrsbelastung gering
Abbildung 5-20 Szenario 5 - Verkehrsbelastung sehr hoch
Abbildung 5-21: Szenario 5 Koordinierung – Ergebnismatrizen, Erläuterung der Abbildung siehe Abbildung 5-1
Abbildung 5-22: Szenario 5 Koordinierung - Verkehrsbelastung „Gering“
Abbildung 5-23 Szenario 5 Koordinierung - Verkehrsbelastung „Sehr hoch“
Abbildung 6-1: Identifizierte Parametrisierungsmatrix

Tabellen

Tabelle 3-1: Potentiale neuer Steuerungsverfahren

Tabelle 3-2: Statische Grundfunktion zum Einlesen MAP-Nachricht

Tabelle 3-3: Dynamische Grundfunktionen zum Einlesen der CAM-Nachricht

Tabelle 3-4: Funktionen für die Einsatzfahrzeug-Priorisierung in der Bestandssteuerung und der C2X-Steuerung

Tabelle 4-1: Anzahl Simulationsläufe

Tabelle 4-2: Modellierung von Einsatzfahrzeugen in der Simulation

Formeln

Formel 1: Bestimmung der Ankunftszeit

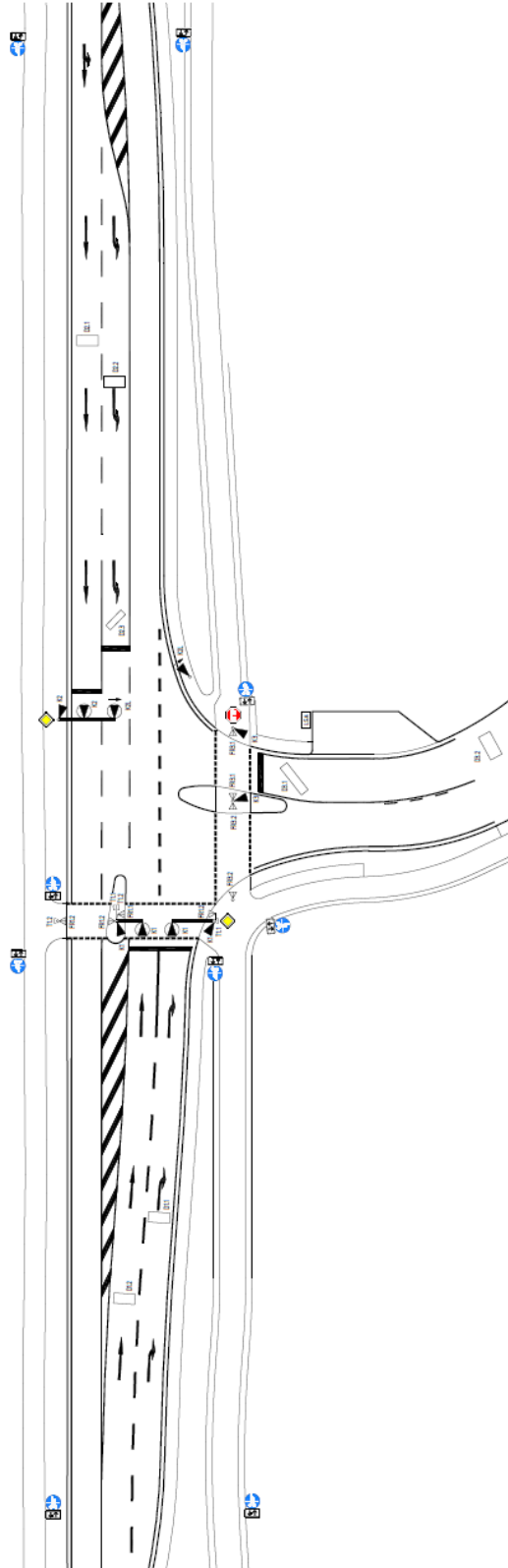
Formel 2: Bestimmung der Standardabweichung

Formel 3: Iterative Bestimmung der Anzahl der Simulationsläufe

Anhang

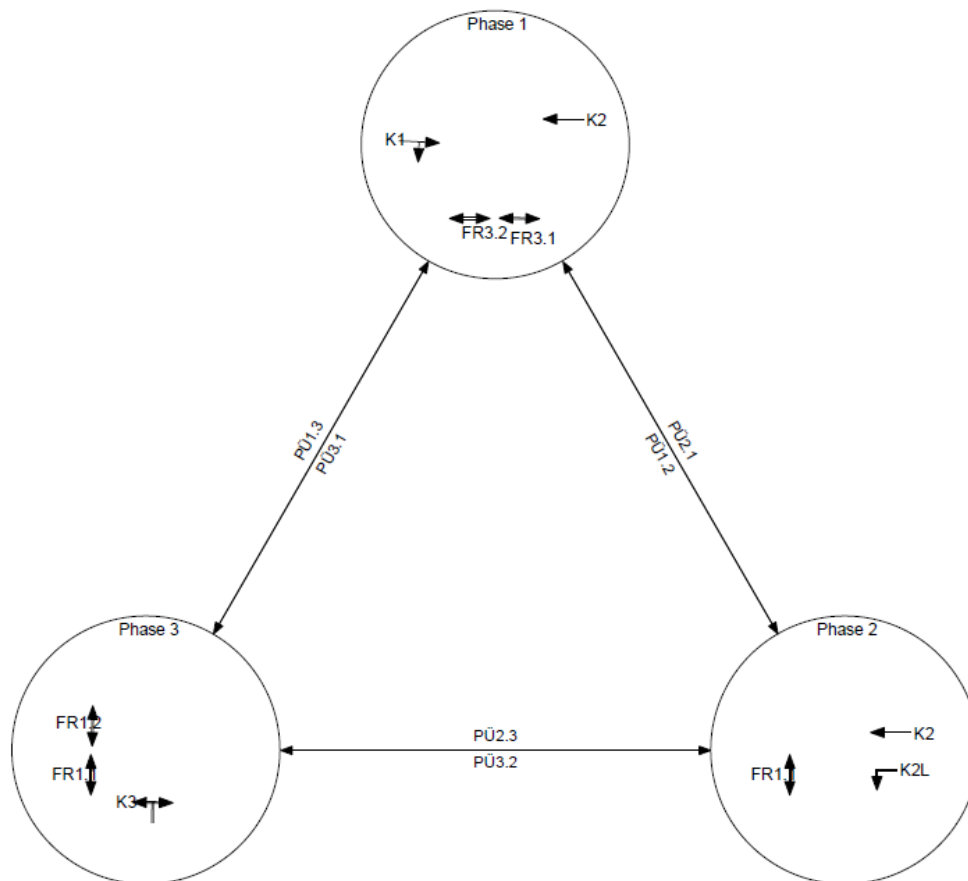
A Konten 1 Außerorts (3-armig)

A.1 Lageplan



A.2 Steuerung

Phasenfolge



A.3 Belastungsszenarien und Signalzeitenpläne mit HBS-Bewertung

Belastung Gering

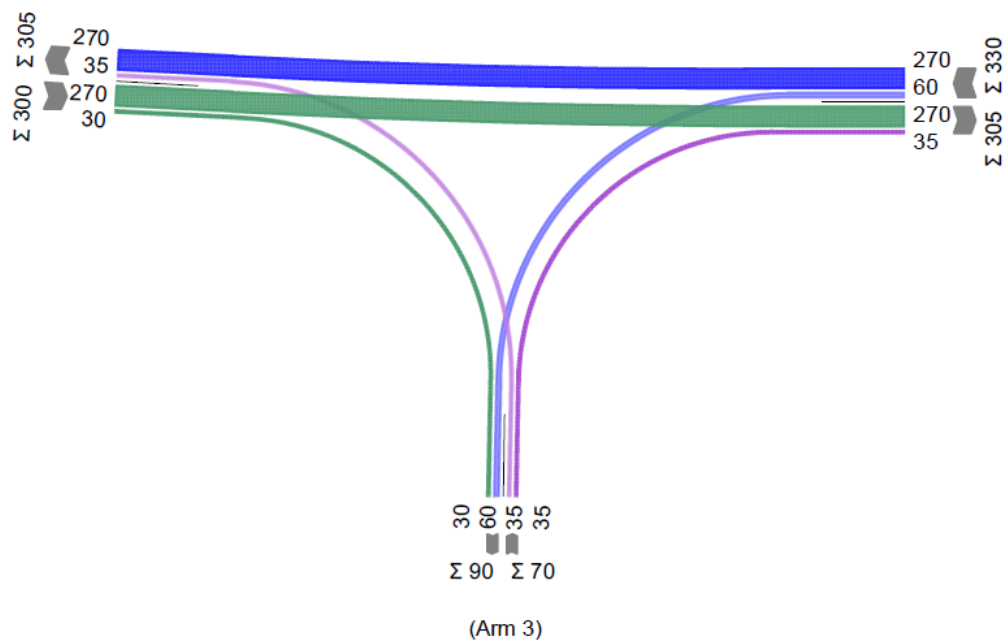
Gering

von\nach	1	2	3
1		270	30
2	270		60
3	35	35	

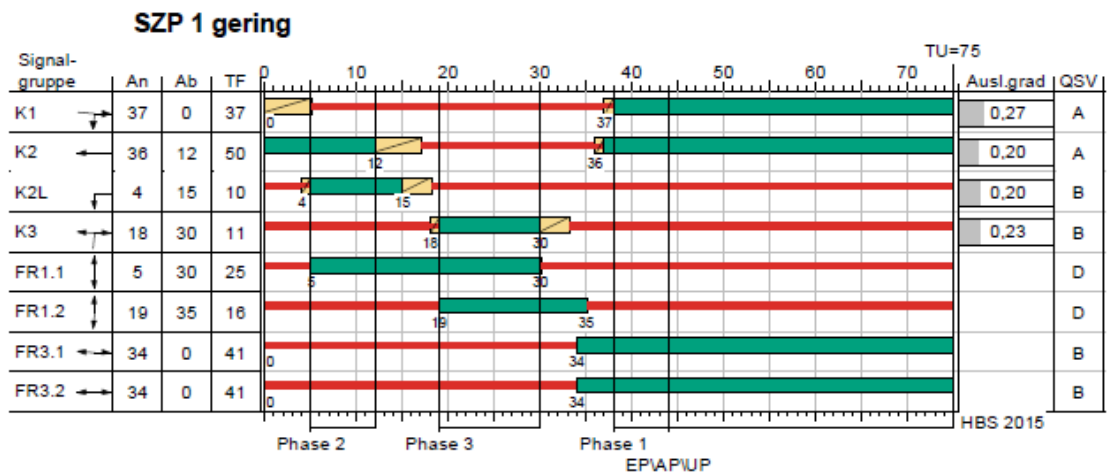


(Arm 1)

(Arm 2)



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung – Gering)



HBS-Bewertung 2015

USA

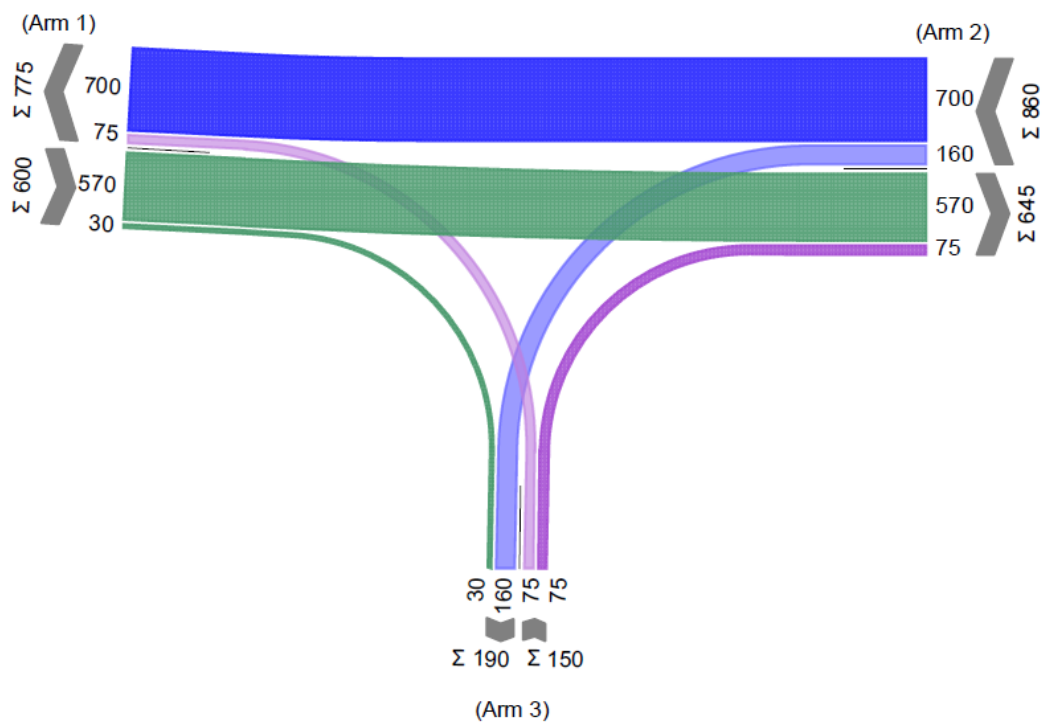
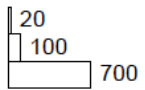
MIV - SZP 1 gering (TU=75) - Gering

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ts [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	NMS,95>NK [-]	nc [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	tw [s]	Nge [Kfz]	NMS [Kfz]	NMS,95 [Kfz]	Lx [m]	QSV [-]	Bemerkung
1	1	→	K1	37	38	38	0,507	270	5,625	1,800	2000	-	21	1014	0,266	11,270	0,207	3,412	6,536	39,216	A	
	2	↙	K1	37	38	38	0,507	30	0,625	1,800	2000	-	21	1014	0,030	9,315	0,017	0,330	1,302	7,812	A	
2	1	←	K2	50	51	25	0,680	270	5,625	1,800	2000	-	28	1360	0,199	4,812	0,140	2,222	4,743	28,458	A	
	2	↘	K2L	10	11	65	0,147	60	1,250	1,800	2000	-	6	294	0,204	29,892	0,144	1,243	3,129	18,774	B	
3	1	↔	K3	11	12	64	0,160	70	1,458	1,800	2000	-	6	302	0,232	30,049	0,171	1,454	3,493	20,958	B	
Knotenpunktsummen:								700						3984								
Gewichtete Mittelwerte:															0,221	11,576						
TU = 75 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																						

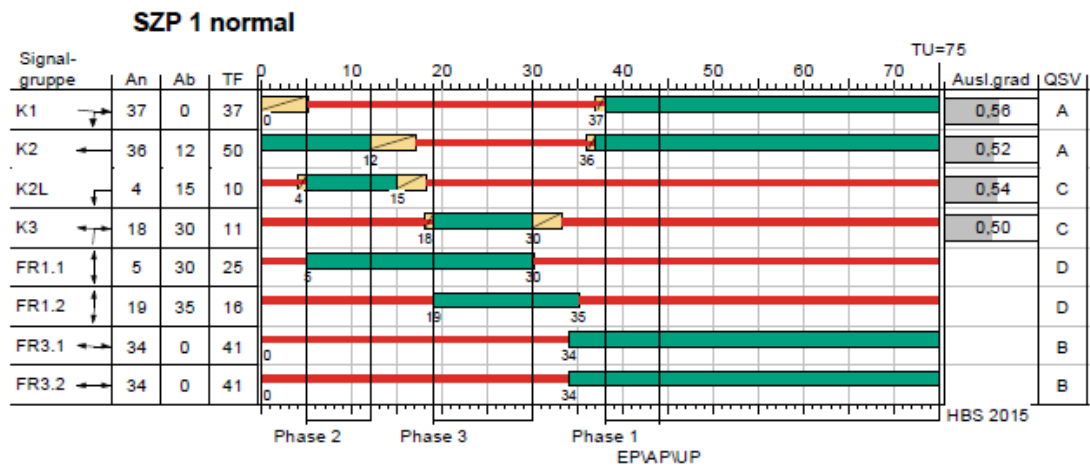
Belastung Normal

Normal

von\nach	1	2	3
1		570	30
2	700		160
3	75	75	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung Normal)



HBS-Bewertung 2015

USA

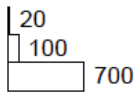
MIV - SZP 1 normal (TU=75) - Normal

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ts [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	N _{vis,ss>nc} [-]	nc [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	tw [s]	N _{ss} [Kfz]	N _{vis} [Kfz]	N _{vis,ss} [Kfz]	L _v [m]	QSV [-]	Bemerkung
1	1	→	K1	37	38	38	0,507	570	11,875	1,800	2000	-	21	1014	0,562	15,600	0,804	8,991	14,062	84,372	A	
	2	↘	K1	37	38	38	0,507	30	0,625	1,800	2000	-	21	1014	0,030	9,315	0,017	0,330	1,302	7,812	A	
2	1	←	K2	50	51	25	0,680	700	14,583	1,800	2000	-	28	1360	0,515	7,633	0,651	7,833	12,566	75,396	A	
	2	↙	K2L	10	11	65	0,147	160	3,333	1,800	2000	-	6	294	0,544	38,584	0,729	3,819	7,124	42,744	C	
3	1	↔	K3	11	12	64	0,160	150	3,125	1,800	2000	-	6	299	0,502	36,608	0,607	3,480	6,635	39,810	C	
Knotenpunktssummen:								1610						3981								
Gewichtete Mittelwerte:															0,524	15,482						
TU = 75 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																						

Belastung Hoch

Hoch

von\nach	1	2	3
1		700	120
2	575		235
3	130	130	



(Arm 1)

$\Sigma 705$
575
130
 $\Sigma 820$
700
120

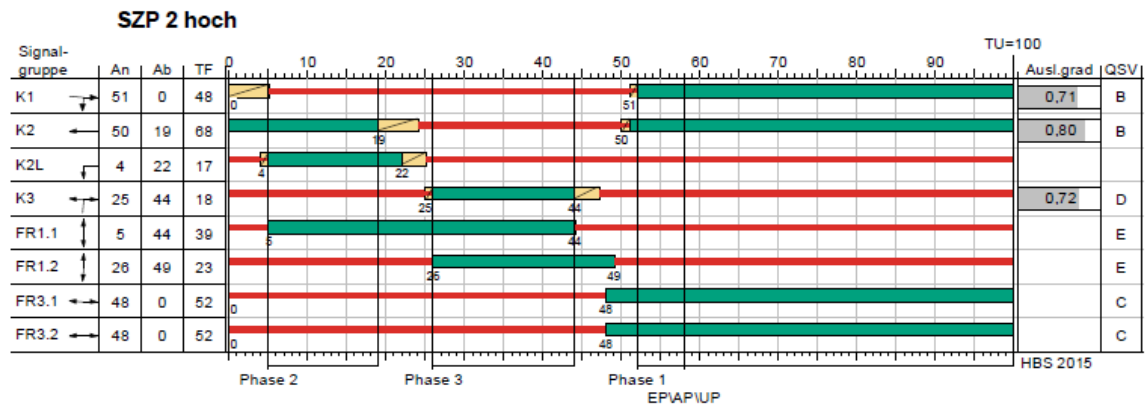
(Arm 2)

575
235
 $\Sigma 810$
700
130
 $\Sigma 830$

120
235
130
130
 $\Sigma 355$ $\Sigma 260$

(Arm 3)

Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung Hoch)



HBS-Bewertung 2015

USA

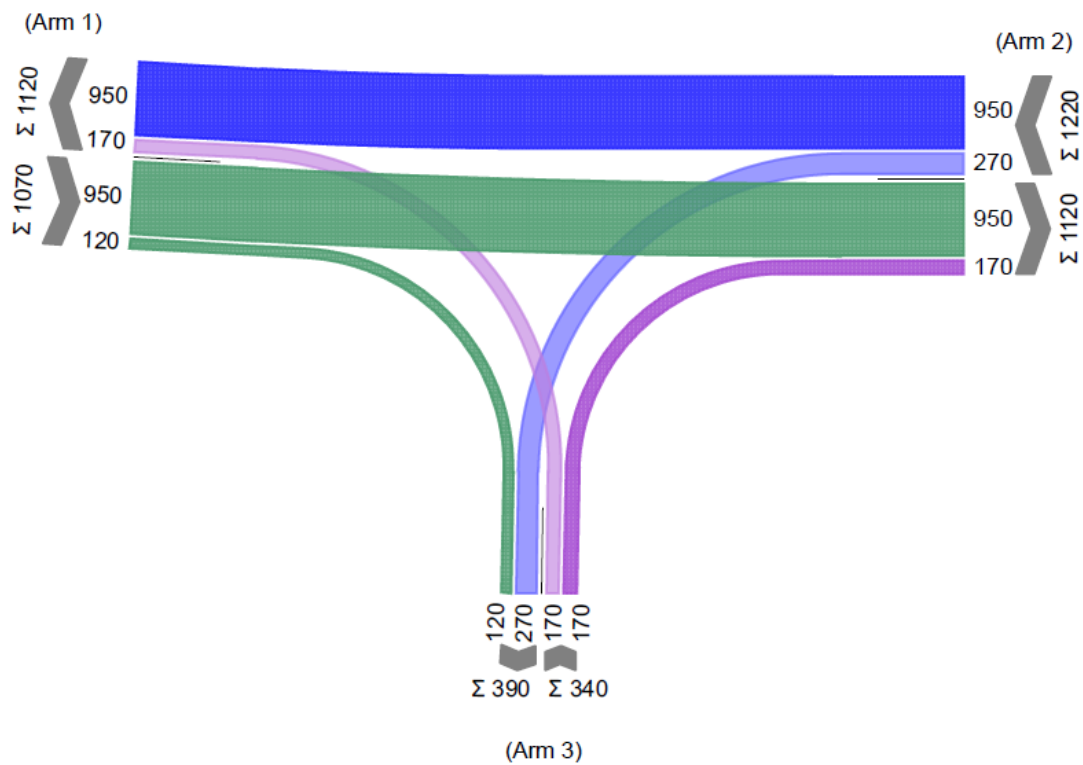
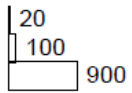
MIV - SZP 2 hoch (TU=100) - Hoch

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ts [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	N _{ges>nc} [-]	nc [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	tw [s]	N _{ge} [Kfz]	N _{us} [Kfz]	N _{ges} [Kfz]	Lx [m]	QSV [-]	Bemerkung
1	1	→	K1	48	49	52	0,490	700	19,444	1,800	2000	-	27	980	0,714	26,534	1,778	17,031	24,010	144,060	B	
	2	↘	K1	48	49	52	0,490	120	3,333	1,800	2000	-	27	980	0,122	14,115	0,077	1,885	4,207	25,242	A	
	1	←	K2	68	69	32	0,690	575	15,972	1,800	2000	-	38	1380	0,417	7,849	0,423	7,375	11,968	71,808	A	
2	2	↙	K2L	17	18	83	0,180	235	6,528	1,800	2000	x	10	360	0,653	50,338	1,224	7,290	11,856	71,136	D	
	1+2		K2, K2L					810	22,500	1,800	2000	-	28	1007	0,804	33,139	3,469	22,245	30,222	181,332	B	
3	1	↔	K3	18	19	82	0,190	260	7,222	1,800	2000	-	10	360	0,722	56,462	1,782	8,589	13,546	81,276	D	
Knotenpunktsummen:								1890						3700								
Gewichtete Mittelwerte:															0,560	22,134						
TU = 100 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																						

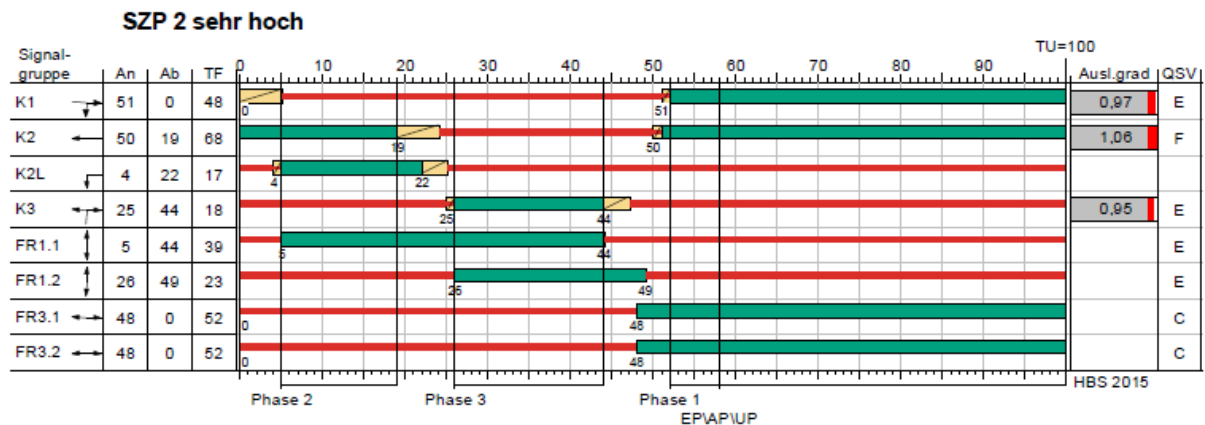
Belastung - Sehr Hoch

Sehr hoch

von\nach	1	2	3
1		950	120
2	950		270
3	170	170	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung - Sehr Hoch)



HBS-Bewertung 2015

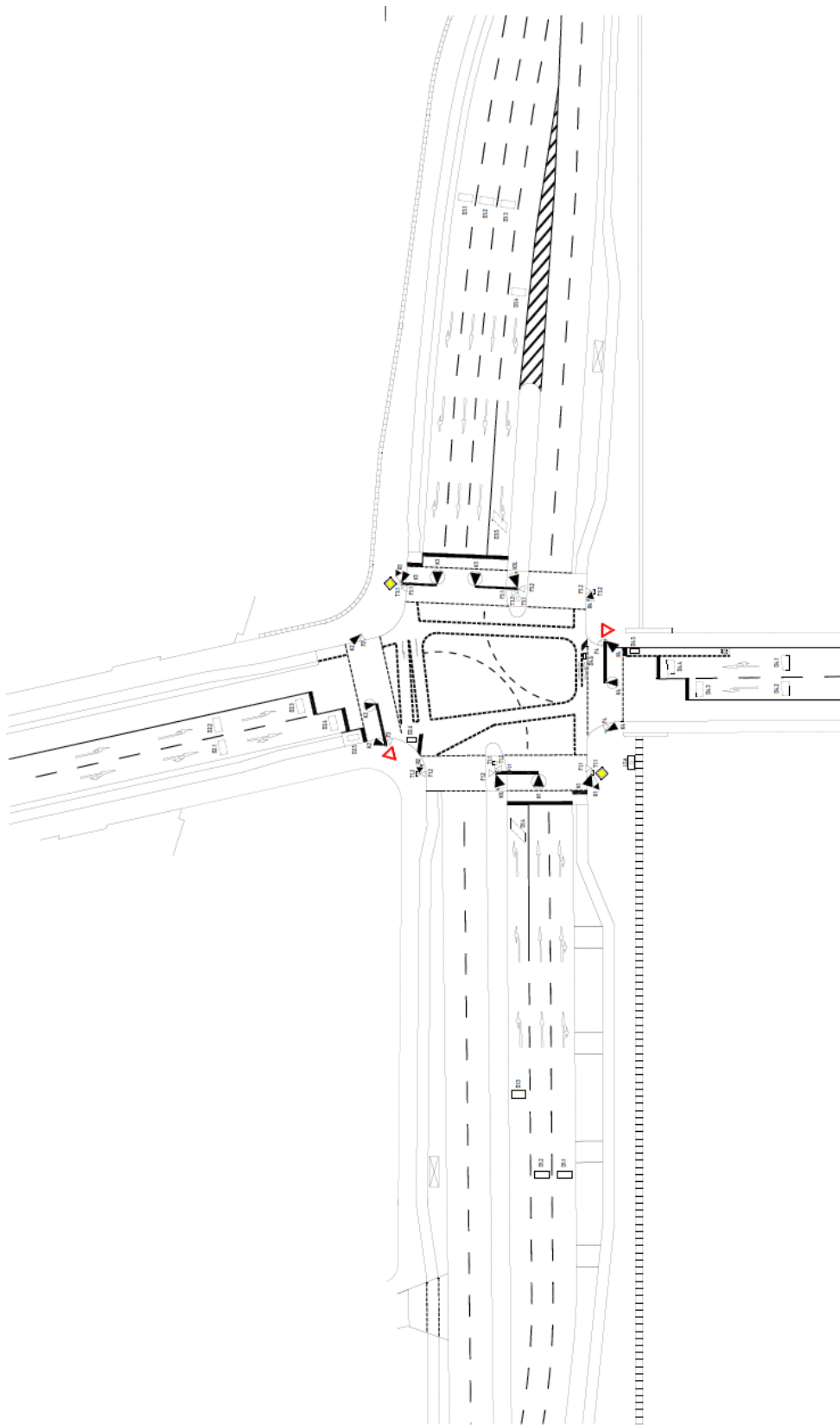
LISA

MIV - SZP 2 sehr hoch (TU=100) - Sehr hoch

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ts [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	N _{MS,95>N_K} [-]	nc [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	tw [s]	N _{GE} [Kfz]	N _{MS} [Kfz]	N _{MS,95} [Kfz]	L _s [m]	QSV [-]	Bemerkung
1	1	→	K1	48	49	52	0,490	950	26,389	1,800	2000	-	27	980	0,969	115,971	24,829	50,455	62,468	374,808	E	
	2	↵	K1	48	49	52	0,490	120	3,333	1,800	2000	-	27	980	0,122	14,115	0,077	1,885	4,207	25,242	A	
2	1	←	K2	68	69	32	0,690	950	26,389	1,800	2000	-	38	1380	0,688	13,145	1,532	17,106	24,101	144,606	A	
	2	↵	K2L	17	18	83	0,180	270	7,500	1,800	2000	x	10	360	0,750	59,997	2,113	9,223	14,359	86,154	D	
	1+2		K2, K2L					1220	33,889	1,800	2000	-	32	1149	1,062	207,131	59,327	93,216	109,545	657,270	F	
3	1	↔	K3	18	19	82	0,190	340	9,444	1,800	2000	-	10	357	0,952	143,492	10,201	19,548	27,025	162,150	E	
Knotenpunktsummen:								2630						3697								
Gewichtete Mittelwerte:															0,805	69,312						
TU = 100 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																						

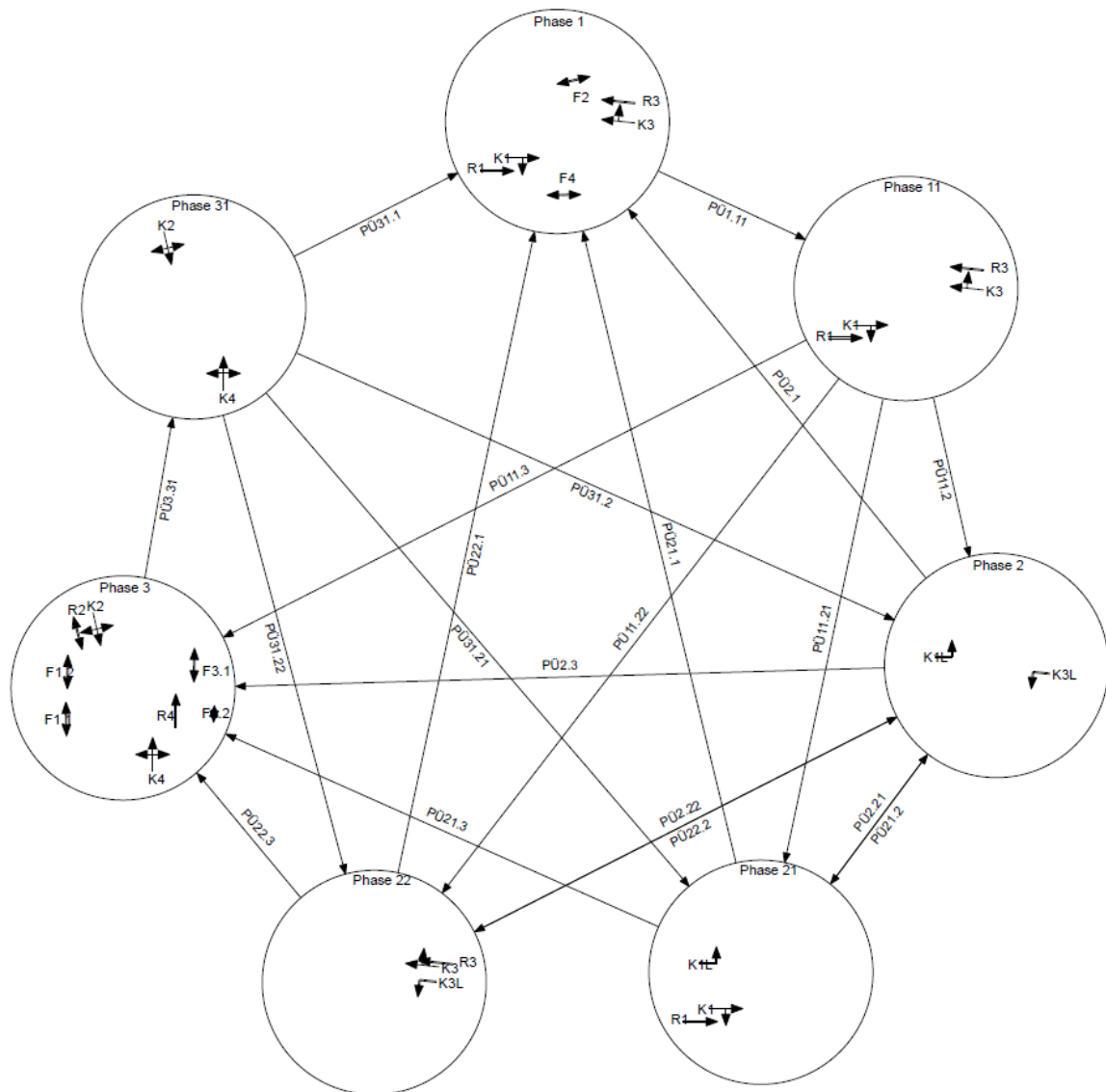
B Knoten 2 innerorts (4-armig)

B.1 Lageplan



B.2 Steuerung

Phasenfolge

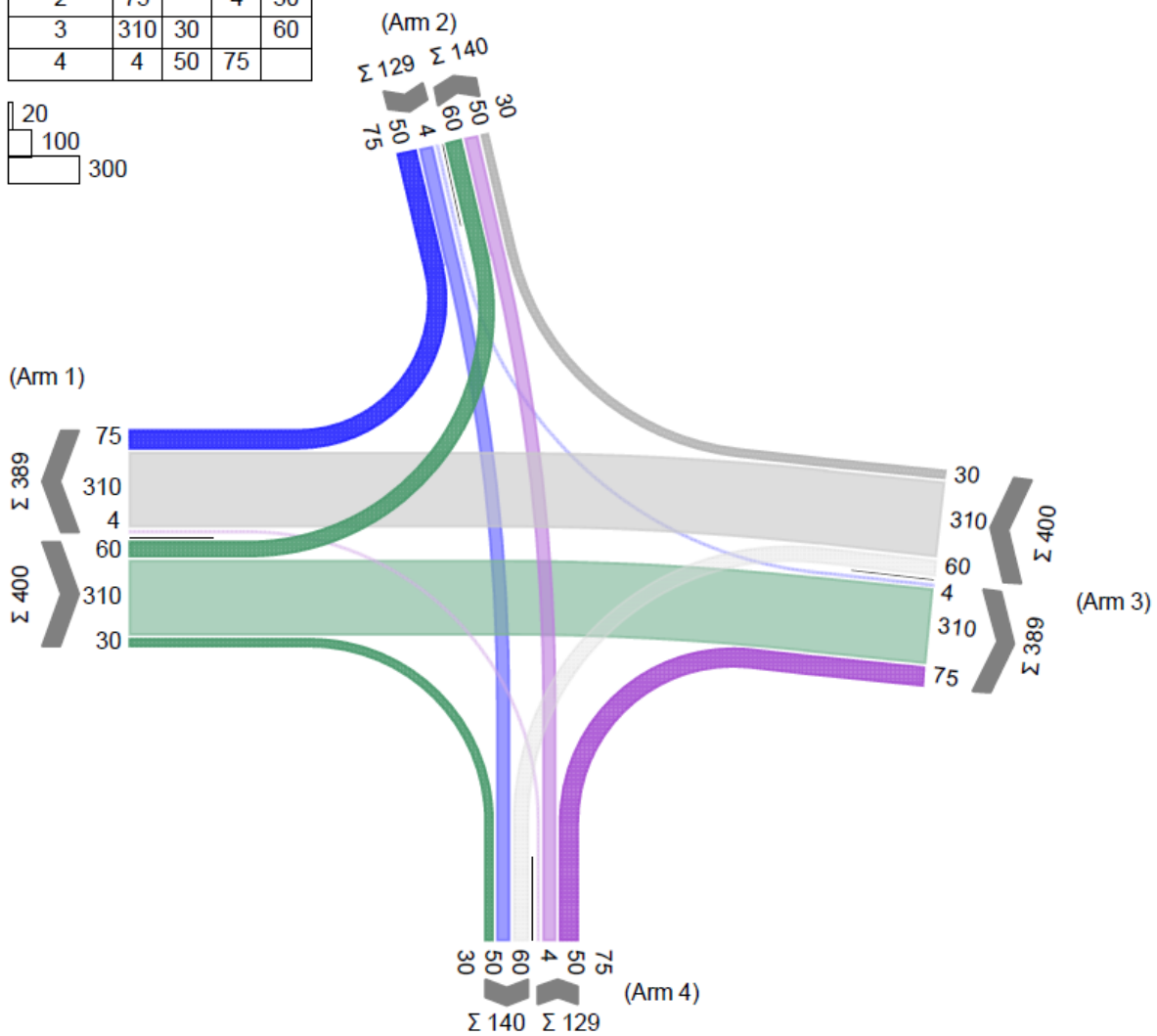
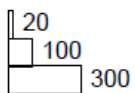


B.2 Belastungsszenarien und Signalzeitenpläne mit HBS-Bewertung

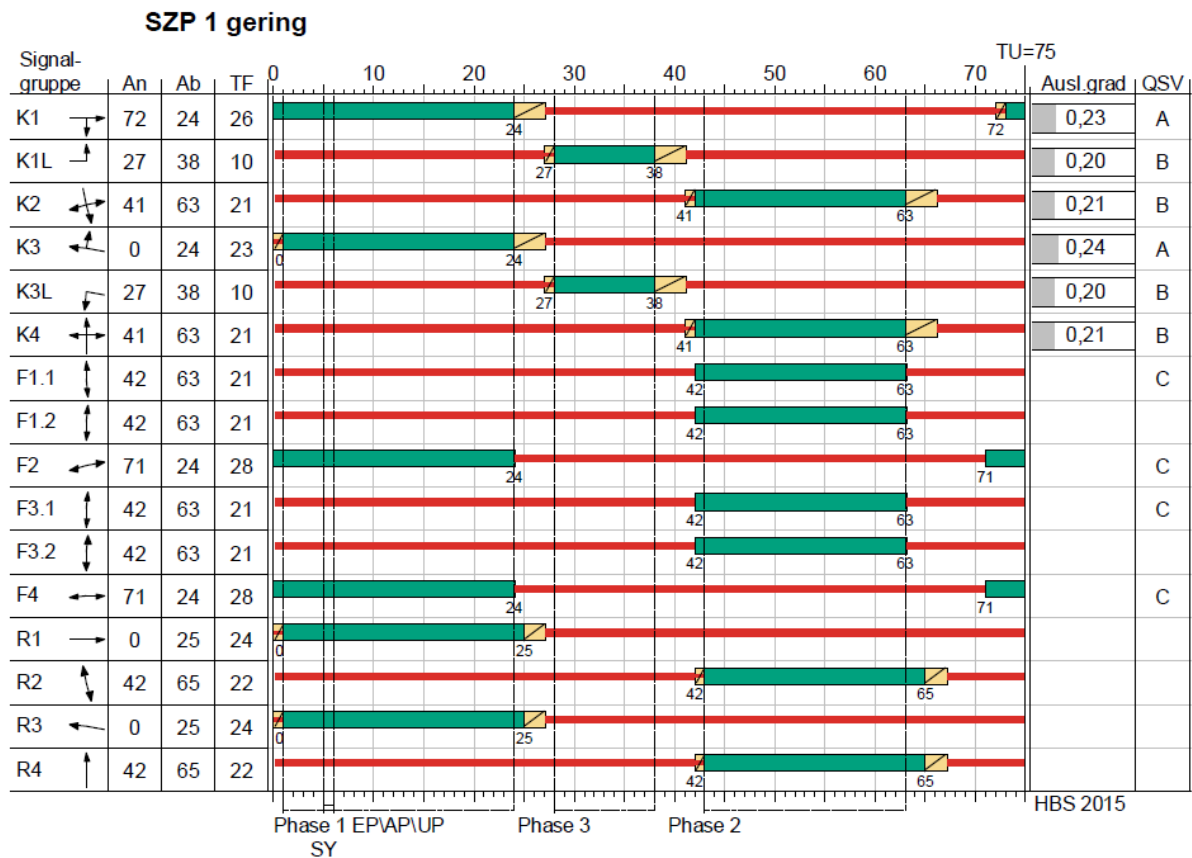
Belastung Gering

Gering

von\nach	1	2	3	4
1		60	310	30
2	75		4	50
3	310	30		60
4	4	50	75	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung – Gering)



HBS-Bewertung 2015

LISA

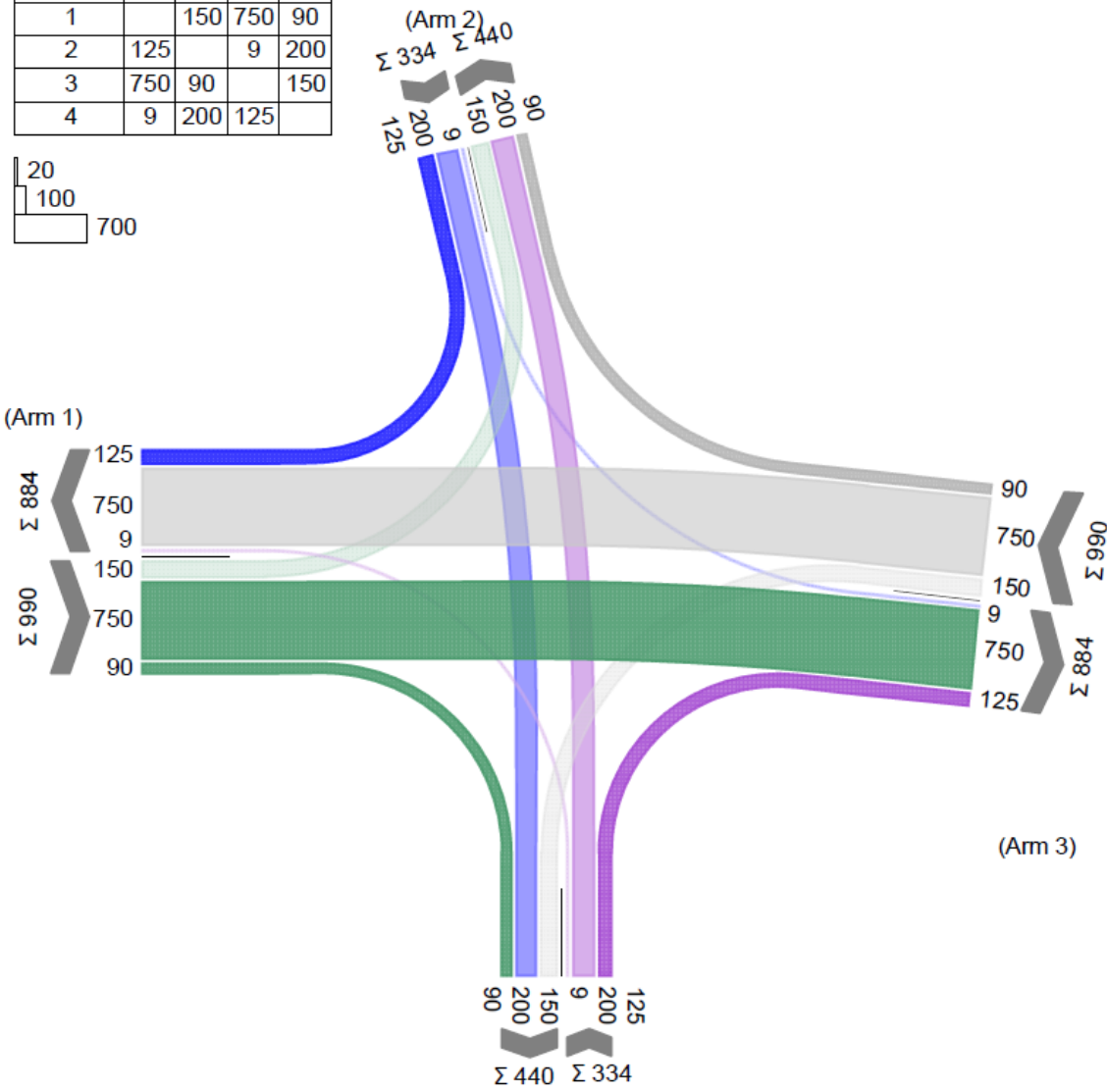
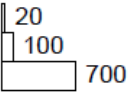
MIV - SZP 1 gering (TU=75) - Gering

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tf [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	tb [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	NMS _{95>nk} [-]	nc [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	tw [s]	N _{GE} [Kfz]	N _{MS} [Kfz]	N _{MS,95} [Kfz]	L _x [m]	QSV [-]	Bemerkung
1	3		K1L	10	11	65	0,147	60	1,250	1,800	2000	-	6	294	0,204	29,892	0,144	1,243	3,129	18,774	B	
	2		K1	26	27	49	0,360	167	3,479	1,800	2000	-	15	720	0,232	17,615	0,171	2,601	5,329	31,974	A	
	1		K1	26	27	49	0,360	168	3,500	1,800	2000	-	15	720	0,233	17,626	0,172	2,617	5,353	32,118	A	
2	1		K2	21	22	54	0,293	117	2,438	1,800	2000	-	12	564	0,207	21,469	0,147	2,006	4,401	26,406	B	
	2		K2	21	22	54	0,293	4	0,083	1,800	2000	-	8	385	0,010	24,525	0,006	0,073	0,530	3,180	B	
3	1		K3	23	24	52	0,320	30	0,625	1,800	2000	-	13	640	0,047	17,757	0,027	0,458	1,603	9,618	A	
	2		K3	23	24	52	0,320	153	3,188	1,800	2000	-	13	640	0,239	19,777	0,178	2,525	5,212	31,272	A	
	3		K3	23	24	52	0,320	152	3,167	1,800	2000	-	13	640	0,237	19,753	0,176	2,506	5,183	31,098	A	
	4		K3L	10	11	65	0,147	60	1,250	1,800	2000	-	6	294	0,204	29,892	0,144	1,243	3,129	18,774	B	
4	2		K4	21	22	54	0,293	4	0,083	1,800	2000	-	8	385	0,010	24,525	0,006	0,073	0,530	3,180	B	
	1		K4	21	22	54	0,293	117	2,438	1,800	2000	-	12	564	0,207	21,469	0,147	2,006	4,401	26,406	B	
Knotenpunktsummen:								1032						5846								
Gewichtete Mittelwerte:															0,218	20,611						
TU = 75 s T = 3600 s Instanzenaritätsfaktor = 1,1																						

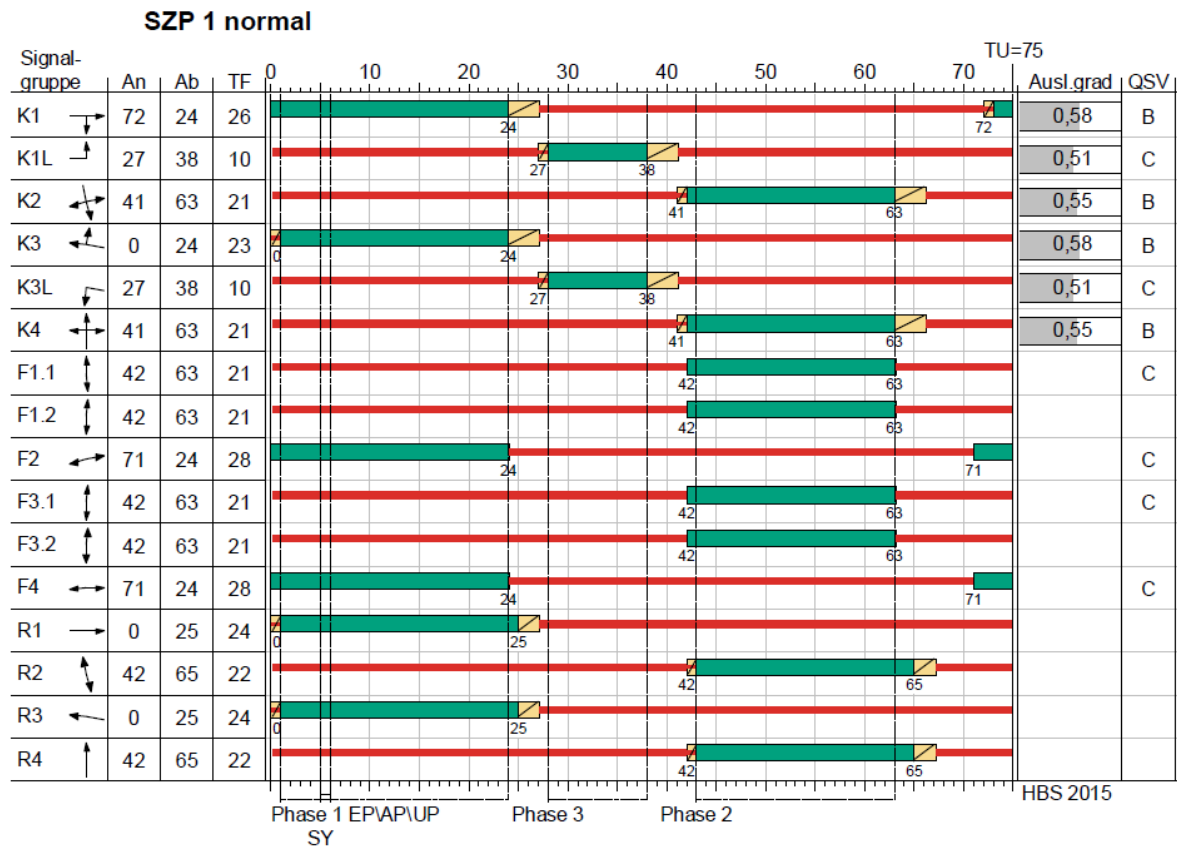
Belastung Normal

Normal

von\nach	1	2	3	4
1		150	750	90
2	125		9	200
3	750	90		150
4	9	200	125	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung – Normal)



HBS-Bewertung 2015

LISA

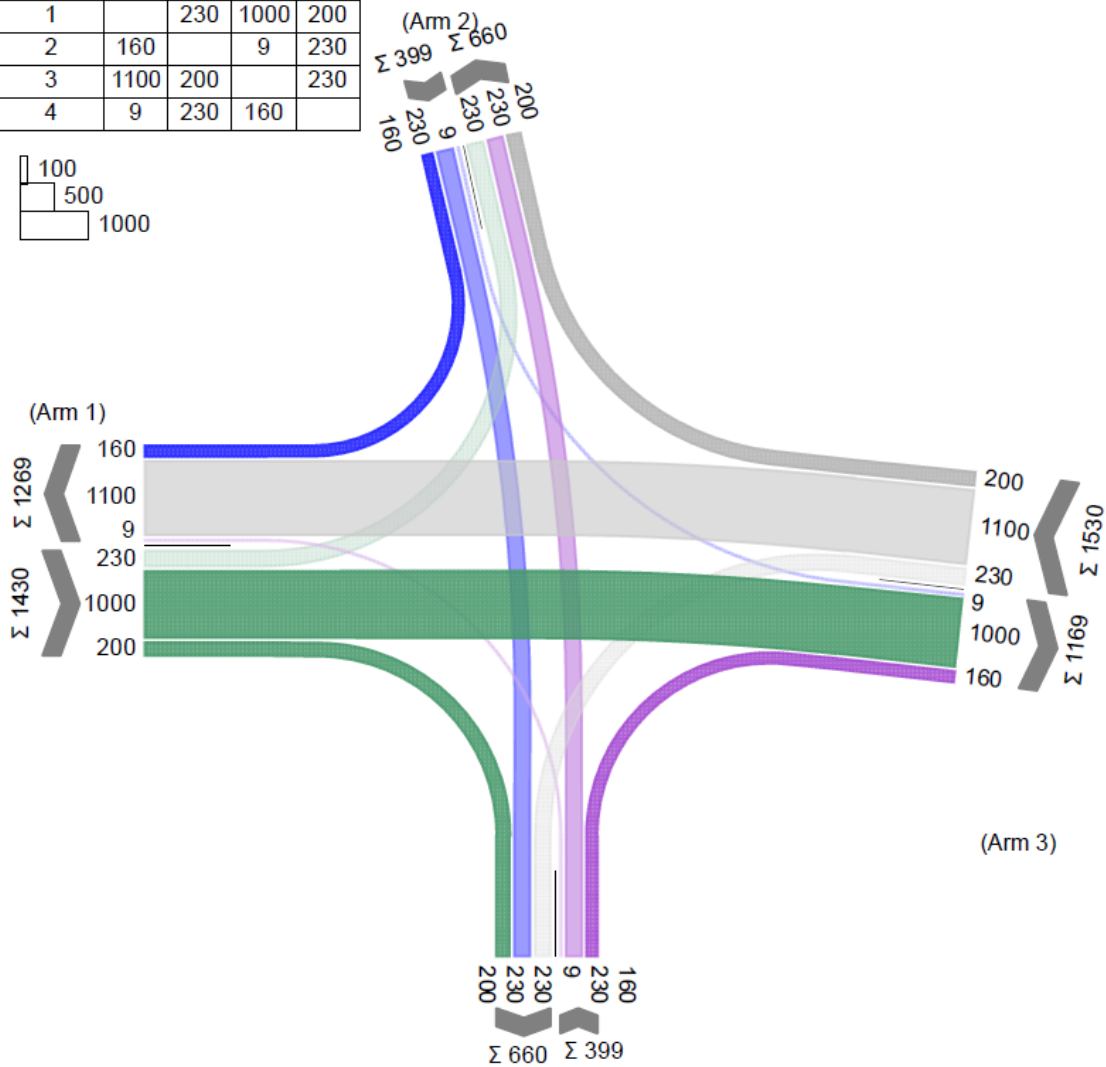
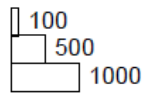
MIV - SZP 1 normal (TU=75) - Normal

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	tu [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	NMS,95>nk [-]	nc [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	tw [s]	Nge [Kfz]	NMS [Kfz]	NMS,95 [Kfz]	Lv [m]	QSV [-]	Bemerkung
1	3		K1L	10	11	65	0,147	150	3,125	1,800	2000	-	6	294	0,510	37,187	0,628	3,510	6,679	40,074	C	
	2		K1	26	27	49	0,360	415	8,646	1,800	2000	-	15	720	0,576	23,653	0,855	7,836	12,570	75,420	B	
	1		K1	26	27	49	0,360	415	8,646	1,800	2000	-	15	720	0,576	23,653	0,855	7,836	12,570	75,420	B	
2	1		K2	21	22	54	0,293	315	6,563	1,800	2000	-	12	569	0,554	27,692	0,771	6,347	10,608	63,648	B	
	2		K2	21	22	54	0,293	9	0,188	1,800	2000	-	5	251	0,036	29,077	0,021	0,186	0,915	5,490	B	
3	1		K3	23	24	52	0,320	90	1,875	1,800	2000	-	13	640	0,141	18,677	0,092	1,427	3,447	20,682	A	
	2		K3	23	24	52	0,320	371	7,729	1,800	2000	-	13	640	0,580	26,186	0,870	7,324	11,901	71,406	B	
	3		K3	23	24	52	0,320	370	7,708	1,800	2000	-	13	640	0,578	26,124	0,862	7,293	11,860	71,160	B	
	4		K3L	10	11	65	0,147	150	3,125	1,800	2000	-	6	294	0,510	37,187	0,628	3,510	6,679	40,074	C	
4	2		K4	21	22	54	0,293	9	0,188	1,800	2000	-	5	251	0,036	29,077	0,021	0,186	0,915	5,490	B	
	1		K4	21	22	54	0,293	315	6,563	1,800	2000	-	12	569	0,554	27,692	0,771	6,347	10,608	63,648	B	
Knotenpunktssummen:								2609						5588								
Gewichtete Mittelwerte:															0,545	26,761						
TU = 75 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																						

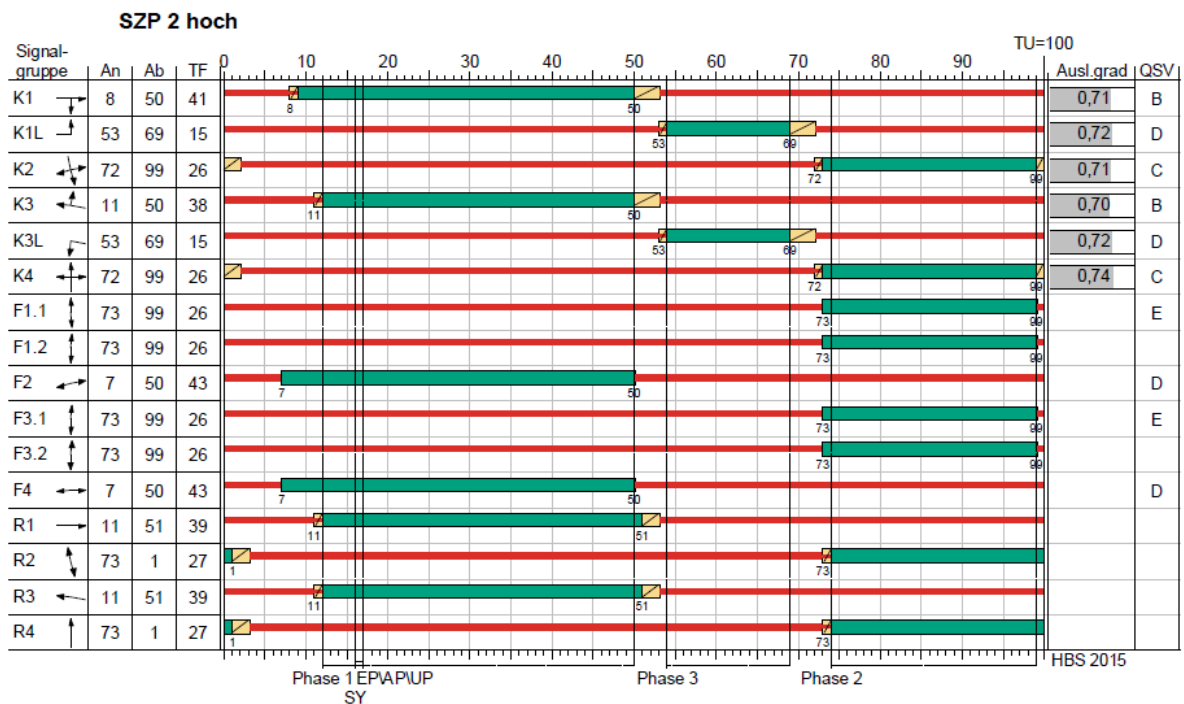
Belastung Hoch

Hoch

von\nach	1	2	3	4
1		230	1000	200
2	160		9	230
3	1100	200		230
4	9	230	160	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung – Hoch)



HBS-Bewertung 2015

LISA

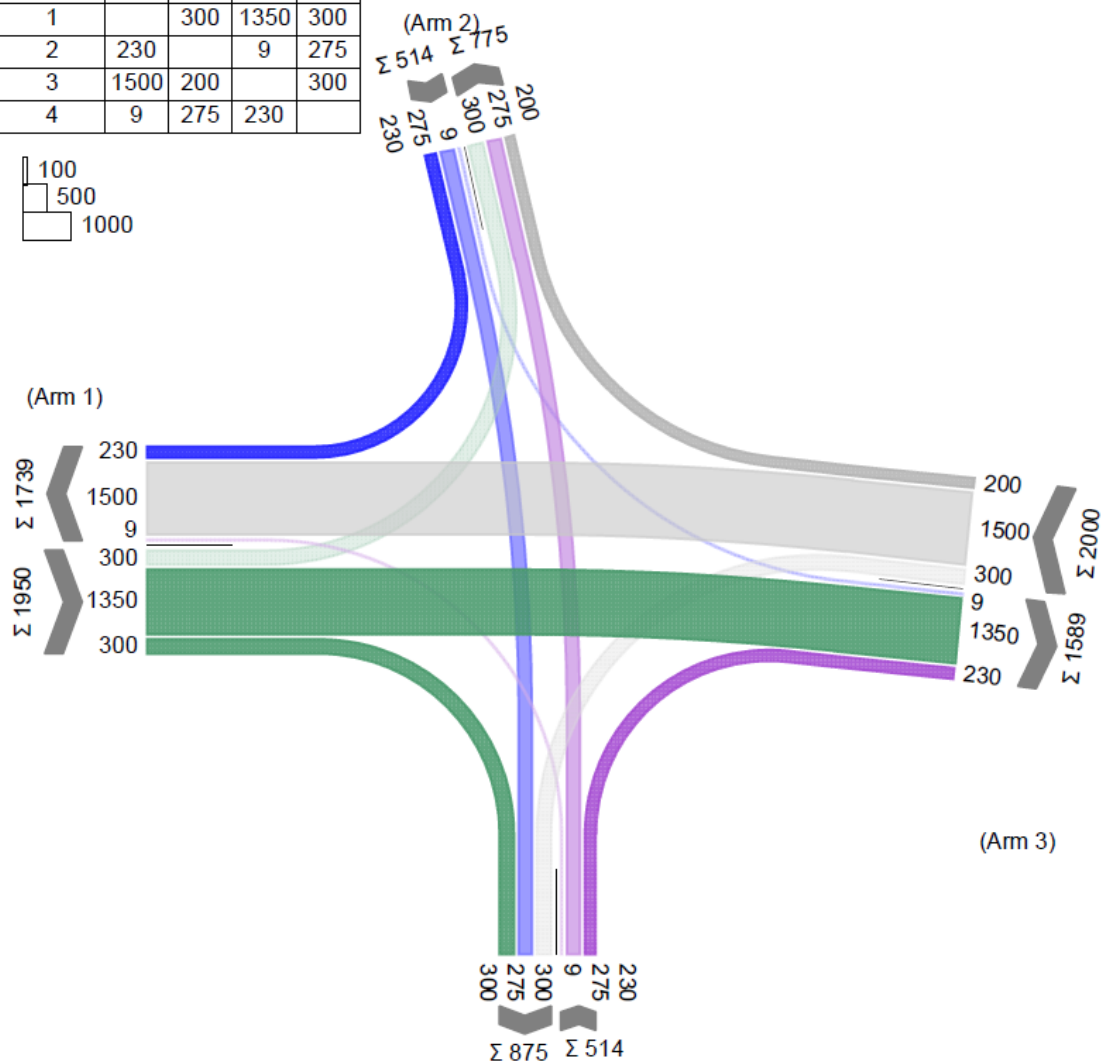
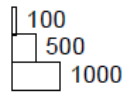
MIV - SZP 2 hoch (TU=100) - Hoch

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	t _f [s]	t _a [s]	t _s [s]	f _a [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	t _b [s/Kfz]	q _s [Kfz/h]	N _{M5,95>nK} [-]	n _c [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	t _w [s]	N _{GE} [Kfz]	N _{M5} [Kfz]	N _{M5,95} [Kfz]	L _x [m]	QSV [-]	Bemerkung	
1	3		K1L	15	16	85	0,160	230	6,389	1,800	2000	-	9	320	0,719	59,396	1,736	7,800	12,523	75,138	D		
	2		K1	41	42	59	0,420	597	16,583	1,800	2000	-	23	840	0,711	31,430	1,738	15,451	22,099	132,594	B		
	1		K1	41	42	59	0,420	596	16,556	1,800	2000	-	23	840	0,710	31,368	1,727	15,409	22,048	132,288	B		
2	1		K2	26	27	74	0,270	385	10,694	1,800	2000	-	15	540	0,713	44,524	1,729	11,397	17,107	102,642	C		
	2		K2	26	27	74	0,270	9	0,250	1,800	2000	-	4	159	0,057	43,261	0,033	0,264	1,133	6,798	C		
3	1		K3	38	39	62	0,390	200	5,556	1,800	2000	-	22	780	0,256	21,574	0,196	3,961	7,327	43,962	B		
	2		K3	38	39	62	0,390	546	15,167	1,800	2000	-	22	780	0,700	33,082	1,623	14,349	20,755	124,530	B		
	3		K3	38	39	62	0,390	546	15,167	1,800	2000	-	22	780	0,700	33,082	1,623	14,349	20,755	124,530	B		
	4		K3L	15	16	85	0,160	230	6,389	1,800	2000	-	9	320	0,719	59,396	1,736	7,800	12,523	75,138	D		
4	2		K4	26	27	74	0,270	9	0,250	1,800	2000	-	4	159	0,057	43,261	0,033	0,264	1,133	6,798	C		
	1		K4	26	27	74	0,270	385	10,694	1,800	2000	-	15	524	0,735	47,309	1,977	11,752	17,550	105,300	C		
Knotenpunktsummen:								3733						6042									
Gewichtete Mittelwerte:															0,684	37,867							
				TU = 100 s T = 3600 s Instanzenaritätsfaktor = 1,1																			

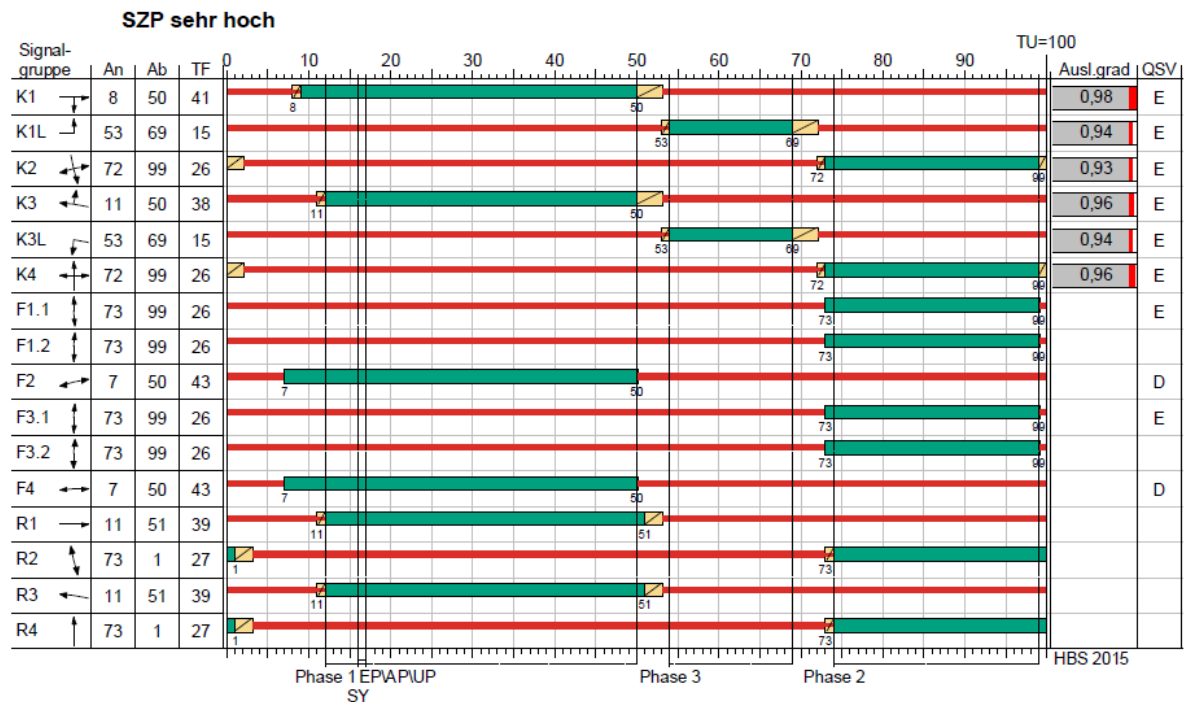
Belastung - Sehr Hoch

Sehr hoch

von\nach	1	2	3	4
1		300	1350	300
2	230		9	275
3	1500	200		300
4	9	275	230	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung - Sehr Hoch)



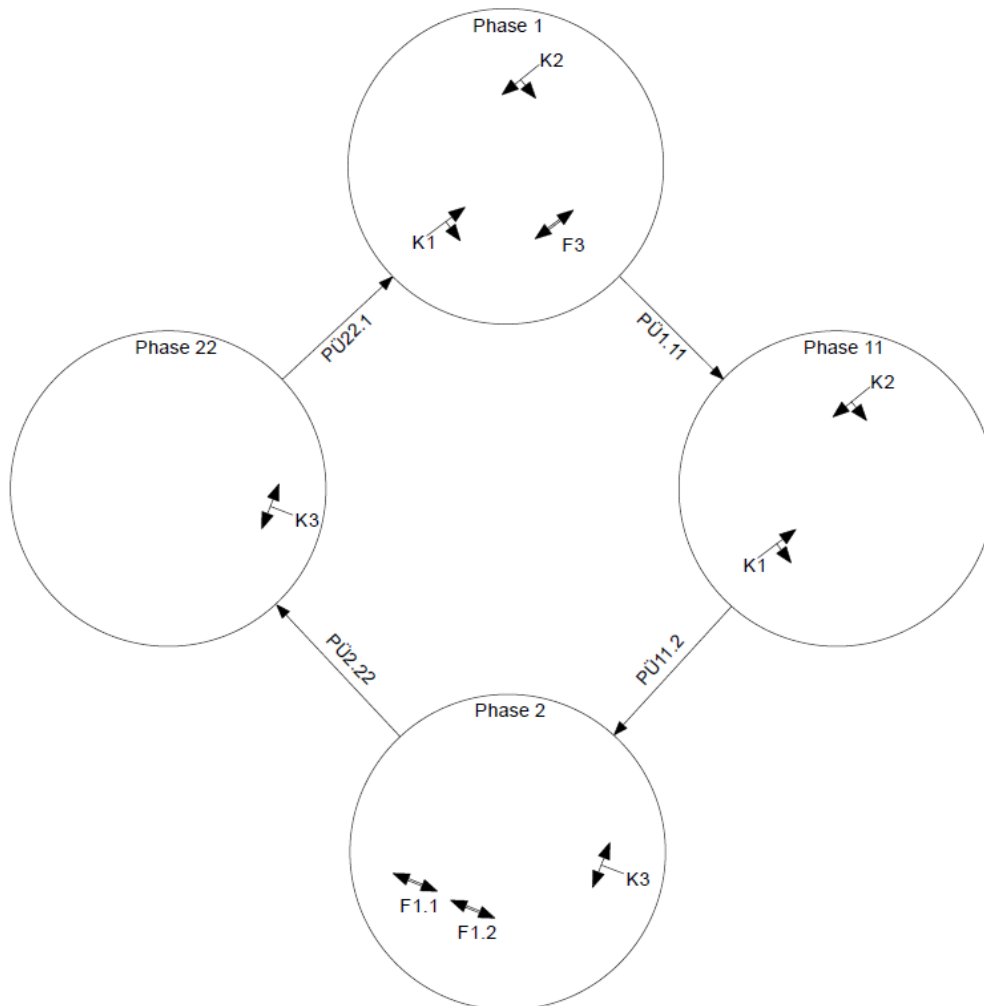
HBS-Bewertung 2015

MIV - SZP sehr hoch (TU=100) - Sehr hoch

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	tb [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	N _{M5,95>nc} [-]	nc [Kfz/U]	C [Kfz/h]	x	tw [s]	N _{ge} [Kfz]	N _{ms} [Kfz]	N _{M5,95} [Kfz]	L _x [m]	QSV [-]	Bemerkung
1	3		K1L	15	16	85	0,160	300	8,333	1,800	2000	-	9	320	0,938	137,698	8,550	16,786	23,715	142,290	E	
	2		K1	41	42	59	0,420	820	22,778	1,800	2000	-	23	840	0,976	129,198	23,495	45,884	57,340	344,040	E	
	1		K1	41	42	59	0,420	820	22,778	1,800	2000	-	23	839	0,977	130,187	23,693	46,098	57,581	345,486	E	
2	1		K2	26	27	74	0,270	500	13,889	1,800	2000	-	15	540	0,926	105,561	10,505	24,024	32,313	193,878	E	
	2		K2	26	27	74	0,270	9	0,250	1,800	2000	-	3	90	0,100	48,287	0,062	0,302	1,231	7,386	C	
3	1		K3	38	39	62	0,390	200	5,556	1,800	2000	-	22	780	0,256	21,574	0,196	3,961	7,327	43,962	B	
	2		K3	38	39	62	0,390	745	20,694	1,800	2000	-	22	780	0,955	112,802	18,017	38,133	48,577	291,462	E	
	3		K3	38	39	62	0,390	744	20,667	1,800	2000	-	22	780	0,954	111,926	17,831	37,907	48,320	289,920	E	
	4		K3L	15	16	85	0,160	300	8,333	1,800	2000	-	9	320	0,938	137,698	8,550	16,786	23,715	142,290	E	
4	2		K4	26	27	74	0,270	9	0,250	1,800	2000	-	3	100	0,090	47,309	0,055	0,294	1,211	7,266	C	
	1		K4	26	27	74	0,270	500	13,889	1,800	2000	-	14	519	0,963	136,715	14,444	28,155	37,129	222,774	E	
Knotenpunktsummen:								4947							5908							
Gewichtete Mittelwerte:															0,926	119,050						
				TU = 100 s T = 3600 s Instationsaritätsfaktor = 1,1																		

C.2 Steuerung

Phasenfolge

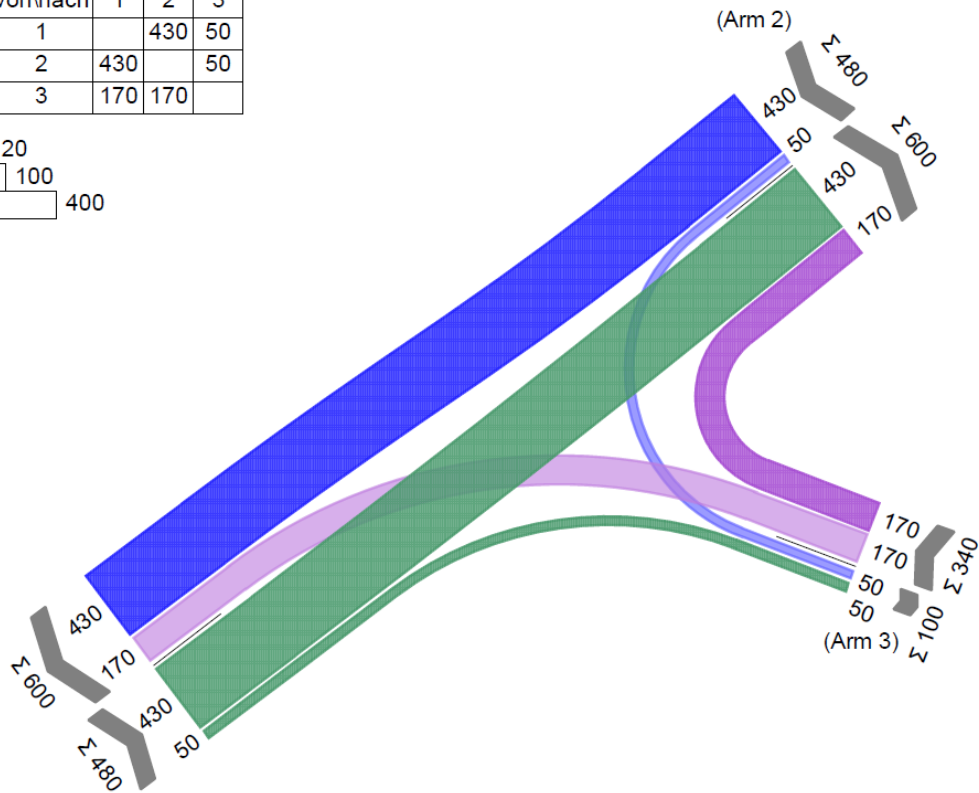
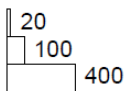


C.3 Belastungsszenarien und Signalzeitenpläne mit HBS-Bewertung

Belastung Gering

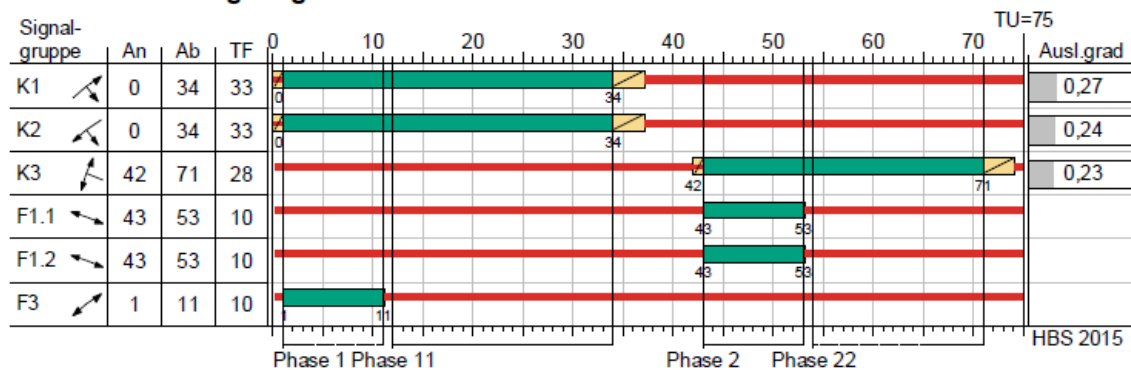
Gering

von\nach	1	2	3
1		430	50
2	430		50
3	170	170	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung – Gering)

SZP 1 gering



HBS-Bewertung 2015

LISA

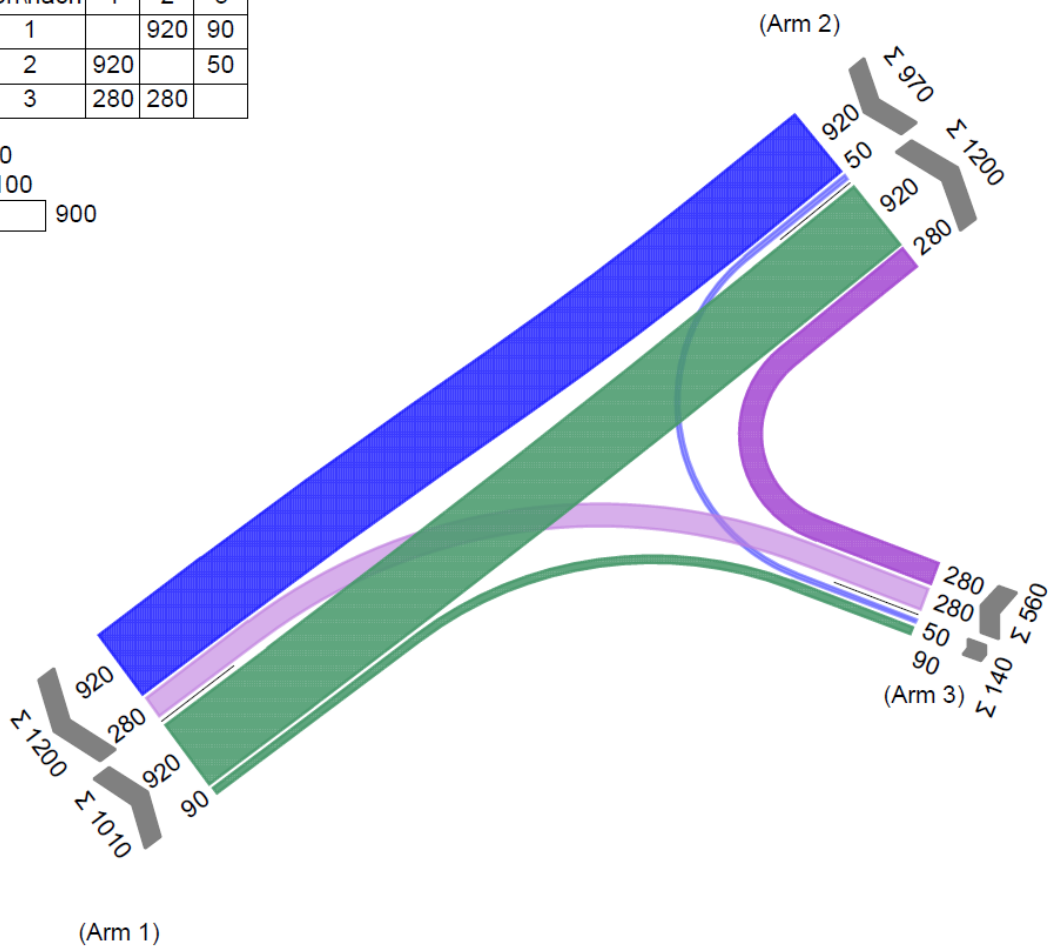
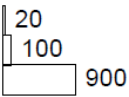
MIV - SZP 1 gering (TU=75) - Gering

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ta [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	C [Kfz/h]	nc [Kfz/U]	Nge [Kfz]	Nms [Kfz]	Nms,as [Kfz]	Lx [m]	Pocket lane length [m]	Nms,as>nc [-]	x	tw [s]	QSV [-]	Bemerkung
1	2		K1	33	34	42	0,453	241	5,021	1,800	2000	906	19	0,207	3,330	6,416	38,496		-	0,266	13,581	A	
	1		K1	33	34	42	0,453	239	4,979	1,800	2000	899	19	0,207	3,318	6,399	38,394		-	0,266	13,715	A	
	1		K2	33	34	42	0,453	215	4,479	1,800	2000	906	19	0,176	2,921	5,811	34,866		-	0,237	13,269	A	
2	2		K2	33	34	42	0,453	215	4,479	1,800	2000	906	19	0,176	2,921	5,811	34,866		-	0,237	13,269	A	
	3		K2	33	34	42	0,453	50	1,042	1,800	2000	391	8	0,082	0,941	2,582	15,492		-	0,128	25,619	B	
3	1		K3	28	29	47	0,387	170	3,542	1,800	2000	774	16	0,159	2,532	5,223	31,338	35,000	-	0,220	16,143	A	
	2		K3	28	29	47	0,387	170	3,542	1,800	2000	740	15	0,169	2,608	5,339	32,034		-	0,230	17,090	A	
Knotenpunktsummen:								1300				5522											
Gewichtete Mittelwerte:																				0,239	15,029		
TU = 75 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																							

Belastung Normal

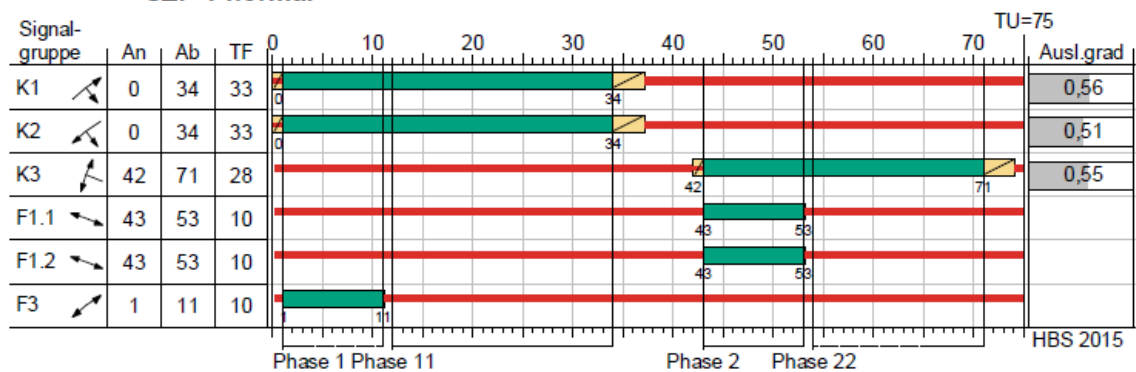
Normal

von\nach	1	2	3
1		920	90
2	920		50
3	280	280	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung – Normal)

SZP 1 normal



HBS-Bewertung 2015

USA

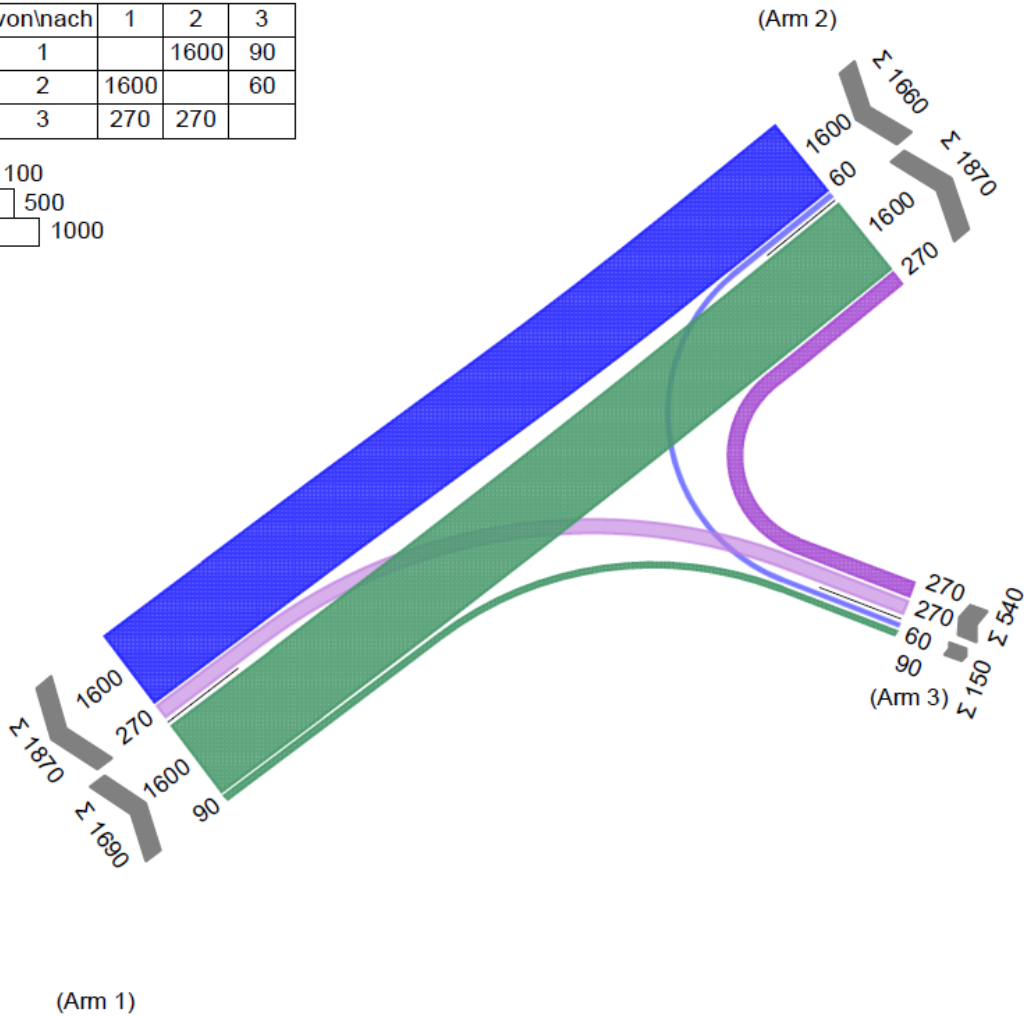
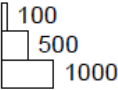
MIV - SZP 1 normal (TU=75) - Normal

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ts [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	C [Kfz/h]	nc [Kfz/U]	Nag [Kfz]	Nms [Kfz]	Nms,ss [Kfz]	Lx [m]	Pocket lane length [m]	Nms,ss>nk [-]	x	tw [s]	QSV [-]	Bemerkung
1	2		K1	33	34	42	0,453	507	10,563	1,800	2000	906	19	0,796	8,538	13,480	80,880	-	-	0,560	18,197	A	
	1		K1	33	34	42	0,453	503	10,479	1,800	2000	899	19	0,796	8,501	13,432	80,592	-	-	0,560	18,353	A	
2	1		K2	33	34	42	0,453	460	9,583	1,800	2000	906	19	0,630	7,439	12,052	72,312	-	-	0,508	17,077	A	
	2		K2	33	34	42	0,453	460	9,583	1,800	2000	906	19	0,630	7,439	12,052	72,312	-	-	0,508	17,077	A	
	3		K2	33	34	42	0,453	50	1,042	1,800	2000	222	5	0,164	1,114	2,899	17,394	-	-	0,225	33,055	B	
3	1		K3	28	29	47	0,387	280	5,833	1,800	2000	774	16	0,330	4,488	8,071	48,426	35,000	x	0,362	17,922	A	
	2		K3	28	29	47	0,387	280	5,833	1,800	2000	733	15	0,367	4,656	8,305	49,830	-	-	0,382	19,249	A	
	1+2		K3					560	11,667	1,800	2000	1027	21	0,744	8,620	13,585	81,510	-	-	0,545	14,912	A	
Knotenpunktsummen:								2540				4572											
Gewichtete Mittelwerte:																				0,495	18,347		
TU = 75 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																							

Belastung Hoch

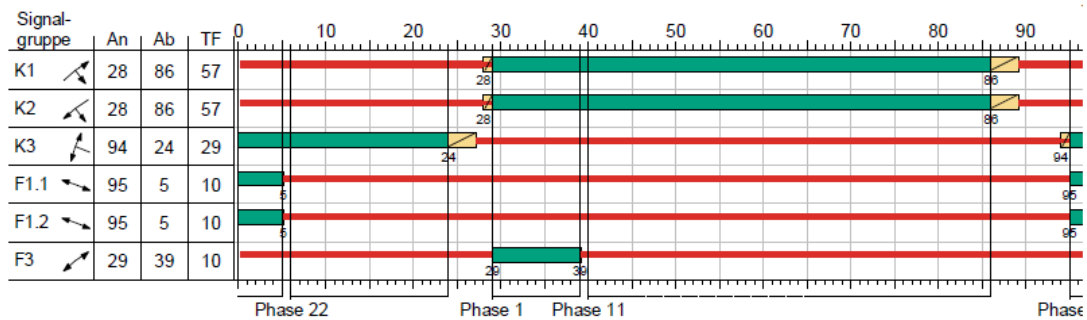
Hoch

von\nach	1	2	3
1		1600	90
2	1600		60
3	270	270	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung – Hoch)

SZP 2 hoch



HBS-Bewertung 2015

USA

MIV - SZP 2 hoch (TU=100) - Hoch

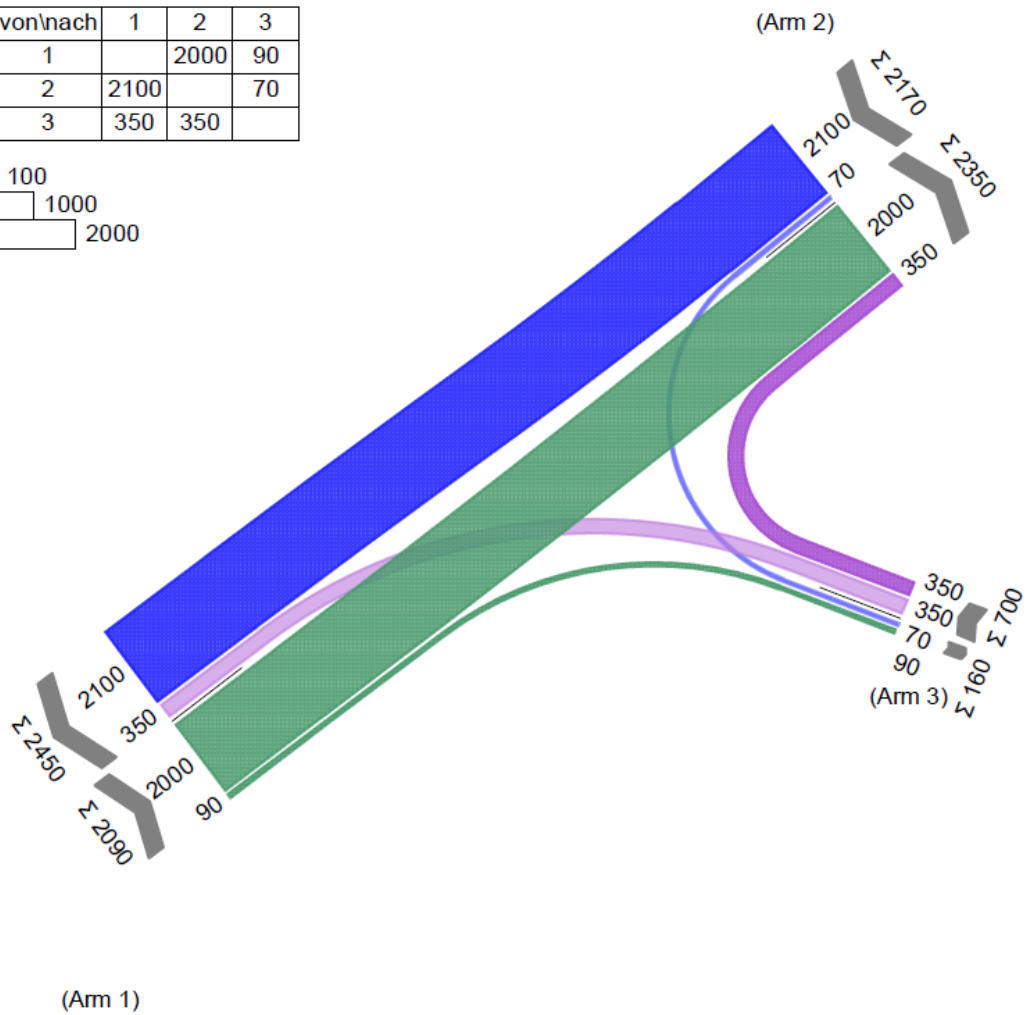
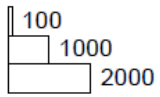
Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ti [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ta [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	C [Kfz/h]	nc [Kfz/U]	N _{0E} [Kfz]	N _{0S} [Kfz]	N _{0LH} [Kfz]	L _s [m]	Pocket lane length [m]	N _{0LH} >N _{0E} [-]	x	tw [s]	QSV [-]	Bemerkung
1	2		K1	57	58	43	0,580	846	23,500	1,800	2000	1160	32	1,966	19,066	26,451	158,706		-	0,729	21,382	B	
	1		K1	57	58	43	0,580	844	23,444	1,800	2000	1156	32	1,979	19,094	26,484	158,904		-	0,730	21,567	B	
2	1		K2	57	58	43	0,580	800	22,222	1,800	2000	1160	32	1,545	17,106	24,101	144,606		-	0,690	19,500	A	
	2		K2	57	58	43	0,580	800	22,222	1,800	2000	1160	32	1,545	17,106	24,101	144,606		-	0,690	19,500	A	
	3		K2	57	58	43	0,580	60	1,667	1,800	2000	138	4	0,449	2,049	4,470	26,820		-	0,435	56,392	D	
3	1		K3	29	30	71	0,300	270	7,500	1,800	2000	600	17	0,487	6,556	10,886	65,316	35,000	x	0,450	31,246	B	
	2		K3	29	30	71	0,300	270	7,500	1,800	2000	562	16	0,555	6,788	11,194	67,164		-	0,480	33,433	B	
	1+2		K3					540	15,000	1,800	2000	787	22	1,497	13,954	20,272	121,632		-	0,686	32,011	B	
Knotenpunktsummen:								3890				5336											
Gewichtete Mittelwerte:																				0,674	22,861		

TU = 100 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1

Belastung - Sehr Hoch

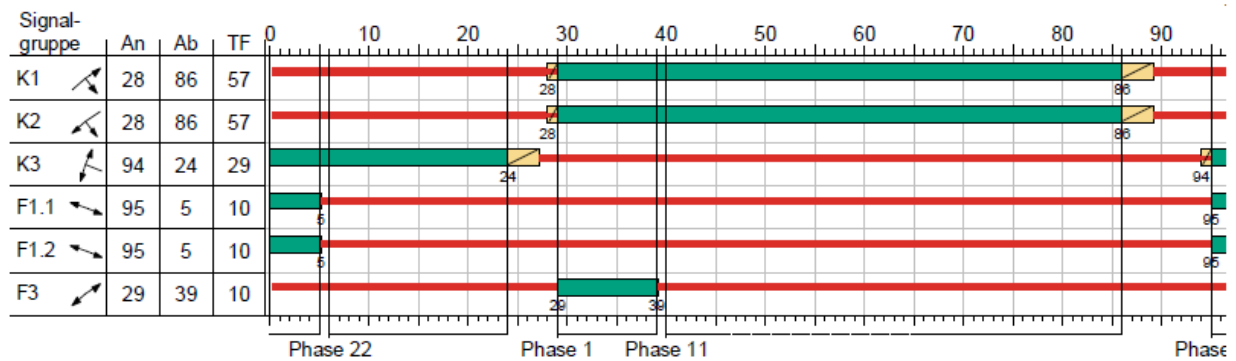
Sehr hoch

von\nach	1	2	3
1		2000	90
2	2100		70
3	350	350	



Signalzeitenplan und HBS-Bewertung (Belastung - Sehr Hoch)

SZP 2 sehr hoch



HBS-Bewertung 2015

LISA

MIV - SZP 2 sehr hoch (TU=100) - Sehr hoch

Zuf	Fstr.Nr.	Symbol	SGR	tr [s]	ta [s]	ts [s]	fa [-]	q [Kfz/h]	m [Kfz/U]	ts [s/Kfz]	qs [Kfz/h]	C [Kfz/h]	nc [Kfz/U]	N _{GE} [Kfz]	N _{MS} [Kfz]	N _{MS,US} [Kfz]	L _r [m]	Pocket lane length [m]	N _{MS,US} >n _c [-]	x	tw [s]	QSV [-]	Bemerkung
1	2		K1	57	58	43	0,580	1047	29,083	1,800	2000	1160	32	11,848	37,496	47,852	287,112		-	0,903	55,289	D	
	1		K1	57	58	43	0,580	1043	28,972	1,800	2000	1156	32	11,655	37,199	47,514	285,084		-	0,902	54,899	D	
2	1		K2	57	58	43	0,580	1050	29,167	1,800	2000	1160	32	12,205	37,989	48,413	290,478		-	0,905	56,443	D	
	2		K2	57	58	43	0,580	1050	29,167	1,800	2000	1160	32	12,205	37,989	48,413	290,478		-	0,905	56,443	D	
	3		K2	57	58	43	0,580	70	1,944	1,800	2000	102	3	1,303	3,215	6,247	37,482		-	0,686	92,651	E	
3	1		K3	29	30	71	0,300	350	9,722	1,800	2000	600	17	0,881	9,129	14,239	85,434	35,000	x	0,583	34,979	B	
	2		K3	29	30	71	0,300	350	9,722	1,800	2000	557	15	1,093	9,592	14,830	88,980		-	0,628	38,578	C	
	1+2		K3					700	19,444	1,800	2000	784	22	8,745	26,935	35,712	214,272		-	0,893	68,594	D	
Knotenpunktsummen:								4960				5295											
Gewichtete Mittelwerte:																				0,862	53,864		
TU = 100 s T = 3600 s Instationaritätsfaktor = 1,1																							

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2023

V 372: Autonome Systeme für Straßenbetriebsdienste (AETAS BAB)

Lüpges, Kleer, Holldorb, Zielke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 373: Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen

Jakobs, Schneider, Toenges-Schuller, Düring, Hoffmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation

Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 376: Innovative Datenerfassung und -nutzung im Straßenbetriebsdienst

Hess, Best, Lohmeier, Temme

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2024

V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen

Geistefeldt, Hohmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 379: Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)

Holldorb, Riel, Wiesler, Cypra, März

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 380: Maßnahmen zum Umgang mit japanischem Staudenknöterich

Molder, Gaar, Münch, Alberternst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Lindner, Ruhnau, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 382: Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Ludwig, Tegeler, Schmedes, Tomhave, Hensel, Forster, Kleinhans, Heinrich, John, Schill

€ 19,50

V 383: Analyse und Entwicklung leistungsfähiger Einfahrtstypen ohne Fahrstreifenaddition für Autobahnen

Geistefeldt, Brandenburg, Sauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 384: Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen – Methoden zur Untersuchung und Metaanalyse
Maier, Leonhardt, Ehm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 385: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstraßen
Geistefeldt, Hohmann, Finkbeiner, Sauer, Vortisch, Buck, Weyland, Weiser, Giuliani
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2025

V 386: Pilothafte Anwendung des Bridge-WIM Verfahrens zur Ergänzung des Achslastmessstellennetzes
Firus, Petschacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 387: Akustische Wirksamkeit von Vegetation
Lindner, Schulze
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 388: Hochaufgelöste multisensorielle Verkehrsdaten in der Streckenbeeinflussung
Schwietering, Löffbering, Weinreis, Maier, Feldges
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 389: Lärmwetter in der Praxis – Erprobung und Weiterentwicklung der Methodik zur Anwendung meteorologischer Korrekturen auf die Schallausbreitung
Skowronek, Liepert, Müller, Schady, Elsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 390: Wirkung von Fahrstreifenbegrenzungen an Einfahrten von Autobahnen auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit
Geistefeldt, Sauer, Brandenburg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 391: Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien
Oehme, Böhm, Horn, Pourpart, Schweidler, Weinzierl, Fiebig, Schuck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 392: Evaluierung der Wirksamkeit bestehender Überflughilfen für Fledermäuse an Straßen
Albrecht, Reers, Scharf, Grimm, Radford, Namyslo, Günther, Martin, Behr
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 393: Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen
Schwietering, Löffbering, Abarghooie, Geistefeldt, Marnach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 394: Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)
Schenzielorz, Schneider, Künzelmann, Sautter, Höger
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
www.schuenemann-verlag.de
Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-839-3
<https://doi.org/10.60850/bericht-v394>

www.bast.de