



Johannes Roos

2018

**Teilsignalisierung von Knotenpunkten
- Untersuchungen zu Verkehrsablauf
und Einsatzmöglichkeiten -**

innovec
Institut für Mobilität & Verkehr

Grüne Reihe Nr. 73

Teilsignalisierung von Knotenpunkten - Untersuchungen zu Verkehrsablauf und Einsatzmöglich- lichkeiten -

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern zur Verleihung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation. Datum der mündlichen Prüfung: 2.2.2018

Verfasser

M.Sc., Dipl. Wirtsch.-Ing. (FH)
Johannes Roos

Erstgutachten

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrike Reutter

Zweitgutachten

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Vorsitzender der Prüfungskommission

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz

Dekan des Fachbereichs

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

Titelbild

Eigene Fotografie, Einmündung Schwabenheimer Weg / Industriestraße in Bad Kreuznach

Gesamtherstellung

Abteilung Foto-Repro-Druck
Technische Universität Kaiserslautern

Zitiervorschlag

Roos, Johannes (2018): Teilsignalisierung von Knotenpunkten - Untersuchungen zu Verkehrsablauf und Einsatzmöglichkeiten - , in: Grüne Reihe Nr. 73, herausgegeben von Wilko Manz, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern.

Kaiserslautern, Februar 2018

ISSN: 1613-5040

CC BY-NC-ND 4.0

D 386

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz

Institut für Mobilität & Verkehr
Institute for Mobility & Transport
Technische Universität Kaiserslautern
University of Kaiserslautern

Paul-Ehrlich-Straße 14
D-67663 Kaiserslautern

Tel.: 0631 / 205-3685

Fax: 0631 / 205-3905

E-Mail: info@imove-kl.de

www.imove-kl.de

Institut für Mobilität & Verkehr **imove**

 TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

Vorwort

Eine typische Verkehrssituation in einem Gewerbegebiet am Stadtrand ist die Einmündung einer Nebenstraße auf eine stärker befahrene Straße. In den Berufsverkehrszeiten herrschen Pendlerverkehre mit Personenkraftwagen und Fahrrädern vor, während in der Mittagszeit ein verstärkter Fußverkehr zu beobachten ist. Über den gesamten Tag verkehren zudem Lkw und Busse. Je nach Verkehrsbelastung, der baulich-räumlichen Struktur und den straßengeometrischen Gegebenheiten kommen hierfür üblicherweise als Verkehrsregelung „rechts vor links“, vorfahrtsregelnde Beschilderungen oder eine Lichtsignalanlage in Frage. Hauptkriterien für die Wahl der konkreten Regelung sind Verkehrssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastungen und die Verkehrsqualität.

Neben diesen überwiegend in Deutschland eingesetzten Regelungsarten ist seit einigen Jahren auch der Einsatz sogenannter „Teilsignalisierungen“ möglich. Wenn aufgrund der Verkehrsbelastung eine beschilderte Vorfahrtsregelung zumindest zeitweise zur Überlastung des Knotenpunktes führt, diese Belastungssituation eine Vollsignalisierung aber nicht rechtfertigt, kann der Hauptstrom mit einer Lichtsignalanlage geregelt werden während der Nebenstrom das „Vorfahrt gewähren“-Zeichen behält. Frühere Untersuchungen haben dieser verkehrstechnischen Lösung – unter bestimmten Bedingungen – bereits positive Wirkungen auf Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit bescheinigt, so dass sie in die aktuellen Regelwerke (FGSV: Richtlinien für Lichtsignalanlagen, 2010) grundsätzlich aufgenommen wurde. Was bislang aber noch fehlt, ist ein theoretischer Hintergrund mit Untersuchungen zu Ausprägung, Verkehrsablauf und daraus abgeleitet die Definition von Einsatzgrenzen.

Hier setzt die Dissertation von Herrn Johannes Roos an, mit der er am Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern zum Doktor-Ingenieur promoviert wurde: Er untersucht, unter welchen Bedingungen vorfahrtsregelte Einmündungen und Kreuzungen, die durch Kapazitäts- und Sicherheitsdefizite auffallen, mit einer Teilsignalisierung ausgestattet werden können und welche Wirkungen sich auf den Verkehrsablauf für Kfz und Fußgänger ergeben. Dazu typisiert er teilsignalisierte Knotenpunkte nach Ausbaustandards und signaltechnisch gesicherten Verkehrsbeziehungen, beschreibt theoretisch und empirisch, unterstützt durch zwei Feldversuche, sowie mittels systematisch angelegter mikroskopischer Verkehrsflusssimulation die Qualität des Verkehrsablaufs für eine Vielzahl von Einsatzfällen und leitet schließlich Einsatzbereiche für die Teilsignalisierung für verschiedene Ausbaustandards ab. Seine Ergebnisse sind für die Wissenschaft, die Praxis sowie auch für die künftige Fortschreibung von Regelwerken von sehr großem Wert.

Kaiserslautern / Wuppertal, im Februar 2018

Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz und Prof. Dr.-Ing Ulrike Reutter

Danksagung

Mit der Abgabe der vorliegenden Arbeit habe ich mir einen lange gehegten Wunsch erfüllt. Wie man berichtet hätten mich schon als Kind Themen rund um Transport und Verkehr fasziniert. Dies hält bis heute an und ich hoffe, dass die Begeisterung dafür mich auf meinem weiteren Berufsweg begleitet. Daran, dass ich eine hervorragende Ausbildung absolvieren konnte, die in dieser Dissertation ihren bisherigen Höhepunkt findet, haben viele Menschen Anteil. Dafür danke ich herzlich.

Meiner Familie dafür, dass sie mich während der schulischen und universitären Zeit unterstützt und angetrieben haben. Im Nachhinein betrachtet waren die zahlreichen Gespräche über den Fortschritt meiner Arbeit mit dafür verantwortlich, die dabei zwangsläufig auftretenden, schwierigen Phasen durchzustehen.

Meine beiden Betreuern Prof. Dr.-Ing. Ulrike Reutter und Prof. Dr. Ing. Manfred Boltze haben mich von Anfang an in meinem Vorhaben unterstützt, unbeeindruckt durch sich verändernde räumliche Distanzen, was ich sehr zu schätzen weiß. Sie standen mir mit ihrem fachlichen Rat zur Seite und hatten stets ein offenes Ohr für große und kleine, wirkliche und vermeintliche Probleme, die der Abfassung einer solchen Arbeit immanent sind. Die von Herrn Boltze ermöglichte Teilnahme am IDS war eine Erfahrung, die ich nicht missen möchte. Der internationale Austausch mit Studenten und Professoren aus meinem Fachgebiet hat mir sehr viel gegeben.

Bei einem Projekt dieser Größenordnung muss auch das nähere Umfeld am Lehrstuhl stimmen. Ich bin froh, so viele sympathische und hilfsbereite wissenschaftliche Mitarbeiter, studentische Hilfskräfte und Kollegen bei imove kennengelernt zu haben. Häufig sind es kleine Gesten, ein Lächeln, ein Tip, die aufmuntern und motivieren. Besonders danken möchte ich dem interimistischen Leiter des Fachgebiets Dr.-Ing. Jürgen Brunsing und seinem Nachfolger Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz. Beide ließen mir die nötigen Freiräume, sorgten für eine gute Arbeitsatmosphäre, förderten mich und standen für fachliche Diskussionen immer zur Verfügung.

Eine große Hilfestellung waren die unentgeltliche Bereitstellung der Software VIS-SIM durch die PTV AG und der Baustellen Lichtsignalanlagen durch die Firma Fabema. Gleiches gilt für die Stadtverwaltung Bad Kreuznach mit allen in die Feldversuche involvierten Mitarbeitern und deren unbürokratische Vorgehensweise bei der praktischen Umsetzung der Erhebungen.

Mein Kollege Dipl.-Ing. Nicolas Mellinger hat zunächst als studentische Hilfskraft lange Zeit meinen Weg bei imove begleitet und mich wesentlich unterstützt. In seiner Vertieferarbeit wirkte er maßgeblich an der Entwicklung von imovino, dem Erhebungsaufbau der empirischen Untersuchungen, mit. Dadurch und das vertrauensvolle, kollegiale Miteinander hat er wesentlichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit.

Volxheim im Februar 2018

Hinweise

Genderhinweis

Aus Gründen der sprachlichen Vereinfachung wird in dieser Arbeit ausschließlich die maskuline Form verwendet. Die feminine Form gilt dabei stets als mit eingeschlossen.

Lesezeichen

Da am Anfang der vorliegenden Dissertation diverse Kürzel zur Klassifizierung teilsignalisierter Knotenpunkte eingeführt werden, liegt dieser Arbeit ein Lesezeichen bei, das bei der Lektüre der weiteren Arbeit unterstützen soll.

Programmcodes

Die in der Arbeit verwendeten Programmcodes können auf Nachfrage beim Institut für Mobilität und Verkehr bezogen werden.

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit Verkehrsablauf und Einsatzmöglichkeiten teilsignalisierter Knotenpunkte. An diesen sind nicht sämtliche, sondern nur bestimmte Verkehrsströme signaltechnisch geregelt. Erste Ansätze, sich dieses Verfahren zu Nutze zu machen, existieren seit den 1950er Jahren. Sie wurden ständig weiterentwickelt und schließlich nach Abschluss eines Forschungsprojektes der Bundesanstalt für Straßenwesen zu Nutzen, Kosten und Sicherheit Bestandteil der Richtlinien für Lichtsignalanlagen der FGSV (Neuaufgabe 2010).

Der Stand in Wissenschaft und Umsetzung im In- und Ausland weist dennoch bis heute Lücken auf. Für eine flächendeckende, praktische Realisierung fehlt es weiterhin an gesicherten Kenntnissen. Hier setzt diese Arbeit mit ihrem mehrstufigen Ansatz aus Literaturrecherche, Empirie, Mikrosimulation und konkreten Umsetzungsempfehlungen an.

Auf Basis der Literatur über signalisierte und unsignalisierte Knoten wurden Überlegungen zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Lösungen angestellt. Die Vermutung, dass sich dieser aus Elementen beider Grundverfahren zusammensetzt, die jedoch anderen Randbedingungen unterliegen, konnte verifiziert werden.

In einem ersten Schritt wurden teilsignalisierte Knotenpunkte hinsichtlich der Anzahl und Lage der Signalgeber bzw. der signaltechnisch gesicherten Verkehrsbeziehungen typisiert. Es konnten an Einmündungen und Kreuzungen drei empfehlenswerte Fälle der Teilsignalisierung identifiziert werden:

- Teilsignalisierung ohne Fußgängerfurten
- Teilsignalisierung mit Fußgängerfurt in der linken Zufahrt
- Teilsignalisierung mit Fußgängerfurt in der rechten Zufahrt

Diese bilden mit zuvor definierten Ausbaustandards, die Fahrstreifenanteile – insbesondere das Vorhandensein von Linksabbiegestreifen in den Zufahrten – am Knotenpunkt berücksichtigen, die Grundlage für die Erstellung von Modellknoten, die in der weiteren Arbeit relevant sind.

Da keine empirischen Untersuchungen über den Verkehrsablauf derartiger Knoten vorlagen, wurden in zwei Feldversuchen hierzu wichtige Kenngrößen an Einmündungen ermittelt. Es zeigte sich dabei, dass lange Wartezeiten vor allem für Linksabbieger reduziert werden konnten. In der Gesamtbilanz wiegen diese Zeit- und Sicherheitsgewinne die leicht gestiegenen Wartezeiten in der Haupttrichtung auf. Der Fahrzeugabfluss in der Nebenrichtung konnte signifikant gesteigert werden, auch wenn die Zeitbedarfswerte einer Vollsignalisierung nicht erreicht wurden. Dies lag an einem Zögern der Verkehrsteilnehmer an der Haltlinie. Die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom entspricht nicht mehr der sonst angenommenen negativen Expo-

nentialverteilung, da durch die Signalisierung eine starke Pulkbildung entsteht. Es kommt zu so genannten Überzufälligkeiten mit vermehrt kleineren Lücken.

Während der Mikrosimulation wurde nach dem „ceteris paribus“ Prinzip pro Ablauf immer nur eine Variable verändert. Somit konnten detailliert die Effekte der gewählten Einflussgrößen abgebildet werden. Es erfolgte eine Untersuchung der definierten Modellknotenpunkte mit der Software VISSIM bezüglich der Einflussfaktoren:

- Ausbaustandard (Linksabbiegestreifen)
- Fälle der Teilsignalisierung
- Signalprogramme
- Verkehrsstärken

Es wurden Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärken in Haupt- und Nebenrichtung sowie Matrizen zur Bestimmung der Einsatzgrenzen entwickelt. Für Kreuzungen konnten im Gegensatz zu Einmündungen nur geringe positive Effekte ermittelt werden. Die Einsatzmöglichkeiten sind maßgeblich abhängig vom Ausbaustandard, Teilsignalisierungsfall und Signalprogramm. Die Teilsignalisierung deckt wie vermutet den Übergangsbereich zwischen konventioneller Vorfahrtregelung und Vollsignalisierung ab. Hierfür wurde der wissenschaftliche Beweis erbracht.

Ergänzt werden die Betrachtungen durch die Möglichkeiten zur Integration des Fußverkehrs. In der Hauptrichtung ist eine gesicherte Fußgängerführung in Abhängigkeit vom gewählten Teilsignalisierungsfall nur in jeweils einem Ast realisierbar. Die Nebenrichtung lässt allerdings keine gesicherte Querung zu. Diese Problematik verstärkt sich an Kreuzungen durch das Vorhandensein von zwei Nebenrichtungen, so dass in diesen Fällen eine Teilsignalisierung aus Sicherheitsüberlegungen ebenfalls nicht empfohlen werden kann. Es wurden prinzipielle Führungsmöglichkeiten aufgezeigt und mittels eines Entscheidungsbaumes visualisiert, der die Auswahl geeigneter Teilsignalisierungsformen am Knotenpunkt unterstützt.

An Kreisverkehren kann eine Teilsignalisierung unter bestimmten Konstellationen sinnvoll sein, um einerseits die Kapazität einzelner Zufahrten zu erhöhen oder andererseits eine gesicherte Fußgängerführung zu realisieren. Als problematisch haben sich nahezu ungehinderte Zuflüsse erwiesen. Diese treten auf, wenn der Zustrom nur selten durch andere Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn unterbrochen wird. Sie führen zu starker Kolonnenbildung. Die Installation einer LSA kann hier die mangelnden Unterbrechungen künstlich schaffen.

Abgerundet wird die Arbeit durch weitere Einsatzmöglichkeiten von Teilsignalisierungen zur Priorisierung von Einzelfahrzeugen oder bestimmter Fahrzeuggruppen im ÖV und Rettungswesen oder zur Räumung von Bahnübergängen.

Abstract

The present dissertation addresses traffic flow and potential applications of partial signalisation of intersections, where only some but not all traffic flows are regulated by signals. First approaches utilising this method have existed since the 1950s. They have been continuously developed and ultimately, after conclusion of a research project by the German Federal Institute for Roadways on the benefits, costs, and safety, have become part of the Research Association for Roadways and Transportation (FGSV) guidelines for signal light systems (new 2010 edition).

The current states of research and domestic and foreign implementation nevertheless still have gaps today. Trusted knowledge is required for comprehensive, practical implementation. This paper makes recommendations based on many hours of literature research, empirical observations, microsimulations, and concrete implementation.

Based on the literature on signalised and unsignalised intersections, traffic flow at partially signalised solutions was considered. The assumption that this would be composed of elements of both basic methods still subject to other boundary conditions was confirmed.

First, partially signalised intersections were classified into types considering the number and location of signals, and the traffic relationships secured by signals. Three recommended cases for partial signalisation were identified for junctions and intersections:

- Partial signalisation without pedestrian crossings
- Partial signalisation with pedestrian crossing (left approach)
- Partial signalisation with pedestrian crossing (right approach)

Together with previously defined construction standards addressing lane divisions particularly the presence of left-turn lanes in the approaches at the intersection, these form the basis for the type classification of model intersections relevant to the study. Because no empirical tests of traffic flow at such intersections were available, important characteristics were determined in two field tests at junctions, showing that long waiting times can be reduced, particularly for left-turn entries. In the overall balance, these gains in time and safety make up for the slight increase in main direction waiting times. The outflow of vehicles in the secondary direction was significantly increased, although the time requirements of full signalisation were not achieved, due to motorists pausing at the stop line. The distribution of time gaps in the main flow no longer corresponds to the otherwise assumed negative exponential distribution, because the partial signalisation causes severe clumping. So-called disproportionate occurrences with increased numbers of small gaps are observed.

During the microsimulation, following the principle of „ceteris paribus“, only one variable was modified in each run. The effects of the selected influencing parameters were therefore depicted in detail. The defined model intersections were tested using VISSIM software considering the influencing factors:

- Construction standard (left-turn lanes)
- Cases of partial signalisation
- Signal programmes
- Traffic intensities

Diagrams were developed for determining the mean loss times as a function of traffic intensities (main and secondary direction), as were matrices for determining the use limits. For crossover intersections, in contrast to junctions, only slight positive effects were determined. The potential applications are largely dependent on construction standard, partial signalisation case, and signal programme. Partial signalisation, as assumed, covers the transition range between conventional right-of-way regulation and full signalisation. Scientific evidence of this was produced.

The potential for integration of pedestrian traffic was additionally considered. In the main direction, a secured pedestrian crossing can be implemented in only one branch, depending on the selected partial signalisation case. The secondary direction does not allow a secured crossing, however. This problem is amplified at crossover intersections with two secondary directions, here, partial signalisation cannot be recommended due to safety considerations. Principle guidance options were listed and visualised using a decision tree that supports the selection of suitable partial signalisation forms at the intersection.

At roundabouts, partial signalisation may be sensible under certain configurations, to increase the capacity of individual entry points or to implement a secured pedestrian crossing. Nearly unhindered inflows where the inflow is only rarely interrupted by other vehicles in the roundabout have been found to be problematic, leading to severe convoy formation. The installation of a signal light can artificially produce the otherwise lacking interruptions.

The paper is rounded out by additional potential applications of partial signalisation for prioritising individual vehicles or particular vehicle groups in public transportation and rescue, or for clearing railway crossings.

Resumé

Cette thèse de doctorat s'occupe de l'analyse du déroulement de la circulation et des possibilités d'emploi des points de jonction partiellement signalisés ce qui veut dire, que seulement certaines des relations sont signalisées. Les premières approches d'utiliser ce procédé existent depuis les années 1950. Elles ont été perfectionnées constamment et après un projet de la „Bundesanstalt für Straßenwesen“ sur les avantages, les coûts et la sécurité, elles sont finalement devenues partie de la directive sur la signalisation routière allemande (RiLSA édition 2010).

La réalisation au niveau scientifique ainsi qu'en ce qui concerne la mise en œuvre en Allemagne et à l'étranger a jusqu'à aujourd'hui des déficits. Il manque encore des connaissances assurées pour une réalisation généralisée et praticable. C'est sur ce point crucial que cette thèse focalise avec son approche multiple qui consiste en une recherche de littérature en combinaison avec des investigations empiriques, des micro-simulations et des recommandations concrètes.

Basé sur la littérature sur les jonctions signalisées et non signalisées, une supposition concernant le déroulement de la circulation pour des installations partiellement signalisées a été développée. L'hypothèse a été confirmée, que celui contient des éléments des deux procédés classiques.

Premièrement, les jonctions partiellement signalisées ont été standardisées en ce qui concerne le nombre et la position des signaux ou plutôt les relations signalisées. Trois cas recommandables d'une signalisation partielle ont été identifiés:

- Signalisation partielle sans passage piétons
- Signalisation avec passage piétons dans l'accès gauche
- Signalisation avec passage piétons dans l'accès droit

Ils forment avec les standards d'aménagement, qui prennent en compte la répartition des voies pour tourner à gauche, la base pour les jonctions de modèle qui sont importantes pour la poursuite de ce travail.

Comme il n'y a pas d'investigation empirique sur le déroulement de la circulation aux jonctions partiellement signalisées, il y avait deux essais in situ pour gagner des valeurs caractéristiques. On a pu constater un abaissement des temps d'attente surtout pour le manœuvre de tourner à gauche de la rue latérale. Finalement, les avantages concernant les temps d'attente et la sécurité compensent la montée des délais dans la direction principale. La sortie de véhicules de la direction inférieure a augmenté même si la valeur d'une signalisation totale n'était pas obtenue. La raison était l'hésitation des conducteurs à la ligne d'arrêt. La distribution des distances temporelles ne correspond plus à la loi exponentielle négative parce que la signalisation partielle provoque la formation des colonnes.

Pendant les micro-simulations selon le principe „ceteris paribus“, une seule variable est changée par passage afin que les effets puissent être analysés en détail. Les jonctions de modèle ont été examinées avec le programme VISSIM concernant les facteurs:

- Standard d'aménagement
- Cas de signalisation partielle
- Déroulement des couleurs
- Volume de trafic

Pour la détermination des temps d'attente et des limites d'application qui dépendent des volumes de trafic, des diagrammes ont été créés. Aux carrefours, il y a, contrairement aux bifurcations, seulement des effets très faibles. Les limites d'application dépendent de manière significative du standard d'aménagement, du cas de signalisation et du déroulement des couleurs. La signalisation partielle couvre, comme prévu, la zone de transition entre la règle de priorité conventionnelle et la signalisation totale. Cela a été prouvé scientifiquement.

De plus, les considérations sont complétées par les possibilités d'intégration des piétons. Dans la direction principale, un guidage des piétons sécurisé dépendant du cas de signalisation n'est possible que dans un des accès. La direction inférieure ne permet pas de guidage sécurisé. Ce problème se renforce aux carrefours parce qu'il y a deux accès subordonnés, de sorte qu'une signalisation partielle n'y est pas recommandée à cause des doutes de sécurité. Des solutions fondamentales ont été démontrées et visualisées par un arbre de décision qui aide à choisir un cas de signalisation.

Aux giratoires, une signalisation partielle est applicable pour augmenter la capacité d'un accès ou pour réaliser un passage de piétons sécurisé. Surtout les afflux libres sont problématiques. Ils apparaissent si un afflux est très rarement interrompu par des véhicules dans le giratoire ce qui provoque la formation des colonnes. Une signalisation peut interrompre l'afflux artificiellement.

Pour conclure, cette thèse démontre encore d'autres possibilités d'application des signalisations partielles pour la priorisation des véhicules individuels ou de certains groupes de véhicules dans la domaine des transports publics, des services de secours ou de l'évacuation des passages à niveau.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIX
Tabellenverzeichnis	XXV
Abkürzungsverzeichnis	XXVII
I Einführung, Grundlagen und Methodik	1
1 Einleitung	3
1.1 Anlass und Hintergrund	3
1.2 Begriffsbestimmungen und Rahmenbedingungen	5
1.2.1 Definition der Teilsignalisierung	5
1.2.2 Bezeichnung der Knotenströme	6
1.2.3 Kapazität und Qualität von Knotenpunkten	9
1.2.4 Rechtliche Grundlagen	12
1.2.5 Richtlinienwerke	12
2 Stand der Wissenschaft und Praxis	15
2.1 Deutschland	15
2.2 Schweiz	19
2.3 Österreich	20
2.4 Nicht deutschsprachiges Ausland	20
2.5 Explorative Befragung zur Teilsignalisierung in Deutschland	21
2.5.1 Auswahl der angeschriebenen Ämter und Knotenpunkte	21
2.5.2 Aufbau des Fragebogens	22
2.5.3 Auswertung der Fragebögen	23
2.6 Zusammenschau	24
3 Methodik und Vorgehensweise	27
3.1 Ziel der Arbeit	27
3.2 Thesen und forschungsleitende Fragestellungen	27
3.2.1 Fragestellungen	27
3.2.2 Thesen	28
3.3 Vorgehensweise, Methoden und Abgrenzung	29
4 Grundlagen des Verkehrsablaufs und Bemessungsverfahren	33
4.1 Verkehrsablauf an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten	33
4.1.1 Empirische Regressionsverfahren	34
4.1.2 Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle	34
4.1.3 Zeitlückenverfahren	35

4.1.4	Bemessungsverfahren nach HBS	41
4.2	Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten	42
4.2.1	Zuflussgesetz	42
4.2.2	Abflussgesetz	42
4.2.3	Befahren der Konfliktflächen	43
4.2.4	Bemessungsverfahren nach RiLSA und HBS	44
4.3	Verkehrsablauf an Kreisverkehren	46
4.4	Eigene Überlegungen zum Verkehrsablauf im MIV an teilsignalisier- ten Knotenpunkten	48
4.5	Zusammenschau	49
II	Eigene Untersuchungen	51
5	Typisierung teilsignalisierter Knotenpunkte und Ableitung der Modellknoten	53
5.1	Definition der Ausbaustandards und Festlegung von Modellknoten	53
5.2	Ermittlung der verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung	57
5.2.1	Lage und Ausgestaltung der Signalgeber	57
5.2.2	Anwendung auf die Modellknoten	58
5.2.3	Beschilderung und Markierung	62
5.3	Zusammenschau	63
6	Empirische Untersuchung zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Einmün- dungen	65
6.1	Beschreibung der untersuchten Knotenpunkte	65
6.1.1	Knotenpunkt 1: Schwabenheimer Weg / Industriestraße	67
6.1.2	Knotenpunkt 2: Gensinger Straße / Michelin Straße	67
6.2	Vorgehensweise der empirischen Untersuchung	69
6.3	Erhebungsgeräte	70
6.3.1	imovino Leitpfosten	70
6.3.2	Zeitrafferkameras	76
6.4	Erhebungsmethodik	77
6.4.1	Verkehrsstärken	77
6.4.2	Einfahrverhalten im vorfahrtgeregelten Zustand	77
6.4.3	Fahrzeugabfluss im teilsignalisierten Zustand	82
6.4.4	Erhebung von Wartezeiten und Rückstaulängen	83
6.5	Ergebnisse Knotenpunkt 1	86
6.5.1	Messaufbau und -durchführung	86
6.5.2	Verkehrsstärken und Bildung der Belastungsklassen	88
6.5.3	Zeitlücken im vorfahrtgeregelten Zustand	90
6.5.4	Wirkungsabschätzung mittels VISSIM	92
6.5.5	Zeitlückenverteilung im Hauptstrom	93
6.5.6	Bestimmung der Zeitbedarfswerte	95
6.5.7	Wartezeiten und Rückstaulängen in der Nebenrichtung	95
6.5.8	Subjektive Beobachtungen	97

6.6	Ergebnisse Knotenpunkt 2: Gensinger Straße / Michelinstraße	97
6.6.1	Messaufbau und -durchführung	97
6.6.2	Bestimmung der Zeitbedarfswerte	100
6.7	Zusammenschau	101
7	Untersuchung der Modellknoten mittels Mikrosimulation	103
7.1	Grundlagen der Mikrosimulationstechnik	103
7.2	Simulationsumgebung	105
7.2.1	Datenbank	105
7.2.2	Python Skript und COM-Schnittstelle	106
7.3	Vorstellung der Modelle	109
7.3.1	Bauliche Gegebenheiten	110
7.3.2	Verkehrsstärken, Routen und Reisezeitmessungen	110
7.3.3	Modellierung der Vorfahrtregelung	111
7.3.4	Signalprogramme	112
7.4	Vorgehensweise der Auswertungen	113
7.5	Manipulierung der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom	114
7.6	Ergebnisse für Einmündungen	119
7.6.1	Einflussfaktor Teilsignalisierungsfall	119
7.6.2	Einflussfaktor Signalprogramm	126
7.6.3	Einflussfaktor Ausbaustandard	130
7.6.4	Zwischenfazit	133
7.7	Ergebnisse für Kreuzungen	133
7.7.1	Einflussfaktor Teilsignalisierungsfall	133
7.7.2	Einflussfaktor Signalprogramm	137
7.7.3	Einflussfaktor Ausbaustandard	141
7.7.4	Zwischenfazit	144
7.8	Zusammenschau	144
8	Integration des Fuß- und Radverkehrs	145
8.1	Übersicht der Querungsanlagen	145
8.1.1	Fußgängerüberweg	148
8.1.2	Mittellinseln	149
8.1.3	Signalisierte Fußgängerfurten an Knotenpunkten	150
8.1.4	Adaption der Querungsanlagen auf die Teilsignalisierung	151
8.1.5	Empirische Beobachtungen zum Querungsverhalten	156
8.2	Radverkehrsführung	159
8.3	Zusammenschau	159
9	Ableitung der Einsatzgrenzen im MIV für Einmündungen	163
9.1	Einmündungen mit Ausbaustandard AS0EI	165
9.1.1	Diagramme zur Bestimmung der Verlustzeiten	165
9.1.2	Einsatzgrenzen für Fall mit Furt rechts (TS78F)	168
9.1.3	Einsatzgrenzen für Fall ohne Furten (TS2378)	169

9.2	Einmündungen mit Ausbaustandard AS1EI	170
9.2.1	Diagramme zur Bestimmung der Verlustzeiten	170
9.2.2	Einsatzgrenzen für Fall mit Furt rechts (TS78F)	173
9.2.3	Einsatzgrenzen für Fall ohne Furten (TS2378)	174
9.3	Einmündungen mit Ausbaustandard AS2EI	175
9.3.1	Diagramme zur Bestimmung der Verlustzeiten	175
9.3.2	Einsatzgrenzen für Fall mit Furt rechts (TS78F)	178
9.3.3	Einsatzgrenzen für Fall ohne Furten (TS2378)	179
9.4	Zusammenschau	180
10	Teilsignalisierung an Kreisverkehren	181
10.1	Teilsignalisierung an Kreisverkehren im MIV	181
10.2	Beschreibung des Modells	182
10.3	Ergebnisse	182
10.4	Fußgängerführung an teilsignalisierten Kreisverkehren	188
10.5	Zusammenschau	191
11	Priorisierung von Einzelfahrzeugen	193
11.1	Priorisierung von ÖV-Fahrzeugen	193
11.2	Rettungswesen und Notfallmanagement	195
11.3	Teilsignalisierung und Schienenverkehr	196
III	Fazit, Diskussion und Ausblick	197
12	Fazit und Diskussion der Ergebnisse	199
12.1	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	199
12.2	Beantwortung der Forschungsfragen	202
12.3	Verwertbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse	204
13	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	207
IV	Literaturverzeichnis und Anhang	209
	Literaturverzeichnis	218
A	Liste der abgefragten Einmündungen	219
B	Liste der abgefragten Kreuzungen	221
C	Fragebogen Einmündung	223
D	Fragebogen Kreuzung	227
E	Fragebogen Kreisverkehr	233

F	Befragung Auswertung Einmündungen	237
G	Befragung Auswertung Kreuzungen	239
H	Kombinationsmöglichkeiten der Fahrstreifenaufteilung für Kreuzungen	241
I	Teilsignalisierungen an AS1EI	243
J	Teilsignalisierungen an AS2EI	245
K	Teilsignalisierungen an AS1KR	247
L	Teilsignalisierungen an AS2KR	249
M	Lageplan Knotenpunkt 1	253
N	Lageplan Knotenpunkt 2	255
O	Zählzeiten Knotenpunkt 1	257
P	Zählzeiten Knotenpunkt 2	259
Q	Lebenslauf	261

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzip der Kolonnenbildung	4
1.2	Beispiellageplan einer teilsignalisierten Einmündung	6
1.3	Bezeichnung der Knotenströme	7
1.4	Hierarchie der Knotenströme	8
1.5	Bezeichnung der Knotenströme an Kreisverkehren	8
2.1	Literaturübersicht Teilsignalisierung	15
2.2	Städte mit auswertbaren Fragebögen	25
3.1	Aufbau der Arbeit	30
4.1	Übersicht der Berechnungsverfahren für Knotenpunkte ohne LSA	33
4.2	Brutto- und Nettolücken im Fahrzeugstrom	35
4.3	Zeitlücken-Summenlinie bei Überzufälligkeit	40
4.4	Bestimmung der mittleren Wartezeit für Knoten ohne LSA	41
4.5	Berechnungsschema für Knotenpunkte mit LSA	45
4.6	Grundkapazität einer Zufahrt in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn	47
5.1	Knotenpunkttyp AS0EI	55
5.2	Knotenpunkttyp AS1EI	55
5.3	Knotenpunkttyp AS3EI	56
5.4	Knotenpunkttyp AS0KR	56
5.5	Knotenpunkttyp AS1KR	56
5.6	Knotenpunkttyp AS2KR	57
5.7	Teilsignalisierung von AS0EI ohne Furten (Fall TS2378)	59
5.8	Teilsignalisierung von AS0EI mit Furt auf der linken Seite (Fall TS23F)	60
5.9	Teilsignalisierung von AS0EI mit Furt rechten Seite (Fall TS78F)	60
6.1	Übersichtskarte	66
6.2	Luftbild Knotenpunkt 1	68
6.3	Luftbild Knotenpunkt 2	68
6.4	Vorgehensweise der empirischen Erhebungen	69
6.5	imovino Messpfosten	71
6.6	Programmablauf zur Messung von Nettozeitlücken	72
6.7	Schematischer Programmcode der Nettozeitlückenmessung	73
6.8	Kontrolle der Datengüte mittels LED	74
6.9	Abweichung Nettomessung	75
6.10	Brinnokamera	76
6.11	Auswerteverfahren der Zeitlücken	81
6.12	Summenkurve der Mediane der Zeitlücken	82

6.13	Ermittlung der Folgezeitlücke	84
6.14	Ausschnitt aus der Wartezeitenerhebung Quelle: MELLINGER 2016 .	85
6.15	Messaufbau Knotenpunkt 1	87
6.16	Teilsignalisierung am Knotenpunkt 1	87
6.17	Regressionsabschätzung für Strom 4	90
6.18	Regressionsabschätzung für Strom 6	91
6.19	Mittlere Gesamtknotenverlustzeit bei unterschiedlichen Signalpro- grammen	92
6.20	Zeitlückensummenlinie des unsignalisierten Zustands im Vergleich zur negativen Exponentialverteilung und VISSIM	94
6.21	Wartezeiten Strom q4	96
6.22	Wartezeiten Strom q6	96
6.23	Rückstaulängen im Nebenstrom	97
6.24	Messaufbau Knotenpunkt 2	98
6.25	Teilsignalisierung am Knotenpunkt 2	98
6.26	Technische Umsetzung der verkehrsabhängigen Steuerung	100
6.27	Entwicklung der Zeitbedarfswerte während der Langzeiterhebung . .	101
7.1	Schematische Darstellung der Simulationsumgebung	106
7.2	Aufbau des Python Skripts	108
7.3	Modell AS0EI mit Fall TS2378	109
7.4	Modell AS0EI mit Fall TS2378 Detailansicht	109
7.5	Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrsstrom ohne Beeinflussung durch eine LSA	115
7.6	Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrsstrom beeinflusst durch ei- ne LSA	116
7.7	Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrsstrom ohne Beeinflussung durch eine LSA (logarithmische Auftragung)	117
7.8	Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrsstrom beeinflusst durch ei- ne LSA (logarithmische Auftragung)	118
7.9	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf den Gesamtknoten an Einmündungen	119
7.10	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf den Gesamtknoten an Einmündungen	120
7.11	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Hauptrichtung an Einmündungen	121
7.12	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Hauptrichtung an Einmündungen	122
7.13	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Nebenrichtung an Einmündungen	123
7.14	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Nebenrichtung an Einmündungen	124
7.15	Auswirkungen des Signalprogramms auf den Gesamtknoten an Ein- mündungen	126

7.16	Auswirkungen des Signalprogramms auf die Hauptrichtung an Einmündungen	127
7.17	Auswirkungen des Signalprogramms auf die Nebenrichtung an Einmündungen	128
7.18	Auswirkungen des Ausbaustandards auf den Gesamtknoten an Einmündungen	130
7.19	Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Hauptrichtung an Einmündungen	131
7.20	Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Nebenrichtung an Einmündungen	132
7.21	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf den Gesamtknoten an Kreuzungen	134
7.22	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf den Gesamtknoten an Kreuzungen	134
7.23	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Hauptrichtung an Kreuzungen	135
7.24	Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Nebenrichtung an Kreuzungen	136
7.25	Auswirkungen des Signalprogramms auf den Gesamtknoten an Kreuzungen	137
7.26	Auswirkungen des Signalprogramms auf die Hauptrichtung an Kreuzungen	138
7.27	Auswirkungen des Signalprogramms auf die Nebenrichtung an Kreuzungen	139
7.28	Auswirkungen des Signalprogramms auf die Nebenrichtung an Kreuzungen	140
7.29	Auswirkungen des Ausbaustandards auf den Gesamtknoten an Kreuzungen	141
7.30	Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Hauptrichtung an Kreuzungen	142
7.31	Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Nebenrichtung an Kreuzungen	143
8.1	Einsatzbereiche von Überquerungsanlagen an zweistreifigen Straßen	146
8.2	Fußgängerüberweg	149
8.3	Mittelinsel	150
8.4	Fußgängerfurt mit Lichtsignalanlage	151
8.5	Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F ohne Querungshilfe links	153
8.6	Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F mit Mittelinsel links	153
8.7	Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F mit FGÜ links	153
8.8	Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F mit FGÜ und Mittelinsel links	153

8.9	Fußgängerquerung in der Nebenrichtung mit Tropfen (knotenpunktsnah)	154
8.10	Fußgängerquerung in der Nebenrichtung mit Fußgängerüberweg (knotenpunktsfern)	155
8.11	Fußgängerquerung in der Nebenrichtung mit Mittelinsel (knotenpunktsfern)	155
8.12	Umfeldnutzungen am Knotenpunkt 1	156
8.13	Nutzung von Zeitlücken im Hauptstrom für die Querung	157
8.14	Querung im inneren Knotenpunktbereich während der Sperrzeit	158
8.15	Querung bei geringem Verkehr	158
8.16	Querung bei stockendem Verkehr	158
8.17	Konfliktsituation mit einbiegendem Fahrzeug	158
8.18	Konfliktsituation mit abbiegendem Fahrzeug	158
8.19	Entscheidungsbaum	161
9.1	Auswahl der Teilsignalisierungskombinationen für die Ermittlung der Einsatzgrenzen	164
9.2	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS0EI vorfahrtgeregelter Fall	165
9.3	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS0EI (teil-)signalisierte Fälle	166
9.4	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten der Nebenrichtung (Z2) für Ausbaustandard AS0EI	167
9.5	Einsatzgrenzen für AS0EI, TS78F mit Signalprogramm 6020	168
9.6	Einsatzgrenzen für AS0EI, TS78F mit Signalprogramm 9020	168
9.7	Einsatzgrenzen für AS0EI, TS2378 mit Signalprogramm 6020	169
9.8	Einsatzgrenzen für AS0EI, TS2378 mit Signalprogramm 9020	169
9.9	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS1EI vorfahrtgeregelter Fall	170
9.10	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS1EI	171
9.11	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten der Nebenrichtung (Z2) für Ausbaustandard AS1EI (teil-)signalisierte Fälle	172
9.12	Einsatzgrenzen für AS1EI, TS78F mit Signalprogramm 6020	173
9.13	Einsatzgrenzen für AS1EI, TS78F mit Signalprogramm 9020	173
9.14	Einsatzgrenzen für AS1EI, TS2378 mit Signalprogramm 6020	174
9.15	Einsatzgrenzen für AS1EI, TS2378 mit Signalprogramm 9020	174
9.16	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS2EI vorfahrtgeregelter Fall	175
9.17	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS2EI (teil-)signalisierte Fälle	176
9.18	Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten der Nebenrichtung (Z2) für Ausbaustandard AS2EI	177
9.19	Einsatzgrenzen für AS2EI, TS78F mit Signalprogramm 6020	178
9.20	Einsatzgrenzen für AS2EI, TS78F mit Signalprogramm 9020	178

9.21	Einsatzgrenzen für AS2EI, TS2378 mit Signalprogramm 6020	179
9.22	Einsatzgrenzen für AS2EI, TS2378 mit Signalprogramm 9020	179
10.1	Skizze des vereinfachten Kreisverkehrsmodells mit den möglichen Fahrzeugrouten	183
10.2	Auswirkungen des Anteils der Ausfahrer auf Zufahrt 2 an Kreisverkehren ohne LSA	184
10.3	Auswirkungen des Signalprogramms auf Zufahrt 1 an Kreisverkehren	184
10.4	Auswirkungen Signalprogramm auf Zufahrt 2 an Kreisverkehren . .	185
10.5	Mittlere Verlustzeit Z2 an Kreisverkehren ohne Signalisierung	185
10.6	Mittlere Verlustzeit Z2 an Kreisverkehren ohne Signalisierung	186
10.7	Mittlere Gesamtknotenverlustzeit an Kreisverkehren ohne Signalisierung	187
10.8	Mittlere Gesamtknotenverlustzeit an Kreisverkehren mit Teilsignalisierung	187
10.9	Luftbild des Kreisverkehrs Alzeyer Straße / Ringstraße	189
10.10	Fußgängerlichtsignalanlage am Kreisverkehr in Bad Kreuznach . . .	190
10.11	Luftbild des Kreisverkehrs B428 / Mainzer Straße	190
11.1	Beispiel für eine Teilsignalisierung zur ÖV-Beschleunigung	194
11.2	Borsigplatz in Dortmund	194
11.3	Feuerwehrausfahrt in Landstuhl	195
11.4	Teilsignalisierung am Bahnübergang in Schweisweiler	196

Tabellenverzeichnis

1.1	Qualitätsstufen für Knotenpunkte ohne LSA	10
1.2	Qualitätsstufen für Knotenpunkte mit LSA	10
2.1	Einsatzbereich von Teilsignalisierung	17
2.2	Einsatzmöglichkeiten von Signalisierung an Kreisverkehren gemäß VSS 2005	19
4.1	Verfahren zur Ermittlung der Grenzzeitlücke	37
5.1	Mögliche Fahrstreifenaufteilungen an einer Einmündung	54
5.2	Mögliche Teilsignalisierungen für den Ausbaustandard AS0EI	60
5.3	Mögliche Teilsignalisierungen für den Ausbaustandard AS0KR . . .	61
6.1	Belastungsklassen Schwabenheimer Weg	89
6.2	Grenz- und Folgezeitlücken des Nebenstroms	91
6.3	Schaltzeiten der Signalprogramme	92
7.1	Umlauf- und Sperrzeiten für die Simulationen	112
8.1	Auswahl der Querungsanlagen für Straßenbreiten bis 6,5m	147
8.2	Auswahl der Querungsanlagen für Straßenbreiten zwischen 6,5m und 8,5m	147
8.3	Mögliche Querungsanlagen für den Teilsignalisierungsfall TS2378 . .	152
8.4	Mögliche Querungsanlagen für den Teilsignalisierungsfall TS78F . .	153

Abkürzungsverzeichnis

AKF	.....	Addition kritischer Fahrzeugströme
AS	.....	Ausbaustandard
BÜSTRA	.....	Bahnübergangssteuerungsanlagen
BaSt	.....	Bundesanstalt für Straßenwesen
BK	.....	Belastungsklasse
bzw.	.....	beziehungsweise
c. p.	.....	ceteris paribus
ca.	.....	circa
DTV	.....	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
EI	.....	Einmündung
etc.	.....	et cetera
Fg	.....	Fußgänger
FGSV	.....	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FGÜ	.....	Fußgängerüberweg
FLSA	.....	Fußgängerlichtsignalanlage
fps	.....	frames per second
Fz	.....	Fahrzeuge
HBS	.....	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
h	.....	Stunde
HR	.....	Haupttrichtung
Kfz	.....	Kraftfahrzeug
KH	.....	Bad Kreuznach
KREIS	.....	Kreisverkehr
KR	.....	Kreuzung
Lkw	.....	Lastkraftwagen
MFS	.....	Mischfahrstreifen
MI	.....	Mittelinsel
MIV	.....	Motorisierter Individualverkehr
ms	.....	Millisekunde
NR	.....	Nebenrichtung
ÖPNV	.....	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	.....	Öffentlicher Verkehr
Pkw-E	.....	PKW-Einheiten
Pkw	.....	Personenkraftwagen

q	Verkehrsstärke
QSV	Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs
RASt	Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
s	Sekunde
StVO	Straßenverkehrsordnung
SV	Schwerverkehr
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
VwVStVO	Allgemeine Verwaltungsverfahrensvorschrift zur Straßenverkehrs- ordnung

Teil I

Einführung, Grundlagen und Methodik

1 Einleitung

1.1 Anlass und Hintergrund

Über drei Viertel von Verzögerungen im Straßenverkehr werden durch Knotenpunkte hervorgerufen. Dadurch entstehen Staus mit ihren negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Ein Teil dieser Staus kann durch den Einsatz von Signalisierungen vermieden werden. In der Vergangenheit wurde darunter meist die Vollsignalisierung des Knotenpunktes verstanden¹.

Häufig werden bislang vorfahrtsregelte Knotenpunkte, die durch Kapazitäts- und Sicherheitsprobleme auffallen, mit einer Lichtsignalanlage (LSA) ausgestattet. Dies ist für Bau- lastträger kostenintensiv. Eine weitaus günstigere Möglichkeit in Bezug auf Verkehrsablauf und Kosten wäre eine Teilsignalisierung, bei der nicht mehr alle Fahrbeziehungen signal- technisch geregelt sind. Zu diesem Schluss kommt eine im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) durchgeführte Untersuchung². Kapazitäten und Verkehrssicherheit liegen demnach auf ähnlich hohem Niveau wie bei einer Vollsignalisierung. Die positiven Ergebnisse der Studie gaben Anlass, sich vertiefter im Rahmen der vorliegenden Dissertation mit dieser Thematik zu befassen, da weiterhin viele Fragestellungen unbeantwortet blieben.

Bei einer Teilsignalisierung wird bewusst mittels Signalgebern in die Zeitlückenverteilung des Hauptstroms eingegriffen, um somit eine Pulkbildung zu erreichen (vgl. Abbildung 1.1).

Ausreichend große Zeitlücken, die nicht natürlich auftreten, werden künstlich durch Licht- signaleingriffe geschaffen, um untergeordneten Strömen ein Einbiegen in den Hauptstrom zu ermöglichen. Dabei müssen Zeitlücken größer als die Grenzzeitlücke t_g auftreten. Grundsätzlich gelten gestörte Verkehrsströme leistungsfähiger als ungestörte³, da die Fahrzeuge als Pulk weniger Zeit zum Durchfahren eines Querschnitts benötigen. Es werden somit Zeiten frei, die dem Nebenstrom angeboten werden können. Die Entscheidung über das Einfahren obliegt immer den Nebenstromfahrern selbst, da für sie der Knotenpunkt nach wie vor als vorfahrtsregelt auftritt. Dadurch wird in manchen Belastungskonstellationen sogar eine höhere Kapazität vermutet, da Fahrzeuge aus dem Nebenstrom zum einen während des unsignalisierten Zustands durch natürlich auftretende Zeitlücken und zum anderen während der Sperrzeit des Hauptstroms nahezu ungehindert abfließen können. Es können somit mehr Zeitlücken genutzt werden. Im Gegensatz zu einer Vollsignalisierung entfallen ansonsten auftretende Zwischenzeitverluste.

¹vgl. KAEMMERER und SCHÖNLEITER 2006

²vgl. FROST und SCHULZE 2008; im Folgenden „Studie von Frost und Schulze“ genannt

³LEUTZBACH 1956 und GROSSMANN 1990

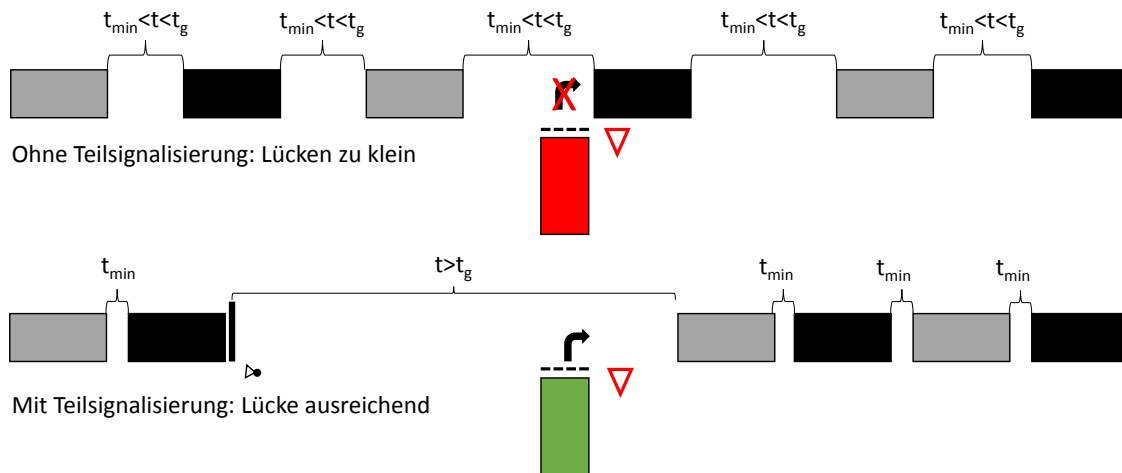


Abbildung 1.1: Prinzip der Kolonnenbildung mit t_{min} = Mindestzeitlücke, t = Reale Zeitlücke und t_g = Grenzzeitlücke

An Kreisverkehren kommen Untersuchungen aus der Schweiz zu dem Ergebnis, dass hier die Kapazität durch Sperrung einzelner Zufahrten erhöht werden kann⁴. Dies zeigte ebenfalls ein Feldversuch der TU Kaiserslautern⁵. Grundsätzlich unterscheidet sich das Prinzip nicht von anderen Knotenpunkttypen, da Kreisverkehre in der Verkehrstechnik als Abfolge von Einmündungen aufgefasst werden.

In der deutschen Praxis ist die Möglichkeit der Teilsignalisierung nach wie vor nicht vollends verbreitet, obgleich in der aktuellen Fassung der Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA, Ausgabe 2010) ein Kapitel zu nicht vollständig signalisierten Knotenpunkten existiert⁶. Ein theoretischer Hintergrund mit Untersuchungen zu Ausprägung, Verkehrsablauf und darauf aufbauenden Einsatzgrenzen fehlt.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es daher, teilsignalisierte Knotenpunkte zu typisieren, den Verkehrsablauf zu analysieren, die genauen Einsatzgrenzen der Teilsignalisierung an Einmündungen, Kreuzungen und Kreisverkehren im Vergleich zu den beiden klassischen Regelungsarten herauszufinden und Empfehlungen für den späteren Einsatz in der Praxis aufzustellen. Darüber hinaus ergeben sich weitere zu beantwortende Fragestellungen hinsichtlich der Integration des Fuß- und Radverkehrs. Die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen wurden bereits nachgewiesen und sind daher nicht Gegenstand dieser Arbeit⁷.

⁴AARGAU 2004 und VSS 2005
⁵vgl. ROOS und REUTTER 2014
⁶vgl. FGSV 2010 Kapitel 5.1
⁷vgl. FROST und SCHULZE 2008

1.2 Begriffsbestimmungen und Rahmenbedingungen

Für das allgemeine Verständnis der Dissertation werden zunächst einige Begriffsbestimmungen vorgenommen sowie die Rahmenbedingungen, in denen sich die Arbeit bewegt, festgelegt. Weitere Definitionen, die sich nur auf Teile der Arbeit beziehen, werden an den entsprechenden Stellen gegeben.

Zunächst wird der Begriff „Teilsignalisierung“ definiert, anschließend die Nomenklatur der Knotenpunktelemente erläutert sowie grundlegende Bemessungsgrößen vorgestellt. Schlussendlich erfolgt eine Aufstellung der zum Zeitpunkt der Veröffentlichung gültigen Gesetze und Richtlinienwerke, auf die sich die Untersuchungen stützen.

1.2.1 Definition der Teilsignalisierung

Als Definition für die Teilsignalisierung wird die aktuelle Ausgabe der Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA 2010) der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) herangezogen. Die um eine eigene Passage erweiterte Definition lautet:

*Unter nicht vollständig signalisierten Knotenpunkten werden Knotenpunkte verstanden, bei denen verschiedene, aber nicht alle Verkehrsbeziehungen signaltechnisch geregelt sind. Ein Kennzeichen nicht vollständig signalisierter Knotenpunkte sind wartezeitabhängige Eingriffsmöglichkeiten durch Nebenströme (**bzw. sonst wartepflichtiger Verkehrsteilnehmer**) an vorfahrt-geregelten Knotenpunkten.⁸*

Signalisierte Fußgängerfurten ohne Eingriffsmöglichkeiten durch den motorisierten Individualverkehr (MIV) sind in diesem Sinne keine Teilsignalisierungen, da keine Eingriffe durch Nebenstromfahrzeuge erfolgen, sondern diese Anlagen lediglich durch Fußgänger angefordert werden. Sie dienen daher nur der gesicherten Querung von Fußgängern und haben keine originäre Aufgabe im MIV, obgleich die Anforderungen von Fußgängern Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben. Diese unterliegen jedoch keiner Abhängigkeit vom MIV und können daher nicht für eine Steuerung herangezogen werden. Erst durch die Installation einer solchen Eingriffsmöglichkeit durch Detektoren oder einer entsprechenden Abstimmung der Anlage auf den MIV kann eine reine Fußgängerfurt zu einer Teilsignalisierung aufgerüstet werden. Der eingeklammerte Zusatz integriert auch Einzelfahrzeuge wie beispielsweise Rettungs- und Einsatzfahrzeuge oder ÖV-Fahrzeuge, die ebenfalls durch eine Teilsignalisierung priorisiert werden können und in der ursprünglichen Definition nicht auftauchen.

Als mögliche Anwendungsfälle werden genannt:

- Schaffung von Zeitlücken
- ÖV-Priorisierung
- Sicherung von Querungsstellen

⁸FGSV 2010, S. 51 mit eigenen Ergänzungen

Mit Hilfe einer Teilsignalisierung sollen gemäß RiLSA 2010 folgende Ziele erreicht werden:

- Erhöhung der Verkehrssicherheit
- Erhöhung der Kapazität
- Verminderung von Wartezeiten
- Vermeidung unnötiger Verlustzeiten in der Hauptrichtung (HR)
- Vermeidung von Ausbaumaßnahmen
- Einsparung von Investitions- und Betriebskosten

Abbildung 1.2 zeigt exemplarisch eine Möglichkeit der Teilsignalisierung an einer Einmündung. Zu erkennen ist, dass Signalgeber (K1a und K2a) nur in der übergeordneten Straße (links und rechts) stehen. Der untergeordnete Ast ist weiterhin mit Verkehrszeichen 205 „Vorfahrt gewähren“ beschildert. Zusätzlich ist ein Detektor (DK1) verbaut, über den die Signalgeber gesteuert werden. Bei zu langen Wartezeiten wird durch Sperrung der Hauptrichtung eine künstliche Lücke zum Einbiegen geschaffen. Diese Lageskizze ist jedoch nur ein mögliches Beispiel einer Vielzahl von Teilsignalisierungsmöglichkeiten.

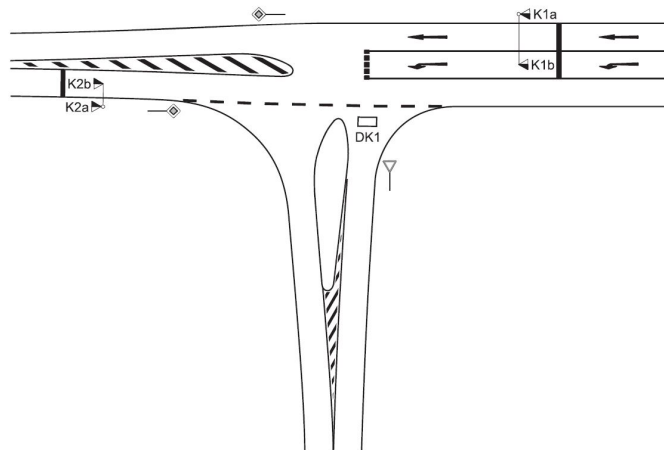


Abbildung 1.2: Beispiellageplan einer teilsignalisierten Einmündung
Quelle: FGSV 2010 S. 52

1.2.2 Bezeichnung der Knotenströme

Unter dem Begriff des Verkehrsablaufs versteht man die Gesamtheit der zeitlichen und räumlichen Abwicklung der Verkehrs- und Bewegungsvorgänge auf den Straßenverkehrsflächen. Dazu zählen beispielsweise Fahren, Beschleunigen, Bremsen, Anhalten, Warten, Kreuzen, Überholen, Einfädeln oder Ausfädeln. Die Gesamtheit der sich bewegenden Fahrzeugeinheiten wird dabei als Verkehrsstrom bezeichnet, die Bewegung selbst als Verkehrs-

fluss⁹. Es gibt gemäß Abbildung 1.3 maximal zwölf verschiedene Kraftfahrzeugströme, die an einem vierarmigen Knotenpunkt auftreten können. Diese sind richtungsbezogen und werden, am linken Knotenpunktarm beginnend, entgegen dem Uhrzeigersinn durchnummeriert (1-12). Die Zufahrten werden entsprechend den Buchstaben Z1-Z4 bezeichnet. Bei Einmündungen fehlen selbstredend die Zufahrt „Z4“ sowie die zugehörigen Verkehrsströme (1,5,9,10,11,12). An Kreisverkehren erfolgt die Bezeichnung analog (siehe Abbildung 1.5). Es wird lediglich noch zwischen Ein- und Ausfahrten unterschieden.

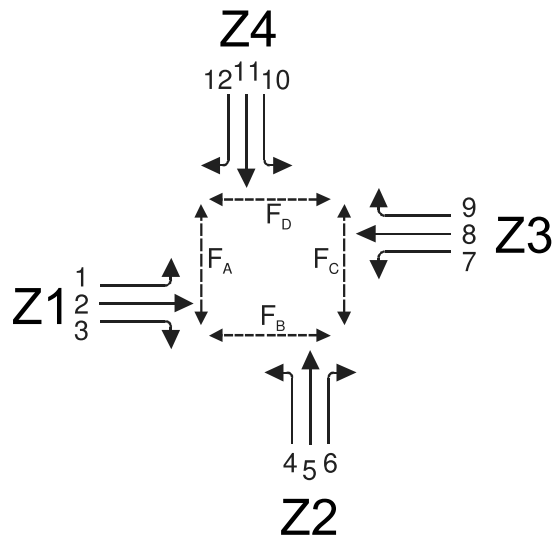


Abbildung 1.3: Bezeichnung der Knotenströme
Quelle: FGSV 2015

Die Ströme sind gemäß der angeordneten Vorfahrt nach StVO hierarchisch gegliedert. Dabei werden nach Abbildung 1.4 folgende Ränge unterschieden (vgl. Abbildung 1.4), die in folgender Reihenfolge wartepflichtig sind¹⁰:

- 1. Rang: Geradeausfahren in der Vorfahrtstraße (2,8), Rechtsabbiegen aus der Vorfahrtstraße (3,9)
- 2. Rang: Linksabbiegen aus der Vorfahrtstraße (1,7), Rechtseinbiegen in die Vorfahrtstraße (6,12)
- 3. Rang: Kreuzen der Vorfahrtstraße (5,11)
- 4. Rang: Linkseinbiegen in die Vorfahrtstraße (4,10)

Bei Kreisverkehren ist grundsätzlich die Kreisfahrbahn den Zufahrten vorfahrtrechtlich übergeordnet. Dies wird durch das Verkehrszeichen 215 angeordnet. Es gibt somit nur Verkehrsströme von Rang 1 und 2, wie Abbildung 1.5 zu entnehmen ist.

⁹vgl. SCHNABEL und LOHSE 2011 S. 19

¹⁰An Einmündungen fehlt Rang 4

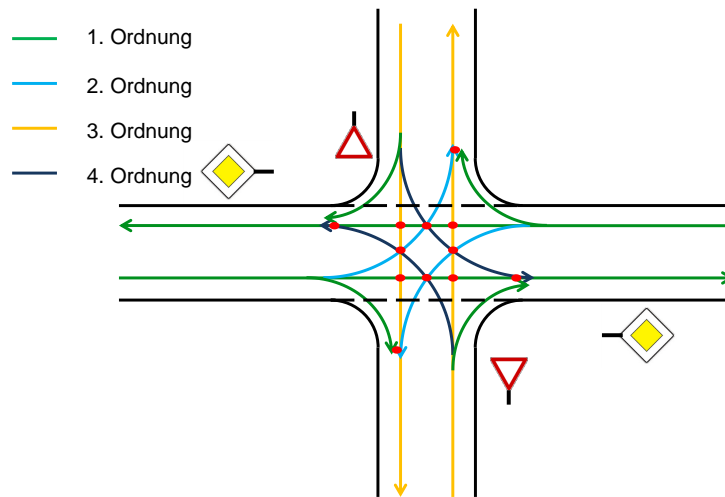


Abbildung 1.4: Hierarchie der Knotenströme

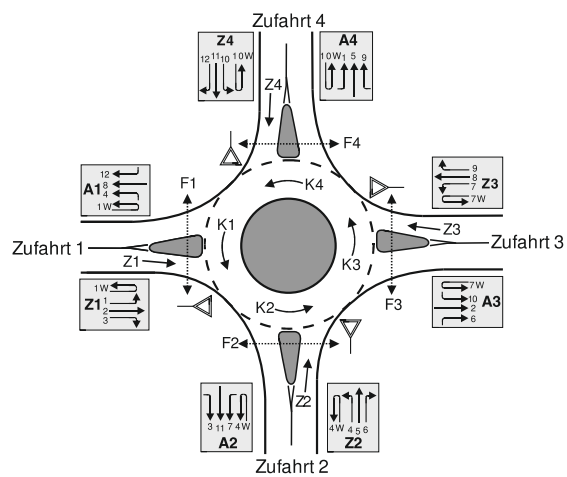


Abbildung 1.5: Bezeichnung der Knotenströme an Kreisverkehren
 Quelle: FGSV 2015

1.2.3 Kapazität und Qualität von Knotenpunkten

Üblicherweise wird unter der Kapazität (in älteren Schriften auch als Leistungsfähigkeit bezeichnet) eines Knotenpunktes die Anzahl der Fahrzeuge verstanden, die diesen in einem gewissen Zeitintervall durchfahren können¹¹. Übliche Einheiten sind Fahrzeuge pro Stunde $\frac{Fz}{h}$ bzw. Pkw-Einheiten pro Stunde $\frac{Pkw-E}{h}$. Für den einzelnen Verkehrsteilnehmer ist diese Größe nicht entscheidend. Er nimmt vielmehr die subjektiv empfundene Wartezeit am Knotenpunkt und damit seinen persönlichen Zeitverlust wahr¹². Auch SIEGLOCH gibt die Kapazität als den größtmöglichen Durchfluss durch eine Verkehrsanlage an und bezeichnet die Wartezeit als abgeleitete Größe, die für den einzelnen Fahrer einen wichtigen Qualitätsmaßstab darstellt¹³. Die Wartezeit ist von praktischer, die Kapazität von theoretischer Natur. Die Berechnungsverfahren des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) versuchen daher, diese beiden Größen ineinander zu überführen.

Im HBS wird die Kapazitätsreserve einer Anlage aus der Differenz zwischen Kapazität (theoretisch maximal mögliche Verkehrsstärke) und der realen Verkehrsstärke eines Verkehrsstroms gebildet. Je geringer die Kapazitätsreserve wird, desto größer ist die mittlere Wartezeit, die ein Verkehrsteilnehmer am Knotenpunkt erfährt, und desto geringer ist die ihm zugewiesene Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV). Die Umrechnung der Kapazitätsreserve in Wartezeiten erfolgt anhand von empirischen Erhebungen, die den Grad der Akzeptanz von Wartezeiten an Knotenpunkten untersucht haben¹⁴. Insbesondere HARDERS stellte hierzu Untersuchungen an¹⁵. Bei zu lang empfundenen Wartezeiten werden zunehmend auch zu kleine Zeitlücken angenommen, was schlimmstenfalls zu Kollisionen führt. Neuere Untersuchungen zu diesem Thema sind nicht bekannt. Im Folgenden wird mit diesen Ergebnissen, die auch im HBS verwendet werden, gearbeitet. Es ergeben sich daraus die Qualitätsstufen in Abhängigkeit von der mittleren Wartezeit an einem Knotenpunkt, wie sie in den Tabellen 1.1 und 1.2 dargestellt sind.

¹¹vgl. HARDERS 1976

¹²vgl. SIEGLOCH 1973

¹³ebd. S. 21

¹⁴vgl. SCHNABEL und LOHSE 2011 S. 172f

¹⁵HARDERS 1968

QSV	mittlere Wartezeit t_w [s]			
	Regelung durch Vorfahrtbeschilderung		Regelung „rechts vor links“	
	Fahrzeugverkehr auf der Fahrbahn	Radverkehr auf Radverkehrsanlagen und Fußgänger	Kreuzung	Einmündung
A	≤ 10	≤ 5	} ≤ 10	} ≤ 10
B	≤ 20	≤ 10		
C	≤ 30	≤ 15	≤ 15	} ≤ 15
D	≤ 45	≤ 25	≤ 20	
E	> 45	≤ 35	≤ 25	≤ 20
F	- ¹⁾	> 35	> 25 ²⁾	> 20 ²⁾

¹⁾ Die QSV F ist erreicht, wenn die nachgefragte Verkehrsstärke q_i über der Kapazität C_i liegt ($q_i > C_i$).

²⁾ In diesem Bereich funktioniert die Regelungsart „rechts vor links“ nicht mehr.

Tabelle 1.1: Qualitätsstufen für Knotenpunkte ohne LSA
Quelle: FGSV 2015 S. S5-5

QSV	Kfz-Verkehr mittlere Wartezeit t_w [s]	ÖPNV auf Sonderfahrstreifen ¹⁾ mittlere Wartezeit t_w [s]	Fußgänger- und Radverkehr ²⁾ maximale Wartezeit $t_{w,max}$ [s]
A	≤ 20	≤ 5	≤ 30
B	≤ 35	≤ 15	≤ 40
C	≤ 50	≤ 25	≤ 55
D	≤ 70	≤ 40	≤ 70
E	> 70	≤ 60	≤ 85
F	- ³⁾	> 60	> 85 ⁴⁾

¹⁾ Die Werte gelten auch für den ÖPNV, der durch eine verkehrsabhängige Steuerung priorisiert wird.

²⁾ Die Grenzwerte gelten für den Radverkehr auch, wenn er auf der Fahrbahn gemeinsam mit dem Kfz-Verkehr geführt wird.

³⁾ Die QSV F ist erreicht, wenn die nachgefragte Verkehrsstärke q über der Kapazität C liegt ($q > C$).

⁴⁾ Die Grenze zwischen den QSV E und F ergibt sich aus dem in den RiLSA (2015) vorgegebenen Richtwert für die maximale Umlaufzeit von 90 s und der Mindestfreigabezeit von 5 s.

Tabelle 1.2: Qualitätsstufen für Knotenpunkte mit LSA
Quelle: FGSV 2015 S. S4-9

In Mikrosimulationsprogrammen wird statt mit einer mittleren Wartezeit mit Verlustzeiten operiert. Die Verlustzeit eines Fahrzeugs in einem Zeitschritt ist der Teil des Zeitschritts, der zusätzlich zur störungsfreien Durchfahrt aufgewendet werden muss, weil die tatsächliche Geschwindigkeit eines Fahrzeuges unter seiner zuvor eingestellten Wunschgeschwindigkeit liegt. Zur Berechnung wird der Quotient aus tatsächlich in diesem Zeitschritt zurückgelegter Wegstrecke und Wunschgeschwindigkeit von der Dauer des Zeitschritts subtrahiert. Die Verlustzeit kann nicht direkt mit einer errechneten mittleren Wartezeit nach HBS gleichgesetzt werden¹⁶.

Verwendung finden in dieser Arbeit zum einen empirisch ermittelte Wartezeiten und zum anderen aus Mikrosimulationen ermittelte Verlustzeiten.

Für eine zuverlässige Funktion von Verkehrsanlagen sieht man in diesem Zusammenhang Bemessungsgrenzwerte unterhalb der Leistungsfähigkeit an. Ziel der Verkehrsplanung ist es, einen Kompromiss aus Kosten und Leistungsfähigkeit zu finden.

Im Allgemeinen wird mit diesen mittleren Wartezeiten gearbeitet, da somit stochastische Schwankungen im Verkehrsablauf geglättet werden. Entscheidend für die Beurteilung eines Knotenpunktes sind jedoch zusätzlich auch die maximalen Wartezeiten, da diese riskante Fahrmanöver bei einzelnen Fahrern provozieren können und somit die Sicherheit der Anlage gefährden. Als zusätzliches Kriterium können auch Rückstaulängen in den Zufahrten herangezogen werden.

Die zugrundeliegenden Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Kapazität sowie ihre Herleitungen werden in Kapitel 4 detailliert erläutert. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass es im Fuß- und Radverkehr abweichende Qualitätskriterien gibt. Hier ist nicht alleine die Kapazität maßgebend, sondern vielmehr der Komfort und die Sicherheit. Beide entscheiden darüber, ob eine Verkehrsanlage auch akzeptiert wird. Hierzu finden sich weitere Anmerkungen im Kapitel 8.

¹⁶vgl. VISSIM 7 Handbuch S. 677

1.2.4 Rechtliche Grundlagen

Die Grundlage für den Straßenverkehr bildet in Deutschland das Straßenverkehrsgesetz in der Fassung von 2003¹⁷. Es gliedert sich in sieben Abschnitte, wovon lediglich der erste für diese Arbeit relevant ist. Dieser fordert den Erlass einer Straßenverkehrsordnung¹⁸ (StVO), als Rechtsverordnung, die das Verhalten sämtlicher Verkehrsteilnehmer regelt. Für die behördliche Seite gibt es zudem die allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung¹⁹ (VwVStVO). Sie bestimmt die Umsetzung der Straßenverkehrsordnung durch die Straßenverkehrsbehörden und Straßenbauämter. Sämtliche verkehrstechnischen Einrichtungen müssen diesen Gesetzen und Verordnungen entsprechen.

Die Signalisierung durch Lichtsignale ist in §37 der StVO sowie den weiteren Erläuterungen zu diesem Paragraphen in der VwVStVO geregelt. Die gesetzlichen Vorschriften machen keine gesonderten Angaben zur Teilsignalisierung von Knotenpunkten, schließen diese aber auch nicht explizit aus. Solange daher die sonstigen gesetzlichen Regelungen einer Signalisierung eingehalten sind, spricht aus rechtlicher Sicht nichts gegen den Einsatz einer Teilsignalisierung. Näheres erläutern die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) der FGSV, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

1.2.5 Richtlinienwerke

Die Untersuchungen stützen sich auf die derzeit gültigen Richtlinienwerke der FGSV. Im Besonderen sind dies die Richtlinien für Lichtsignalanlagen in der Ausgabe 2010²⁰ (RiLSA 2010) und das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen in der Version 2015²¹ (HBS 2015) für die Signalsteuerung und deren verkehrstechnische Beurteilung. Die bauliche Gestaltung der Modellknoten sowie die erarbeiteten Konzepte zur Fußgängerführung basieren auf den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen²² (RASt 2006).

RiLSA In der RiLSA sind neben der Definition und den Zielen aus Abschnitt 1.2.1 die verkehrlichen Einsatzbereiche, die sich mit den Ergebnissen der Studie von FROST und SCHULZE decken, sowie Beispielanwendungen der Teilsignalisierung aufgeführt. Dies sind die Schaffung von Zeitlücken für wartepflichtige Fahrzeuge, die ÖPNV Priorisierung und die Sicherung von Querungsstellen.

¹⁷Straßenverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2003 (BGBl. I S. 310, 919), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 8. Juni 2015 (BGBl. I S. 904)

¹⁸Straßenverkehrs-Ordnung vom 6. März 2013 (BGBl. I S. 367), geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. Oktober 2014 (BGBl. I S. 1635)

¹⁹Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) vom 22. Oktober 1998 in der Fassung vom 11. November 2014

²⁰FGSV 2010

²¹FGSV 2015

²²FGSV 2006c

HBS Das HBS beschränkt sich nur auf Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage. Zwischenstufen kennt es nicht. Einige Komponenten der beschriebenen Verfahren können auch an teilsignalisierten Knotenpunkten angewendet werden. Soweit erforderlich werden für die Untersuchungen die Standardwerte des HBS übernommen und ggf. durch eigene Werte ergänzt, sofern dies erforderlich und sinnvoll scheint.

RASt Die RASt kennen ebenfalls keine teilsignalisierten Knotenpunkte. Dort finden sich auch lediglich Hinweise zur baulichen Gestaltung von Knotenpunkten mit und ohne LSA. Vieles lässt sich auf nicht vollständig signalisierte Anlagen übertragen.

Weitere Richtlinien Sofern nötig werden in der Arbeit auch weitere Richtlinienwerke der FGSV angewendet. Diese werden an den entsprechenden Stellen im weiteren Verlauf der Arbeit genannt.

2 Stand der Wissenschaft und Praxis

2.1 Deutschland

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die vorhandene Literatur aus Deutschland zum Themenkomplex Teilsignalisierung. Abbildung 2.1 zeigt die Beiträge in chronologischer Reihenfolge. Unterschieden wird dabei zwischen Fachbeiträgen (Dissertationen und Zeitschriftenartikeln), studentischen Arbeiten und Richtlinien.

Erste Überlegungen, sich die Manipulation der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom zur Verbesserung des Einbiegens von Nebenströmen gezielt zu Nutze zu machen, hatte bereits LEUTZBACH 1956. In seiner Dissertation über Zeitlückenverteilungen gestörter Verkehrsströme geht er in einem Kapitel auch auf die Störung durch Lichtsignalsteuerungen ein und erläutert, wie durch eine Lichtsignalanlage Lücken bestimmter Größe einem Verkehrsstrom aufgezwungen und diese durch einfädelnden Querverkehr genutzt werden können. Hieraus folgert er,

„ob sich aus dieser Tatsache nicht ein Kriterium für eine den Verkehrsstärken zweckmäßig angepaßte Signalisierung entwickeln läßt.“²³

Jahr	Fachbeiträge	Stud. Arbeiten (dem Verfasser zur Verfügung gestellte)	Richtlinien
1956	Leutzbach		
∨			
1983	Autorenkollektiv		
∨			
2000		Kerschbaum	
∨			
2003	Schnüll	Vesper	Entwurf Teilfortschreibung RiLSA
∨			
2008	BaSt Studie		
∨			
2010			RiLSA 2010

Abbildung 2.1: Literaturübersicht Teilsignalisierung

Weiterführende Überlegungen zu nicht vollständigen Signalisierungen fanden jedoch erst Anfang der 2000er Jahre statt²⁴. Vorausgegangen war 1983 im Arbeitskreis „Lichtsignalanlagen und Knotenpunktgestaltung“ die Frage, ob ein zeitweises Zuschalten von Lichtsignalanlagen neben der Anwendung an Fußgängerfurten nicht auch auf andere Zweistro-

²³LEUTZBACH 1956 S. 51

²⁴vgl. SCHNÜLL 2003

mentscheidungen ausgedehnt werden kann. Diese Diskussion wurde später als Autorenkollektiv veröffentlicht²⁵. In den FGSV Gremien zur Teilfortschreibung der RiLSA 2003 wurde damals über die Aufnahme dieser Sonderform der Signalisierung im Arbeitskreis „Verkehrsbeeinflussung innerorts“ diskutiert, um besonders benachteiligten Verkehrsströmen während der Hauptverkehrszeiten hohe Kapazitäten zu ermöglichen, ohne dabei in Normalverkehrszeiten Unflexibilitäten, hohe Wartezeiten und hohe Betriebskosten in Kauf nehmen zu müssen. Im Entwurf zur Teilfortschreibung werden als potentielle Einsatzfelder

- die Schaffung von Zeitlücken für wartepflichtige Fahrzeuge,
- die Beschleunigung und Priorisierung von ÖPNV-Fahrzeugen
- sowie die Sicherung von Überquerungsstellen

genannt. Die aufgeführten Einsatzfelder sollten jedoch nur als Einzelbeispiele verstanden werden. Die Teilsignalisierung wurde als erster Schritt hin zu einer Vollsignalisierung aufgefasst und vor allem dort empfohlen, wo eine vollständige Signalisierung aufgrund örtlicher Randbedingungen nur mit erheblichem Aufwand oder gar nicht möglich ist. Es sollten mit ihr folgende Ziele verfolgt werden:

- Erhöhung der Verkehrssicherheit an sonst unsignalisierten Knotenpunkten
- Steigerung der Kapazität ursprünglich nicht signalisierter Knotenpunkte mit geringem signaltechnischem Aufwand
- Verminderung der Wartezeiten wartepflichtiger Verkehrsteilnehmer im Vergleich zu Knotenpunkten ohne LSA
- Vermeidung unnötiger Halte und Wartezeiten in den Hauptrichtungen, die bei einer vollständigen Signalisierung entstehen können, da bei ausreichend großen Zeitlücken im Hauptstrom Einbiegen oder Kreuzen möglich ist, ohne dass der vorfahrtberechtigte Strom unterbrochen wird
- Vermeidung von Ausbaumaßnahmen, die einen großen Flächenbedarf erfordern würden (Rechtsabbiegefahrbahnen an Kreisverkehrsplätzen, Einfädelungstreifen an plangleichen Knotenpunkten, teilplanfreie oder planfreie Lösungen)
- Einsparung hoher Investitions- und Folgekosten, da Anlagenperipherie und Steuerung einer nicht vollständigen Signalisierung kostengünstiger realisiert und betrieben werden können als bei einer vollständigen Signalisierung

Es fehlten zu diesem Zeitpunkt noch gesicherte Erkenntnisse zur Wirkung auf Verkehrsqualität und Verkehrssicherheit, so dass in der Endfassung der Teilfortschreibung das Kapitel über nicht vollständige Signalisierungen wieder gestrichen wurde.

Die Bedenken - vor allem hinsichtlich Verkehrssicherheit - waren zu groß, um diese Signalisierungsart in die Richtlinie aufzunehmen. Stattdessen hat die BaSt ein Forschungsprojekt lanciert, das die Leistungsfähigkeit und die Verkehrssicherheit nicht vollständig signalisier-

²⁵vgl. ARBEITSKREIS LICHTSIGNALANLAGEN UND KNOTENPUNKTGESTALTUNG 1983

ter Knotenpunkte untersuchen sollte. Es handelt sich hierbei um die im Vorfeld bereits mehrfach erwähnte Studie von FROST UND SCHULZE, die 2008 abgeschlossen wurde. Sie gliedert sich in die 5 Bereiche:

1. Bestandsanalyse
2. Empirische Verkehrsbeobachtungen
3. Simulation des Verkehrsablaufs
4. Verkehrssicherheitsanalyse
5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Bestandsanalyse gibt einen Überblick über die Verbreitung solcher Anlagen in Deutschland mit ihren jeweiligen Ausprägungen. Hierzu wurde eine bundesweite Befragung durchgeführt. Auf deren Ergebnisse stützt sich die explorative Befragung dieser Arbeit in Kapitel 2.5, die jedoch einen anderen Schwerpunkt aufweist. Auf Basis dieser Befragung wurden sechs Knotenpunkte für weitergehende Untersuchungen ausgewählt. Das Verkehrsgeschehen wurde im Rahmen der empirischen Beobachtungen zur Kalibrierung von Simulationsmodellen auf Video aufgezeichnet. Mit diesen wurden die Knotenpunkte anschließend unter verschiedenen Verkehrsbelastungen mit den drei Regelungsarten

- vorfahrtgeregelt
- teilsignalisiert
- vollsignalisiert

untersucht. Für die Beurteilung der Verkehrssicherheit wurden für diese Knotenpunkte sowie 21 weitere in ganz Deutschland Unfalldaten ausgewertet. Letztlich erfolgte anhand von Beispielkalkulationen eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der sechs Beispielknoten.

Als wesentliche Erkenntnisse dieser Studie kann die Erarbeitung von Einsatzgrenzen genannt werden, die auf Basis der durchgeführten Mikrosimulationen ermittelt wurden. Demnach liegen die Grenzen für eine Teilsignalisierung in der Größenordnung der Vollsignalisierung, wie Tabelle 2.1 entnommen werden kann.

Einsatzbereich (innerorts)	Richtung	von [KFZ/h]	bis [KFZ/h]
unsignalisiert	Hauptrichtung	800	1400
	Nebenrichtung	200	600
teilsignalisiert	Hauptrichtung	800	2000
	Nebenrichtung	300	800
vollsignalisiert	Hauptrichtung	800	2000
	Nebenrichtung	300	750

Tabelle 2.1: Einsatzbereich von Teilsignalisierung
Quelle: FROST und SCHULZE 2008

Die durchgeführten Untersuchungen weisen jedoch diverse Defizite auf, die eine Verallgemeinerung verhindern. Erstens basieren sie nur auf sechs Beispielknotenpunkten, zweitens fehlt eine vertiefte Analyse des Verkehrsablaufs, die für eine Übertragbarkeit der Ergebnisse und die Aufstellung eines Bemessungsverfahrens essentiell ist, und drittens ist keine Typisierung teilsignalisierter Knoten vorgenommen worden. Darüber hinaus fehlen empirische Untersuchungen zum Verhalten der Verkehrsteilnehmer.

Die dennoch positiven Erkenntnisse vor allem hinsichtlich der Sicherheit erlaubten schließlich die Aufnahme der Teilsignalisierung in die Ausgabe 2010 der RiLSA.

Ferner haben sich in Deutschland auch studentische Arbeiten mit der Thematik beschäftigt. Dem Verfasser standen Arbeiten aus Darmstadt und Stuttgart zur Verfügung. VESPER hat exemplarisch drei teilsignalisierte Knotenpunkte beobachtet und kommt bezüglich Verkehrssicherheit und Kapazität zu positiven Ergebnissen. KERSCHBAUM hat weitaus mehr Knotenpunkte untersucht und festgestellt, dass eine Teilsignalisierung erst sinnvoll ist, wenn ein Teilstrom die QSV E erhält. Sonst ist eine Vorfahrtregelung geeigneter. Er empfiehlt bei der Erwägung der Installation einer Teilsignalisierung, diese mit einer Vollsignalisierung zu vergleichen. Aufgrund mangelnder Unfallzahlen kann er keine abschließenden Aussagen zur Verkehrssicherheit treffen.

Ansätze zur Beeinflussung von Kreisverkehren finden sich bei LAGEMANN. In seiner Dissertation legt er die prinzipiellen Möglichkeiten der ÖV-Priorisierung an Kreisverkehren dar. Eine Möglichkeit zur Realisierung einer Bus-Priorisierung ist die Teilsignalisierung, bei der der Verkehrsstrom unterhalb der Zufahrt des ÖV-Fahrzeuges angehalten wird. Diese Möglichkeit erlaubt im Gegensatz zur Vollsignalisierung die Aufrechterhaltung gewisser Fahrbeziehungen im Kreis während der Sperrzeit. Der Anwendungsfall der ÖV-Priorisierung wird in dieser Arbeit genauer in Kapitel 11 behandelt. Außerdem gab es Versuche zur Beeinflussung eines Kreisverkehrs in Kaiserslautern²⁶. Die dort durchgeführten Beobachtungen und Simulationen haben gezeigt, dass eine Lichtsignalsteuerung unter bestimmten Rahmenbedingungen an Kreisverkehren sinnvoll sein kann, um den Verkehrsfluss zu optimieren und um einzelne Zufahrten zu priorisieren, wie dies bei klassischen lichtsignalgeregelten Knotenpunkten auch der Fall ist. Leider konnte die Praxistauglichkeit in diesem Projekt nicht abschließend geklärt werden, sodass an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf besteht. Umsetzungsbeispiele finden sich in Dillenburg und Verden an der Aller.

²⁶ROOS und REUTTER 2014

2.2 Schweiz

In der Schweiz befasste sich ein Forschungsvorhaben des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) mit der Verkehrsbeeinflussung an Kreisverkehren²⁷. Ferner führt das Hinweispapier des Baudepartements des Kantons Aargau diese Möglichkeit an²⁸. Die aufgeführten Einsatzmöglichkeiten sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Ziel	Ansatz	Einsatz im Zusammenhang mit
Sichern	keine Konflikte durch zeitliche Trennung der Ströme	Erhöhen der Verkehrssicherheit Ermöglichen von Durchfahrten schienengebundener Verkehrsmittel, Einfahren von Linienbussen vom Busstreifen in die Zufahrt
Bevorzugung einzelner Ströme	durch zusätzliche Zeitlücken kurzfristige Erhöhung der Leistungsfähigkeit einer Zufahrt	Erhöhen der Leistungsfähigkeit durch Bündeln der Fußgängerströme Bevorzugen von Linienbussen auf einer Zufahrt, gezieltes Bevorzugen einer Zufahrt (z.B. Stau-Management, Tunnel, Autobahn-Ausfahrt)
Leistungssteigerung	Steuern der Zufahrten als Einzelknoten mit Anhalten auf Kreisfahrbahn	Erhöhung der Gesamtleistungsfähigkeit bei Großkreisel
Gewährleistung des Verkehrsablaufs	einzelne Fahrtfreigabe der verschiedenen Zufahrten	Gewährleisten Verkehrsablauf bei überlastetem Netz, Verhindern Überstauen der Kreisfahrbahn, wenn Abfluss aus Kreisel nicht gewährleistet

Tabelle 2.2: Einsatzmöglichkeiten von Signalisierung an Kreisverkehren gemäß VSS 2005

²⁷ vgl. VSS 2005

²⁸ AARGAU 2004

Die Studie kommt zu dem Schluss, dass teilweise die Vorteile von Kreisverkehren mit denen von Lichtsignalanlagen verbunden werden können. Dies trifft vor allem auf die Durchfahrt schienengebundener Fahrzeuge und die Priorisierung von Bussen zu. Ebenso kann eine Bündelung der Fußgängerströme aus Sicherheits- oder Leistungsfähigkeitsgründen ausschlaggebend für eine Signalisierung sein. Die Studie besagt aber auch, dass eine Steuerung von kleinen Kreisverkehren zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit einzelner Zufahrten weder im In- noch im Ausland umgesetzt worden sind.

Die Teilsignalisierung von Einmündungen und Kreuzungen wurde in der Schweiz bislang weder in der Wissenschaft noch in der Praxis betrachtet. In den einschlägigen Richtlinien ist im Gegensatz zu Deutschland und Österreich kein gesondertes Kapitel hierzu vorhanden. Gleichwohl ist eine Teilsignalisierung von der Richtlinie²⁹ auch nicht ausgenommen.

2.3 Österreich

In Österreich existiert ein Merkblatt zu unvollständigen Verkehrslichtsignalregelungen aus dem Jahre 2014. Es beinhaltet im Wesentlichen die Aspekte, die auch in der deutschen RiLSA zu finden sind. Die Definition lautet:

*Einrichtung zur Regelung eines Konfliktpunktes, bei der nicht alle Verkehrsbeziehungen signaltechnisch geregelt werden und bei der das grüne Licht zur Anzeige der Freigabe nicht zum Einsatz kommt.*³⁰

Das Merkblatt führt folgende Ziele an:

- Verbesserung der Verkehrssicherheit im Vergleich zu unsignalisierten Knoten
- Erhöhung der Leistungsfähigkeit für den wartepflichtigen Verkehr
- Verminderung von Wartezeiten für wartepflichtigen Verkehr
- Vermeidung von unnötigen Wartezeiten in den Hauptverkehrsströmen gegenüber einer vollständigen Signalisierung

Nach Aussage von Prof. Martin Fellendorf von der TU Graz sind solche Anlagen bislang nur im Zusammenhang mit dem schienengebundenen ÖV anzutreffen. Beispiele zur Steuerung des MIV sind nicht bekannt. Das Thema ist von der Wissenschaft bislang nicht aufgegriffen worden.

2.4 Nicht deutschsprachiges Ausland

Japan In Japan sind laut Aussage von Prof. Hideki Nakamura von der Nagoya Universität vereinzelt Teilsignalisierungen zu finden, vor allem als Bedarfs LSA für Fußgänger. Ob diese

²⁹VSS 1996.

³⁰FSSV 2014, S. 2

jedoch der hier verwendeten Definition entsprechen, kann nicht geklärt werden. Literatur ist zu diesem Thema nicht bekannt.

Frankreich In französischen Richtlinienwerken lassen sich keine Regelungen zur Teilsignalisierung finden³¹. Es findet sich allerdings auch kein Ausschlusskriterium darin. Eine direkte Anfrage an das zuständige Ministerium blieb bis zur Fertigstellung dieser Arbeit unbeantwortet, so dass diesbezüglich keine Informationen vorliegen.

Niederlande Die niederländischen Gesetze und Richtlinien behandeln das Thema Teilsignalisierung ebenfalls nicht. Eine Anfrage beim zuständigen Ministerium bestätigt dies. Spezifische Informationen liegen den Verantwortlichen nicht vor. Dies schließt jedoch nicht aus, dass auf kommunaler Ebene solche Anlagen existieren. Dies herauszufinden, wäre jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden und der Erkenntnisgewinn wird als gering eingestuft, weshalb hierauf in dieser Arbeit verzichtet wird.

2.5 Explorative Befragung zur Teilsignalisierung in Deutschland

Die Analyse der derzeitigen Erfahrungen mit der Teilsignalisierung in Deutschland erfolgte anhand einer explorativen Befragung von Straßenbauverwaltungen. Diese verfolgte den Zweck, einen ersten Überblick über die Einsatzbedingungen solcher Knotenpunkte zu bekommen. Hierzu ergingen im Sommer 2015 an 60 Straßenbauverwaltungen Fragebögen zur baulichen Ausgestaltung, den Verkehrsbelastungen, den eingesetzten Steuerungsverfahren sowie der erreichten Qualität des Verkehrsablaufs an ausgewählten teilsignalisierten Knotenpunkten. Damit unterscheidet sich die Befragung wesentlich von der damals durchgeführten Studie von FROST UND SCHULZE.

2.5.1 Auswahl der angeschriebenen Ämter und Knotenpunkte

Aus forschungsökonomischen Gründen wurde in dieser Arbeit auf eine Vollerhebung in Deutschland verzichtet. Es wurden nur diejenigen Verwaltungen angeschrieben, die bereits in der Studie von FROST UND SCHULZE angegeben hatten, teilsignalisierte Knotenpunkte zu betreiben. Die Befragung fand mit Unterstützung des Deutschen Städtetages statt. Eine Übersicht der ausgewerteten Knotenpunkte befindet sich im Anhang A und B. Insgesamt betrachtet wurden somit 307 Knotenpunkte. Davon waren 156 Einmündungen und 149 Kreuzungen. Kreisverkehre waren nur zwei vertreten. Die Knotenpunkte verteilen sich auf insgesamt 49 Städte.

³¹MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER 1991

2.5.2 Aufbau des Fragebogens

Für die Befragung wurde ein Fragebogen, unterteilt in die sechs Blöcke:

- Block A: Bauliche Gegebenheiten
- Block B: Verkehrsdaten
- Block C: Steuerungsverfahren
- Block D: Bewertung des Verkehrsablaufs
- Block E: Ansprechpartner
- Block F: Sonstiges

entworfen. Dieser unterschied sich je nach Knotentyp (Einmündung, Kreuzung oder Kreisverkehr). Jede Verwaltung erhielt für ihre jeweiligen Verkehrsanlagen einen Fragebogen mit bereits vorausgefülltem Kopf. Somit konnte sichergestellt werden, dass der richtige Fragebogen verwendet wurde. Blanko Exemplare der Fragebögen befinden sich in den Anhängen C bis E.

Block A Der erste Block befasst sich mit der Fahrstreifenaufteilung am Knotenpunkt und den Aufstellplätzen in den einzelnen Strömen. Grafisch konnte markiert werden, welche Ströme separat oder auf Mischfahrstreifen geführt werden. Bei einer separaten Führung wurde zusätzlich die Zahl der Aufstellplätze abgefragt.

Block B Im Block Verkehrsdaten waren die Kommunen gebeten, das Verkehrsaufkommen anzugeben. Gefragt wurde nach der maßgeblichen stündlichen Verkehrsstärke in Fahrzeugen pro Stunde sowie dem zugehörigen Schwerverkehrsanteil für jeden Strom mit einer Zusatzangabe der letzten Erhebung dieser Daten. In einem größeren Raster wurden zusätzlich Fuß- und Radverkehrsaufkommen in drei Stufen ermittelt. Das Fußgängeraufkommen konnte hierbei in den Stufen

- Niedrig, entspricht bis 200 Fg/h
- Mittelmäßig, entspricht 200 Fg/h bis 400 Fg/h
- Hoch, entspricht über 400 Fg/h

angegeben werden. Das Radverkehrsaufkommen am Knotenpunkt wurde in die drei Stufen

- Niedrig, entspricht bis zu 5% DTV
- Mittelmäßig, entspricht 5% bis 10% DTV
- Hoch, entspricht über 10% DTV

eingeteilt. Letztlich wurde noch nach einer regelmäßigen Befahrung des Knotens durch Linienfahrzeuge gefragt.

Block C Die Teilnehmer waren im Block Steuerungsverfahren gebeten, zwischen folgenden Arten der Steuerung zu wählen:

- Festzeitsteuerung mit Angabe von Umlaufzeit- und Sperrzeit
- Verkehrsabhängige Steuerung
 - mittels Rückstaulängen im Nebenstrom
 - mittels Wartezeiten im Nebenstrom
 - mittels Zeitlücken im Hauptstrom
- Anforderung durch ÖV
- Anforderung durch Fußgänger
- Sonstiges

Eine Mehrfachnennung war möglich. Die Lage der Signalgeber konnte wiederum grafisch in einer vorgefertigten Skizze eingezeichnet werden.

Block D Für die Bewertung des Verkehrsablaufs kamen zwei Methoden in Betracht. Entweder konnten die Teilnehmer mittlere Wartezeiten sowie die QSV nach HBS angeben oder mittlere Verlustzeiten nach VISSIM, falls eine Mikrosimulation der Anlage durchgeführt wurde und entsprechende Ergebnisse vorlagen.

Blöcke E und F Die letzten beiden Blöcke befassen sich mit der Nennung von Ansprechpartnern für Rückfragen sowie einem Feld für sonstige Eintragungen.

2.5.3 Auswertung der Fragebögen

Von den angeschriebenen 49 Städten haben 12 geantwortet. Diese sind in Abbildung 2.2 ersichtlich. Das entspricht 24,5% Rücklaufquote bezogen auf die angeschriebenen Städte und 18,1% bezogen auf die Gesamtanzahl der Knotenpunkte. Es lagen somit 56 ausgefüllte Fragebögen vor. Einmündungen und Kreuzungen sind zu gleichen Teilen vertreten. Ausgefüllte Fragebögen zu Kreisverkehren sind keine eingegangen. Bei den Einmündungen waren 75% der Fragebögen, bei den Kreuzungen 53% auswertbar.

Oftmals war die Definition der Teilsignalisierung unklar, obgleich diese im Anschreiben nochmals erwähnt wurde. Bei den Einmündungen beschreiben 33% der Fragebögen vollsi-

gnalisierte Knotenpunkte und stehen daher für eine Auswertung nicht zur Verfügung. Bei den Kreuzungen liegt dieser Anteil bei 73%.

Bei den verbleibenden Fragebögen sind die Angaben oftmals lückenhaft. Die Aussagen zu baulichen Gegebenheiten und Verkehrsdaten lassen häufig keine Auswertung zu, da die Datenbasis zu gering ist. Verwunderlich ist, dass mancherorts keine Verkehrsdaten für die Bemessung vorhanden sind. Eine leicht bessere Auswertungsquote wurde im Block Steuerungsverfahren erzielt. Da die meisten Knotenpunkte (ca. 90%) durch ÖV Fahrzeuge befahren werden, liegt auch häufig eine ÖV-Anforderung (ca. 63%) vor. 75% der Anlagen werden zudem durch Fußgängeranforderungen geschaltet. Wenn eine verkehrabhängige Steuerung im MIV eingesetzt wird, so erfolgt diese meist über Wartezeiten im Nebenstrom mit unterschiedlichen Schwellwerten.

Die Befragung hat gezeigt, dass die Möglichkeit der Teilsignalisierung in Deutschland nur vereinzelt angewendet wird. Die quantitativen Daten reichen jedoch bei weitem nicht aus, um hieraus Schlüsse über Einsatzgrenzen der Teilsignalisierung ziehen zu können. Vielfach fehlen in den Fragebögen elementare Angaben, die für eine Auswertung nötig gewesen wären. Oftmals lagen die gesuchten Informationen in den Verwaltungen nicht vor oder konnten nicht mit vertretbarem Aufwand beschafft werden. Das heißt im Umkehrschluss, dass auf dem Gebiet noch großer Forschungsbedarf besteht, um den Anwendern in den Kommunen ein Handwerkszeug zu geben, mit dem sie teilsignalisierte Knotenpunkte besser bemessen können.

2.6 Zusammenschau

Die Analyse des aktuellen Stands der Wissenschaft und der Praxis zeigt, dass ein umfassender Überblick über das Thema Teilsignalisierung bislang fehlt. In Deutschland und Österreich gibt es die meisten Untersuchungen und bereits erste Berücksichtigungen in den jeweiligen Richtlinien. In der Schweiz gab es Untersuchungen zur Signalisierung von Kreisverkehren. Im nicht deutschsprachigen Ausland ist die Teilsignalisierung gemäß den durchgeführten Recherchen unbekannt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Literatur nur wenig Informationen über die Teilsignalisierung, insbesondere den Verkehrsablauf und die Bemessung, enthält. Die Themenkomplexe Verkehrssicherheit und Kosten hingegen konnten bereits hinlänglich erforscht werden und sind daher nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit. In den folgenden Kapiteln wird versucht, diese Wissenslücke genauer zu identifizieren, die entsprechenden Fragestellungen zu entwickeln und im Folgenden zu beantworten.



Abbildung 2.2: Städte mit auswertbaren Fragebögen

3 Methodik und Vorgehensweise

3.1 Ziel der Arbeit

Die Analyse des aktuellen Stands von Wissenschaft und Praxis hat gezeigt, dass viele Fragestellungen zu teilsignalisierten Knotenpunkten unbeantwortet sind. Diese Forschungslücke soll mit der vorliegenden Arbeit geschlossen werden.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es,

- einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Arten der Teilsignalisierung zu geben
- den Verkehrsablauf im MIV an teilsignalisierten Knotenpunkten besser zu verstehen und zu beschreiben
- die Einsatzgrenzen in Relation zu den beiden klassischen Regelungsarten herauszufinden
- Auswirkungen auf die Belange der nicht motorisierten Verkehrsteilnehmer zu identifizieren und hierfür Lösungsmöglichkeiten zu entwickeln
- weitere Potentiale der Teilsignalisierung aufzuzeigen

3.2 Thesen und forschungsleitende Fragestellungen

3.2.1 Fragestellungen

Neben der grundsätzlichen Frage, ob mit einer Teilsignalisierung die Ziele nach RiLSA aus Kapitel 1.2.1 erreicht werden können, ergeben sich aus der Literaturstudie in dieser Arbeit folgende forschungsleitende Fragestellungen bezüglich teilsignalisierter Knotenpunkte:

1. Welche Ausprägungen von Teilsignalisierungen bezogen auf die Lage der Signalgeber gibt es und wie sinnvoll sind diese einsetzbar?
2. Für welche Anwendungszwecke kann eine Teilsignalisierung eingesetzt werden?
3. Wie ist der Verkehrsablauf im MIV an teilsignalisierten Knotenpunkten charakterisiert?
4. Wie müssen Signalprogramme für teilsignalisierte Knotenpunkte aussehen?
5. Unter welchen Verkehrsbelastungen kann eine Teilsignalisierung an Knotenpunkten eingesetzt werden?

6. Welchen Einfluss hat die Teilsignalisierung auf nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer?
7. Welchen Platz nimmt die Teilsignalisierung zwischen den etablierten Regelungen ein?
8. Welche Möglichkeiten ergeben sich für den ÖV?
9. Wie ist die Teilsignalisierung aus Sicht der Verkehrssicherheit für alle Verkehrsteilnehmer zu bewerten?
10. Ist eine Teilsignalisierung günstiger in Bau und Betrieb als die etablierten Lösungen?

Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht die Fragen 1 bis 8 zu beantworten. Die letzten beiden Fragestellungen hat die Studie von FROST UND SCHULZE ausführlich analysiert und der Verfasser sieht daher hierzu aktuell keinen weiteren Forschungsbedarf.

3.2.2 Thesen

Aus den Fragestellungen lassen sich folgende Thesen ableiten, die im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen überprüft werden sollen.

These 1 Eine Kolonnenbildung bewirkt eine Erhöhung der Kapazität³². Die räumlichen Abstände der Fahrzeuge im Hauptstrom werden durch Sperrung mittels Signalgeber verringert. Die Fahrzeuge fließen anschließend als Pulk mit geringen Abständen ab. Zwischen den Pulks wird durch das Anhalten eine künstliche, große Lücke geschaffen. Dadurch werden Zeiten frei, die dem Nebenstrom angeboten werden können. Durch eine veränderte Zeitlückenverteilung des Hauptstroms stehen mehr Lücken oberhalb der Grenzzeitlücke zur Verfügung, die durch Nebenstromfahrzeuge genutzt werden können. Nebenstromfahrer können nach wie vor selbst entscheiden, wann sie in den Hauptstrom einfahren. Diese These gilt gleichermaßen für Einmündungen, Kreuzungen und Kreisverkehre. Die künstlich geschaffenen Lücken können ebenso Fußgängern zur Querung angeboten werden.

These 2 Teilsignalisierte Knotenpunkte sind bei bestimmten Verkehrsbelastungskonstellationen leistungsfähiger als etablierte Regelungen, da keine starren Freigabezeiten für den Nebenstrom gelten. Zusätzlich entfallen bei einer Teilsignalisierung die Zwischenzeiten.

These 3 Eine Teilsignalisierung ist insbesondere dann leistungsfähig, wenn sich der Knotenpunkt im Übergangsbereich bzgl. der anliegenden Verkehrsstärken zwischen der Vorfahrtregelung und der Vollsignalisierung befindet.

These 4 Eine Teilsignalisierung behindert den Hauptstrom in geringerem Maße als eine Vollsignalisierung, da dieser nur angehalten wird, wenn tatsächlich Nebenstromfahrzeuge eine ausreichend große Lücke benötigen.

³²vgl. GROSSMANN 1990 S. 7

These 5 An Kreisverkehren kann eine Teilsignalisierung einzelner Zufahrten, insbesondere bei asymmetrischen Belastungen und ungünstigen Geometrieverhältnissen, zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit führen.

3.3 Vorgehensweise, Methoden und Abgrenzung

Zur Beantwortung der im vorherigen Kapitel aufgestellten Fragen kommt in dieser Arbeit ein mehrstufiger Ansatz zur Anwendung. Vorgeschaltet sind im Grundlagenteil eine Literaturrecherche im In- und Ausland und eine explorative Befragung (siehe Kapitel 2) von deutschen Straßenbauverwaltungen, die den aktuellen Stand der Praxis erfragen soll.

Zunächst erfolgt die Darstellung der Grundlagen des Verkehrsablaufs an vorfahrtgeregelten und vollsignalisierten Knotenpunkten sowie darauf aufbauend die Ableitung eigener Überlegungen zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Anlagen.

Der zweite Teil der Arbeit widmet sich den eigenen Untersuchungen. Zunächst erfolgt eine Typisierung teilsignalisierter Knotenpunkte hinsichtlich Anzahl und Lage der Signalgeber und Fahrstreifen und die Ableitung von Modellknoten für die späteren Untersuchungen. Zur Überprüfung der eigenen Überlegungen zum Verkehrsablauf dienen zum einen zwei Feldversuche in Bad Kreuznach und zum anderen Mikrosimulationsverfahren. Die Ergebnisse aus der Empirie unterstützen den Aufbau der Simulationsmodelle. Anschließend folgen aus diesen beiden Untersuchungen Schlüsse auf den Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten und die Ermittlung der Einsatzgrenzen. Abgerundet wird die Forschungsarbeit durch die Betrachtung der Belange nicht motorisierter Verkehrsteilnehmer sowie weiterer Anwendungsmöglichkeiten von Teilsignalisierungen.

Die Vorgehensweise kann nochmals in Abbildung 3.1 grafisch nachvollzogen werden. Alle einzelnen Schritte, mit Ausnahme der explorativen Befragung und der Darstellung der Grundlagen des Verkehrsablaufs, die bereits in Kapitel 2.5 behandelt wurde, sind im folgenden nochmals ausführlicher dargelegt. Die Gliederung der Arbeit orientiert sich an diesen Schritten. Spezifische Methoden zur empirischen Untersuchung und den Mikrosimulationen folgen in den entsprechenden Kapiteln.

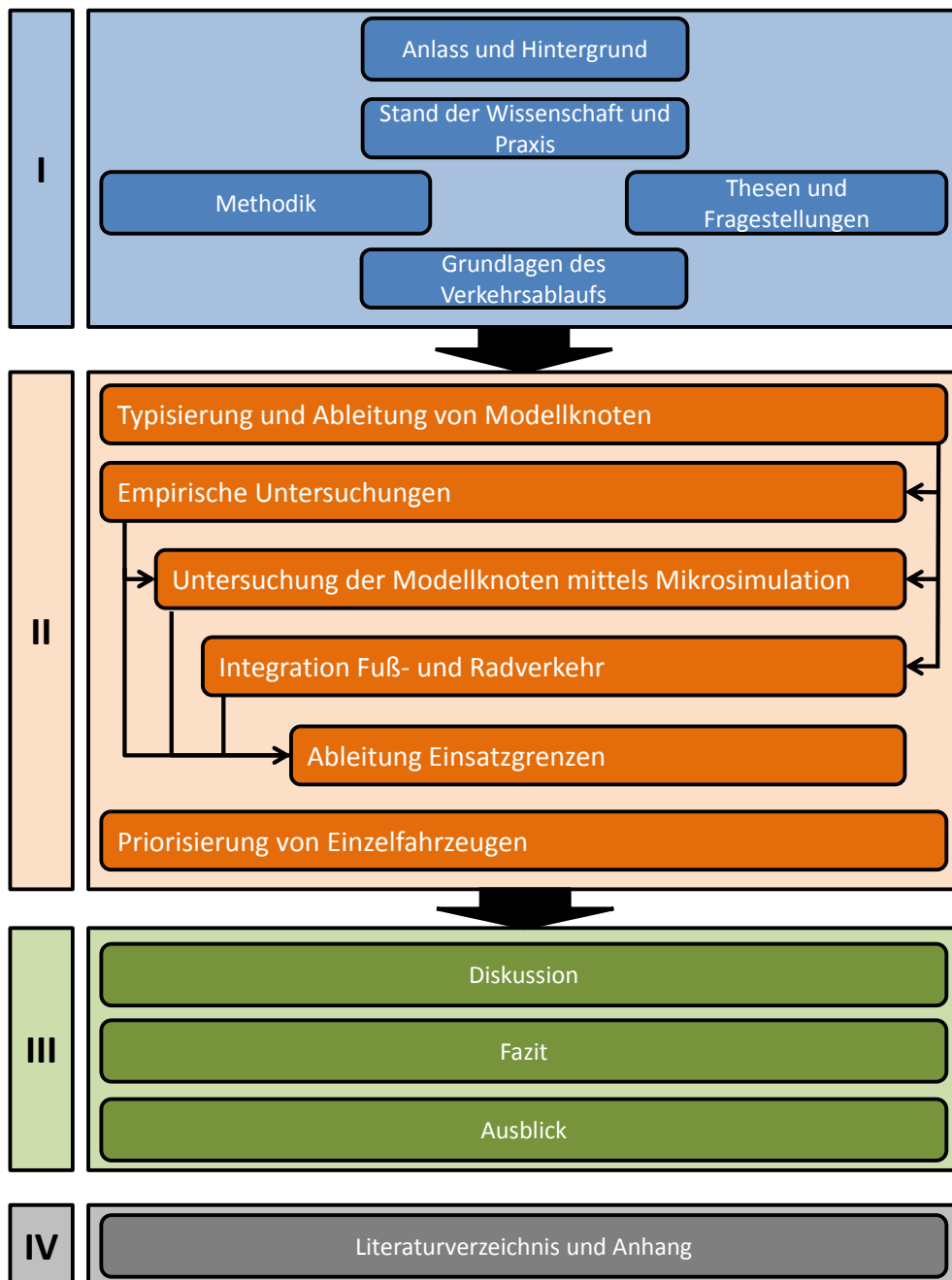


Abbildung 3.1: Aufbau der Arbeit

Typisierung und Ableitung von Modellknoten Mit der Typisierung werden mehrere Ziele verfolgt. Primär soll der Einfluss der Fahrstreifenaufteilung mit in die weiteren Untersuchungen einfließen, weshalb **Ausbaustandards** (AS) mit ähnlich vermutetem Verkehrsablauf gebildet werden, in die die einzelnen Möglichkeiten eingruppiert werden. Daneben soll aufgezeigt werden, welche **Fälle der Teilsignalisierung** bezogen auf die Anzahl und Lage der Signalgeber es für Knotenpunkte gibt und mit welchen Vor- und Nachteilen diese verbunden sind. Letztlich werden für jede Klasse Modellknoten definiert, auf die die verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung angewendet werden, um diese in späteren Untersuchungen anwenden zu können.

Empirische Untersuchung zum Verkehrsablauf im MIV an teilsignalisierten Einmündungen Da es bislang noch keine empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten gibt, kommen zur weiteren Validierung der eigenen Überlegungen empirische Untersuchungen an einer Einmündung zur Anwendung, da dort die Verkehrsabläufe am einfachsten zu erheben sind. Ziel ist es, zu analysieren, wie sich durch den Einsatz einer Teilsignalisierung zum einen die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom so beeinflussen lässt, dass Fahrzeuge zu Pulks zusammengefasst und somit größere Lücken für die Nebenrichtung geschaffen werden und zum anderen, wie sich diese Maßnahme auf Wartezeiten und Rückstaulängen auswirkt. Ferner werden Zeitbedarfswerte analysiert, um das Einfahrverhalten aus dem Nebenstrom beschreiben zu können. Hierzu wurden in Bad Kreuznach provisorisch zwei Knotenpunkte zu einer Teilsignalisierung umgerüstet. Die Erkenntnisse fließen auch in die Untersuchung der Modellknoten durch die Mikrosimulationen ein. Darüber hinaus geben die Untersuchungen Aufschluss über das Verhalten von Fußgängern und Radfahren an teilsignalisierten Knotenpunkten.

Untersuchung von Modellknoten mittels Mikrosimulation Zur weiteren Klärung der Frage nach dem Verkehrsablauf und der Kapazitätsermittlung sowie den Einsatzgrenzen kommen umfangreiche Mikrosimulationen zur Anwendung. Es hat sich nämlich gezeigt, dass mit den Erkenntnissen aus der Literatur und der empirischen Untersuchung allein die Fragestellungen nicht hinreichend beantwortet werden können. Hierfür werden die in der Typisierung festgelegten Modellknotenpunkte unter verschiedenen Belastungsszenarien und Signalprogrammen mit dem „ceteris paribus“ Ansatz aus den Wirtschaftswissenschaften untersucht³³. Bei diesem wird immer nur ein Parameter verändert und die restlichen Einflussgrößen bleiben konstant. Somit können die Auswirkungen der einzelnen Einflussgrößen präzise ermittelt werden. Zunächst war geplant, nur die Verkehrsbelastungskonstellationen zu simulieren, die nach HBS2015 für eine Teilsignalisierung infrage kommen. Es hat sich während der Bearbeitung jedoch gezeigt, dass keine Vergleichbarkeit mit den nach HBS2015 ermittelten mittleren Wartezeiten und den simulierten mittleren Verlustzeiten besteht. Daher wurde dieser Weg verworfen und alle Konstellationen durch Simulationen untersucht, auch wenn hierzu ein erheblicher Rechenaufwand nötig war. Damit kann die Teilsignalisierung mit den etablierten Regelungen verglichen werden. Dieses Verfahren hat SIEGLOCH seinerzeit mit der Begründung der mangelnden Rechnerkapazität abgelehnt, obgleich es ihm von den Ergebnissen her zusagte³⁴. Die 40 Jahre später

³³vgl. WÖHE und DÖRING 2013

³⁴vgl. SIEGLOCH 1973 S. 7

verfügbare Rechenleistung macht dieses Vorgehen möglich. Aus den Simulationen können anschließend diverse Kenngrößen ermittelt werden, die es erlauben, den Verkehrsablauf und die Einsatzgrenzen zu beschreiben.

Integration des Fuß- und Radverkehrs Neben dem MIV spielen an Knotenpunkten vor allem innerorts Fußgänger und Radfahrer eine große Rolle. Zur Beantwortung der Frage nach den Auswirkungen auf diese beiden Gruppen sollen neben der Literatur vor allem die eigenen Beobachtungen über Querungsverhalten und Interaktion mit dem MIV einfließen, die während der empirischen Erhebungen gemacht wurden. Anschließend sollen diese Erkenntnisse unter Beachtung der Richtlinien für Fußgängerverkehrs- und Radverkehrsanlagen in deren Adaption auf teilsignalisierte Knotenpunkte einfließen.

Ermittlung der Einsatzgrenzen Mit den Erkenntnissen aus den empirischen Untersuchungen und der Mikrosimulation der Modellknoten werden die Einsatzgrenzen ermittelt. Hierzu werden die Verlustzeitergebnisse der teilsignalisierten Knotenpunkte denen vorfahrtsregelter und vollsignalisierter gegenübergestellt und betrachtet, bei welchen Verkehrsbelastungen sich Vorteile für eine gewisse Regelungsart ergeben. Basis hierfür sind Diagramme der mittleren Verlustzeiten aus den Simulationen in Abhängigkeit der Verkehrsstärken in Haupt- und Nebenrichtung.

Teilsignalisierung an Kreisverkehren Eine Teilsignalisierung an Kreisverkehren kann zur Sicherung von Fußgängern oder zur Kapazitätssteigerung einzelner Zufahrten eingesetzt werden. Die prinzipielle Wirkungsweise einer Zufussdosierung soll anhand eines vereinfachten Modells unter Beibehaltung der Simulationsumgebung analysiert werden.

Priorisierung von Einzelfahrzeugen Neben der Kapazitätssteigerung im MIV gibt es noch weitere Anwendungsmöglichkeiten einer Teilsignalisierung, bei denen es um die Priorisierung von Einzelfahrzeugen bzw. Fahrzeuggruppen geht. Es sollen die prinzipielle Wirkungsweise solcher Anlagen dargestellt und die Einsatzfelder definiert werden.

4 Grundlagen des Verkehrsablaufs und Bemessungsverfahren

Das folgende Kapitel widmet sich den Theorien über den Verkehrsablauf und den darauf aufbauenden Bemessungsverfahren an Knotenpunkten. Es erfolgt eine Übersicht über die Verfahren vorfahrt geregelter und vollsignalisierter Knotenpunkte. Das Verständnis dieser ist essentiell für den weiteren Verlauf der Arbeit. Am Ende des Kapitels resultieren daraus eigene Überlegungen zum möglichen Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten.

4.1 Verkehrsablauf an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten

Dieser Abschnitt stellt den Verkehrsablauf an nicht lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten dar. In der Vergangenheit wurden hierzu verschiedene Verfahren entwickelt. Abbildung 4.1 zeigt diese mit den jeweils maßgeblich an der Entwicklung beteiligten Personen.

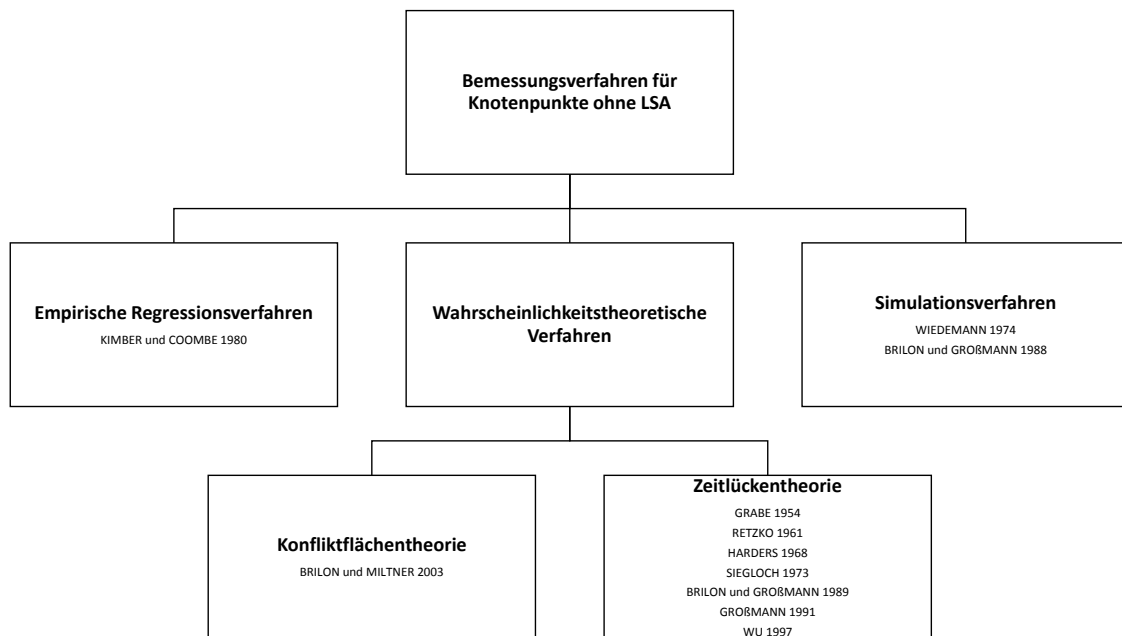


Abbildung 4.1: Übersicht der Berechnungsverfahren für Knotenpunkte ohne LSA

Bis auf die Simulationsmodelle, die Gegenstand von Kapitel 7 sind, werden die Verfahren im Folgenden kurz mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt.

4.1.1 Empirische Regressionsverfahren

Bei der Regressionsanalyse werden die Verkehrsstärken im vorfahrtberechtigten Hauptstrom ermittelt und ihnen die einfahrenden Fahrzeuge des Nebenstroms gegenübergestellt. Es werden nur Zeitintervalle mit Rückstau im Nebenstrom betrachtet. Die Kapazität des Knotenpunkts ergibt sich aus der Summe der während des Rückstaus pro Zeiteinheit in den Hauptstrom eingefahrenen Fahrzeuge. Durch lineare Regressionsrechnung wird anschließend der Zusammenhang zwischen Kapazität C des Nebenstroms und der Verkehrsstärke q_p des Hauptstroms ermittelt³⁵. Die Methode stammt aus Großbritannien und wurde von KIMBER und COMMBE 1980 eingeführt.

Es können jedoch lediglich Einmündungen mithilfe der Regressionsanalyse beurteilt werden. Für Kreuzungen mit mehr als drei Zufahrten liegen noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Bedeutung hat sie vor allem in Bezug auf Kreisverkehre erlangt, die bei der Berechnung als Aneinanderreihung mehrerer Einmündungen verstanden werden³⁶. Weitere Ausführungen zu Kreisverkehren finden sich in Abschnitt 4.3.

4.1.2 Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle

Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle gehen von Belegungswahrscheinlichkeiten sogenannter Konfliktflächen aus. Dies sind Bereiche, die von mehreren Fahrzeugströmen für die Ausübung ihrer Fahrmanöver beansprucht werden.

Prominentester Vertreter ist das von BRILON und MILTNER 2003 weiterentwickelte Konfliktmatrix-Verfahren dar, das auf der AKF-Methode (Addition kritischer Fahrzeugströme) basiert.

Dabei wird eine betrachtete Knotenpunktfläche in mehrere Teilflächen gegliedert. Jede dieser Konfliktflächen wird von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsströmen zum Passieren des Knotenpunkts befahren. Durch die Belegung von Konfliktflächen durch bevorzugte Fahrzeuge ist das Abfließen wartepflichtiger Fahrzeuge limitiert. Gemäß ihrer Rangfolge werden den verschiedenen Verkehrsströmen nacheinander Belegtzeitanteile zugewiesen. Aus dem Quotient der pro Zeitintervall für einen Verkehrsstrom zur Verfügung stehenden Belegtzeit und dem Zeitbedarfswert ergibt sich die Kapazität eines Verkehrsstroms.

³⁵vgl. BRILON und WEINERT 2001 und BRILON und MILTNER 2003

³⁶vgl. BRILON und WEINERT 2001

4.1.3 Zeitlückenverfahren

Besondere Bedeutung hat in Deutschland das Zeitlückenverfahren erlangt. Dieses Verfahren wird im folgenden Abschnitt daher näher vorgestellt, da es auch in der späteren empirischen Untersuchungen Verwendung findet.

Der Zeitlückentheorie liegt die Überlegung zugrunde, dass für jeden Fahrer eines Nebenstromfahrzeugs eine bestimmte Mindest-Zeitlücke in allen Strömen höheren Ranges gleichzeitig vorhanden sein muss, damit er sein Fahrmanöver ausführen kann. Als Zeitlücke wird der zeitliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen bezeichnet. Es kann zwischen Brutto- und Nettozeitlücken unterschieden werden, je nachdem, ob die Fahrzeuglängen mit eingerechnet werden (vgl. Abbildung 4.2). Relevant sind vor allem die Nettozeitlücken, also der Abstand zwischen Heck des ersten Fahrzeugs und Front des zweiten Fahrzeugs.

In diesem Zusammenhang ergeben sich zwei essentielle Fragestellungen:

1. Wie häufig treten Zeitlücken bestimmter Größe im Hauptstrom auf?
2. Wie werden Zeitlücken bestimmter Größe durch Nebenstromfahrzeuge genutzt?

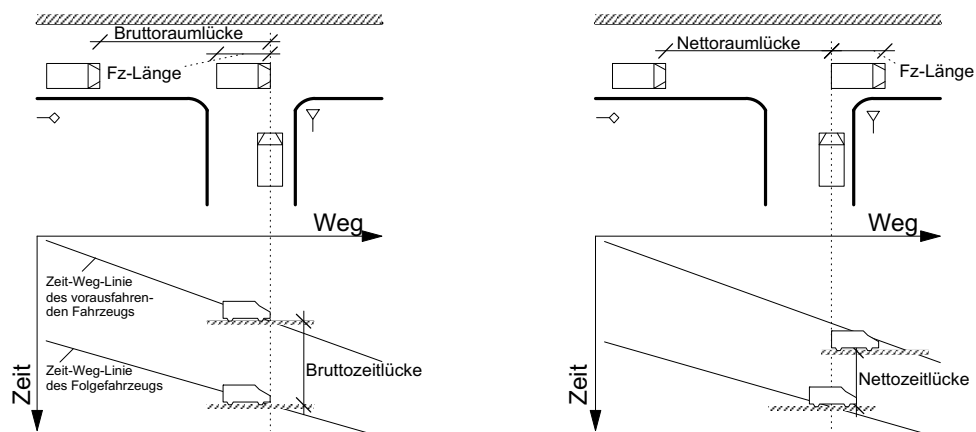


Abbildung 4.2: Brutto- und Nettolücken im Fahrzeugstrom

Quelle: SCHNABEL und LOHSE 2011

Den Grundstein der Zeitlückentheorie legt GRABE mit seiner Arbeit im Jahr 1954³⁷. Er wertete durch Filmaufnahmen und Zeitschreiber die räumliche und zeitliche Verteilung von Fahrzeugen auf der freien Strecke und an Knoten aus. Die Ergebnisse nutzte er, um über Wahrscheinlichkeitsrechnungen zu Bemessungsformeln für diese Verkehrsanlagen zu gelangen.

³⁷GRABE 1954

Er führte im Rahmen dieser Arbeit erstmals den Begriff der Grenzzeitlücke ein und bezieht sich dabei auf die Definition von GREENSHIELD³⁸. Er unterscheidet zwei Arten von Zeitlücken:

- Gap: Zeitlücke, bei der ein Nebenstromfahrzeug mindestens ein Fahrzeug passieren lässt
- Lag: Zeitlücke, bei der ein Nebenstromfahrzeug einfährt, ohne vorher ein Fahrzeug passieren zu lassen (sog. Restzeitlücke)

FINDEISEN untersuchte in diesem Zusammenhang, ob auch weitere Faktoren Einfluss auf das Einfahrverhalten haben. Er stellte fest, dass lediglich der räumliche Abstand des herannahenden Fahrzeugs relevant ist³⁹.

Für die Ankunftsverteilung von Fahrzeugen an einem Knotenpunkt wird die Poisson-Verteilung verwendet. Die Poisson-Wahrscheinlichkeit p für das Eintreffen von k Fahrzeugen bei einer mittleren Eintreffenzahl der Fahrzeuge in einem Intervall m ergibt sich durch folgende Gleichung.

$$p(m, X = k) = e^{-m} \frac{m^k}{k!} \quad (4.1)$$

Das Verhältnis j von Streuung zu Mittelwert gibt Aufschluss über den Kolonnencharakter des Verkehrsflusses. Werte um 1 charakterisieren einen zufälligen Verkehrsfluss wie er auf mittelmäßig ausgelasteten Landstraßen anzutreffen ist. Werte von 1,5 bis 2 sind typisch für städtische Verhältnisse. Weitere Informationen hierzu finden sich im Kapitel 4.1.3.2.

$$j = \frac{s^2}{m} \quad (4.2)$$

4.1.3.1 Grenzzeitlückenbestimmung

Zeitlücken können von wartenden Nebenstromfahrern angenommen oder abgelehnt werden. Dies ist abhängig von der Größe der Zeitlücke, dem fahrerischen Können, der Motorisierung, der bereits verstrichenen Wartezeit sowie weiteren Faktoren. Da diese Faktoren nicht einzeln in einer Berechnung berücksichtigt werden können, wird verallgemeinert die Grenzzeitlücke genutzt. Sie ist definiert als diejenige Zeitlücke, die von 50% der Fahrer angenommen bzw. abgelehnt wird⁴⁰. Für deren Abschätzung sind in der Vergangenheit verschiedene Verfahren entwickelt worden, weil eine direkte messtechnische Erfassung nicht möglich ist. Eine chronologische Übersicht der Schätzverfahren nach WEINERT ist in Tabelle 4.1 zu finden.

³⁸GREENSHIELDS 1947

³⁹FINDEISEN 1975

⁴⁰GREENSHIELDS 1947

Verfahren	Definition t_g	Ermittlung t_g
RAFF / HART (1950) GRABE (1954), RETZKO (1961)	Lücke, für die gilt: Anzahl angenommener Lücken $< t_g$ ist gleich der Anzahl abgelehnter Lücken $> t_g$	Schnittpunkt der Summenlinien abgelehnter und angenommener Lücken
HARDERS (1968, 1976)	die im Mittel kleinste annehmbare Lücke	für jede Klasse t wird von allen Lücken der Anteil der angenommenen gebildet --> Verteilung der aktuellen Grenzzeitlücken; $t_g =$ Mittelwert dieser Verteilung
SIEGLOCH (1973)	die im Mittel kleinste annehmbare Lücke	1. bei ständigem Rückstau wird für jede Hauptstromlücke t die Anzahl einfahrender Nebenstromfahrzeuge g gezählt 2. für jedes (ganzzahlige) g wird die mittlere Lücke gebildet 3. Regressionsgerade durch Mittelwerte ergibt $t = t_0 + t_r \cdot g$ 4. $t_g = t_0 + t_r/2$
ASHWORTH (1968, 1970) BLUMENFELD, WEISS (1978)	Erwartungswert der Verteilung angenommener Lücken, verschoben nach links	$t_g = \mu_a - q \cdot \sigma_a^2$ ($\mu_a / \sigma_a^2 =$ Erwartungswert / Varianz der Verteilung an- genommener Lücken; $q =$ Hauptstromverkehrsstärke)
HEWITT (1983, 1985, 1993)	Erwartungswert der Verteilung angenommener Lücken, korrigiert zur Berücksichtigung des Fehlers durch mehrfaches Ablehnen	iteratives Verfahren; Herleitung der Grenzzeitlückenverteilung aus dem Anteil der ersten und weiteren angenommenen und abgelehnten Lücken an der Gesamtzahl der Lücken
Probit SOLBERG, OPPENLANDER (1966), MAHMASSANI, SHEFFI (1981), HAMED et al. (1997)	t_g eines Fahrers d ergibt sich aus t_g^* aller Fahrer und zufälliger Abweichung ϵ_d ($\epsilon_d = N(0, \sigma_\epsilon)$)	$p_d(t) = 1 - \Phi((t-t_g) / \sigma_\epsilon)$ $p_d(t) =$ Wahrscheinlichkeit, dass Lücke t angenommen wird; t_g und σ_ϵ mittles Regression oder Maximum-Likelihood schätzen
Logit MAZE (1981), CASSIDY et al. (1995), TEPLY et al. (1997)	Median der Verteilung angenommener Lücken $p_a(t)$, ermittelt über die Maximierung des Nutzers U_d	$p_a(t) = 1 / (1 + e^{-V_d})$ $p_a(t) =$ Wahrscheinlichkeit, dass Lücke t angenommen wird; $V_d =$ lineare Funktion; Schätzen des Parameters mittels Regression oder Maximum- Likelihood
Maximum-Likelihood MILLER (1972), DAGANZO (1981), HOROWITZ (1982), TROUTBECK (1992)	Erwartungswert der Grenzzeitlückenverteilung, die zwischen den Verteilungen der angenommenen und größten abgelehnten Lücken liegt	$L = \sum \ln[F(a_j) - F(r_j)] = \text{Max}$ $F(a_j) / F(r_j) =$ Verteilung angenommener / abgelehnter Lücken

Tabelle 4.1: Verfahren zur Ermittlung der Grenzzeitlücke
Quelle: WEINERT 2001, S. 62

Die Modelle von ASHWORTH und HEWITT sehen die Grenzzeitlücke als Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung an. Als problematisch hat sich herausgestellt, dass ein Fahrer mehrere Lücken ablehnen kann, bevor er tatsächlich einfährt. Dadurch liegt der Anteil der angenommenen Lücken unterhalb der als annehmbar wahrgenommenen Lücken der Fahrer. Beide Autoren entwickelten Verfahren, um diesen Fehler zu korrigieren.

Die Probit-Analyse und das Logit-Modell schätzen die Wahrscheinlichkeit der Annahme einer Zeitlücke auf Grundlage statistischer Werte und Verteilungen. Das Maximum-Likelihood-Verfahren gibt die Grenzzeitlücke als den Erwartungswert der Grenzzeitlückenverteilung an, der zwischen den Verteilungen der angenommenen und größten abgelehnten Zeitlücke liegt.

Das in Deutschland gängige Verfahren zur Schätzung der Grenzzeitlücke beruht vor allem auf den Arbeiten von GRABE, HARDERS und SIEGLOCH. Unter der Voraussetzung ständigen Rückstaus in der Nebenrichtung entwickelte letzterer eine Formel zur Berechnung der Kapazität in Abhängigkeit der im übergeordneten Strom herrschenden Verkehrsstärke sowie der Grenz- und Folgezeitlücken des Nebenstroms. In dieser Arbeit wird das Verfahren von SIEGLOCH angewendet, da es sich als zweckmäßig, einfach und hinreichend genau herausgestellt hat. Die genaue Beschreibung findet sich im Kapitel 6.

Nach SIEGLOCH lässt sich folgende Kapazitätsgrundformel aufstellen, in welche die Verkehrsstärke der übergeordneten Richtung sowie die Grenz- und Folgezeitlücken der Nebenrichtung eingehen.

$$G = \frac{3600}{t_f} e^{-q_p \frac{t_0}{3600}} \quad (4.3)$$

Hierbei sind G die Grundkapazität eines Verkehrsstroms, t_f die Folgezeitlücke zwischen zwei einbiegenden Fahrzeugen, q_p die maßgebende Hauptstrombelastung des übergeordneten Stroms und t_0 die Nullzeitlücke, die von keinem Fahrzeug genutzt wird.

4.1.3.2 Einfluss der Gebundenheit von Verkehrsströmen

Die Annahme poissonverteilter Fahrzeugankünfte bzw. einer negativen Exponentialverteilung der Zeitlücken stellt eine Vereinfachung der realen Verhältnisse dar. Mit zunehmender Verkehrsstärke sind die Fahrzeugankünfte nicht mehr unabhängig voneinander und es kommt vermehrt zu Kolonnenverkehr. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von (Teil-)Gebundenheit. Ein weiterer Auslöser für die Bildung von Fahrzeugpuls sind Lichtsignalanlagen, wie sie auch bewusst bei der Teilsignalisierung eingesetzt werden. Durch die Entstehung von Fahrzeugpuls wird das Auftreten von Zeitlücken verändert und die diesem Verfahren zugrunde liegende Annahmen stimmen nicht mehr.

Diese Thematik wird in der Literatur mehrfach behandelt:

- SIEGLOCH 1973⁴¹
- ZHANG 1989⁴²
- KRELL 1956⁴³
- KNOTE 2003⁴⁴

Durchgesetzt hat sich diesbezüglich vor allem die Anwendung eines Verschiebungsmaßes a zur Berücksichtigung von städtischem Verkehr.

$$a = m \cdot (j - 1) \quad (4.4)$$

Dabei ist j das Verhältnis von Streuung (σ) zu Mittelwert m . Es kann im städtischen Verkehr Werte zwischen 1,5 und 2,5 annehmen. Bei freiem Verkehr liegt es bei 1⁴⁵.

$$j = \frac{\sigma^2}{m} \quad (4.5)$$

Die modifizierte Poissonverteilung sieht dann wie folgt aus.

$$p(m, X = k) = f \cdot e^{-(m+a)} \cdot \frac{(m+a)^{k+a}}{\Gamma(k+a+1)} \quad (4.6)$$

Der Hochrechnungsfaktor f , der nahezu bei 1 liegt, ist nötig, damit die Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten wieder 100% ergibt. Die Gammafunktion (Γ) sorgt bei $a > 0$ für eine Verschiebung der Verteilung nach links.

$$\Gamma(n+1) = n! \quad (4.7)$$

Fahren Fahrzeuge in Pulks, so treten kleine Abstände häufiger auf und es kommen gleichzeitig auch mehr große Zeitlücken vor. Mittlere Werte nehmen hingegen ab. Diese Überzufälligkeit kann durch eine zusammengesetzte Exponentialfunktion beschrieben werden⁴⁶:

$$P(ZL \geq t) = f \cdot e^{-2 \cdot f \cdot qs \cdot t} + (1-f) \cdot e^{-2 \cdot (1-f)} \cdot qs \cdot t \quad (4.8)$$

⁴¹SIEGLOCH 1973 S. 33

⁴²ZHANG 1989

⁴³KRELL 1956

⁴⁴KNOTE 2003

⁴⁵vgl. SCHNABEL und LOHSE 2011 S. 128ff.

⁴⁶vgl. ebd. S. 134f

Die zugehörige Dichtefunktion lautet:

$$f(t) = s \cdot f^2 \cdot qs \cdot e^{-2 \cdot f \cdot qs \cdot t} + 2 \cdot (1 - f)^2 \cdot qs \cdot e^{-2 \cdot (1-f) \cdot qs \cdot t} \quad (4.9)$$

Die Parameter f und r lassen sich über folgende Formeln bestimmen. Dabei ist \bar{t} die mittlere Zeitlücke des Verkehrsstroms und kann empirisch bestimmt werden. $qs = \frac{q}{3600}$ bezeichnet den sekundlichen Fahrzeugfluss. Wird $r > 1$ so ist eine Überzufälligkeit gegeben. Wird $r = 1$ so tritt keine Änderung ein und man erhält die ursprüngliche negative Exponentialfunktion. Abbildung 4.3 zeigt exemplarisch die Verschiebung einer Zeitlückenverteilung.

$$f = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{r-1}{r+1}} \right) \quad (4.10)$$

$$r = \frac{s^2}{\bar{t}^2} \quad (4.11)$$

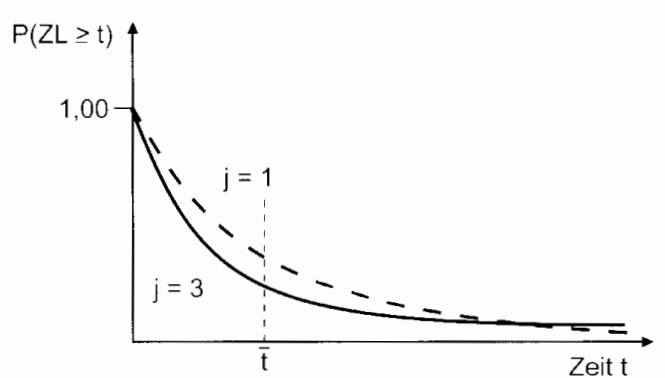


Abbildung 4.3: Zeitlücken-Summenlinie bei Überzufälligkeit
Quelle: SCHNABEL und LOHSE 2011

Grundsätzlich führt die Berücksichtigung von Kolonnenverkehr im Hauptstrom zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit des Nebenstroms⁴⁷. Mit einer Teilsignalisierung macht man sich diesen Effekt zu Nutze. Zur Bemessung einer Teilsignalisierung wären jedoch der Einfluss der Verkehrsstärke und des Signalprogramms wichtig, um den Kolonnencharakter bzw. den Zeitpunkt der Auflösung des Pulks nach der Sperrzeit bestimmen zu können. Dies geben die oben beschriebenen Verfahren derzeit nicht her.

⁴⁷vgl. GROSSMANN 1990 S. 7

4.1.4 Bemessungsverfahren nach HBS

Das aktuelle Berechnungsverfahren nach HBS für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage gliedert sich in insgesamt sechs Schritte.

1. Bestimmung der Verkehrsstärken und Umrechnung in PKW-Einheiten
2. Bestimmung der Grundkapazitäten für die Ströme ab Rang 2
3. Bestimmung der Kapazitäten mit Abminderungen für querende Fußgänger sowie ggf. Berechnung der Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustands in höherrangigen Strömen
4. ggf. Berücksichtigung von Mischströmen
5. Bestimmung der Kapazitätsreserve
6. Bestimmung der mittleren Wartezeit

Der erste Schritt dient der Berücksichtigung der Größen- und Beschleunigungseigenschaften verschiedener Fahrzeuggruppen am Knotenpunkt. Große und schwere Fahrzeuge werden als mehrere Personenwagen gewertet. Es ergeben sich normierte PKW-Einheiten. Im zweiten Schritt wird für die Ströme ab Rang 2 die Grundkapazität ermittelt, die sich auf Basis der Verkehrsstärke in den höherrangigen Strömen und den Grenz- und Folgezeitlücken ergibt. Hierin sind jedoch noch nicht die Abminderungsfaktoren durch querende Fußgänger und mögliche Rückstaus in den übergeordneten Strömen enthalten. Diese werden im nächsten Verfahrensschritt einbezogen. Nach der Einbeziehung etwaiger Mischströme, kann am Ende die Kapazitätsreserve als Differenz zwischen Kapazität und Verkehrsstärke und darauf aufbauend die mittlere Wartezeit bestimmt werden, die letztlich in einer Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (QSV) mündet (vgl. Abbildung 4.4).

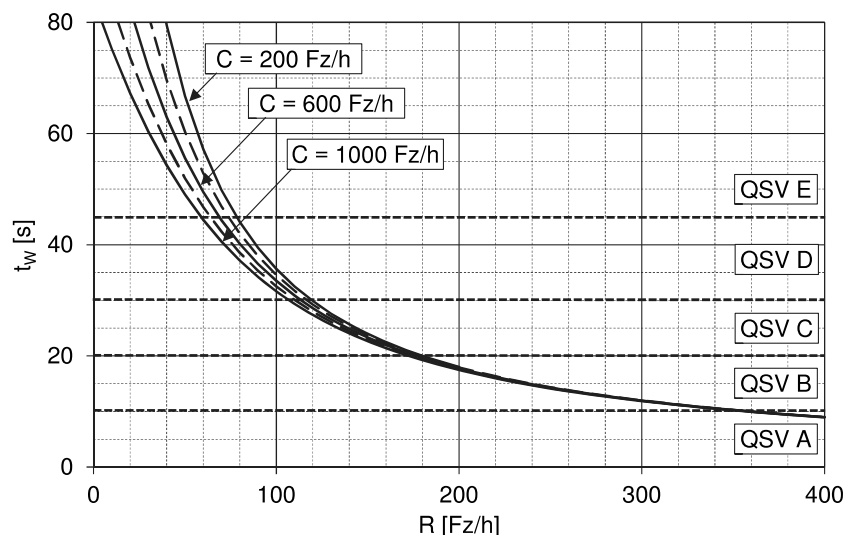


Abbildung 4.4: Bestimmung der mittleren Wartezeit für Knoten ohne LSA
Quelle: FGSV 2015

4.2 Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten

Der Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten charakterisiert sich im Wesentlichen über drei Gesetzmäßigkeiten⁴⁸. Hierzu zählen:

- Das Zufießen der Fahrzeuge
- Das Abfließen der Fahrzeuge
- Das Befahren der Konfliktfläche(n)

Auf diesen Gesetzmäßigkeiten baut das aktuelle Berechnungsverfahren für Knotenpunkte mit LSA auf, das anschließend vorgestellt wird.

4.2.1 Zuflussgesetz

Der Zufluss der Fahrzeuge an einen lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt unterscheidet sich nicht von den vorfahrtgeregelten Fällen aus Kapitel 4.1. In den meisten Fällen wird die Ankunftsverteilung der Fahrzeuge durch eine Poissonverteilung beschrieben.

4.2.2 Abflussgesetz

Der Abfluss der Fahrzeuge hingegen unterscheidet sich erheblich. Er ist nicht mehr ausschließlich durch Wahrscheinlichkeiten charakterisiert. Durch den Einsatz eines Signalprogramms sind die Zeiten, in denen Fahrzeuge halten oder fahren können, vorgegeben. Während der Freigabezeit können Fahrzeuge daher meist ungehindert abfließen. Dies gilt nicht bei bedingt verträglich geführten Strömen. Bei diesen ist zusätzlich das Durchsetzen gegen bevorrechtigte Ströme zu berücksichtigen. Charakteristisch für den Abfluss ist der Zeitbedarfswert, der angibt, welche Zeit zwei aufeinanderfolgende Fahrzeuge zum Passieren der Haltlinie benötigen. Er ist vergleichbar mit der Folgezeitlücke t_f bei Vorfahrtknoten und ergibt sich aus folgender linearer Beziehung, die angibt, wie viele Fahrzeuge n während der Freigabezeit t_F aus einem Fahrstreifen abfließen können.

$$n = \frac{t_F - t_a}{t_C} \quad (4.12)$$

mit

- t_F Freigabezeit
- t_a Anfahrzeitverlust
- t_C Folgezeitlücke bzw. Zeitbedarfswert

Umgestellt nach t_C erhält man den Zeitbedarfswert:

⁴⁸vgl. SCHNABEL und LOHSE 2011, S. 206ff

$$t_C = \frac{t_F \cdot t_a}{n} \quad (4.13)$$

Aus dem Zeitbedarfswert wird die Sättigungsverkehrsstärke q_S abgeleitet. Sie ist eine theoretische Größe und gibt an, wie viele Fahrzeuge während einer theoretischen Grünstunde auf einem Fahrstreifen fahren können. Der Zeitbedarfswert kann empirisch ermittelt werden oder es werden feste Werte mit Zu- und Abschlägen zur Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten verwendet. Letzteres ist der Standardfall in der Praxis.

$$q_S = \frac{3600}{t_C} \quad (4.14)$$

Das HBS nennt als mögliche Abminderungsfaktoren:

- Schwerverkehrsanteil
- Abbiegeradien
- Längsneigungen
- Fahrbahnbreiten

Weitere Informationen, insbesondere zur empirischen Ermittlung der Zeitbedarfswerte finden sich in Kapitel 6.

Über die Sättigungsverkehrsstärke bestimmt sich die Kapazität eines Fahrstreifens durch den Freigabezeitanteil f_A , der das Verhältnis von Freigabezeit t_F zur Umlaufzeit t_U angibt.

$$f_A = \frac{t_F}{t_U} \quad (4.15)$$

$$C = f_A \cdot q_S \quad (4.16)$$

4.2.3 Befahren der Konfliktflächen

Das Befahren der Konfliktflächen ist in erster Linie für das Räumen und Einfahren beim Phasenwechsel relevant.

Maßgebende Größe ist die Zwischenzeit t_Z , die sich aus der Räumzeit t_r des endenden Stroms, der Einfahrzeit des beginnenden Stroms t_e und der Überfahrzeit $t_{\ddot{u}}$, die noch bei gelb einfahrende Fahrzeuge berücksichtigt.

$$t_Z = t_r + t_{\ddot{u}} - t_e \quad (4.17)$$

Zwischenzeiten sind das zentrale Sicherheitselement lichtsignal geregelter Knotenpunkte. Sie stellen sicher, dass unverträgliche Verkehrsströme auf den Konfliktflächen zeitlich getrennt werden. Knapp bemessene Zwischenzeiten erlauben zwar höhere Kapazitäten, da die Leerzeiten am Knotenpunkt, in denen keine Fahrzeuge fahren, geringer ausfallen, erhöhen jedoch die Gefahr, dass langsam räumende Verkehrsteilnehmer mit zügig einfahrenden in Konflikt geraten. Umgekehrt führen lange Zwischenzeiten zu hohen Leerzeiten und Kapazitätseinbußen. Die genaue Bestimmung der Zwischenzeiten kann in der RiLSA Kapitel 2.5 nachvollzogen werden. Sie ist daher hier nicht detailliert aufgeführt.

4.2.4 Bemessungsverfahren nach RiLSA und HBS

Die Berechnungsschritte im MIV für Knotenpunkte mit LSA sind in Abbildung 4.5 dargestellt und gliedern sich in die zwei Bereiche:

1. Signalprogrammberechnung nach RiLSA
2. Qualitätsnachweis nach HBS

Die Signalprogrammberechnung startet mit der Aufstellung des Signallageplans und der Phaseneinteilung. Sie bildet die Grundlage für die Zwischenzeitenberechnungen. Ergebnis ist der Phasenfolgeplan.

Aus den realen Verkehrsstärken und der Sättigungsverkehrsstärke ergeben sich anschließend die Umlauf- und Freigabezeiten, die letztlich im Signalzeitenplan münden. Dieser wird im zweiten Schritt auf seine Qualität überprüft. Als Eingangsgrößen dienen wiederum Sättigungsverkehrsstärken und reale Verkehrsstärken. Über die zuvor beschriebenen Gesetzmäßigkeiten des Zu- und Abfließens kann eine mittlere Wartezeit berechnet und dieser einer Qualitätsstufe (QSV) gemäß Tabelle 1.2 zugeordnet werden. Die Wartezeit ergibt sich aus der in einem Umlauf ankommenden und abfließenden Fahrzeuge und kann daher unterteilt werden in eine Grundwartezeit und eine Reststauwartezeit für Fahrzeuge, die in einem Umlauf nicht abgefertigt werden konnten.

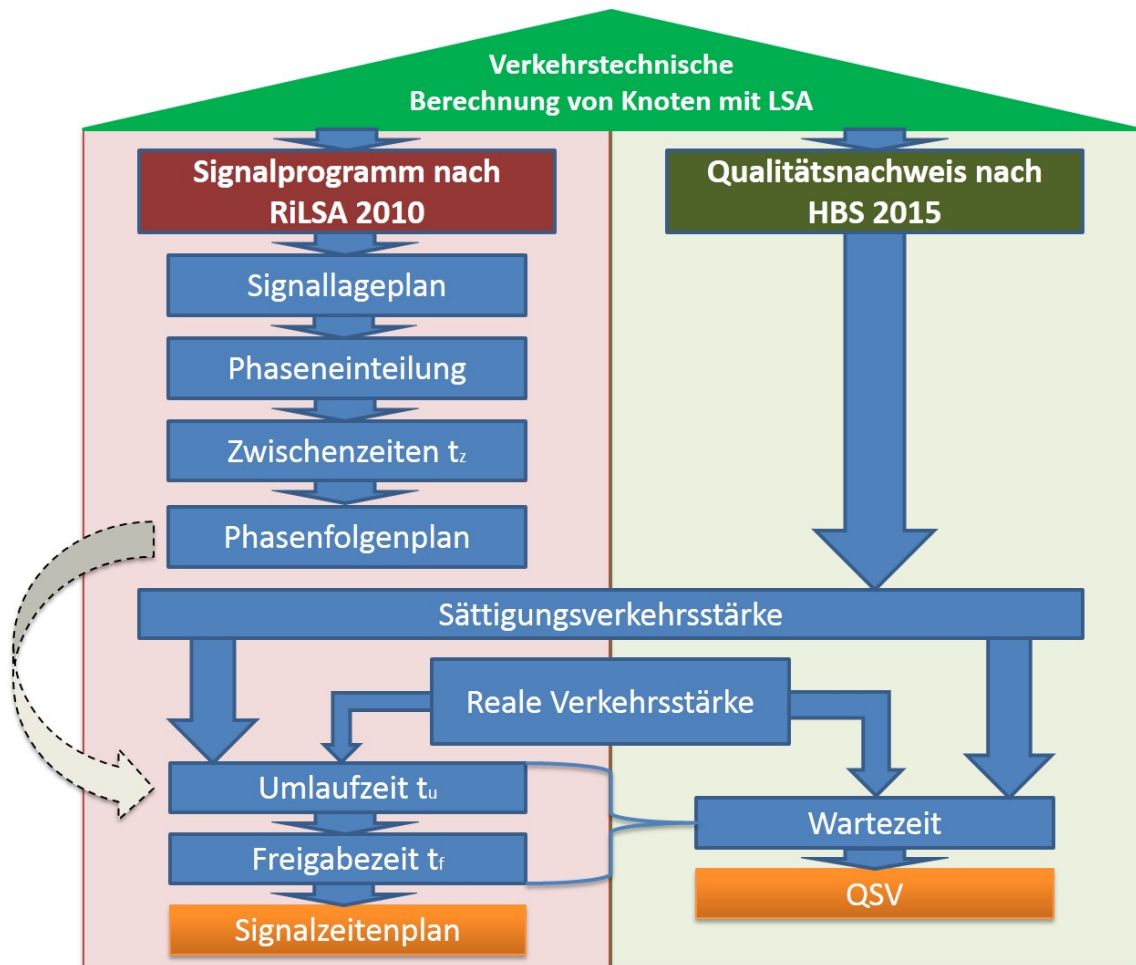


Abbildung 4.5: Berechnungsschema für Knotenpunkte mit LSA
 Quelle: Vorlesungsunterlagen imove

4.3 Verkehrsablauf an Kreisverkehren

Der Verkehrsablauf an Kreisverkehren ähnelt dem an anderen Vorfahrtknoten. HARTZ liefert eine detaillierte Übersicht über die Entwicklung der Berechnungsverfahren von Kreisverkehren⁴⁹. Es werden an dieser Stelle nur die wichtigsten Schritte genannt.

Die ersten Berechnungsansätze verfolgten einen Verflechtungsansatz, bei dem die Einfahrten gegenüber der Kreisfahrbahn vorfahrtberechtigt waren. Es wurde angenommen, dass einfahrende und ausfahrende Fahrzeuge eine gewisse Teilstrecke nebeneinander herfahren und sich anschließend für die Weiterfahrt einsortieren. Den Grundstein für die heutige Beurteilung von Kreisverkehren legten LEUTZBACH und ERNST im Jahre 1969, nachdem zuvor die Vorfahrtregelung zugunsten der Kreisfahrbahn geändert worden ist, indem sie vermuteten, dass das Verhalten der Autofahrer an vorfahrtgeregelten Kreisverkehrsplätzen ähnlich dem Verhalten der Autofahrer an vorfahrtgeregelten Kreuzungen oder Einmündungen ist. In den folgenden Jahrzehnten wurde die Forschung vor allem im angelsächsischen Raum vorangetrieben und das Zeitlückenmodell und die Regressionstheorie weiter gestärkt.

In den Jahren 1990 und 1992 beschäftigten sich BRILON und STUWE aufgrund der wachsenden Popularität von Kreisverkehren in Deutschland mit der Thematik⁵⁰. Ein Kreisverkehr lässt sich ihrer Meinung nach als eine Aneinanderreihung von Einmündungen in eine Einbahnstraße auffassen. Für die Bemessung kann daher auf das in Kapitel 4.1 vorgestellte empirische Regressionsverfahren zurückgegriffen werden. Es entfällt die Rangeinteilung, da immer nur den Fahrzeugen auf der Kreisfahrbahn Vorfahrt gewährt werden muss.

Während eines stetigen Rückstaus in der Zufahrt werden die einfahrenden Fahrzeuge und die Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn in kurzen Intervallen gezählt. Der stetige Rückstau stellt sicher, dass tatsächlich keine Lücke ungenutzt bleibt. Werden die Werte für die Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und der Zuflüsse gegenübergestellt, erhält man Diagramme, aus denen man die Grundkapazität einer Zufahrt in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn ablesen kann (vgl. Abbildung 4.6). Dieses Verfahren wurde auch in die aktuelle Fassung des HBS übernommen. Für jede Zufahrt ist die anliegende Verkehrsstärke $q_{PE,K}$ auf der Kreisfahrbahn zu ermitteln. Anschließend ergibt sich die Grundkapazität der Zufahrt q_{PE} , die anschließend noch durch den Einfluss querender Fußgänger abgemindert werden kann.

Zur Steuerung von Kreisverkehren mit Lichtsignalanlagen scheint jedoch der Ansatz mittels Zeitlücken zweckmäßiger, da das Einfahren maßgeblich von der Größe der zur Verfügung stehenden Lücken abhängt und das Auftreten dieser durch die Signalisierung gesteuert wird. Das oben beschriebene Verfahren berücksichtigt derzeit nicht eine etwaige Gebundenheit des Verkehrs auf der Kreisfahrbahn.

⁴⁹vgl. HARTZ 1995

⁵⁰vgl. BRILON und STUWE 1991 und STUWE 1992 und BRILON und WU 2008

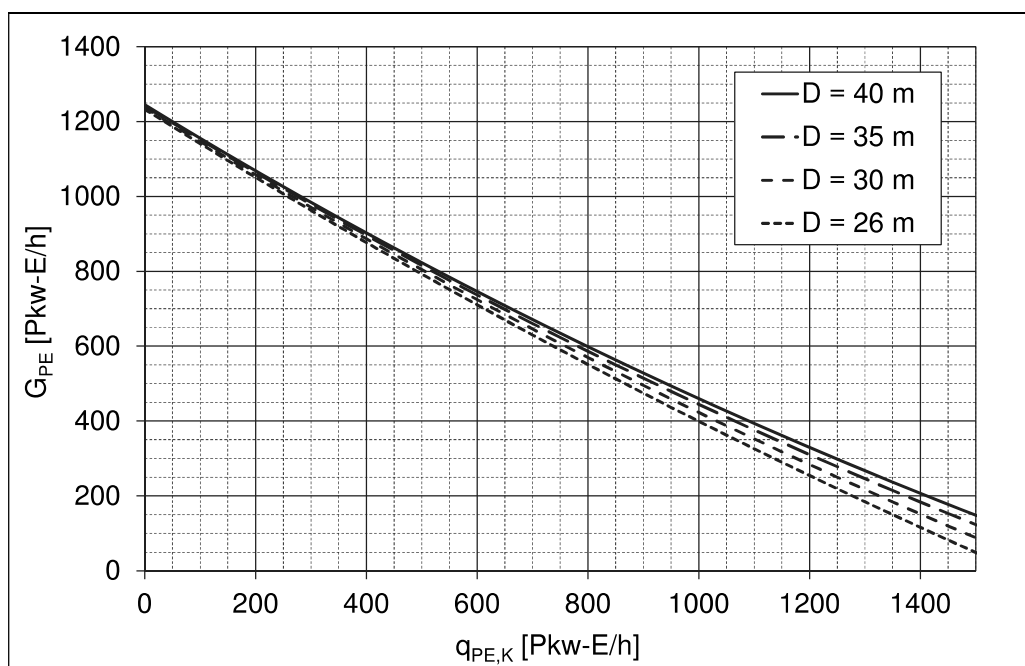


Abbildung 4.6: Grundkapazität einer Zufahrt in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn

Quelle: FGSV 2015 S. S5-35

4.4 Eigene Überlegungen zum Verkehrsablauf im MIV an teilsignalisierten Knotenpunkten

Der Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten wurde, wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, in der Literatur bislang noch nicht umfassend behandelt. Erkenntnisse zum Verkehrsablauf und einem darauf aufbauenden Bemessungsverfahren sind bislang nicht existent. In diesem Kapitel sollen daher eigene Überlegungen zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten dargestellt werden.

Grundsätzlich wird vermutet, dass sich der Verkehrsablauf in der Nebenrichtung an nicht vollständig signalisierten Kreuzungen und Einmündungen aus einer Kombination von vorfahrtgeregelten und signalgesteuerten Elementen zusammensetzt. Diese beiden Varianten wurden in den beiden Kapiteln 4.1 und 4.2 vorgestellt. In der Hauptrichtung ergeben sich keine Veränderungen zu einer Vollsignalisierung, so dass die bewährten Verfahren ohne Anpassungen weiter verwendet werden können. Dies gilt hingegen nicht für die unsignalisierte Nebenrichtung.

Die LSA an teilsignalisierten Knotenpunkten dient in erster Linie dazu, die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom zu Gunsten einer Verbesserung des Einfahrens aus dem Nebenstrom zu beeinflussen. Es kommt dadurch zu einer Erhöhung der Gebundenheit und einer Verschiebung der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom.

Da an einem teilsignalisierten Knotenpunkt Nebenstromfahrer jederzeit und unabhängig von einer Signalisierung über das Einfahren in den Knotenpunkt entscheiden, gibt es entgegen einer Vollsignalisierung hierfür zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- Einfahren in natürlich auftretende Zeitlücken (GRÜN im Hauptstrom)
- Einfahren in künstlich geschaffene Zeitlücken (ROT im Hauptstrom)

Nebenstromfahrzeuge können nur in den Hauptstrom einfahren, wenn ausreichend große Zeitlücken in diesem vorhanden sind⁵¹. Diese Entscheidung treffen Nebenstromfahrer selbst. Das Auftreten von Zeitlücken im Hauptstrom ist von seiner Verkehrsstärke und dem Signalprogramm abhängig. Je größer der Sperrzeitanteil und die Verkehrsstärke sind, desto stärker ist die Gebundenheit und die Pulkbildung am Ende der Sperrzeit.

Die erste Methode basiert auf der Zeitlückentheorie, während die zweite dem Abfluss bei einer Vollsignalisierung gleicht. Jedoch gelten für beide Methoden veränderte Rahmenbedingungen, so dass die Verfahren, wie sie sich beispielsweise im HBS wiederfinden, modifiziert werden müssen.

Während der Sperrung des Hauptstroms durch die LSA ähnelt der Verkehrsablauf mehr einem signalisierten Knotenpunkt, Nebenstromfahrzeuge können nahezu ungehindert nach-

⁵¹vgl. Kapitel 4.1

einander einbiegen, wobei die Kapazität im Nebenstrom vermutlich geringer ist, da kein GRÜN signalisiert wird und die Fahrer daher zögerlicher in den Knotenpunkt einfahren. Diesen Effekt behandelt unter anderem die empirische Untersuchung in Kapitel 6.

In der übrigen Zeit sind Fahrer auf ausreichend große Lücken im Hauptstrom angewiesen. Problem bei der Teilsignalisierung ist jedoch, dass es durch die LSA zu einer Störung des Hauptstroms kommt und die negative Exponentialverteilung für das Auftreten von Zeitlücken nicht mehr gültig sein wird. Eine Berechnung mit den bekannten Methoden unsignalisierter Knotenpunkte ist daher nicht möglich, sondern es muss analysiert werden, wie sich die Zeitlückenverteilung gestörter Ströme beschreiben lässt. Ausreichend große Lücken werden sich erst nach Abfluss des Fahrzeugpulses wieder einstellen. Im Extremfall gibt es nur noch viele kleine Lücken zwischen den Fahrzeugen und eine große Lücke, die der Sperrzeit entspricht. Dieses Extrem gleicht demnach einer Vollsignalisierung, da keine natürlichen Zeitlücken im Hauptstrom mehr auftreten, die ein Einfahren aus dem Nebenstrom ermöglichen würden. Dieser Fall ist für die Praxis demnach nicht relevant. Eine solche Zeitlückenverteilung wäre nur bei einem konstant hohen Zufluss zu erreichen, wie er in der Realität nicht vorkommt. Man wird sich also in einem Mischbereich befinden, in dem die natürlichen Zeitlücken nicht groß genug sind und nicht häufig genug auftreten, um den Nebenstrom abwickeln zu können. Ziel der in dieser Arbeit eingesetzten Mikrosimulationsverfahren ist daher, diesen Übergangsbereich abbilden zu können.

Die Annahme der Lücken durch Nebenstromfahrer wird als gleich angesehen, auch wenn es denkbar wäre, dass zuvor angenommene Lücken jetzt abgelehnt werden, da Fahrer wissen, dass sie durch die Teilsignalisierung größere Lücken angeboten bekommen.

Der gesamte Verkehrsablauf wird demnach davon abhängen, zu welchen Anteilen die beiden Zustände auftreten, was wiederum von den Verkehrsbelastungen in den Zufahrten abhängt.

Letztlich stellt sich auch die Frage, welche Wartezeiten für teilsignalisierte Knotenpunkte angewendet werden sollen, da die Werte für Vorfahrtknoten und LSA-Knoten differieren. Da der vorfahrtgeregelte Zustand der Regelfall sein sollte und die LSA nur bei Bedarf eingreift, scheint es zweckmäßig, die QSV des vorfahrtgeregelten Zustands gemäß Tabelle 1.1 zu verwenden.

4.5 Zusammenschau

Die Analyse der bekannten Bemessungsverfahren für Knotenpunkte mit und ohne LSA hat gezeigt, dass diese nicht direkt auf teilsignalisierte Knotenpunkte übertragbar sind, da dort insbesondere hinsichtlich der Zeitlückenverteilung und den Zeitbedarfswerten erhebliche Differenzen bestehen. Während das Verfahren für unsignalisierte Knotenpunkte, wie es im aktuellen HBS beschrieben ist, eine negativ exponentiale Zeitlückenverteilung voraussetzt, ist diese bei teilsignalisierten Knotenpunkten nicht mehr gegeben. Zudem werden sich

die Zeitbedarfswerte der einfahrenden Nebenstromfahrzeuge vermutlich unterscheiden. Die oben angestellten Überlegungen zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten sollen daher mittels der folgenden Untersuchungen überprüft und verfeinert werden.

Teil II

Eigene Untersuchungen

5 Typisierung teilsignalisierter Knotenpunkte und Ableitung der Modellknoten

Die Kapazität eines Knotenpunktes wird maßgeblich durch seine bauliche Gestaltung, die anliegenden Verkehrsstärken - vor allem im MIV - sowie die angewendete Verkehrsregelung beeinflusst. Es ist daher zweckmäßig, zunächst eine Typisierung von teilsignalisierten Knotenpunkten anhand der Fahrstreifenaufteilung und der Lage der Signalgeber vorzunehmen, da diese den Verkehrsablauf maßgeblich bestimmen⁵². Im ersten Schritt der Typisierung werden für Einmündungen und Kreuzungen (nur vierarmig) alle denkbaren Kombinationen hergeleitet und anschließend in sogenannte Ausbaustandards mit ähnlichem Verkehrsablauf zusammengefasst. Danach werden die verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung zunächst allgemein dargelegt und anschließend auf diese Ausbaustandards übertragen. Diese Überlagerung bildet die Basis für die weiteren Untersuchungen.

5.1 Definition der Ausbaustandards und Festlegung von Modellknoten

Wie eingangs erwähnt, hat die Fahrstreifenaufteilung in den einzelnen Zufahrten einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsablauf an Einmündungen und Kreuzungen. Stehen den Fahrzeugen separate Abbiegestreifen zur Verfügung, so wirkt sich dies unmittelbar auf die Kapazität aus, da wartepflichtige Fahrzeuge niederen Ranges andere Verkehrsteilnehmer aus höherrangigen Strömen, die unter Umständen den Knotenpunkt ohne Halt passieren könnten, nicht behindern.

Die Anzahl der möglichen Fahrstreifenaufteilungen an einem Knotenpunkt N ergibt sich durch folgende Formel:

$$N = L^A \begin{cases} L = 2 & \text{für Einmündungen} \\ L = 4 & \text{für Kreuzungen} \end{cases} \quad (5.1)$$

Hierbei ist L die Anzahl der möglichen Fahrstreifenkombinationen in einer Zufahrt. Es wird zwischen einer separaten Führung oder Mischfahrstreifen unterschieden. Die Anzahl der Zufahrten am Knotenpunkt wird mit A angegeben. Es ergeben sich somit für Einmündungen (EI) 8 und für Kreuzungen (KR) 256 mögliche Aufteilungen. Technisch unmögliche Kombinationen, wie die Führung von Linksabbiegestreifen mit Rechtsabbiegestreifen auf einem Mischfahrstreifen, sind ausgeschlossen. Für Einmündungen ergeben sich die Kom-

⁵²vgl. FGSV 1988 S. 28

binationsmöglichkeiten nach Tabelle 5.1. Der Buchstabe „M“ steht für eine Führung der Ströme auf einem Mischfahrstreifen, wohingegen „X“ eine separate Führung kennzeichnet. Aus Übersichtsgründen ist die Abbildung für Kreuzungen in den Anhang H verschoben. Ausfahrkeile und Rechtsabbiegestreifen für Rechtsabbieger sind nicht betrachtet worden.

		Verkehrsströme					
		2	3	4	6	7	8
ifd. Nr.	1	M		M		M	
	2	X	X		M		M
	3	M		X	X		M
	4	M		M		X	X
	5	M		X	X	X	X
	6	X	X		M		X
	7	X	X	X	X		M
	8	X	X	X	X	X	X

AS0EI
AS1EI
AS2EI

Tabelle 5.1: Mögliche Fahrstreifenaufteilungen an einer Einmündung
 X: Einzelner Fahrstreifen
 M: Mischfahrstreifen

Da eine weitere Betrachtung sämtlicher möglicher Fahrstreifenaufteilungen nicht leistbar ist, werden Ausbaustandards (AS) mit ähnlich vermutetem Verkehrsablauf gebildet. Die verwendete Nomenklatur ergibt sich aus: „AS“ + „0,1,2,3“ + „EI,KR“. Die Eingruppierung erfolgt nach der Erfüllung der folgenden Merkmale.

Für Einmündungen werden folgende Ausbaustandards definiert:

- AS0EI: Alle Knoten, die nicht AS1EI erfüllen
- AS1EI: Alle Knoten mit mindestens einem Linksabbiegestreifen in Hauptrichtung
- AS2EI: Alle Knoten mit mindestens einem Linksabbiegestreifen in Hauptrichtung und getrennten Fahrstreifen in Nebenrichtung

Für Kreuzungen werden folgende Ausbaustandards definiert:

- AS0KR: Alle Knoten, die nicht AS1KR erfüllen
- AS1KR: Alle Knoten mit mindestens zwei Linksabbiegestreifen in Hauptrichtung
- AS2KR: Alle Knoten mit mindestens zwei Linksabbiegestreifen in Hauptrichtung und Nebenrichtung

- AS3KR: Alle Knoten mit ausschließlich Einzelfahrstreifen (wird für eine Teilsignalisierung aus Sicherheitsgründen nicht empfohlen, da das Verkehrsgeschehen sehr komplex ist, und daher nicht weiter betrachtet)

Die durchgeführte Klassifizierung wurde anhand von HBS Rechnungen für Vorfahrtknoten über das Kriterium der erreichten QSV bzw. mittleren Wartezeit für vorfahrtgeregelter Knotenpunkte überprüft⁵³. Für jeden Knotenpunkt wurde mittels eines Python Skriptes, welches die Formblätter 5-1 und 5-2 des HBS 2015 nachbildet, die mittlere Wartezeit bestimmt und diese mit den übrigen Knotenpunkten dieser Klasse verglichen. Es wurde mit vier unterschiedlichen Verkehrsbelastungen gearbeitet. Dabei zeigte sich, dass die gewählten Merkmale für die Aufteilung sinnvoll sind. Es wurde in den Ergebnissen deutlich, dass vor allem das Vorhandensein und die Kapazität der Linksabbiegespuren – insbesondere in Nebenrichtung – für die Wartezeiten am Knotenpunkt und dessen Qualitätsstufe entscheidend sind.

Für die Untersuchungen werden daher folgende Modellknoten (Abbildungen 5.1 bis 5.6), die auch in der Praxis als Standardlösungen weit verbreitet sind, als Repräsentanten für die einzelnen Ausbaustandards festgelegt⁵⁴.

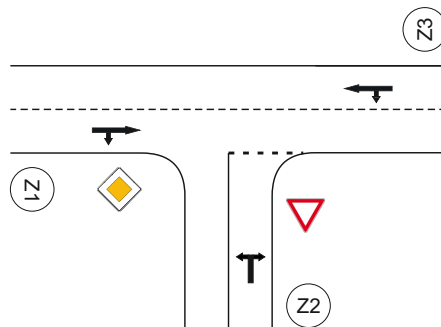


Abbildung 5.1: Knotenpunkttyp AS0EI

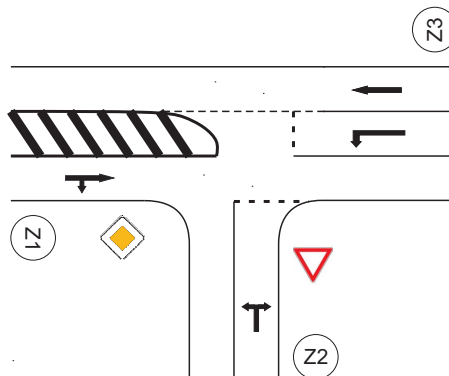


Abbildung 5.2: Knotenpunkttyp AS1EI

⁵³vgl. SCHOENWIESE 2015

⁵⁴vgl. FGSV 1988

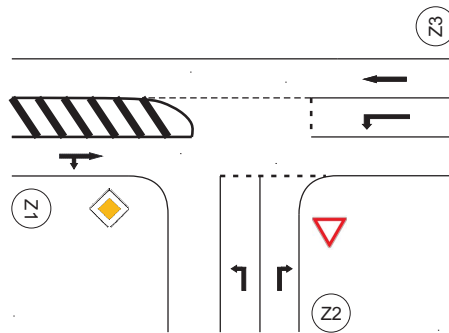


Abbildung 5.3: Knotenpunkttyp AS3EI

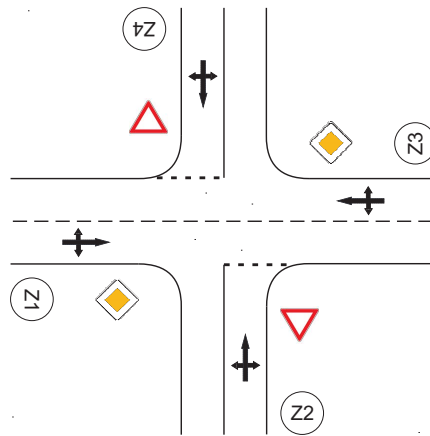


Abbildung 5.4: Knotenpunkttyp AS0KR

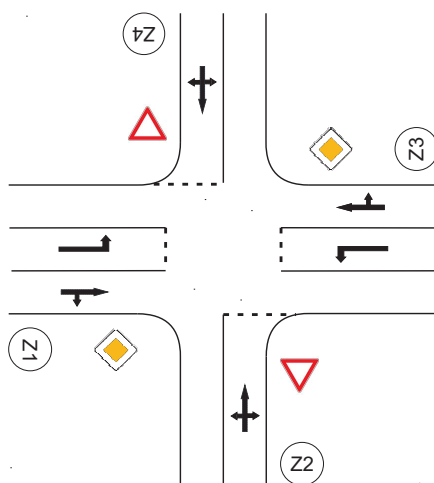


Abbildung 5.5: Knotenpunkttyp AS1KR

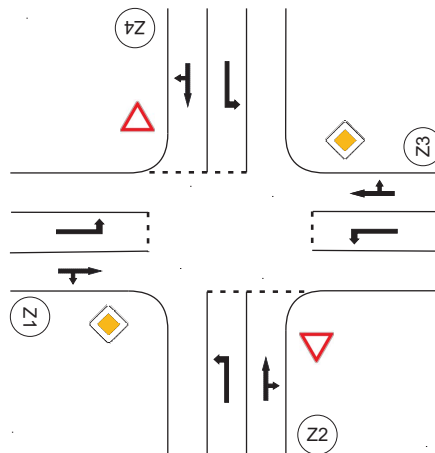


Abbildung 5.6: Knotenpunkttyp AS2KR

5.2 Ermittlung der verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung

Während man die Lage der Signalgeber bei der Vollsignalisierung relativ einfach beschreiben kann, ist dies bei der Teilsignalisierung komplexer, da es mehrere Möglichkeiten gibt, einen Knotenpunkt teilzusignalisieren. Wie die Definition aus Kapitel 1.2.1 erkennen lässt ist eine Teilsignalisierung gegeben, wenn an einem Knotenpunkt nur gewisse, aber nicht alle Fahrbeziehungen signaltechnisch geregelt sind. Konkretere Angaben macht die Richtlinie hierzu hingegen nicht. Aufgrund der geltenden Gesetze und Richtlinien kann der Wegfall von Signalgebern jedoch nicht willkürlich erfolgen.

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich zunächst mit der Frage, welche Möglichkeiten bestehen, um Knotenpunkte gesetzes- und richtliniengetreu teilsignalisieren zu können. Anschließend wird auf weitere Ausstattungsmerkmale eingegangen, bevor letztlich die Erkenntnisse auf die Modellknoten aus dem vorigen Abschnitt übertragen werden.

5.2.1 Lage und Ausgestaltung der Signalgeber

Für teilsignalisierte Knotenpunkte gelten grundsätzlich dieselben Regelungen nach RiLSA und StVO wie bei einer Vollsignalisierung. Aus der RiLSA ergeben sich die zwei Hauptanforderungen an die Signalisierung von Fahrstreifen:

- Nichtverträgliche Verkehrsströme dürfen nicht zusammen freigegeben werden (außer ggf. bei 2-feldiger Signalisierung)
- Mischfahrstreifen müssen gemeinsam signalisiert werden

Zur Anwendung können sowohl zwei- als auch dreifeldige Signalgeber kommen. Die Signalfolge GRÜN - GELB - ROT kann nur angewendet werden, wenn sichergestellt ist, dass nicht verträgliche Ströme während der Freigabezeit gesperrt sind. Die Signalfolge DUNKEL - GELB - ROT kann auch eingesetzt werden, wenn unverträgliche Ströme nicht gesperrt sind, da in Dunkelstellung die Vorfahrtsregelung greift. Obwohl mit dieser Signalfolge mehr Teilsignalisierungsmöglichkeiten denkbar sind, wird diese Methode wegen Sicherheitsbedenken verworfen, da, insbesondere bei Linksabbiegern im Gegenverkehr, nicht sichergestellt werden kann, ob die Signale von den Verkehrsteilnehmern richtig verstanden werden und somit die Sicherheit der Gesamtanlage nicht gewährleistet ist⁵⁵.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich folgende Grundregel für die Aufstellung von Signalgebern:

Es müssen zunächst höherrangige Ströme signalisiert sein, bevor weitere Ströme niedrigeren Ranges signalisiert werden können.

Basierend auf den oben genannten Rahmenbedingungen sind verschiedene Fälle der Teilsignalisierung an Knotenpunkten möglich. Einige können aufgrund der oben erläuterten Beschränkungen von vornherein ausgeschlossen werden. Andere sind zwar theoretisch denkbar, jedoch nicht zielführend für eine Verbesserung des Verkehrsablaufs und werden daher als nicht empfohlen eingestuft.

Für die Modellknoten sind die Möglichkeiten der Teilsignalisierung im folgenden Kapitel aufgezeigt.

5.2.2 Anwendung auf die Modellknoten

In diesem Kapitel erfolgt die Übertragung der Signalisierungsmöglichkeiten auf die Modellknoten.

Für Einmündungen und Kreuzungen sind diese in den Tabellen 5.2 und 5.3 exemplarisch für AS0EI und AS0KR dargestellt. Es wird folgende Notation verwendet:

- O = Zufahrt ist unsignalisiert
- X = Zufahrt ist signalisiert
- F = In der Zufahrt befindet sich eine signalisierte Fußgängerfurt

Die Möglichkeiten für die übrigen Ausbaustandards sind aus Gründen der Lesbarkeit im Anhang abgedruckt. Die Kombinationen folgen dabei immer demselben Muster. Fall 0 bezeichnet immer den vorfahrtgeregelten Fall, während „V“ immer den vollsignalisierten Zustand repräsentiert. Rechtlich nicht realisierbare sowie nicht empfohlene Lösungen werden verworfen und sind grau hinterlegt. Aus Sicherheitsüberlegungen werden die Fälle

⁵⁵vgl. FGSV 2010 Abschnitt 2.3.1.2

verworfen, in denen nur in jeweils einer Zufahrt ein Signalgeber steht. Nebenstromfahrern wird bei diesen Fällen nämlich die Beobachtung der Hauptrichtung vermutlich erschwert, da diese Form der Signalisierung nicht erwartungskonform ist. Als Fahrer kann man sich nicht darauf verlassen, wenn eine Richtung des Hauptstroms anhält, dass dies auch für die Gegenrichtung gilt. Ebenso werden die Fälle mit einer Furt verworfen, die keinen Signalgeber in der gegenüberliegenden Furt aufweisen. Die Furt mit zusätzlichem Signalgeber und Haltlinie in der gegenüberliegenden Zufahrt ist der empfohlene Fall. In der Praxis sind auch Beispiele bekannt, in denen lediglich in einer Zufahrt eine Furt angebracht ist. Dies hat den Nachteil, dass es bei Stau keine Möglichkeit des Einbiegens gibt. Diese Situation verschärft sich zudem, wenn die vorgeschlagene Abrückung nicht eingehalten wird, sondern die Furt knotenpunktnah angeordnet ist.

Die verbleibenden Zeilen stellen die möglichen Fälle der Teilsignalisierungen dar. Dies sind:

- Teilsignalisierung ohne Furten (TS2378): Jeweils ein Signalgeber in den Zufahrten Z1 und Z3
- Teilsignalisierung mit Doppelfurt (TS23F78F): Signalisierte Fußgängerfurten in den Zufahrten Z1 und Z3
- Teilsignalisierung mit Furt links (TS23F): Signalisierte Fußgängerfurt in Z1 und Signalgeber in Z3
- Teilsignalisierung mit Furt rechts (TS78F): Signalisierte Fußgängerfurt in Z3 und Signalgeber in Z1

Die zweite Möglichkeit wird jedoch aufgrund des hohen Signalisierungsaufwandes und der großen Ähnlichkeit zu einer Vollsignalisierung nicht weiter verfolgt. Außerdem kann bereits jetzt vermutet werden, dass die Leistungsfähigkeit durch die beiden Furten sehr herabgesetzt sein wird. Sie ist daher ebenfalls den nicht empfohlenen Lösungen zugeordnet.

Exemplarisch für die Ausbaustandard AS0EI sind die verschiedenen Fälle in den Abbildungen 5.7 bis 5.9 zu sehen. Für die restlichen Ausbaustandards können diese analog hergeleitet werden.

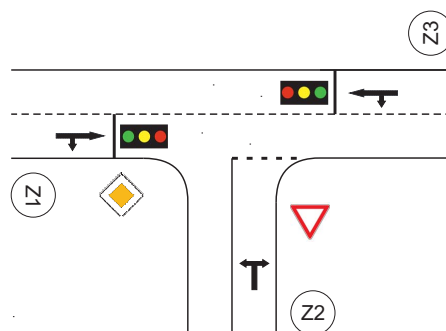


Abbildung 5.7: Teilsignalisierung von AS0EI ohne Furten (Fall TS2378)

AS0EI	Fall	Z1 MFS 2/3	Z2 MFS 4/6	Z3 MFS 7/8
Keine Signalisierung	0	O	O	O
Nicht empfohlene Teilsignalisierungen		O	O	X
		X	O	O
		F	O	O
		O	O	F
Mögliche Teilsignalisierungen	TS2378	X	O	X
	TS23F	F	O	X
	TS78F	X	O	F
Vollsignalisierung	V	X	X	X
Unmögliche Teilsignalisierungen		O	X	O
		O	X	X
		X	X	O
O: Kein Signalgeber, X: Signalgeber F: Signalisierte Fußgängerfurt				

Tabelle 5.2: Mögliche Teilsignalisierungen für den Ausbaustandard AS0EI

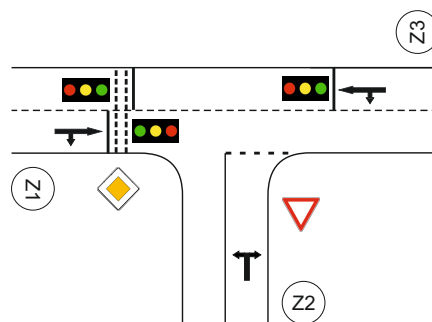


Abbildung 5.8: Teilsignalisierung von AS0EI mit Furt auf der linken Seite (Fall TS23F)

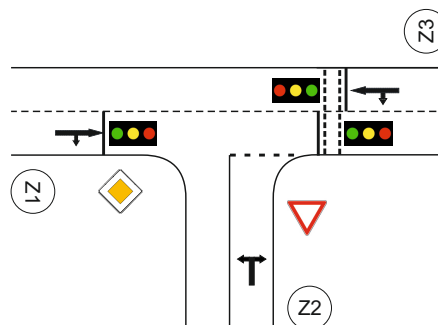


Abbildung 5.9: Teilsignalisierung von AS0EI mit Furt rechten Seite (Fall TS78F)

ASOKR	Fall	Z1 MFS q1/q2/q3	Z2 MFS q4/q5/q6	Z3 MFS q7/q8/q9	Z4 MFS q10/q11/q12
Keine Signalisierung	0	O	O	O	O
Nicht empfohlene Teilsignalisierungen		O	O	X	O
		X	O	O	O
		O	O	F	O
		F	O	O	O
Mögliche Teilsignalisierungen	TS2378	X	O	X	O
	TS23F	F	O	X	O
	TS78F	X	O	F	O
Vollsignalisierung		X	X	X	X
Unmögliche Teilsignalisierungen		O	O	O	X
		X	O	X	X
		X	X	X	O
		O	O	X	X
		O	X	O	O
		O	X	O	X
		O	X	X	X
		X	O	O	X
		X	X	O	O
		X	X	O	X

O: Kein Signalgeber, X: Signalgeber F: Signalisierte Fußgängerfurt

Tabelle 5.3: Mögliche Teilsignalisierungen für den Ausbaustandard AS0KR

5.2.3 Beschilderung und Markierung

Die Beschilderung richtet sich nach der StVO bzw. der Vwv StVO. Bei Teilsignalisierungen ergeben sich keine Änderungen bezogen auf die etablierten Regelungen. Ein Hinweis auf die geänderte Signalisierung ist bei einer Neueinrichtung unumgänglich. Inwieweit der Hinweis auf die Teilsignalisierung mit der Möglichkeit der Anforderung von Zeitlücken in der Nebenrichtung hilfreich ist oder nicht, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden und ist somit Gegenstand weiteren Forschungsbedarfes. Er kann zum einen dazu führen, dass Fahrzeugführer auf eine künstlich geschaffene Lücke warten und somit zu kleine Lücken ablehnen oder zum anderen aus Bequemlichkeit oder Vorsicht passende Lücken ablehnen und nur große künstliche Lücken annehmen, was wiederum zu Lasten der erreichbaren Kapazität geht.

Haltlinien sind jeweils 3,00m vor den Signalgebern aufzubringen. Deren Lage sollte abgerückt von den Konfliktpunkten liegen⁵⁶. Dadurch ist sichergestellt, dass Nebenstromfahrer sich rechtzeitig auf das Verhalten von Fahrzeugen im Hauptstrom einstellen können. Das Maß der Abrückung sollte außerorts 50m betragen⁵⁷. Innerorts wurde während der empirischen Erhebung in Bad Kreuznach (vgl. Kapitel 6) eine Abrückung von 25m vorgesehen. Diese wurde vom Ordnungsamt als Auflage vorgegeben.

Alternativ können auch Räum- und Einfahrzeiten des Nebenstroms herangezogen werden. In der Zeit, die ein wiederanfahrendes Fahrzeug im Hauptstrom benötigt, um die Konfliktfläche zu erreichen, muss ein Nebenstromfahrzeug, das gerade in diese eingefahren ist, genügend Zeit haben, um diese auch wieder zu verlassen. Es ergeben sich Zwischenzeiten wie bei einer vollsignalisierten Anlage. Die Einfahrzeit t_e nach RiLSA beträgt

$$t_e = \frac{3,6 \cdot s_e}{40} \quad (5.2)$$

Dabei ist s_e der Einfahrweg von der Haltlinie bis zum Konfliktpunkt. Unterstellt wird eine Einfahrtsgeschwindigkeit von $40 \frac{km}{h}$. Die Einfahrzeit muss gleich der Zeit sein, die ein Fahrzeug des Nebenstromes zum Räumen der Konfliktfläche, als t_r bezeichnet, benötigt. Es gilt die Forderung

$$t_e = t_r + 1,5s \quad (5.3)$$

Der Sicherheitszuschlag von 1,50s ergibt sich aus der benötigten Orientierungszeit eines Fahrers an der Haltlinie⁵⁸. Die Räumzeit t_r ist abhängig vom Räumfall nach RiLSA. Dort werden insgesamt sechs Fälle unterschieden, wovon für diesen Anwendungsfall drei Fälle relevant sind:

- Fall 1: Geradeausfahrendes Kraftfahrzeug räumt

⁵⁶vgl. FGSV 2010 S. K 4-4

⁵⁷FROST und SCHULZE 2008

⁵⁸vgl. RETZKO 1961 S. 82

- Fall 2: Abbiegendes Kraftfahrzeug räumt
- Fall 5: Radfahrer räumt

Überfahrzeiten sind nicht zu betrachten, da in der untergeordneten Zufahrt keine Signalgeber vorhanden sind. Die Räumzeiten ermitteln sich nach Formel 5.4.

$$t_r = \begin{cases} \frac{s_0+6}{10} & \text{Räumfall 1} \\ \frac{s_0+6}{7} & \text{Räumfall 2} \\ \frac{s_0}{4} & \text{Räumfall 5} \end{cases} \quad (5.4)$$

Das Abrückungsmaß A (entspricht s_e) der Haltlinien im übergeordneten Strom erhält man durch Umstellung der Formeln 5.2 und 5.3 über Formel 5.5.

$$A = \frac{t_r + 1,5 \cdot 40}{3,6} \quad (5.5)$$

Für jede Zufahrt der Hauptrichtung können somit die Abrückmaße der Haltlinien bestimmt werden. Generell sind Maße unter $20,00m$ aus Sicherheitsgründen zu vermeiden. Dies ergibt sich aus der Rückrechnung der oben genannten Beziehung. Angenommen wird ein Räumweg, der der Fahrstreifenbreite von $3m$ entspricht. Dies ergibt ein Abrückmaß von $A = 16,90m$, wenn der Räumfall 1 zugrunde gelegt wird. Für Räumfall 5 ergeben sich ebenfalls $16,90m$. Dieser Wert sollte jedoch nicht ausgereizt werden, da auch längere Räumwege bzw. langsamer räumende Fahrzeuge existieren. Generell gilt, dass ein zu geringes Abrückmaß den Nebenstromfahrern erschwert, das Halten von Fahrzeugen in der Hauptrichtung zu erkennen. Das rechtzeitige Erkennen wirkt sich jedoch essentiell auf die erreichbaren Kapazitäten aus. Auf der anderen Seite wirken sich zu große Abrückmaße negativ aus, da die Räumzeiten im Hauptstrom sehr lang werden. Für die Bestimmung eines optimalen Abrückmaßes bedarf es noch weiterer Erfahrungen aus der Praxis.

5.3 Zusammenschau

In diesem Kapitel wurden zunächst die Knotenpunkte nach ihrer Fahrstreifenaufteilung typisiert, da diese einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf hat, weil fehlende Aufstellplätze für untergeordnete Ströme andere Verkehrsteilnehmer behindern können und somit die Kapazität der Gesamtanlage beeinträchtigt wird. Anschließend wurden anhand festgelegter Kriterien Ausbaustandards mit ähnlich vermutetem Verkehrsablauf gebildet, die daraufhin auf ihre Plausibilität überprüft wurden. Daraus resultieren die für die späteren Untersuchungen relevanten Modellknoten. Im nächsten Schritt konnten die grundsätzlichen Regelungen der RiLSA auf teilsignalisierte Knotenpunkte übertragen werden. Es zeigt sich, dass Signalgeber nicht beliebig aufgestellt oder entfernt werden können, sondern der Wegfall einer Hierarchie folgen muss. Es müssen immer die höherrangigen Ströme signalisiert werden, bevor untergeordnete Ströme signaltechnisch geregelt werden können. Daraus lassen sich drei empfehlenswerte Fälle der Teilsignalisierung ableiten:

- Teilsignalisierung ohne Furten (TS2378)
- Teilsignalisierung mit Fußgängerfurt links (TS23F)
- Teilsignalisierung mit Fußgängerfurt rechts (TS78F)

Anschließend erfolgte die Anwendung der Regelungen auf die zuvor festgelegten Modellknoten. Dabei wurde zwischen möglichen und unmöglichen Lösungen unterschieden. Letztlich ergeben sich für jeden Ausbaustandard mehrere Fälle einer Teilsignalisierung. In der Praxis muss für jeden Knoten individuell überprüft werden, welche Ausprägungen der Teilsignalisierung anwendbar sind. Hierzu werden im folgenden Lösungen aufgezeigt.

6 Empirische Untersuchung zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Einmündungen

Einen Baustein, um den Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten beschreiben zu können, stellt die empirische, experimentelle Untersuchung zweier Einmündungen dar. Sie dient zum einen dazu, den Verkehrsablauf für den späteren Aufbau der Modelle verstehen zu können und zum anderen die Wirkungen und den Umgang der Fahrer mit dieser Regelungsart zu analysieren. Insbesondere interessiert die Fragestellung nach dem Einfahrverhalten aus der Nebenrichtung. Untersucht werden soll, wie Nebenstromfahrer in natürlich auftretende und künstlich geschaffene Lücken einfahren. Zusätzlich lassen sich auch Effekte auf die Verkehrssicherheit sowie das Verhalten von Fußgängern analysieren.

Hierzu wurden empirische Untersuchungen in Bad Kreuznach angestellt. Zum einen wurde eine bislang vorfahrtsregelte Einmündung für eine Woche provisorisch zu einer Teilsignalisierung ohne Furten (TS2378) umgerüstet und zum anderen konnte an einer weiteren Einmündung im Stadtgebiet eine dreimonatige Langzeituntersuchung zur Ermittlung von Eingewöhnungseffekten, ebenfalls mit dem Fall TS2378, durchgeführt werden. Dieser Fall bot sich aufgrund seiner simplen Realisierbarkeit in der Praxis an. Eine doppelte Untersuchung desselben Knotenpunktes war aufgrund von Bauarbeiten nicht möglich, so dass die Ergebnisse der beiden Untersuchungen nur bedingt miteinander vergleichbar sind, da sich die Randbedingungen zum Teil stark unterscheiden. Teile dieses Kapitels waren Gegenstand einer Diplomarbeit am Fachgebiet und wurden in der Fachzeitschrift *Straßenverkehrstechnik* 1/2017 als Peer Review Beitrag veröffentlicht⁵⁹. Der Untersuchungsablauf, die eingesetzten Methoden sowie die Ergebnisse und deren Auswirkungen auf die weiteren Untersuchungen sind Gegenstand dieses Kapitels.

6.1 Beschreibung der untersuchten Knotenpunkte

Die empirischen Untersuchungen fanden an zwei Knotenpunkten in Bad Kreuznach statt, einer Kreisstadt mit ca. 50.000 Einwohnern in Rheinland-Pfalz. Die beiden untersuchten Knotenpunkte, Typ AS0EI und AS1EI, befinden sich im dortigen Gewerbegebiet jeweils an Hauptverkehrsstraßen, wovon erstere angebaut und die zweite anbaufrei ist. Anbaufrei meint in diesem Fall, dass über die Straße keine Grundstücke erschlossen sind. Dies sind zum einen der Schwabenheimer Weg (siehe Abbildung 6.2) und zum anderen die Gensinger Straße (siehe Abbildung 6.3). Beide verbinden das Stadtzentrum mit dem überörtlichen Bundesfernstraßennetz. Die Auswahl der beiden Einmündungen erfolgte sowohl aus forschungsökonomischen Gesichtspunkten, da Bad Kreuznach in erreichbarer Nähe liegt, als

⁵⁹MELLINGER 2016 und MELLINGER und ROOS 2017

auch, weil die Bereitschaft der dortigen Stadtverwaltung gegeben war, die Forschungsaktivitäten zu unterstützen. Folgende weitere Auswahlkriterien bildeten den Hintergrund der Vorauswahl:

- Verkehrsbelastung innerhalb der Grenzwerte aus Tabelle 2.1
- Häufiger Rückstau im Nebenstrom
- Knotenpunkt derzeit unsignalisiert
- Ausbaustandard AS0EI oder AS1EI, da dort die Messungen am einfachsten durchführbar sind

In Abbildung 6.1 sind die beiden Knotenpunkte verzeichnet. Südwestlich des Planausschnittes liegt das Stadtzentrum von Bad Kreuznach. Östlich führt die B41 zur BAB A61 mit direktem Anschluss an das Rhein-Main Gebiet. Es sind daher hohe Pendlerverflechtungen zwischen den Wohnquartieren von Bad Kreuznach und dem Autobahnanschluss zu verzeichnen, die sich hauptsächlich auf der Bosenheimer Straße abbilden, jedoch auch die beiden untersuchten Straßen tangieren.

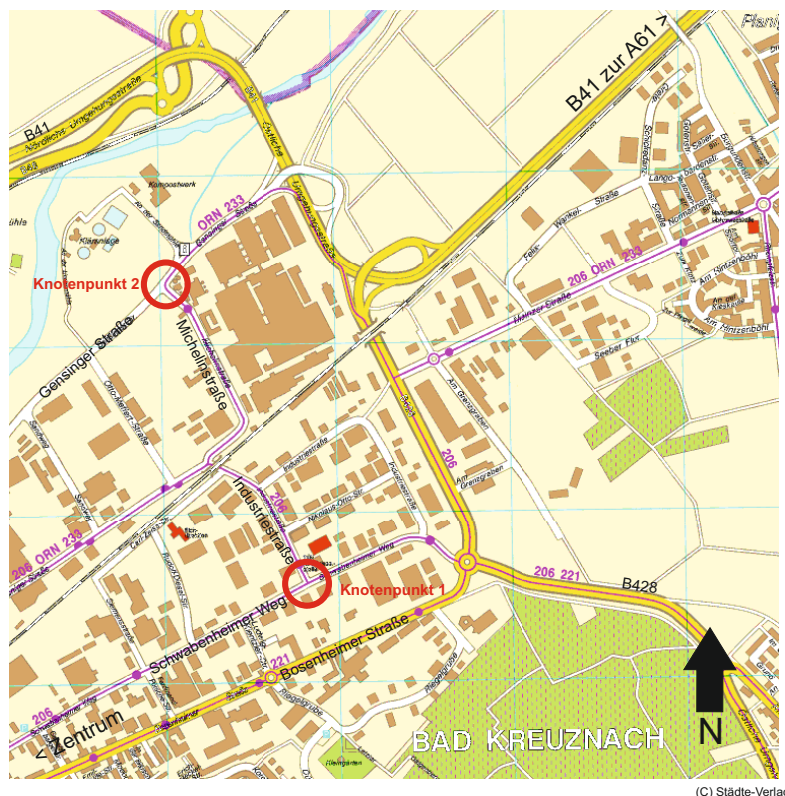


Abbildung 6.1: Übersichtskarte (ohne Maßstab)
Kartenbasis: Städte Verlag, Fellbach

6.1.1 Knotenpunkt 1: Schwabenheimer Weg / Industriestraße

Einer der beiden untersuchten Knotenpunkte ist die Einmündung der Industriestraße in den Schwabenheimer Weg (Typ AS0EI), der parallel zur Haupteinfallstraße (Bosenheimer Straße) verläuft und somit auch eine gewisse Verbindungsfunktion aufweist. Der Schwabenheimer Weg beginnt im Osten am Kreisverkehr, an dem die B428 mit der Bosenheimer Straße und dem Schwabenheimer Weg verknüpft wird, verläuft südwestlich durch das Gewerbegebiet und mündet dort ebenfalls in einen Kreisverkehr. Von hier besteht die Möglichkeit, entweder über die Gensinger Straße oder die Bosenheimer Straße weiter in die Innenstadt oder das nahegelegene Wohngebiet zu gelangen. Der Kreisverkehr sorgt in der abendlichen Spitzenstunde regelmäßig für Rückstaus bis zum untersuchten Knotenpunkt.

Angesiedelt sind viele Büros und Gewerbebetriebe. Ebenso sind diverse Einkaufsmöglichkeiten und Restaurationsbetriebe vorhanden. Diese erzeugen zum einen Berufs- und zum anderen Versorgungsverkehr, was sich auch in den Zählraten der Vorerhebung niederschlägt, da ausgeprägte Spitzen fehlen. Teils sind Grundstücke über den Schwabenheimer Weg erschlossen, so dass es auch zum Ein- und Ausfahren von Parkplätzen kommt, was insbesondere beim Schwerverkehr für Störungen sorgt.

An diesem Knotenpunkt fand im vierten Quartal 2015 die einwöchige Untersuchung statt.

Der Knotenpunkt weist folgende geometrischen Merkmale auf:

- Fahrstreifenbreite Hauptrichtung: 3,10 m
- Fahrstreifenbreite Nebenrichtung: 4,10 m
- Längsneigungen: 0%
- Abbiegeradien: 12,00 m

Ein Lageplan befindet sich am Anhang.

6.1.2 Knotenpunkt 2: Gensinger Straße / Michelin Straße

Die dreimonatige Langzeituntersuchung fand an der Einmündung Gensinger Straße / Michelinstraße im zweiten Halbjahr 2016 statt. Die Gensinger Straße stellt neben der Bosenheimer Straße eine weitere wichtige Verbindung von der B41 zum Stadtzentrum dar. Diese Einmündung kann dem Typ AS1EI zugeordnet werden, da sie einen Linksabbiegestreifen in Hauptrichtung besitzt. In der Hauptrichtung ist bei diesem Knotenpunkt keine Rückstauproblematik vorhanden, da der nächste lichtsignalgeregelte Knotenpunkte ca. 1,5 km entfernt liegt. Es ist jedoch mit einem Einfluss dieser LSA auf die Verteilung der Fahrzeugankünfte zu rechnen. In der Gegenrichtung ist die Gensinger Straße planfrei mit einer Trompete an die Bundesstraße B41 angeschlossen. Die Straße ist in ihrem gesamten Verlauf anbaufrei. Die Erschließung der angrenzenden Firmen erfolgt über Nebenstraßen. Lediglich die Zufahrt zum Mitarbeiterparkplatz des Michelin Reifenwerkes erfolgt über die

Gensinger Straße. Dieser wird häufig von wendenden LKW aus den Abfallwirtschaftsbetrieben genutzt, da diese nicht direkt Richtung B41 ausfahren dürfen.

Der Knotenpunkt weist folgende geometrischen Merkmale auf:

- Fahrstreifenbreite Haupttrichtung: 3,00 m
- Fahrstreifenbreite Linksabbiegestreifen: 2,80 m
- Fahrstreifenbreite Nebenrichtung: 4,50 m
- Längsneigungen: 0%
- Abbiegeradien: 12,00 m

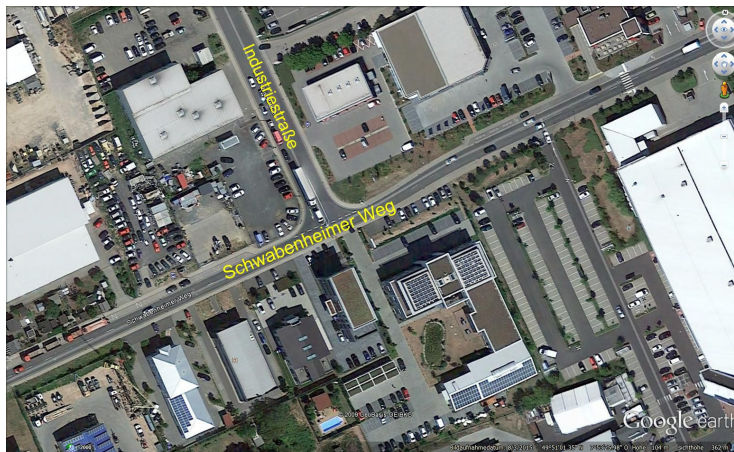


Abbildung 6.2: Luftbild Knotenpunkt 1
Quelle: Google Earth



Abbildung 6.3: Luftbild Knotenpunkt 2
Quelle: Google Earth

6.2 Vorgehensweise der empirischen Untersuchung

Die empirischen Untersuchungen liefen bei beiden untersuchten Knotenpunkten in drei Schritten ab⁶⁰. Diese sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Zunächst erfolgte eine Voruntersuchung am unsignalisierten Knotenpunkt. Es wurde der Verkehr beobachtet, die Verkehrsstärken erhoben und letztere anschließend mit den Einsatzgrenzen aus der Studie von FROST UND SCHULZE abgeglichen.

Darauf folgte eine Vorerhebung, bei der Verkehrsstärken, Zeitlücken im Hauptstrom, Rückstaulängen und Wartezeiten in der Nebenrichtung sowie das Einfahrverhalten der Nebenstromfahrer erhoben wurden. Anschließend wurde mit diesen Werten ein VISSIM Modell der Einmündung erstellt und daran eine Wirkungsabschätzung der geplanten Teilsignalisierung vorgenommen. Im Vordergrund stand, ob die Maßnahme unter den gegebenen Randbedingungen einsetzbar ist und welche Signalprogramme geschaltet werden können. Die Auswahl erfolgte über eine Nutzwertanalyse, die die Parameter Rückstaulängen und Anzahl der Halte sowohl im Haupt- als auch im Nebenstrom berücksichtigte.

Für die Nacherhebung wurden die Knotenpunkte mit einer provisorischen Baustellen-LSA ausgerüstet und zuvor als passend bewertete Programme eingespielt. Während der Nacherhebung wurden abermals Zeitlücken, Wartezeiten und Rückstaulängen messtechnisch erfasst und mit der Vorerhebung verglichen. Während allen Erhebungstagen wurden die Knotenpunkte auf Video aufgezeichnet.

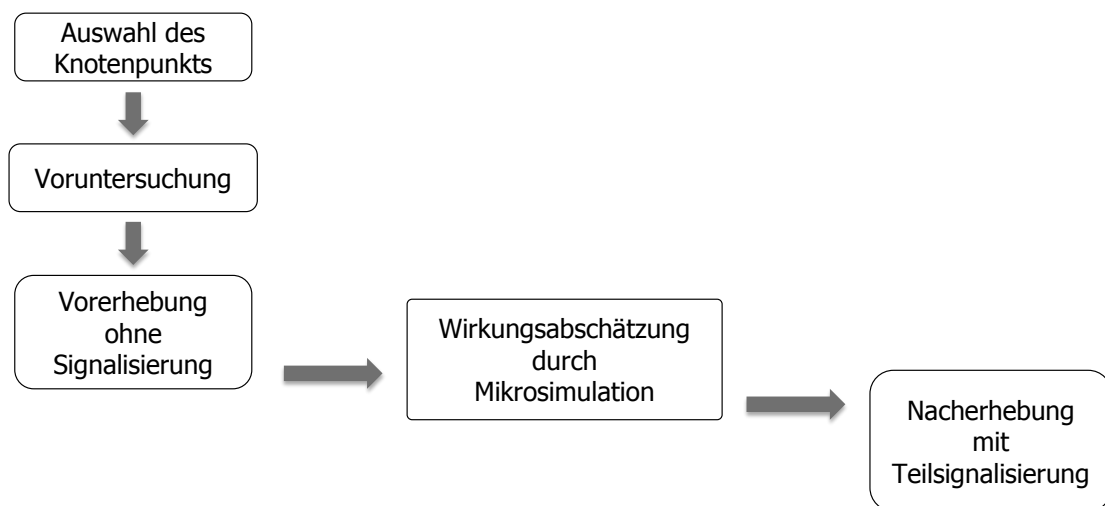


Abbildung 6.4: Vorgehensweise der empirischen Erhebungen

Quelle: Angelehnt an MELLINGER und ROOS 2017

⁶⁰Am Knotenpunkt 2 wurden keine Wartezeiten und Rückstaulängen erhoben

6.3 Erhebungsgeräte

Zur Erhebung der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom sowie deren Ablehnung bzw. Annahme kamen zwei Erhebungssysteme zum Einsatz. Zur Messung der Zeitlücken waren dies ultraschallbasierte Messpfosten, die basierend auf wechselnden Distanzinformationen die Lücke zwischen zwei Fahrzeugen messen. Zur Auswertung der Annahme oder Ablehnung sowie zur Messung von Wartezeiten, Rückstaulängen und Einfahrverhalten wurden Zeitrafferkameras eingesetzt. Diese waren mit den Pfosten synchronisiert. Den Lücken auf den Videos konnten daher die genauen Messwerte zugeordnet und diese anschließend ausgewertet werden. Beide Geräte sind Teil des „imovino“ Systems des Lehrstuhls und wurden eigens für diese Erhebungen am Lehrstuhl konzipiert, da entsprechende Geräte auf dem Markt nicht zur Verfügung standen⁶¹.

6.3.1 imovino Leitpfosten

Es existiert eine Vielzahl an Erhebungsmethoden zur Messung von Zeitlücken. Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Erhebungsaufwands, der Messgenauigkeit und der Erhebungskosten. Eine der ältesten und verbreitetsten Methoden ist die Anwendung eines Zeitschreibers (Time Recorder). Im Zeitschreiber läuft eine Papierrolle mit konstanter Geschwindigkeit. Das Messpersonal hält durch Drücken von Tasten die zeitliche Verteilung der Fahrzeuge auf dieser Rolle fest. Nachteil dieser Methode ist, dass jederzeit Personal an der Messstelle vorhanden sein muss, das den Erfassungsbereich überblicken kann, um rechtzeitig den Kontakt auszulösen, was eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle darstellt. Da in diesem Fall Messungen über mehrere Tage angedacht waren, schied diese Methode aufgrund des Personalbedarfs aus. Eine zweite Möglichkeit ist die Videomesung. Hierbei wird die Messstelle während der Erhebungsdauer auf Video aufgezeichnet und anschließend am Computer entweder manuell oder automatisch ausgewertet. Die manuelle Auswertung ähnelt der des Zeitschreibers. Software bietet daher immense Vorteile bei Genauigkeit und Schnelligkeit. Großer Nachteil der Videomesung ist, dass ein geeigneter Kamerastandort gefunden werden muss, der den Bereich möglichst verzerrungsfrei und ohne Verdeckungen filmen kann. Solche Punkte standen in beiden Fällen nicht zur Verfügung, so dass auch diese Methode verworfen wurde. Letztlich kommen zur Messung von Zeitlücken auch Druckschläuche zum Einsatz. Ihr Nachteil besteht in dem Eingriff in den Verkehr, da die Schläuche auf der Fahrbahn verankert werden müssen. Dies führt möglicherweise zu einem anderen Verhalten der Verkehrsteilnehmer.

Aufgrund dieser Überlegungen entstand für die in dieser Arbeit durchgeführten empirischen Erhebungen ein selbst konzipiertes Erhebungsgerät, das in Abbildung 6.5 zu sehen ist. Hierfür wurden folgende Entwicklungsziele verfolgt:

- Hohe Flexibilität
- Genauigkeit Zehntelsekunde
- Kein Eingriff in den Straßenverkehr, gute Anpassung an das Straßenbild

⁶¹vgl. MELLINGER et al. 2016

- Lange Akku-Laufzeit
- Autonome Erfassung ohne Personal am Knotenpunkt
- Messung von Brutto- und Nettozeitlücken
- Automatisierte Auswertung am PC
- Geringe Investitions- und Betriebskosten

Als Basis wurde ein Arduino Mikrocontroller ausgewählt. Arduino ist ein open-source Prototyping Plattform, basierend auf einfach zu nutzender Hard- und Software. Die Hardware umfasst dabei das Board mit Mikrocontroller, das über diverse Ein- und Ausgänge verfügt, an die beliebige Sensoren und Aktoren angeschlossen werden können. Die Softwareumgebung dient der Programmierung und Kompilierung der fertigen Programmcodes (Sketche). Diese sind in der Programmiersprache C++ abgefasst. Es gibt verschiedene Varianten, die sich hauptsächlich in Rechenleistung und Baugröße unterscheiden. Für diesen Anwendungszweck kamen am Lehrstuhl der Arduino Mega sowie der Arduino Uno zum Einsatz. Weitere Informationen über das Arduino Projekt können in der Literatur oder im Internet nachgelesen werden⁶².



Abbildung 6.5: imovino Messpfosten

Als Sensor fungiert ein Ultraschallentfernungsmesser, der permanent Distanzwerte liefert, die zur Auswertung genutzt werden können. Der Sensor misst orthogonal zur Fahrbahn die Entfernung vom Fahrbahnrand aus. Wenn sich kein Fahrzeug auf dem Fahrstreifen befindet, so wird ein großer Wert gemessen. Sobald ein Fahrzeug in den Messbereich einfährt,

⁶²vgl. beispielsweise BRÜHLMANN 2015 oder www.arduino.org

wird die Entfernung schlagartig kleiner bis zum Verlassen des Querschnitts. Diese beiden Zeitpunkte können durch den Arduino bestimmt werden. Über die intern mitlaufende Uhr kann die Lückengröße errechnet werden. Eingebaut wird die Technik in einen Leitpfosten. Dieser dient zum einen als Wetterschutz und ermöglicht zum anderen die unauffällige Platzierung der Technik am Fahrbahnrand bzw. Gehweg. Der genaue Ablauf zur Messung von Nettolücken ist im folgenden Abschnitt beschrieben. Der Messpfosten ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

6.3.1.1 Messung von Nettozeitlücken

Mit den imovino Ultraschallmesspfosten ist es möglich, direkt Nettozeitlücken zu messen. Hierbei detektiert der Sensor das Heck eines Fahrzeugs. Diese Information wird abgespeichert, wenn für mindestens eine Sekunde kein kleinerer Wert als der Schwellwert E gemessen wurde. Diese Sicherheitssekunde dient der Fehlertoleranz, da es an Türfugen mitunter zu Reflexionen des Ultraschalls kommt und bei der Durchfahrt des Fahrzeugs kurzzeitig große Werte gemessen werden können. Die Zeitinformation dieses Ereignisses wird in einer Hilfsvariablen abgespeichert. Bei Ankunft des Folgefahrzeugs wird dessen Vorderkante detektiert und anschließend die Differenz zwischen der aktuellen Zeit und der zuvor abgespeicherten Zeit ermittelt. Diese Differenz entspricht der Nettozeitlücke zwischen den beiden Fahrzeugen. Die zwei Hilfsvariablen „merker1“ und „merker2“ dienen der Steuerung des Programms. In ihnen werden Programmzustände festgehalten, die für die Auswertung notwendig sind. Der schematische Ablauf ist in den Abbildungen 6.6 und 6.7 dargestellt.

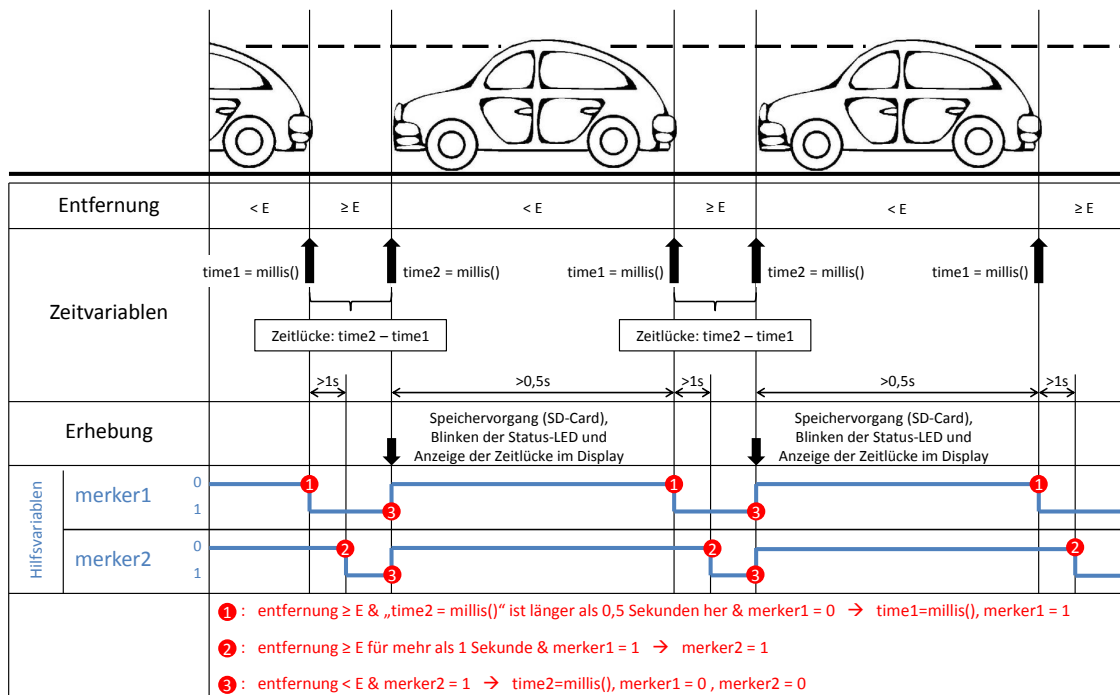


Abbildung 6.6: Programmablauf zur Messung von Nettozeitlücken
Erarbeitet mit MELLINGER 2015

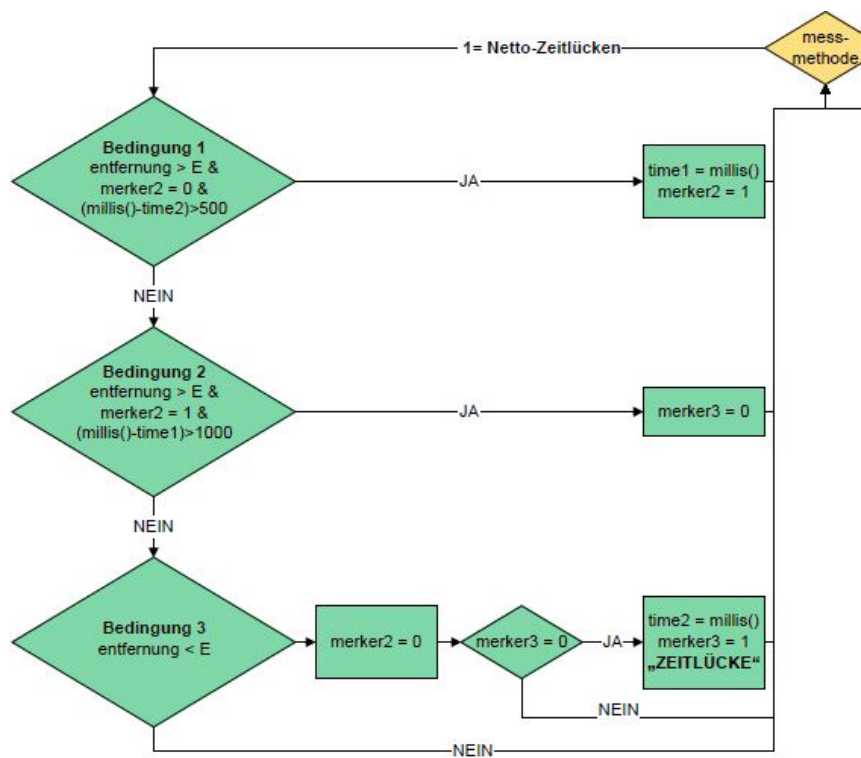


Abbildung 6.7: Schematischer Programmcode der Nettozeitlückenmessung
Erarbeitet mit MELLINGER 2015

6.3.1.2 Abschätzung der Datengüte

Die Abschätzung der Datengüte der Messpfosten fand mittels einer Videoauswertung statt. Hierzu wurde am Pfosten eine Videokamera mit 60 fps montiert, die den Erfassungsbereich des Sensors abdeckt. Eine zusätzliche LED am Pfosten, die immer dann aufleuchtete, wenn ein Fahrzeug detektiert wurde, visualisierte die Detektion. Die Messanordnung kann in Abbildung 6.8 nachvollzogen werden. Es war somit möglich die Zeitlückenwerte des Pfostens mit denen aus den Kamerabildern abzugleichen.

Es wurden mehrere Testläufe in Kaiserslautern durchgeführt, bei denen nur geringe Abweichungen festgestellt werden konnten. Die Abweichungen sind vor allem von der Form der Fahrzeuge abhängig. Gewölbte Stoßfänger werden schlechter detektiert als gerade Fahrzeugabschlüsse. Sowohl bei der Nettozeitlückenmessung als auch der Bruttozeitlückenmessung lag die Abweichung im Mittel knapp unter 10ms (vgl. Abbildung 6.9). Die Standardabweichung betrug bei der Nettomessung 8,3ms und bei der Bruttomessung 6,6ms. Diese Genauigkeit übertrifft die geforderte Genauigkeit von 1/10s. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die überprüfte Fallzahl für eine abschließende Aussage zur Datengüte nicht ausreicht, sondern lediglich einen Anhaltspunkt bieten kann. Aufgrund der überaus positiven Ergebnisse, welche die geforderte Genauigkeit übersteigen, wurde auf eine weitergehende Kontrolle der Qualität verzichtet. Bezieht man an dieser Stelle die menschliche Wahrnehmung ein, so stellt man fest, dass eine solch genaue Abschätzung der Zeitlückengröße durch die Fahrer gar nicht möglich ist⁶³. Insofern wird die Datengüte für die Untersuchungen in dieser Arbeit als hinreichend genau angesehen.



Abbildung 6.8: Kontrolle der Datengüte mittels LED

⁶³vgl. WEINERT 2001 S. 16

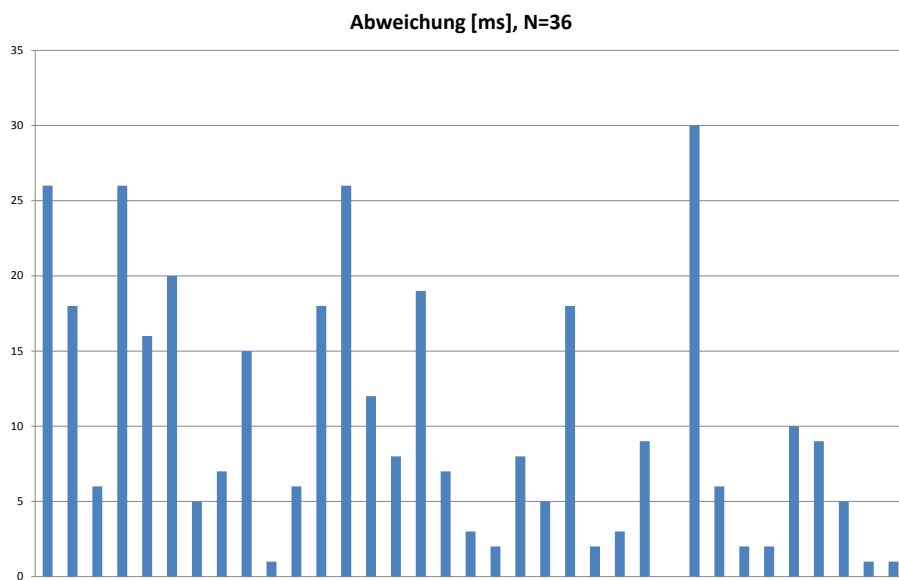


Abbildung 6.9: Abweichung Nettomessung

6.3.2 Zeitrafferkameras

Zur Beobachtung und zur Auswertung der angenommenen bzw. abgelehnten Zeitlücken, der Rückstaulängen und Wartezeiten kamen Zeitrafferkameras der Firma Brinno (siehe Abbildung 6.10) zum Einsatz, die folgende Eigenschaften erfüllen:

- Lange Akkulaufzeit
- Genügend Speicherplatz für Erhebungsdauer
- Wetterschutz (v.a. Wind und Regen)
- Kompakter, leichter Aufbau
- Gut zu befestigen
- Großer Weitwinkel
- Unauffälligkeit im Straßenbild

Das verwendete Kamerasystem ermöglichte somit eine flexible Erhebung ohne große Vorarbeiten. Die Kameras konnten an Lichtmasten und Verkehrsschildern angebracht werden. Aufgrund des großen Weitwinkels war eine Montage in 2,5m Höhe ausreichend. Die große Verzerrung erlaubte keine Messung der Zeitlücken über das Videobild. Die Speicherung erfolgte auf SD Karten.

Als Nachteile haben sich Gegenlicht und schwache Lichtverhältnisse gezeigt. Die Kameras kamen hier schneller an ihre Grenzen als professionelle Systeme. Dies war bei dieser Erhebung aber nicht von großem Nachteil, da das größte Verkehrsaufkommen vor Einbruch der Dunkelheit auftrat und die Knotenpunkt innerorts mit entsprechender Straßenbeleuchtung lagen. Außerdem lösen die Kameras zeitlich nur im Halbsekundenraster auf. Dies hat zur Folge, dass Wartezeiten und Zeitbedarfswerte nur mit dieser Genauigkeit ermittelt werden konnten.



Abbildung 6.10: Brinnokamera

6.4 Erhebungsmethodik

6.4.1 Verkehrsstärken

Zur Erhebung der Verkehrsmengen kam eine klassische Knotenpunktzählung mit Videounterstützung zum Einsatz, die sich an den Kriterien der Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE) orientiert⁶⁴. Es wurde zum einen während der Voruntersuchungen des Knotenpunkts 1 direkt vor Ort gezählt und zum anderen später anhand der Videoaufnahmen. Es wurde folgende Klassifizierung vorgenommen:

- Fahrrad / Moped
- Motorrad / Pkw
- LKW 3,5t-7,5t
- LKW >7,5t
- Bus
- Sonstige

6.4.2 Einfahrverhalten im vorfahrtgeregelten Zustand

Das Einfahrverhalten der Nebenstromfahrzeuge wird im Wesentlichen über Grenz- und Folgezeitlücken (unsignalisierte Knotenpunkte) bzw. Zeitbedarfswerte beschrieben (signalisierte Knotenpunkte). Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurden daher zunächst Grenz- und Folgezeitlücken des unsignalisierten Zustands erhoben.

Für die empirischen Untersuchungen wird aufgrund der hohen Praktikabilität auf das Verfahren nach SIEGLOCH zurückgegriffen⁶⁵.

SIEGLOCH geht davon aus, dass sich die Anzahl der in den Hauptstrom einfahrenden Nebenstromfahrzeuge im Mittel mit wachsender Größe der Zeitlücke erhöht. Unter dieser Annahme beschreibt er die Anzahl einfahrender Nebenstromfahrzeuge $g(t)$ durch Formel 6.1. Er nutzt zusätzlich die sogenannte Nullzeitlücke t_0 aus Formel 6.2. Darunter versteht man die Lücke, die von allen Fahrzeugen abgelehnt wird. Stellt man die Gleichung entsprechend um, erhält man die Formel zur Ermittlung der Grenzzeitlücke t_g (Formel 6.3). Die Folgezeitlücke t_f bezeichnet die Zeitlücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Nebenstromfahrzeugen und wird aus den Messdaten entnommen.

$$g(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t \leq t_0 \\ \frac{t-t_0}{t_f} & \text{für } t > t_0 \end{cases} \quad (6.1)$$

⁶⁴FGSV 2012

⁶⁵SIEGLOCH 1973

$$t_0 = t_g - \frac{t_f}{2} \quad (6.2)$$

$$t_g = t_0 + \frac{t_f}{2} \quad (6.3)$$

Trägt man nun die Zeitlückenwerte in Abhängigkeit der eingefahrenen Fahrzeuge auf, so erhält man eine Punktwolke aus Werten. Durch diese Wolke kann mithilfe der Regressionsvariablen a und b eine Gerade der Gleichung

$$t = a + b \cdot g(t) \quad (6.4)$$

gelegt werden. Aus (6.1) und (6.4) ergibt sich Gleichung

$$\frac{t - t_0}{t_f} = \frac{t - a}{b} \quad (6.5)$$

welche durch Einsetzen der Formel 6.2 die Grenzzeitlücke (und daraus die Nullzeitlücke) ergibt:

$$t_g = t_0 + \frac{b}{2} \quad (6.6)$$

Die gemessenen Zeitlückenwerte der Messpfosten müssen daher mit den Videoaufnahmen abgeglichen werden. Für jede Zeitlücke wurde ausgewertet, wie viele Fahrzeuge in diese eingefahren sind. Dieses Verfahren lief dreistufig ab.

Für die Auswertung der Erhebungsdaten kam eine an das Verfahren von SIEGLOCH angelehnte und an die örtlichen Gegebenheiten leicht modifizierte Methode zum Einsatz, welche dem systematischen Herausfiltern der für die Auswertung relevanten Zeitlücken dient. Es ergibt sich ein Ablaufschema⁶⁶, anhand dessen jeder Zeitlücke ein bestimmtes Attribut zugewiesen wurde (vgl. Abbildung 6.11). Die Attribute lauten wie folgt:

- X: Während dieser Zeitlücke gab es kein Nebenstromfahrzeug, das diese hätte annehmen oder ablehnen können
- V: Das Nebenstromfahrzeug wurde während dieser Zeitlücke vorgelassen oder hat die Vorfahrt des Hauptstromfahrzeugs missachtet
- H: Das Nebenstromfahrzeug ist während dieser Zeitlücke ohne Halt in die Konfliktfläche eingefahren (Nutzung einer lag)
- GV: Es handelt sich um eine Zeitlücke, die aufgrund von Gegenverkehr im Hauptstrom nicht genutzt werden kann
- L: Es handelt sich um eine Zeitlücke, die aufgrund wartender Linksabbieger (Strom 7) nicht genutzt werden kann (gilt nur für Strom 4)

⁶⁶vgl. MELLINGER 2016 S. 61 ff

- 0: Es handelt sich um eine wegen ihrer Größe abgelehnte Zeitlücke
- R: Es handelt sich um eine Zeitlücke, die während Rückstau im Nebenstrom von einer gewissen Anzahl an Fahrzeugen angenommen wurde (für Auswertung relevant)

Je nach Attribut wird eine Zeitlücke für die spätere Auswertung herangezogen oder verworfen.

Hauptkriterium Das Hauptkriterium ist die Unterscheidung der Lücken nach Anwesenheit eines Nebenstromfahrzeugs. Wenn kein Fahrzeug wartet, wird sie mit dem Attribut „X“ gekennzeichnet und nicht weiter betrachtet. Ebenso werden „lags“ verworfen, sofern zu Beginn der Zeitlücke kein Fahrzeug an der Haltlinie wartete (vgl. Kapitel 4.1.3). Alle anderen Lücken verbleiben in der Auswertung.

Abschnitt 1 War ein Fahrzeug während des Auftretens der Lücke anwesend, kommt diese vorerst für die Auswertung in Frage. Das nächste Kriterium schließt diejenigen aus, bei denen entweder das Nebenstromfahrzeug vorgelassen wurde oder trotz Anwesenheit bevorzogter Fahrzeuge in den Hauptstrom eingefahren ist (Drängeln). Da dem Fahrer die Entscheidung über eine Annahme oder Ablehnung der Lücke abgenommen wurde oder ein nicht StVO-konformes Verhalten vorlag, werden Lücken dieser Art durch das Attribut „V“ markiert und nicht weiter betrachtet.

Ebenso werden auch angenommene Lücken ausgeschlossen, bei denen ein Fahrzeug im Haltevorgang nicht gänzlich zum Stehen kam, bevor es die Lücke angenommen hat. RETZKO stellte fest, dass eine Lücke nur dann exakt bestimmt werden kann, wenn ein Fahrzeug komplett zum Halten gekommen ist⁶⁷. Solche Lücken werden mit „H“ markiert.

Abschnitt 2 Durch die drei beschriebenen Abfragen bleiben nur noch Gaps übrig, bei denen auch regelkonformes Verhalten vorlag. Die folgenden Kriterien unterscheiden diese Gaps hinsichtlich ihrer Annahme oder Ablehnung durch einen Nebenstromfahrer.

Für die Ablehnung einer angebotenen Zeitlücke ergeben sich verschiedene Möglichkeiten: Ein Nebenstromfahrzeug aus Strom 4 (Linkseinbieger) muss wegen seines niedrigsten Ranges an der Einmündung sowohl die Fahrzeuge aus den bevorzugten Strömen 2 und 3 (von links) sowie 7 und 8 (von rechts) beachten. Zum Einfahren werden in beiden Hauptstromarmen jeweils ausreichend große Lücken benötigt. Kann zum Beispiel eine erfahrungsgemäß ausreichend große Gap in der rechten Zufahrt nicht angenommen werden, weil die dichte Fahrzeugfolge aus der linken Zufahrt dies verhindert, wird diese Gap durch das Attribut „GV“ für Gegenverkehr gekennzeichnet.

Ist nicht der Gegenverkehr der Grund für die Ablehnung, wird noch eine weitere Möglichkeit abgefragt. Da an der betrachteten Einmündung kein Abbiegestreifen für die Linksab-

⁶⁷vgl. RETZKO 1961 S. 72

bieger des Hauptstroms (Strom 7) vorgesehen ist, kommt es im rechten Hauptstromarm immer wieder zu kleineren Rückstaus, wenn sich keine ausreichend große Zeitlücken in Strom 2 bieten. Wenn die Lückengröße zwischen den Hauptstromfahrzeugen aus Strom 2 groß genug zum Abbiegen ist, müssen erst die zurückgestauten Fahrzeuge in Strom 8 abfließen. Für das Nebenstromfahrzeug aus Strom 4 reicht die verbleibende Lückengröße meist zum Einbiegen nicht aus. Analog zum Kriterium des Gegenverkehrs wird diese Hauptstromlücke des Stroms 2 mit dem Attribut „L“ versehen und muss in der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden.

Trifft keine der Möglichkeiten zur Ablehnung einer Gap zu, muss es sich folglich um eine nicht ausreichend große Lücke handeln. Wenn sich ein Nebenstromfahrer gegen die Annahme einer solchen Zeitlücke entscheidet, wird sie mit „0“ gekennzeichnet. Bei den Lücken mit diesem Attribut handelt es sich um „echte“ abgelehnte Gaps. Sie ergeben die Nullzeitlücke.

Abschnitt 3 Wird eine Zeitlücke von einem oder mehreren Nebenstromfahrzeugen zum Einfahren angenommen, wird die Anzahl der eingefahrenen Fahrzeuge notiert. Hierbei besteht die Möglichkeit, dass eine Lücke aufgrund von Gegenverkehr oder Linksabbiegern im Hauptstrom nicht von allen wartenden Nebenstromfahrzeugen genutzt werden kann. Ist dies der Fall, wird die betroffene Lücke zusätzlich zur Anzahl durch die Attribute „GV“ oder „L“ aus Abschnitt 2 markiert, da der Einfahrprozess der Fahrzeugschlange abgebrochen wurde.

Sollte sich der Rückstau im Nebenstrom komplett auflösen und eine Gap allen wartenden Fahrzeugen das Einfahren ermöglichen, wird lediglich die Anzahl der Fahrzeuge notiert, die diese Lücke genutzt haben. Da kein Fahrzeug im Nebenstrom übrig bleibt, wird die Voraussetzung des ständigen Rückstaus im Nebenstrom zur Auswertung der Lücke nicht erfüllt. Die Lücke wird ebenfalls aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Wenn das Einbiegen eines oder mehrerer Nebenstromfahrzeuge nicht durch Gegenverkehr oder Linksabbieger im Hauptstrom unterbrochen wird, sondern die komplette Gap genutzt werden kann und mindestens ein wartendes Fahrzeug im Nebenstrom am Ende der Lücke übrig bleibt, handelt es sich um eine für die weitere Auswertung relevante Zeitlücke. Sie wird durch die Anzahl der eingefahrenen Fahrzeuge sowie durch das Attribut „R“ gekennzeichnet.

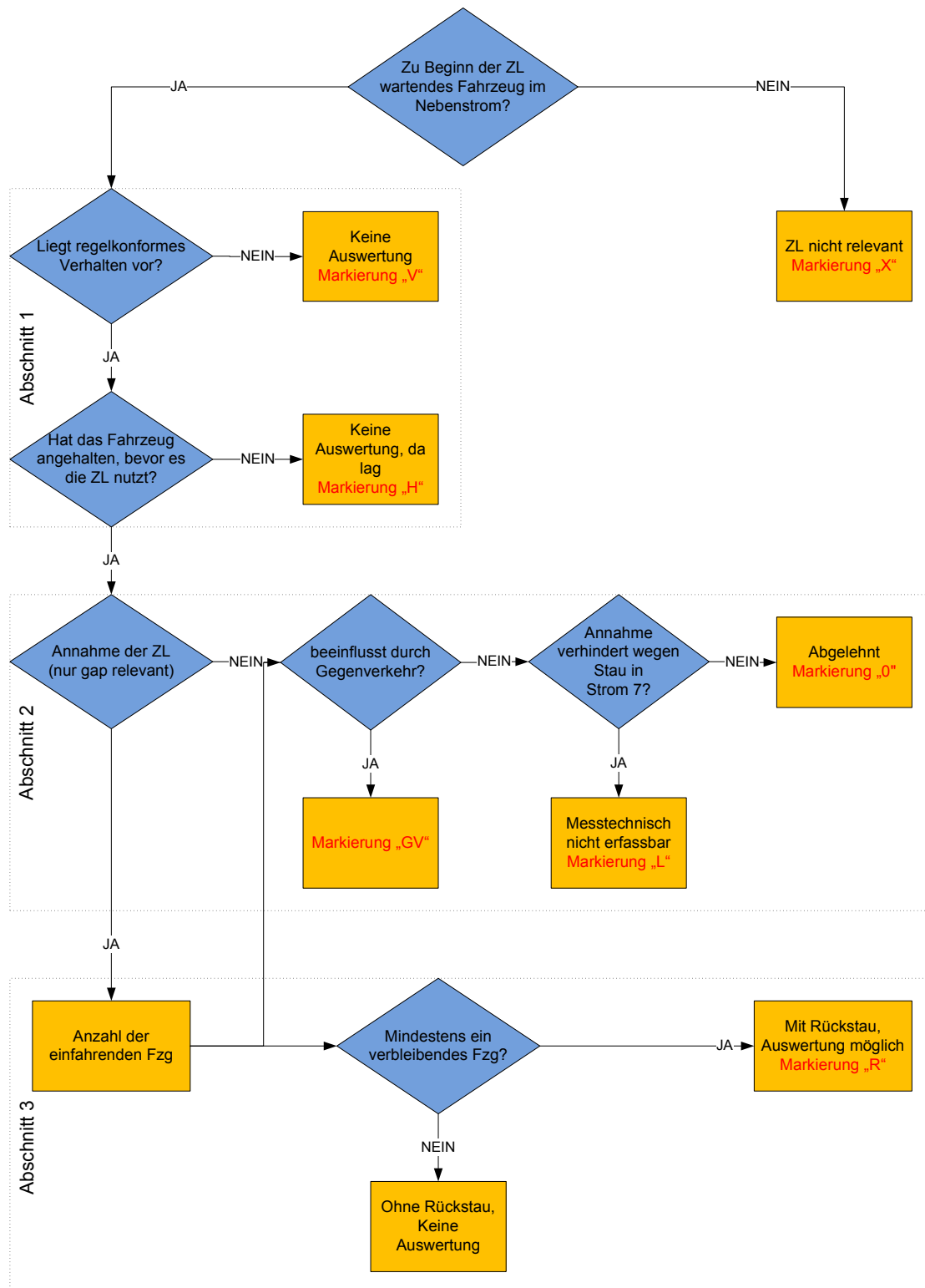


Abbildung 6.11: Auswerteverfahren der Zeitlücken
Erarbeitet mit MELLINGER 2016

6.4.3 Fahrzeugabfluss im teilsignalisierten Zustand

An signalisierten Knotenpunkten dient zur Beschreibung des Einfahrverhaltens aus der Nebenrichtung der Zeitbedarfswert⁶⁸, identisch mit der Folgezeitlücke an vorfahrtgeregelten Knotenpunkten. Dieser beschreibt den zeitlichen Abstand bei GRÜN zwischen zwei die Haltlinie passierenden Nebenstromfahrzeugen und dient somit der Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärke.

Zeitbedarfswerte können in Analogie zu vollsignalisierten Zufahrten auch bei teilsignalisierten zur Beschreibung des Verkehrsablaufs herangezogen werden. Auch hier stellt sich nämlich die Frage, wie viele Fahrzeuge während der Sperrzeit des Hauptstroms aus der Nebenrichtung einbiegen können.

Eine gute Anleitung zur Ermittlung von Zeitbedarfswerten und daraus abgeleiteten Sättigungsverkehrsstärken liefern SCHNABEL und LOHSE in Anlehnung an das Highway Capacity Manual (HCM). Die Verfahrensschritte zur Bestimmung von Zeitbedarfswerten sind in Abbildung 6.13 dargestellt.

Voraussetzung ist, dass die Fahrzeuge vorher in dichter Packung vor der Haltlinie gewartet haben und als Pulk abfließen. Der Zeitbedarfswert unterscheidet sich nach der jeweiligen Fahrzeugposition. Die Werte der ersten vier Fahrzeuge unterscheiden sich von denen der folgenden Fahrzeuge, wie Abbildung 6.12 zu entnehmen ist.

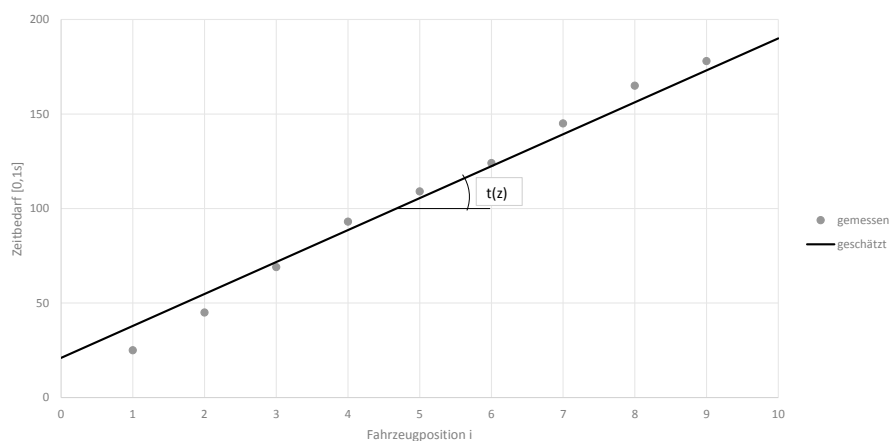


Abbildung 6.12: Summenkurve der Mediane der Zeitlücken

Quelle: AXHAUSEN et al. 1989

Im vorliegenden Fall wurden die Zeitbedarfe der Nebenstromfahrzeuge zum Einfahren in den Hauptstrom aus den Videodaten gewonnen. Es kamen alle Intervalle in Frage, bei denen folgende Kriterien erfüllt waren:

⁶⁸engl. average saturation headway

- Ständiger Rückstau in der Nebenrichtung
- Kein Stau in der Hauptrichtung
- Hauptrichtung hatte vollständig geräumt

Die Betrachtung fand immer für die gesamten Mischfahrstreifen statt. Das heißt, es konnten in den ersten Positionen auch vereinzelt Fahrzeuge parallel abfließen. Eine fahrstreifenscharfe Analyse war nicht möglich. Für die Bestimmung dieses Wertes wird auf das Abflussgesetz in Formel 6.7 zurückgegriffen:

$$n = \frac{t_F - t_a}{t_C} \quad (6.7)$$

Hierbei sind:

- n = Anzahl der abgeflossenen Fahrzeuge
- t_F = Gesamtzeitbedarf
- t_a = Anfahrzeitverlust (aufgrund der Fahrzeugtechnik heute fast nicht mehr relevant)
- t_C = Kürzeste Zeitlücke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen (Folgezeitlücke)

Umgestellt nach t_C kann die mittlere Folgezeitlücke bei Kenntnis des Gesamtzeitbedarfs und der Anzahl der eingefahrenen Fahrzeuge n nach Gleichung 6.8 bestimmt werden.

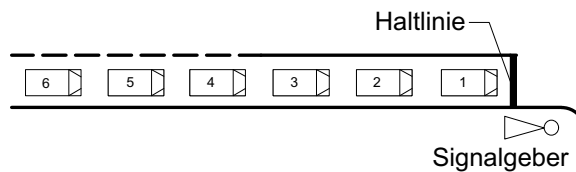
$$t_C = \frac{t_F}{n} \quad (6.8)$$

Im HCM wird empfohlen, nur die Werte des 4., 10. und letzten Fahrzeugs zu verwenden. Dies hätte jedoch zu sehr wenigen Messwerten geführt, so dass alle Fahrzeuge in die Betrachtung eingeflossen sind. Dies ist insofern vertretbar, als jedes Fahrzeug an der Haltlinie neu entscheiden muss, ob es in den Knotenpunkt einfahren kann. Bei einer Vollsignalisierung wird diese Entscheidung durch die Signalisierung abgenommen.

6.4.4 Erhebung von Wartezeiten und Rückstaulängen

6.4.4.1 Wartezeiten und Rückstaulängen der Hauptrichtung

Die Wartezeiten und Rückstaulängen der Hauptrichtung wurden am Knotenpunkt nicht empirisch erhoben, da der Verkehrsablauf in dieser Relation sich bei einer Teilsignalisierung nicht von einer Vollsignalisierung unterscheidet. Somit wurden die Wartezeiten und Rückstaulängen nach dem HBS Verfahren für Knotenpunkte mit LSA auf Basis der anliegenden Verkehrsstärken und des geschalteten Signalprogramms überprüft.



Voraussetzung: Kraftfahrzeuge stehen in dichter Packung im Fahrstreifen der Knotenpunktzufahrt

Bezugsgrößen: - Zeitpunkt des Signalbildwechsels
 Sperrung / Fahrtfreigabe (Rot+Gelb auf Grün)
 - Kraftfahrzeugbug (Fahrzeugspitze)
 - Haltlinie

Zeitbedarf bzw. Zeitlücke 0-1: Zeitdauer vom Signalbildwechsel zum Passieren der Haltlinie durch das 1. Kraftfahrzeug (Bug) = Zeitbedarf für das 1. Kfz
 Folgezeitlücken: Haltlinie durch das 1. Kraftfahrzeug (Bug) bis zum Passieren der Haltlinie durch das 2. Kraftfahrzeug (Bug) = Zeitbedarf für das 2. Kfz usw.

Geamtzeitbedarf: Besteht die Staukolonne aus n Fahrzeugen, dann umfasst ihr Zeitbedarf die Zeitdauer vom Signalbildwechsel (Rot+Gelb auf Grün) bis zum Passieren der Haltlinie durch das n-te Fahrzeug.

Fz-Mischung: Aufschreibung der Fahrzeugarten zur Angabe des SV-Anteils

Abbildung 6.13: Ermittlung der Folgezeitlücke

Quelle: SCHNABEL und LOHSE 2011

6.4.4.2 Wartezeiten und Rückstaulängen der Nebenrichtung

Die Wartezeiten und Rückstaulängen in der Nebenrichtung wurden über die Kamerabilder ausgewertet. Eine Auswertung über HBS Rechnungen ist dabei nicht möglich, da es hierfür kein Verfahren gibt. Als Definition für die Ankunft und Abfahrt von Fahrzeugen hat WEINERT in ihrer Arbeit folgende Vereinbarungen getroffen, die in dieser Arbeit ebenfalls Verwendung finden⁶⁹:

- Als „Ankunftszeit in erster Position“ wurde der Zeitpunkt definiert, an dem das untergeordnete Fahrzeug in erster Position der Warteschlange zum Stillstand kam.
- Die „Abfahrtszeit“ wurde mit dem Einfahren in die Konfliktfläche gleichgesetzt. Das bedeutet: Bei der Abfahrtszeit handelt es sich um den Zeitpunkt, an dem das Fahrzeug mit dem ersten Reifen die Fahrbahnbegrenzungslinie zum nächsten bevorrechtigten Strom überfuhr. Wenn ein untergeordnetes Fahrzeug zügig durchfahren konnte, weil es keinem Fahrzeug eines höheren Ranges Vorfahrt gewähren musste, wurde die Ankunftszeit mit der Abfahrtszeit gleichgesetzt. In diesem Falle wurde der Zeitpunkt registriert, an dem das Fahrzeug in die Konfliktfläche einfuhr.
- Als „Ankunftszeit am Ende der Schlange“ wurde die Zeit verstanden, zu der das Nebenstromfahrzeug am Ende der Warteschlange zum Stillstand kam. War die Schlange in Bewegung, so wurde der Zeitpunkt festgehalten, an dem das ankommende Ne-

⁶⁹WEINERT 2001 S. 75 f.

benstromfahrzeug die gleiche Geschwindigkeit annahm wie das letzte Fahrzeug der Schlange

Es wurden in einer Warteschlange maximal zehn Fahrzeuge betrachtet. Längere Rückstaus konnten aufgrund der Kameraauflösung nicht zweifelsfrei analysiert werden. Die Wartezeitberechnung beginnt daher auch immer erst ab der 10. Position.

Die Rückstaulängen wurden anschließend für beliebige Zeitintervalle aus der Differenz der zu- und abfließenden Fahrzeuge ermittelt. Für das erste Intervall wurde der Startwert händisch aus dem Videobild ermittelt. Abbildung 6.14 zeigt einen Ausschnitt aus dem Erhebungsbogen. Die erste Spalte ermöglichte das Eintragen von Fahrzeugmerkmalen, so dass diese während der gesamten Beobachtung nachverfolgt werden können. Die zweite Spalte beinhaltet die Ankunftszeit am Knotenpunkt. Die letzten beiden Spalten stellen stromweise die Abfahrtsuhrzeit sowie die sich ergebende Wartezeit dar.

Bemerkung zu Fahrzeug	Uhrzeit Beginn Wartezeit	LINKS		RECHTS	
		Uhrzeit Ende Wartezeit q4	Wartezeit q4	Uhrzeit Ende Wartezeit q6	Wartezeit q6
	Fahrzeugankunft an Haltelinie oder im Rückstau (max. 10 Fz)	Fahrzeug fährt links in den Hauptstrom ein	[Sekunden]	Fahrzeug fährt rechts in den Hauptstrom ein	[Sekunden]
PT CRUISER	14:00:02	14:00:28	00:00:26		
SEAT WEISS	14:00:07			14:00:22	00:00:15
AUDI ROT	14:01:03	14:01:46	00:00:43		
VAN SCHWARZ	14:01:25	14:01:55	00:00:30		
PANAMERA	14:01:26	14:02:03	00:00:37		
KASTENWAGEN WEISS	14:01:30	14:02:07	00:00:37		
KOMBI GRAU	14:01:58			14:02:09	00:00:11
ROT PRITSCH	14:02:19			14:02:19	00:00:00
AUDI SCHWARZ	14:02:26	14:02:46	00:00:20		
GOLF BLAU	14:02:44			14:02:47	00:00:03
KOMBI BLAU	14:02:45			14:02:49	00:00:04
KASTENWAGEN WEISS	14:03:17	14:03:40	00:00:23		
BENZ KASTENWAGEN	14:03:29	14:03:43	00:00:14		
SCHWARZ	14:03:30			14:03:46	00:00:16
SUV SCHWARZ	14:03:50			14:03:53	00:00:03
AUDI KOMBI	14:04:30	14:04:44	00:00:14		
BMW SUV	14:05:01			14:05:06	00:00:05
KASTENWAGEN DUNKELGRAU	14:05:02			14:05:09	00:00:07
BENZ KASTENWAGEN	14:05:16			14:05:16	00:00:00
QUAD	14:05:20			14:05:20	00:00:00
ASTRA DUNKELGRAU	14:05:30			14:05:30	00:00:00
KASTENWAGEN WEISS	14:06:07			14:06:07	00:00:00
AUDI LIMOUSINE	14:06:10			14:06:18	00:00:08
BENZ LIMOUSINE	14:06:15			14:06:20	00:00:05
SUV DUNKELGRAU	14:06:26			14:06:29	00:00:03
FAHRRAD	14:06:41			14:06:41	00:00:00
BENZ LIMOUSINE	14:06:45	14:07:07	00:00:22		
LIMOUSINE GRAU	14:06:56			14:06:56	00:00:00

Abbildung 6.14: Ausschnitt aus der Wartezeitenerhebung

Quelle: MELLINGER 2016

6.5 Ergebnisse Knotenpunkt 1

6.5.1 Messaufbau und -durchführung

Für die Erhebungen im vorfahrtgeregelten und teilsignalisierten Zustand kamen am Knotenpunkt 1 fast identische Messaufbauten zum Einsatz. Lediglich Kamera 1 wurde bei der Nacherhebung versetzt, um das Signalbild der LSA aufzeichnen zu können. Kamera 1 war bei der Vorerhebung so montiert, dass sie aus der Industriestraße auf den Knotenpunkt gerichtet war. Kamera 2 war gegenüber montiert und filmte in die Industriestraße. Dieser Aufbau wurde gewählt, um mögliche Verdeckungen ausgleichen zu können. Dies erwies sich jedoch in der späteren Auswertung nicht als notwendig. Der gesamte Knotenpunktbereich wurde ausreichend von Kamera 2 erfasst.

Der Aufstellort der Messpfosten sollte prinzipiell so gewählt werden, dass er die für den untergeordneten Strom relevanten Zeitlücken erfassen kann⁷⁰. Dies gestaltet sich jedoch nicht als trivial. Beispielsweise wäre für eine korrekte Messung der Zeitlücken für die Ströme 4 und 6 eine Messung in der Fahrbahnmitte der Industriestraße nötig gewesen. Da dies mangels Tropfen nicht möglich gewesen wäre, wurde folgende Annahme für die Erfassung der Zeitlücken getroffen:

Aufgrund der kompakten Bauweise der Einmündung wird davon ausgegangen, dass q_3 ebenfalls einen Einfluss auf die Annahme bzw. Ablehnung der Zeitlücken im Nebenstrom hat und somit mit in die Erfassung aufgenommen wird. Die Messpfosten wurden in beiden Fahrtrichtungen des Schwabenheimer Wegs an den Fahrbahnrändern in Höhe des Endes der Eckausrundungen aufgestellt.

Die Messanordnung kann der Skizze in Abbildung 6.15 und der Aufnahme in Abbildung 6.16 sowie Anhang M entnommen werden.

Für die Messung war es erforderlich die Uhrzeit der Messpfosten und der Kameras zu synchronisieren, da ansonsten keine Auswertung der angenommen und abgelehnten Zeitlücken möglich ist. Die Synchronisierung wurde durch zeitgleiches Einschalten der Pfosten und einem anschließenden Abgleich mit den Videoaufnahmen erreicht. Somit konnte jedem Videobild eine Zeitlückeninformation zugeordnet werden.

Die Vorerhebung fand an zwei Terminen statt. Zunächst wurde am 5.11.2015 (Mittwoch) das Verkehrsaufkommen im Rahmen einer Voruntersuchung händisch gezählt, um herauszufinden, ob der Knotenpunkt die Kriterien aus Tabelle 2.1 erfüllt. Nachdem sich die Verkehrsbelastungen als geeignet herausgestellt hatten, wurde am 10.11.2015 (Dienstag) mit den Messungen begonnen. Es wurde für einen gesamten Tag die Zeitlücken im Hauptstrom sowie die Wartezeiten und Rückstaulängen im Nebenstrom erhoben. Die Untersuchungen

⁷⁰vgl. WEINERT 2001

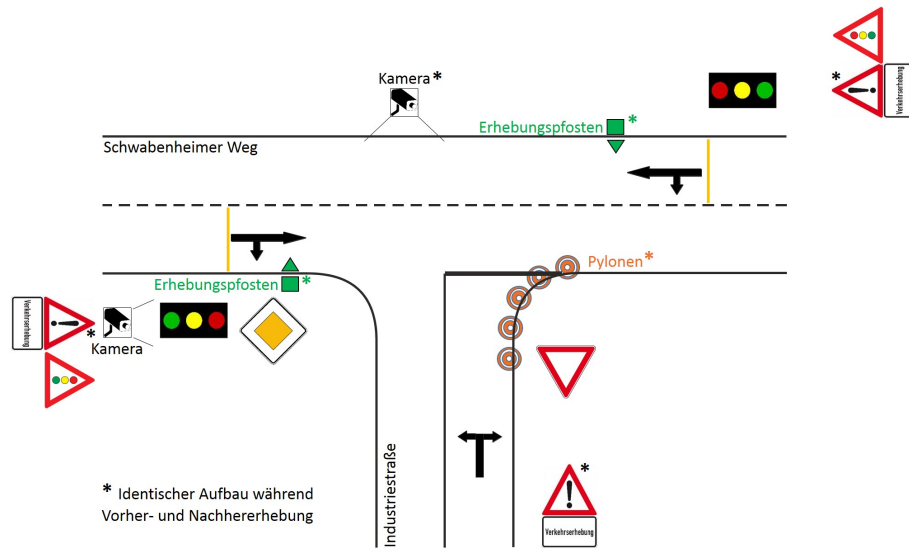


Abbildung 6.15: Messaufbau Knotenpunkt 1

Quelle: MELLINGER und ROOS 2017



Abbildung 6.16: Teilsignalisierung am Knotenpunkt 1

des Knotenpunktes im teilsignalisierten Zustand fanden zwischen dem 30.11.2015 und dem 4.12.2015 (Montag bis Dienstag) statt.

6.5.2 Verkehrsstärken und Bildung der Belastungsklassen

Während der Vorerhebung und der einzelnen Nacherhebungstage wurden die Verkehrsstärken ermittelt. Es ergibt sich in der nach HBS 2015 ermittelten Spitzenstunde für die Vorerhebung am 10.11.2015 folgende Verkehrsbelastung:

- : Zufahrt 1: Schwabenheimer Weg aus Richtung Kreisverkehr
 - q2: 487 Fz/h
 - q3: 129 Fz/h
- : Zufahrt 2: Industriestraße
 - q4: 117 Fz/h
 - q6: 293 Fz/h
- : Zufahrt 3: Schwabenheimer Weg aus Richtung Innenstadt
 - q7: 156 Fz/h
 - q8: 359 Fz/h

Der SV-Anteil beträgt in den einzelnen Zufahrten:

- Zufahrt 1: 2%
- Zufahrt 2: 1%
- Zufahrt 3: 1%

Da die weiteren Messgrößen direkt von der Verkehrsstärke abhängig sind, können die Ergebnisse der einzelnen Erhebungstage somit nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. Daher wurden Belastungsklassen (BK) anhand folgender Kriterien gebildet:

- Gesamtverkehrsstärke am Knotenpunkt $\pm 5\%$ (Einheit $\frac{Fz}{15min}$)
- Aufteilung der Gesamtverkehrsstärke auf die Einzelströme $\pm 5\%$

Damit sollte sichergestellt werden, dass innerhalb der 15-min Intervalle der Verkehrsablauf vergleichbar ist. Es wurden nur die Intervalle verglichen, die derselben Belastungsklasse zugeordnet werden konnten. Jedes Intervall, das für die spätere Auswertung einer Klasse zugeordnet werden konnte, ist entweder gelb, blau oder grün markiert. Die Zuordnung ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

6 Empirische Untersuchung zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Einmündungen

Intervall	Vorerhebung				Nacherhebung Dienstag				Nacherhebung Mittwoch				Nacherhebung Donnerstag			
	Anzahl HS 2,3	Anzahl NS 4,6	Anzahl HS 7,8	SUMME	Anzahl HS 2,3	Anzahl NS 4,6	Anzahl HS 7,8	SUMME	Anzahl HS 2,3	Anzahl NS 4,6	Anzahl HS 7,8	SUMME	Anzahl HS 2,3	Anzahl NS 4,6	Anzahl HS 7,8	SUMME
14:00:00 14:15:00	130 40%	93 29%	103 32%	326	119 36%	101 30%	112 34%	332	139 43%	83 26%	103 32%	325	132 38%	95 27%	119 34%	346
14:15:00 14:30:00	102 35%	87 29%	106 36%	295	153 39%	115 29%	124 32%	392	145 41%	93 27%	112 32%	350	128 39%	93 28%	111 33%	332
14:30:00 14:45:00	101 37%	74 27%	96 35%	271	135 40%	79 24%	122 36%	336	124 39%	81 26%	109 35%	314	151 41%	92 25%	125 34%	368
14:45:00 15:00:00	145 44%	100 30%	88 26%	333	159 44%	95 26%	109 30%	363	140 41%	95 28%	108 31%	343	124 38%	101 31%	105 32%	330
15:00:00 15:15:00	131 43%	86 28%	91 30%	308	152 42%	92 25%	117 32%	361	168 43%	121 31%	104 26%	393	155 37%	132 32%	131 31%	418
15:15:00 15:30:00	124 39%	100 31%	97 30%	321	138 40%	97 28%	113 32%	348	125 35%	112 31%	121 34%	358	142 40%	102 29%	112 31%	356
15:30:00 15:45:00	137 41%	91 27%	109 32%	337	135 38%	83 24%	133 38%	351	133 39%	92 27%	112 33%	337	137 38%	108 30%	116 32%	361
15:45:00 16:00:00	126 40%	91 29%	100 32%	317	174 46%	94 25%	114 30%	382	144 39%	110 30%	117 32%	371	156 45%	90 26%	104 30%	350
16:00:00 16:15:00	141 40%	107 30%	103 29%	351	140 39%	93 26%	122 34%	355	149 40%	117 31%	110 29%	376	151 38%	108 27%	142 35%	401
16:15:00 16:30:00	160 41%	94 24%	133 34%	387	170 41%	93 22%	151 36%	414	132 37%	103 29%	123 34%	358	147 38%	114 29%	127 33%	388
16:30:00 16:45:00	151 44%	85 24%	111 32%	347	171 43%	93 24%	130 33%	394	171 43%	97 24%	134 33%	402	163 44%	92 25%	115 31%	370
16:45:00 17:00:00	142 40%	90 25%	121 34%	353	169 41%	102 25%	141 34%	412	167 43%	94 24%	129 33%	390	171 41%	112 27%	137 33%	420

Belastungsklasse		größte Abweichung		Aufteilung		
1	335	15	4,48%	40%	30%	30%
2	355	9	2,54%	40%	25%	35%
3	400	14	3,50%	40%	25%	35%

Vorerhebung	
Signalprogramm 1	
Signalprogramm 2	
Signalprogramm 3	

Tabelle 6.1: Belastungsklassen Schwabenheimer Weg
Quelle: MELLINGER und ROOS 2017

6.5.3 Zeitlücken im vorfahrtgeregelten Zustand

Der Verkehrsablauf im vorfahrtgeregelten Zustand wird vor allem durch Grenz- und Folgezeitlücken beschrieben. Für Verkehrsstrom 4 konnten insgesamt 2238 Lücken erhoben werden, wovon jedoch nur ein Bruchteil für die Bestimmung von Grenz- und Folgezeitlücken infrage kam. Dem Großteil der Lücken wurden Attribute zugeordnet, die keine weitere Betrachtung zuließen. Letztlich konnten 3% der Lücken verwendet werden. Für Verkehrsstrom 6 standen insgesamt 1517 Lücken zur Verfügung, wovon 6% nutzbar waren.

Mithilfe dieser Werte konnte eine Regressionsabschätzung der Grenz- und Folgezeitlücken nach dem Verfahren von SIEGLOCH durchgeführt werden. Es traten nur Lücken auf, in die bis zu 4 Fahrzeuge eingefahren sind. Die Abbildungen 6.17 und 6.18 zeigen die Regressionsgeraden für die Ströme 4 und 6. In Tabelle 6.2 sind die Werte im Vergleich zu den in Deutschland üblichen Standardwerten des HBS 2015 dargestellt. Die vor Ort ermittelten Werte weichen von denen des HBS ab. Vor allem die Folgezeitlücken sind deutlich erhöht, was darauf schließen lässt, dass das Einfahren in den Knotenpunkt erschwert ist und somit die Leistungsfähigkeit herabgesetzt ist. Gründe können die schlechte Einsehbarkeit sowie die beengten Verhältnisse sein.

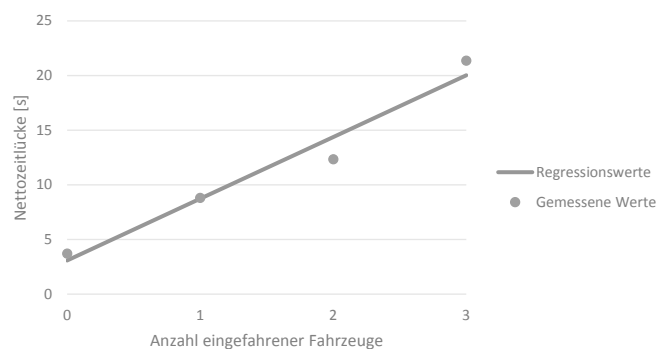


Abbildung 6.17: Regressionsabschätzung für Strom 4
Quelle: Angelehnt an MELLINGER 2016

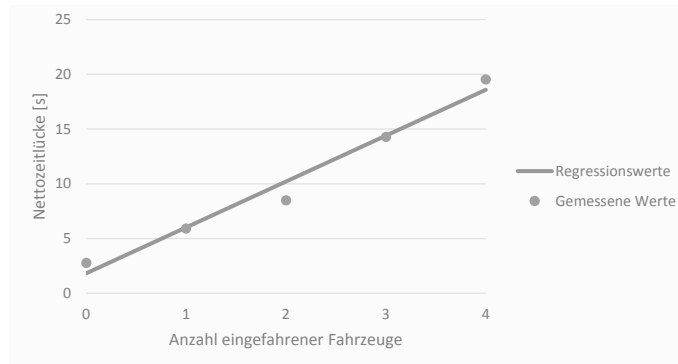


Abbildung 6.18: Regressionsabschätzung für Strom 6
Quelle: Angelehnt an MELLINGER 2016

	Anzahl der eingefahrenen Fahrzeuge	Zeitlücke [s]	Regressionsvariable a	Regressionsvariable b	Grenzzeitlücke [s]	Folgezeitlücke [s]
Strom 4	0	3,7	3,0802	5,6482	6,5	5,6
	1	8,8				
	2	12,3				
	3	32,4				
HBS Wert					6,5	3,2
Strom 6	0	2,8	1,8236	4,1988	4,9	4,2
	1	5,9				
	2	8,5				
	3	14,3				
	4	19,5				
HBS Wert					5,9	3,0

Tabelle 6.2: Grenz- und Folgezeitlücken des Nebenstroms
Quelle: Angelehnt an MELLINGER 2016

6.5.4 Wirkungsabschätzung mittels VISSIM

Vor dem eigentlichen Feldtest war es nötig, die Wirkungen einer Teilsignalisierung mittels Mikrosimulation abzuschätzen, um geeignete Signalprogramme auswählen zu können, so dass es zu keinen negativen Auswirkungen auf den Verkehrsablauf kommt.

Auf Grundlage der von der Stadtverwaltung zur Verfügung gestellten Katasterkarten wurde ein VISSIM Modell des Knotenpunkts erstellt und anschließend über die Parameter aus der Vorerhebung im Nullfall anhand der ermittelten Grenz- und Folgezeitlücken sowie der Wartezeiten und Rückstaulängen kalibriert.

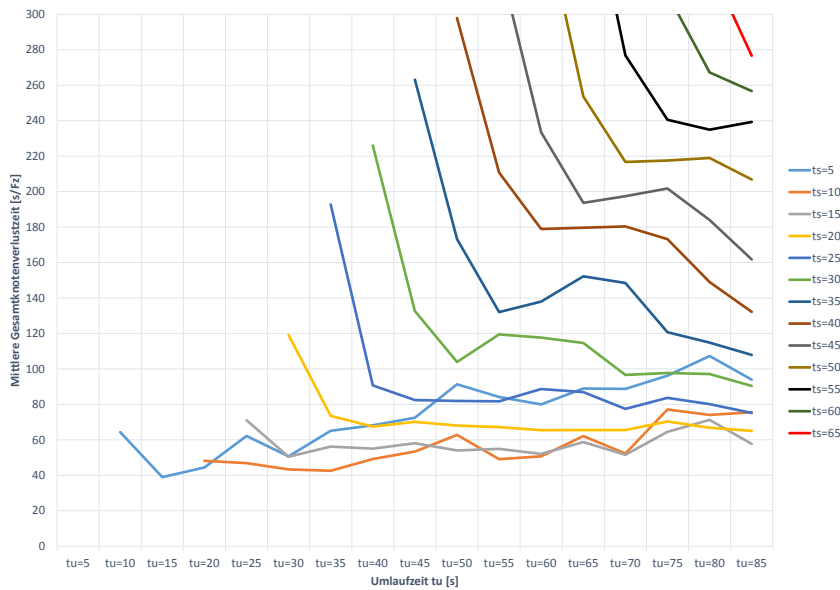


Abbildung 6.19: Mittlere Gesamtknotenverlustzeit bei unterschiedlichen Signalprogrammen
Quelle: MELLINGER 2016

Signalprogramm	Freigabezeit	Übergangszeit	Sperrzeit	Übergangszeit	Umlaufzeit	Einsatzzeit		
	grün	gelb	rot	rot-gelb		Tag	von	bis
	[s]	[s]	[s]	[s]				
1	35	4	15	1	55	Dienstag	14 Uhr	17 Uhr
2	40	4	15	1	60	Donnerstag	14 Uhr	16 Uhr
3	35	4	18	1	58	Mittwoch	14 Uhr	17 Uhr
						Donnerstag	16 Uhr	17 Uhr

Tabelle 6.3: Schaltzeiten der Signalprogramme
Quelle: Angelehnt an MELLINGER 2016

Die Wirkungsabschätzung hat gezeigt, dass eine Teilsignalisierung den Verkehrsablauf an diesem Knotenpunkt vor allem in Hinblick auf die Nebenrichtung verbessern kann. Durch Simulation verschiedener Signalprogramme (vgl. Abbildung 6.19) konnten drei erfolgversprechende Programme für den späteren Feldtest ermittelt werden. Diese sind in Tabelle 6.3 mit ihren jeweiligen Einsatzzeiträumen dargestellt. Signalprogramm 3 ergab sich aus einer Optimierung vor Ort.

6.5.5 Zeitlückenverteilung im Hauptstrom

Die Zeitlückenverteilung im Hauptstrom zeigte die erwarteten Effekte, wie sie bereits in Kapitel 4.4 vermutet wurden. Die Teilsignalisierung bewirkte eine Kolonnenbildung, wodurch vermehrt kleine Lücken auftraten und am Ende eines jeden Umlaufs eine große Lücke geschaffen wurde, die dem Nebenstrom das Einfahren erleichterte.

Dargestellt ist in Abbildung 6.20 die Zeitlückensummenlinie der Einmündung im Vergleich zu einer negativen Exponentialverteilung und den Werten einer VISSIM Simulation für die Spitzenstunde bei einer Belastung von 565 Fz/h. Die schwarze Linie zeigt die ideale negative Exponentialverteilung in der Spitzenstunde.

Die empirischen Werte bestätigen somit die Vermutungen aus Kapitel 4. Es kommt zu der bereits in der Literatur (vgl. Kapitel 4.1.3.2) beschriebenen Überzufälligkeit in der Zeitlückenverteilung. Die Zeitlückensummenlinien aus Abbildung 6.20 zeigen denselben Effekt, wie er bereits in Abbildung 4.3 vorgestellt wurde.

Die blaue Kurve zeigt die gemessenen Werte für den unsignalisierten Fall. Es ist zu sehen, dass beide Kurven einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Man kann daher von einem fast freien Verkehrsfluss an dieser Stelle ausgehen. Hiervon weichen die gelbe und orangefarbene Kurve ab, die die Zeitlückensummenlinie im teilsignalisierten Fall zeigen. Zu erkennen ist eine Plateaubildung, die auf das vermehrte Auftreten kleiner Lücken zurückzuführen ist. Unterschiede zwischen den beiden Signalprogrammen sind aufgrund deren großen Ähnlichkeit hier nicht sichtbar.

Für den konkreten Fall sind die Verschiebungsparameter $r = 2,10$ und $f = 0,20$. Die Verteilung weicht damit stark von der ursprünglichen Verteilung ab, die bei $r = 1$ gegeben wäre.

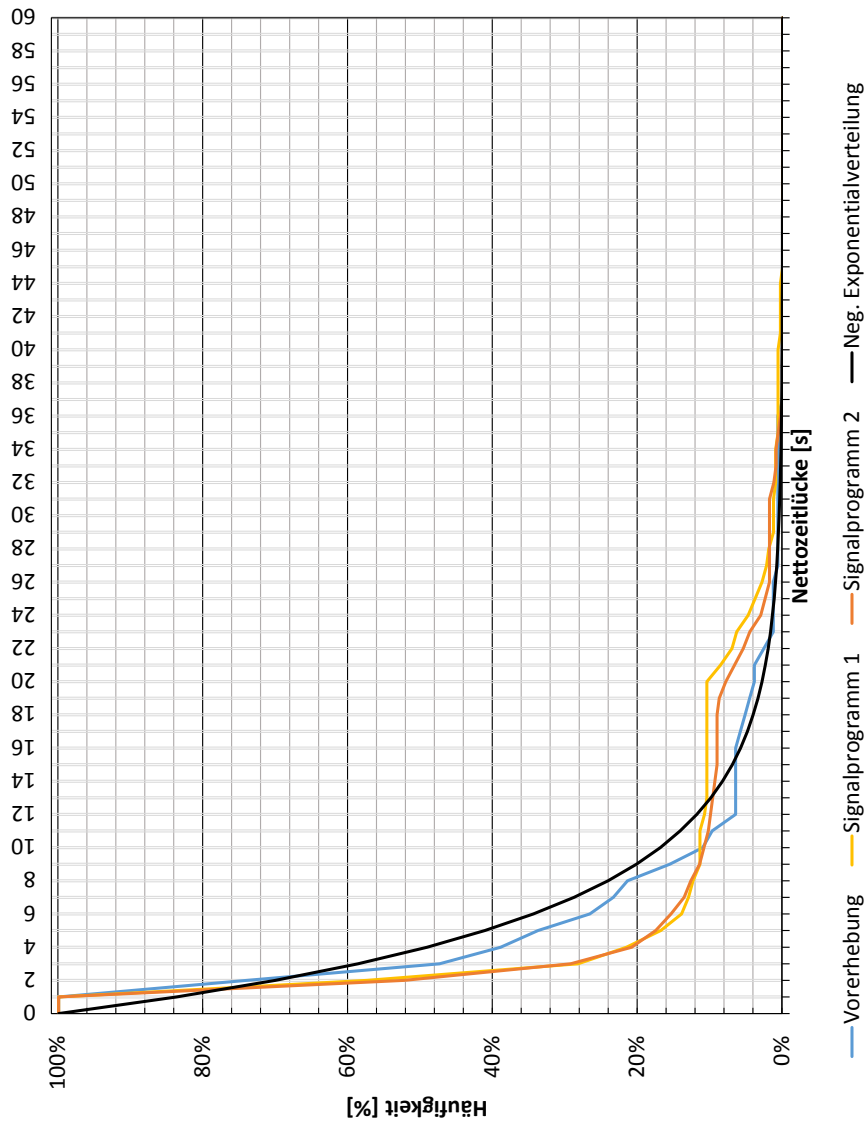


Abbildung 6.20: Zeitlückensummenlinie des unsignalisierten Zustands im Vergleich zur negativen Exponentialverteilung und VISSIM

6.5.6 Bestimmung der Zeitbedarfswerte

Zur Beschreibung des Fahrzeugabflusses aus der Nebenrichtung während der Sperrzeit wird der Zeitbedarfswert verwendet. Insgesamt konnten 107 Werte analysiert werden. Der Zeitbedarfswert lag bei $3,4 \frac{s}{Fz}$ und streute mit $0,9 \frac{s}{Fz}$. Die hohe Streuung ist der geringen Anzahl an Messwerten geschuldet.

Der Wert liegt deutlich unter den gemessenen Folgezeitlücken für diesen Knotenpunkt, jedoch wesentlich höher als der Wert von vollsignalisierten Knotenpunkten. Dieser beträgt ohne Berücksichtigung örtlicher Einflüsse $1,8 \frac{s}{Fz}$. Dies liegt daran, dass viele Fahrer an der Haltlinie zögern, bevor sie einfahren.

6.5.7 Wartezeiten und Rückstaulängen in der Nebenrichtung

Im Zuge der empirischen Erhebungen wurden nach der in Kapitel 6.4.4 dargestellten Methode die Wartezeiten der Fahrzeuge und daraus abgeleitet auch die Rückstaulängen bestimmt. Für jedes Fahrzeug wurden wie erläutert bis zur zehnten Position im Rückstau die Ankunfts- und Abfahrtszeiten notiert.

Die Auswertung der Wartezeiten erfolgte getrennt für die beiden Nebenströme 4 (Linkseinbieger) und 6 (Rechtseinbieger), obwohl wegen der Führung auf einem Mischfahrstreifen eine gegenseitige Beeinflussung vorlag. Für Strom 4 zeigt der Vergleich der mittleren Wartezeiten, dass durch den Einsatz der Teilsignalisierung größtenteils Vorteile im Vergleich zum unsignalisierten Zustand des Knotenpunkts erreicht werden konnten (vgl. Abbildung 6.21). Für BK2 ergab sich beispielsweise eine Reduzierung von bis zu 11s auf 19 Sekunden. Für Fahrzeuge aus Strom 6 konnten meist leicht längere Wartezeiten von bis zu drei Sekunden (7s bzw. 9s je nach BK) festgestellt werden, da diese zunächst ein Abfließen der Fahrzeugkolonne im Hauptstrom abwarten mussten (vgl. Abbildung 6.22). Einzelne lange Wartezeiten konnten durch den Einsatz der Signalprogramme für beide Ströme verringert oder gänzlich vermieden werden, so dass die Standardabweichung der mittleren Wartezeit je nach Belastungsklasse um ca. 30% auf ungefähr 15s abgenommen hat.

Im Hauptstrom haben sich die Wartezeiten erwartungsgemäß leicht erhöht. Die Überprüfung der Wartezeiten mittels HBS hat für den Mischstrom 2/3 eine mittlere Wartezeit von ca. 6 Sekunden je nach Belastungsklasse und Signalprogramm ergeben. Die Gesamtbeurteilung der Wartezeiten am Knotenpunkt zeigt eine deutliche Verbesserung gegenüber dem unsignalisierten Fall.

Während des Betriebs der LSA konnte, wie Abbildung 6.23 zeigt, nur vereinzelt eine Reduzierung der Länge des Rückstaus im Nebenstrom beobachtet werden. Hervorgerufen wurde dieser Aspekt ebenfalls durch die Kolonnenbildung im Hauptstrom. Nebenstromfahrzeuge stauen sich während des Abfließens des Fahrzeugpulk im Hauptstrom auf. Erst wenn dieser Fahrzeugpulk vollständig abgeflossen ist, stehen Nebenstromfahrzeugen wieder genügend

Zeitlücken zur Verfügung, die er zum Einbiegen nutzen kann. In allen Belastungsklassen wurden, unabhängig vom eingesetzten Signalprogramm, höhere Werte sowohl für die maximale als auch die mittlere Rückstaulänge des Nebenstroms festgestellt. Im Mittel stieg die Anzahl wartender Fahrzeuge um 0,2 bis 0,9 Fahrzeuge auf maximal 2,2 an. Im Hauptstrom hingegen konnten während der gesamten Erhebung keine langen Rückstaus beobachtet werden. Dies stützt auch die Überprüfung der Staulängen nach HBS, wonach zum Freigabezeitende im Mittel kein Fahrzeug wartet.

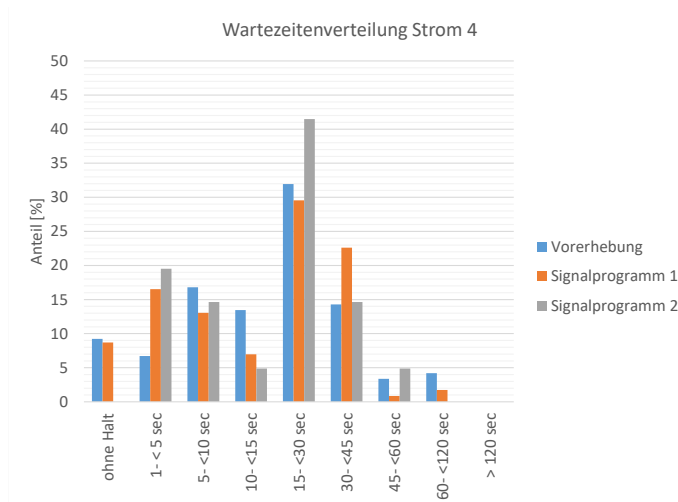


Abbildung 6.21: Wartezeiten Strom q4 (BK1)
Quelle: MELLINGER und ROOS 2017

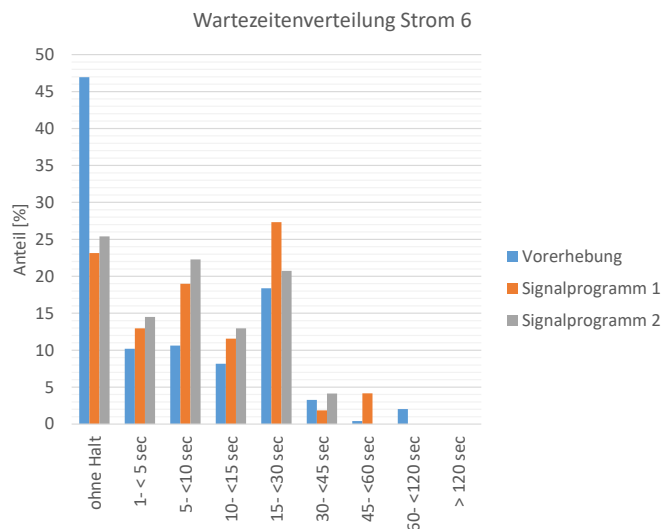


Abbildung 6.22: Wartezeiten Strom q6 (BK3)
Quelle: MELLINGER und ROOS 2017

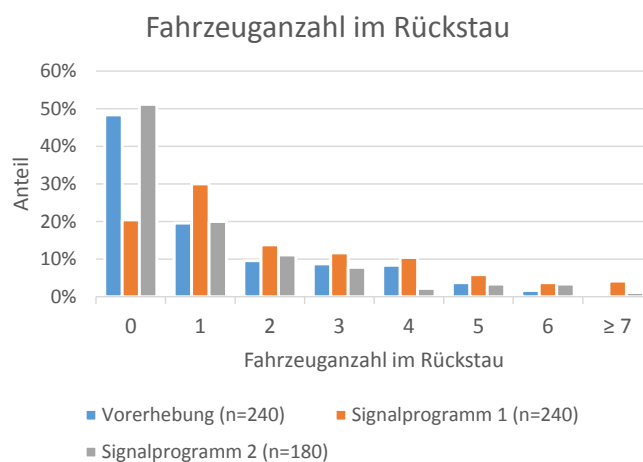


Abbildung 6.23: Rückstaulängen im Nebenstrom (BK2)

Quelle: MELLINGER und ROOS 2017

6.5.8 Subjektive Beobachtungen

Die Auflage des Ordnungsamtes zur dauerhaften Beobachtung des Knotenpunkts ließ neben den Messungen auch subjektive Beobachtungen zu. Über diese konnte eine Abnahme riskanter Fahrmanöver im Laufe der Woche festgestellt werden. Zum Teil wurde gezielt die Sperrzeit der Hauptrichtung abgewartet und somit riskante Fahrmanöver, wie sie vermehrt während der Vorerhebung stattfanden, vermindert. Die Vermutung ist, dass es sich häufig um dieselben Fahrer gehandelt hat und somit ein Gewöhnungseffekt eingetreten ist. Dies lässt sich jedoch wissenschaftlich nicht beweisen. Dies ist der Grund für die sich im folgenden Kapitel anschließende Langzeituntersuchung.

6.6 Ergebnisse Knotenpunkt 2: Gensinger Straße / Michelinstraße

6.6.1 Messaufbau und -durchführung

Der zweite untersuchte Knotenpunkt, ebenfalls im Gewerbegebiet von Bad Kreuznach gelegen, entspricht dem Typ AS1EI. Er besitzt einen Linksabbiegestreifen in der Hauptrichtung. Die Haltlinie erstreckt sich daher in diesem Fall über zwei Fahrstreifen. In der Nebenrichtung ist aus steuerungstechnischen Gründen ebenfalls ein Signalgeber aufgestellt. Dieser war während der gesamten Untersuchung mit einer Haube verdeckt und somit das Signalbild für die Autofahrer nicht sichtbar. Der Signalgeber wurde benötigt, um eine Verkehrsabhängigkeit zu realisieren (siehe Kapitel 6.6.1.2). Kameras befanden sich in diesem Fall auf der Gensinger Straße stadtauswärts zur Erfassung des Signalbildes und direkt am Knotenpunkt zur Aufzeichnung der Fahrzeuge aus der Michelinstraße. In den beiden Hauptstrommästen waren wiederum die Messpfosten aufgebaut.

Die Lichtsignalanlage wurde über einen Zeitraum von drei Monaten betrieben. Messungen wurden jedoch nur an zwölf zufällig ausgewählten Tagen durchgeführt, da jede Messung mit erheblichem Fahr- und Auswertungsaufwand verbunden war. Ziel war es, längerfristige Verhaltensänderungen der Autofahrer im Umgang mit der Teilsignalisierung zu analysieren. Aus diesem Grund war die Untersuchung in diesem Fall in erster Linie auf das Einfahrverhalten aus der Nebenrichtung (Zeitbedarfswerte) fokussiert. Rückstaulängen und Wartezeiten wurden aufgrund des sehr hohen Aufwandes nicht erhoben. Aus demselben Grund wurde auch auf die Bestimmung der Grenz- und Folgezeitlücken verzichtet.

Die Messanordnung kann der Skizze in Abbildung 6.24 und der Aufnahme in Abbildung 6.25 sowie Anhang N entnommen werden.

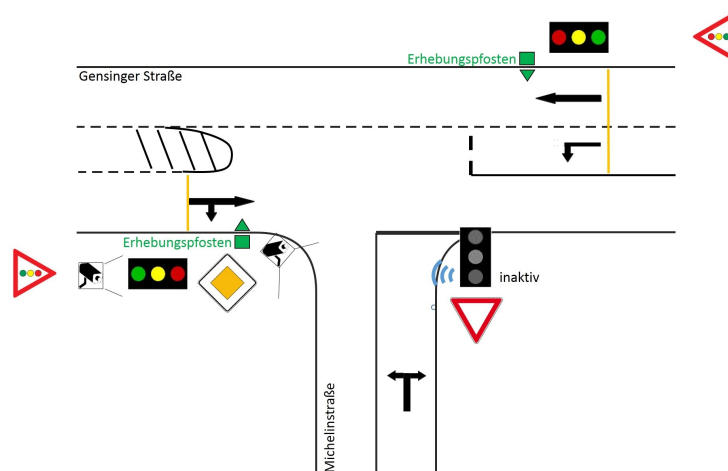


Abbildung 6.24: Messaufbau Knotenpunkt 2
Angelehnt an MELLINGER und ROOS 2017



Abbildung 6.25: Teilsignalisierung am Knotenpunkt 2

6.6.1.1 Verkehrsstärken

Die Verkehrsstärken wurden beim Knotenpunkt 2 nach demselben Schema wie zuvor am Schwabenheimer Weg erhoben. Da jedoch keine Auswertung von Wartezeiten und Rückstaulängen erfolgte, wurde auf eine Zählung während der Nacherhebung verzichtet. Während der Vorerhebung am 07.12.2016 ergaben sich zur Spitzenstunde folgende nach HBS 2015 ermittelte Verkehrsstärken:

- Zufahrt 1: Gensinger Straße stadtauswärts
 - q2: 955 Fz/h
 - q3: 25 Fz/h
- Zufahrt 2: Michelinstraße
 - q4: 8 Fz/h
 - q6: 348 Fz/h
- Zufahrt 3: Gensinger Straße stadteinwärts
 - q7: 208 Fz/h
 - q8: 483 Fz/h

Der SV-Anteil beträgt in den einzelnen Zufahrten:

- Zufahrt 1: 2%
- Zufahrt 2: 4%
- Zufahrt 3: 5%

Im Vergleich zu Knotenpunkt 1 ist der SV-Anteil in den Zufahrten 2 und 3 erhöht. Zudem wurden die Relationen 3 und 4 sehr selten befahren. Die Gesamtbelastung liegt verglichen mit dem Knotenpunkt 1 deutlich höher.

6.6.1.2 Technische Umsetzung der verkehrsabhängigen Steuerung

Die Verkehrsabhängigkeit wurde durch eine Eigenentwicklung mittels Arduino realisiert (siehe Abbildung 6.26), da die Standardlösung der Baustellen-LSA diese Funktion nicht anbietet. Standardmäßig können nur sich annähernde Fahrzeuge über einen Radardetektor erfasst werden. Über einen gewissen Zeitraum wartende Fahrzeuge hingegen sind für die Steuerung unsichtbar. In der Nebenrichtung musste daher ebenfalls ein Signalgeber aufgestellt werden, der jedoch abgedeckt war und dessen Radarsensor durch eine eigene Steuerung überbrückt wurde.

Am Mast der LSA waren zwei Ultraschallsensoren befestigt, die die Belegung der zweiten Fahrzeugposition überwachten. Mindestens einer der beiden Sensoren musste über die

gesamte Zeit einen Wert kleiner des zuvor eingestellten Schwellwertes messen, damit es zu einer Auslösung kam. Die Steuerung überwachte folgende Bedingungen:

- Durchgängige Belegung (Werte unterhalb des Schwellwertes) mindestens eines Sensors von 10s
- Zeit zwischen zwei Anforderungen mindestens 20s

Wenn diese Bedingungen, die an die Beispielwerte der RiLSA angelehnt sind, zutreffen, wurde über ein angeschlossenes Relais ein Impuls an den Signalgeber übertragen. Dieser entspricht dem Impuls, den normalerweise der Radarsensor übermittelt. Anschließend wurde diese Anforderung an die übergeordnete Steuerung, welche in einem der Signalgeber der Haupttrichtung integriert war, übertragen, die sodann den Phasenübergang einleitet. Anschließend wurde der Hauptstrom für 15s gesperrt.

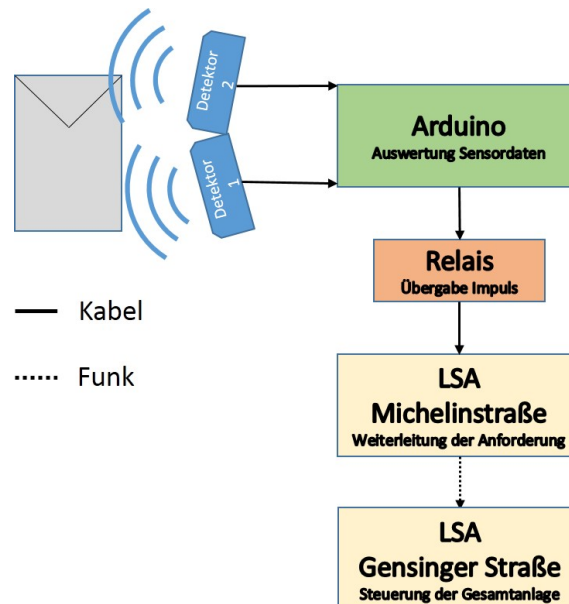


Abbildung 6.26: Technische Umsetzung der verkehrsabhängigen Steuerung

6.6.2 Bestimmung der Zeitbedarfswerte

Im Vergleich zum Knotenpunkt 1 fallen die Zeitbedarfswerte um ca. 1s größer aus. Dies kann an dem erhöhten Schwerverkehrsanteil insbesondere in der Nebenrichtung liegen. Zudem war dem Schwerverkehr ein Einfahren in den Knotenpunkt aufgrund der Platzverhältnisse in der Haupttrichtung sowie der engen Schleppkurven erschwert. Ein Gewöhnungseffekt an diesem Knotenpunkt über die Zeit ist nicht zu beobachten, wie Abbildung 6.27 zeigt. Die Werte schwanken an den insgesamt zwölf Erhebungstagen zwischen 3,8s und 4,7s. Der Mittelwert beträgt 4,4s.

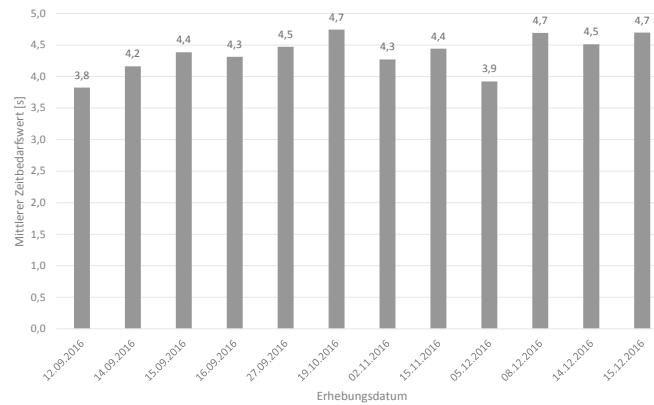


Abbildung 6.27: Entwicklung der Zeitbedarfswerte während der Langzeiterhebung

Das Ausbleiben eines Gewöhnungseffektes kann zum einen am hohen SV-Anteil in Verbindung mit den beengten Platzverhältnissen zu tun haben und zum anderen mit weniger regelmäßigen Nutzern der Michelinstraße, so dass für diese die Verkehrsregelung immer neuartig war.

6.7 Zusammenschau

Durch die empirischen Untersuchungen konnten diverse Fragestellungen beantwortet und die Wirkungen einer Teilsignalisierung in der Praxis aufgezeigt werden. Der gewählte, selbstentwickelte Erhebungsansatz aus Ultraschallmesspfosten mit kombinierten Zeitrafferkameras hat sich hierbei bewährt.

Am Knotenpunkt 1, an dem umfangreichere Auswertungen zum Einsatz kamen, konnte die provisorische einwöchige Einrichtung einer Teilsignalisierung die Erwartungen hinsichtlich Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Reduzierung riskanter Fahrmanöver erfüllen. Vor allem lange Wartezeiten in der Nebenrichtung konnten abgebaut werden. Die Ergebnisse stützen die eigenen Überlegungen zum Verkehrsablauf aus Kapitel 4.4. Es konnte eine deutliche Abweichung der Zeitbedarfswerte im Vergleich zu vollsignalisierten Knoten nachgewiesen werden, was letztlich negativen Einfluss auf die erreichbare Kapazität hat. Viele Fahrer zögerten an der Haltlinie vor dem Einbiegen.

Die Untersuchungen am Knotenpunkt 2 dienten vor allem der Analyse von Eingewöhnungseffekten. Die dortige Anlage wurde für ca. drei Monate betrieben. Auch hier konnten erhöhte Zeitbedarfswerte festgestellt werden. Diese lagen höher als bei Knotenpunkt 1. Eine mögliche Erklärung kann der erhöhte Schwerverkehrsanteil sein. Selbst gegen Ende der Messreihe sank der Wert nicht.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf den Verkehrsablauf scheinen ausreichende Sichtfelder zu sein. Somit ist es bereits Fahrern in der zweiten oder auch dritten Position möglich, das

Verhalten der Fahrer im Hauptstrom abzuschätzen und entsprechend zu reagieren. Dadurch wird der Abfluss aus der Nebenrichtung erhöht.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Mikrosimulationen aus Kapitel 7 ein, ersetzen jedoch keine Kalibrierung, da hierfür eine breitere Datenbasis nötig wäre.

7 Untersuchung der Modellknoten mittels Mikrosimulation

Nachdem das Kapitel 4 die Grundlagen des Verkehrsablaufs an vorfahrtgeregelten und vollsignalisierten Knotenpunkten behandelt hat sowie eigene Überlegungen zum Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten angestellt wurden, soll in diesem Kapitel der Verkehrsablauf an solchen Knoten mit Mikrosimulationsverfahren untersucht werden. Unterstützend fließen die Erkenntnisse aus den empirischen Erhebungen aus Kapitel 6 ein.

Dieses Kapitel wird zunächst generell auf den Einsatz von Mikrosimulationsverfahren im Verkehrswesen eingehen. Anschließend erfolgen die Beschreibung der Simulationsumgebung und der Modelle, bevor im letzten Abschnitt die Ergebnisse, sortiert nach den einzelnen Einflussfaktoren, präsentiert werden. Kreisverkehre werden in Kapitel 10 gesondert behandelt.

7.1 Grundlagen der Mikrosimulationstechnik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Simulationstechnik sowie ihre Grenzen aufgezeigt⁷¹. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Simulationsmodell und Simulationssoftware. Simulationssoftware bezeichnet die Produkte der verschiedenen Anbieter. Unterschiedlichen Produkten kann jedoch dasselbe Modell zugrunde liegen.

Simulationsmodelle für den Kfz-Verkehr bestehen aus folgenden Teilmodellen:

- Netzmodell
- Verhaltensmodell
- Verkehrsnachfragemodell

Das Netzmodell beinhaltet die gebaute Umgebung. Es fließen beispielsweise Fahrstreifenanzahl und -aufteilung, Breiten, Abbiegeradien und Längsneigungen ein. Das Verhaltensmodell beschreibt das Verhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmer. Wichtigster Vertreter im Innerortsbereich ist das Fahrzeugfolgemodell nach WIEDEMANN 74⁷². Das Verkehrsnachfragemodell ist für die Verkehrsstärken und Routen zuständig. In komplexen Modellen liegen Quelle-Ziel-Matrizen vor. Bei kleinen Modellen, die nur einen Knotenpunkt abbilden, kann dies auch über Zuflüsse und entsprechende Routenentscheidungen geschehen.

Modelle werden ferner nach ihrer Abbildungsgenauigkeit unterschieden:

⁷¹vgl. FGSV 2006a

⁷²WIEDEMANN 1974

- Makroskopische Modelle
- Mikroskopische Modelle
- Mesoskopische Modelle
- Hybridmodelle
- Submikroskopische Modelle

Makroskopische Modelle bilden ganze Verkehrsnetze ab, ohne dabei auf die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Verkehrsteilnehmern einzugehen. Sie kommen bei der Modellierung von Autobahnverkehr sowohl als sogenannte fluiddynamische Modelle als auch in der Verkehrsplanung als Reisezeitmodelle vor. Sie sind nicht geeignet, um den Verkehrsablauf an einzelnen Knotenpunkten zu simulieren.

Typische Einsatzbereiche von mikroskopischen Simulationen sind komplexe Knotenpunktssysteme, bei denen die analytischen Methoden an ihre Grenzen stoßen. Das kleinste Element in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen sind einzelne Fahrzeuge, die miteinander agieren und spezifische Eigenschaften aufweisen. Die Verhaltensmuster sind in Form von Rechenalgorithmen in sogenannten Verhaltensmodellen hinterlegt. Hierzu zählen beispielsweise Geschwindigkeitsverteilungen, Fahrstreifenwahl und Abstandsverhalten. Es können meist nur vergleichende, quantitative Aussagen innerhalb eines Modells getroffen werden.

In mesoskopischen Modellen werden die Bewegungen einzelner Fahrzeuge in einem Streckennetz untersucht, jedoch nicht deren Interaktion. Sie sind ebenfalls für Untersuchungen von Einzelknoten ungeeignet.

Hybridmodelle weisen sowohl mikroskopische als auch makroskopische Elemente auf. Der Verkehr wird je nach Lage im Netz unterschiedlich modelliert. Typisch ist eine makroskopische Betrachtung auf der freien Strecke und eine mikroskopische an den Knotenpunkten. Vorteil ist ein geringerer Rechenaufwand im Vergleich zu rein mikroskopischen Modellen. Da jedoch nur Einzelknoten untersucht werden, scheidet dieser Typ ebenfalls aus.

Die letzte Gattung sind submikroskopische Modelle, die bis in die einzelnen Fahrzeuge hineinreichen, um beispielsweise Motor, Antriebsstrang und Fahrwerk zu modellieren. Diese Modelle sind sehr detailliert, benötigen jedoch einen sehr hohen Rechenaufwand und können somit für die Simulation des Verkehrsablaufs an teilsignalisierten Knotenpunkten ebenfalls verworfen werden.

Für die angestrebten Untersuchungen eignen sich daher mikroskopische Modelle am besten. Über den „ceteris paribus“ Ansatz können bei überschaubarem Rechenaufwand und hinreichender Detailtreue die verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung, verschiedene Verkehrsbelastungen sowie die Ausbaustandards untereinander verglichen und daraus die Einsatzgrenzen abgeleitet werden. Für die Untersuchungen kommt die Software VISSIM der

PTV AG in der Version 7.16 zum Einsatz. VISSIM⁷³ ist eine mikroskopische, multi-modale Verkehrsfluss-Simulationssoftware.

Ergebnisse aus Mikrosimulationen können nicht direkt mit stochastisch ermittelten Werten verglichen werden, wie sie beispielsweise das HBS oder auch das HCM liefern. VISSIM liegt ein Individualverhaltensmodell zugrunde, während die beiden Richtlinienwerke gemittelte Parameter annehmen. Untersuchungen hierzu stellte unter anderem BEIERL an⁷⁴.

In Simulationen ist zwischen abundanten und präteriten Attributen zu unterscheiden. Erstere sind zusätzlich zur Wirklichkeit im Modell vorhanden und letztere wurden bei der Modellierung ausgelassen. Da die Modelle in dieser Arbeit auf fiktiven Modellknotenpunkten aufbauen, die keine Vorbilder in der Realität aufweisen, hat dies keine weitere Bedeutung.

7.2 Simulationsumgebung

Zur Umsetzung des „ceteris paribus“ Ansatzes dient eine dreigeteilte Architektur aus VISSIM, SQL-Datenbank und Python Skripten, wie sie in Abbildung 7.1 dargestellt ist. Die Datenbank enthält die zu simulierenden Datensätze und speichert die Ergebnisse für die spätere Auswertung ab. Auf diese wird mittels Python Skripten zugegriffen. Diese leiten die Eingangsparameter über die COM Schnittstelle an VISSIM weiter und starten den Simulationslauf. Jeder Datensatz wird fünf Mal mit unterschiedlichen Startzufallszahlen durchlaufen, um Schwankungen zu glätten. Nach LOHMILLER sollten die Anzahl der Durchläufe größer gewählt werden⁷⁵. Er schlägt vor, die Anzahl der Wiederholungen anhand der Querverkehrsstärke oder der Wartezeit festzumachen, um eine ausreichende Glättung der Ergebnisse zu erreichen. Dies ist jedoch aufgrund des vorliegenden Ansatzes nicht zweckmäßig, da sich diese Größen laufend verändern. Nach Abschluss der Simulation werden die Ergebnisse von VISSIM an Python übergeben, anschließend in die Ergebnistabelle geschrieben und der nächste Lauf wird angestoßen.

7.2.1 Datenbank

Als Datenbank diene eine MySQL Datenbank, die aus Gründen der Performanz auf einem separaten Rechner lief. Es gab für Einmündungen, Kreuzungen und Kreisverkehre jeweils eine eigene Datenbank. Diese beinhaltet immer eine Tabelle mit den Verkehrsdaten für die Haupt- und Nebenrichtung. In dieselbe Datenbank werden auch die Ergebnistabellen geschrieben. Diese können anschließend zur weiteren Bearbeitung und Auswertung exportiert werden. Jede Kombination aus

⁷³ Abkürzung für „Verkehr in Städten Simulations Modell“

⁷⁴ BEIERL 2012

⁷⁵ LOHMILLER 2006

- Teilsignalisierungsfall
- Ausbaustandard
- Signalprogramm
- Verkehrsstärke der Hauptrichtung
- Verkehrsstärke der Nebenrichtung

führt somit zu einem Datensatz.

7.2.2 Python Skript und COM-Schnittstelle

Für den „ceteris paribus“ Ansatz war die Ansteuerung von VISSIM über ein externes Skript nötig. Nur so konnten die Knotenpunkte automatisiert unter vielen verschiedenen Verkehrsbelastungen untersucht werden.

Das Skript beginnt nach der Einbindung der Konnektoren für die COM-Schnittstelle und MySQL mit dem Aufbau der Datenbankverbindung. Anschließend erfolgt der Aufruf einer VISSIM Instanz. An dieser Stelle werden Speicherort und Dateiname des zu ladenden Modells übergeben.

In der Schleife, die sich solange wiederholt, bis alle Datensätze abgearbeitet sind, werden zunächst die Daten für die einzelnen Fahrzeugzufüsse aus der Datenbank abgefragt und in Variablen zwischengespeichert, bevor diese dann an VISSIM übergeben werden. Im nächsten Schritt wird die Simulation gestartet. Es werden VISSIM weitere Parameter über Simulationsdauer und Anzahl der Läufe mitgeteilt. Anschließend werden nach Ende der Simulationsläufe die relevanten Kenngrößen abgefragt und ebenfalls in Variablen abgespeichert. Letztlich erfolgt die Weitergabe der zwischengespeicherten Daten an die Ergebnistabelle in der Datenbank. Wenn alle Datensätze abgearbeitet sind, wird VISSIM geschlossen und das Skript ist beendet.

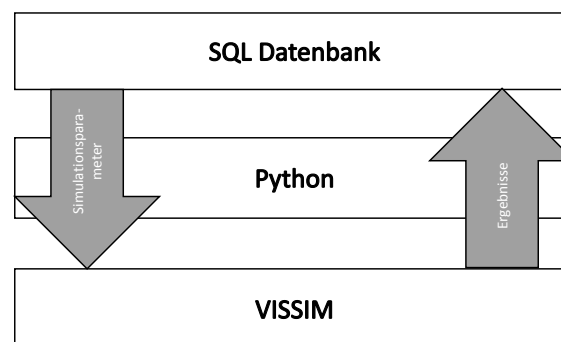


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Simulationsumgebung

Mit dem verwendeten Hexacore PC mit 3,5 GHz Basistakt konnten drei VISSIM Instanzen parallel betrieben werden, wodurch die gesamte Simulationsdauer gesenkt werden konnte. Dennoch dauerten komplette Durchläufe ca. 8 Stunden. In dieser Zeit wurden jeweils 2250 Vissim Läufe absolviert.

Abbildung 7.2 zeigt schematisch den Aufbau des Skriptes.

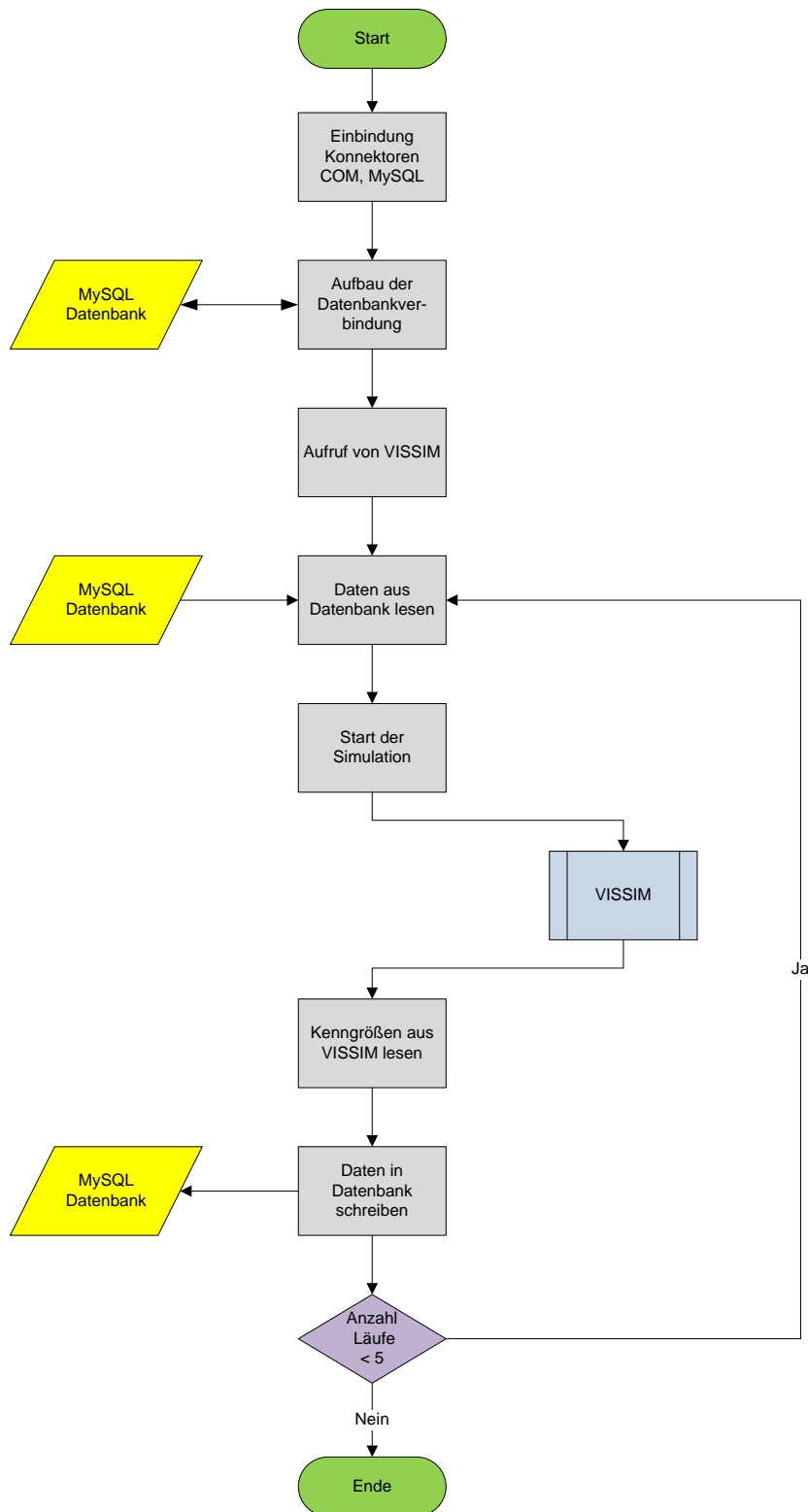


Abbildung 7.2: Aufbau des Python Skripts

7.3 Vorstellung der Modelle

Jeder in Kapitel 5 definierte Modellknoten wurde in VISSIM immer nach demselben Schema modelliert. Die Dimensionierung der einzelnen Knotenpunktelemente entsprachen den derzeit gültigen Richtlinienwerken für Stadtstraßen⁷⁶. Als Modellierungsgrundlage dienten CAD Modelle der Knotenpunkte.

Die Abbildungen 7.3 und 7.4 zeigen für AS0EI und AS1KR exemplarisch die Modelle in VISSIM. Dargestellt ist bei Einmündungen der Signalisierungsfall TS2378 und bei Kreuzungen TS78F, hier jedoch nur der innere Knotenpunktbereich. Die einzelnen Elemente der Modelle werden im folgenden beschrieben.



Abbildung 7.3: Modell AS0EI mit Fall TS2378

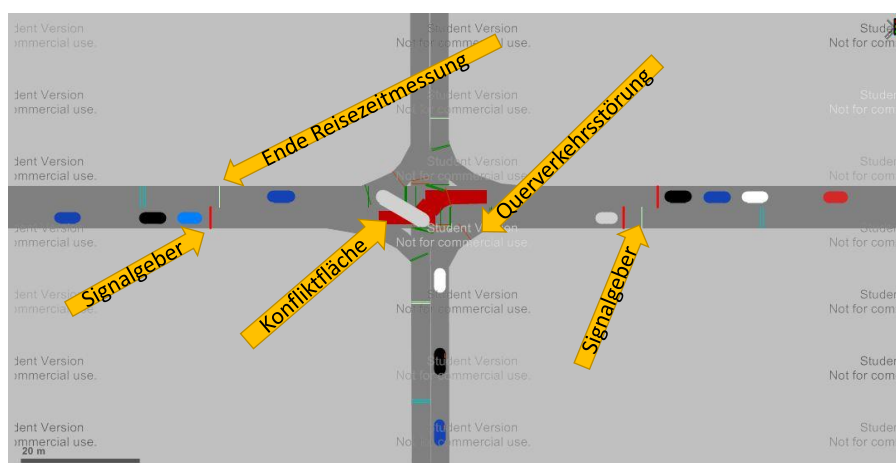


Abbildung 7.4: Modell AS0EI mit Fall TS2378 Detailansicht

⁷⁶vgl. FGSV 2006c

7.3.1 Bauliche Gegebenheiten

Die Modelle folgten den Vorgaben aus den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen 2006⁷⁷. Die Fahrstreifen hatten eine einheitliche Breite von 3,5m. Sie wiesen eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h sowie Rechtsfahrgebot auf. Die Abbiegeradien betragen einheitlich 12m. Längsneigungen blieben unberücksichtigt. Die Haltlinien waren bei den teilsignalisierten Fällen 20m abgerückt. Bei der Vollsignalisierung lagen sie im regulären Abstand nach RiLSA. Die einzelnen Knotenpunktzufahrten hatten immer eine Länge von 100 Metern. Es war kein Überholen möglich.

7.3.2 Verkehrsstärken, Routen und Reisezeitmessungen

In den Modellen wurde zwischen der Verkehrsstärke in den Zufahrten der Hauptrichtung q_{HR} (Z1 und Z3) und der Nebenrichtung q_{NR} (Z2 und ggf. Z4) unterschieden. Jedes Modell wurde mit denselben Belastungen untersucht. Diese ergaben sich aus folgenden Annahmen:

- q_{HR} : 100 – 1000 $\frac{Fz}{h}$ mit einer Schrittweite von 100 $\frac{Fz}{h}$
- q_{NR} : 100 – 1000 $\frac{Fz}{h}$ mit einer Schrittweite von 100 $\frac{Fz}{h}$

Die ursprüngliche Vorgehensweise einer vorherigen Eingrenzung über HBS Rechnungen schlug aufgrund der zu stark differierenden Ergebnisse zwischen HBS und VISSIM fehl. Die Grenzen wurden daher durch den Verfasser festgesetzt worden. Um auch die unteren Einsatzbereiche erfassen zu können, fingen die Simulationen bereits bei Verkehrsstärken von 100 $\frac{Fz}{h}$ an. Aufgrund der beschränkten Rechenkapazitäten wurde eine Obergrenze von 1000 $\frac{Fz}{h}$ gewählt, obgleich die Studie von FROST und SCHULZE den Einsatzbereich auch noch bei höheren Belastungen sieht.

Am Beginn jeder Zufahrt lagen ein Fahrzeugzufluss, eine statische Routenentscheidung und der Beginn von Reisezeitmessungen für die einzelnen Verkehrsströme. Das Ende der Messungen lag in Höhe des erneuten Beginns einer ungestörten Weiterfahrt in der Zielrichtung der betrachteten Route.

Für die Routenentscheidungen wurden vom Verfasser nachfolgende Annahmen getroffen, die für alle Modelle gültig waren. An Einmündungen teilten sich die simulierten Verkehrsströme am Knotenpunkt wie folgt auf:

- Hauptrichtung
 - 75% gradeaus (2, 8)
 - 25% abbiegend (3, 7)
- Nebenrichtung

⁷⁷FGSV 2006c

50% links einbiegend (4)

50% rechts einbiegend (6)

An Kreuzungen wurden folgende Verteilungen angenommen:

- Hauptrichtung
 - 50% geradeaus (2, 8)
 - 25% links abbiegend (1, 7)
 - 25% rechts abbiegend (3, 9)
- Nebenrichtung
 - 50% geradeaus (5, 11)
 - 25% links einbiegend (4, 10)
 - 25% rechts einbiegend (6, 12)

Anwendung fand ein SV-Anteil von 10% entsprechend dem Standardwert des HBS in allen Simulationen. Fuß- und Radverkehr blieben in den Simulationen unberücksichtigt. Es wurde lediglich darauf geachtet, dass an Fußgängerfurten die Mindestfreigabezeit eingehalten ist. Der ÖV fand keine besondere Beachtung, sondern war in den Schwerverkehr integriert. Somit gab es weder Priorisierungen noch zu berücksichtigende Haltestellen.

7.3.3 Modellierung der Vorfahrtregelung

Die Vorfahrtregelungen wurden über Querverkehrsstörungen im Modell abgebildet. Dies hat gegenüber der vom Anbieter empfohlenen Arbeit mit Konfliktflächen den Vorteil, dass die Vorfahrtsituationen detailgetreuer abgebildet werden können. Die Position des gestörten und der störenden Querschnitte können präzise eingepflegt und einem gestörten Querschnitt mehrere übergeordnete Ströme zugewiesen werden. Letztlich erlaubt diese Vorgehensweise auch die Angabe von Zeitlückenwerten für jedes einzelne Fahrmanöver.

Am Beginn von Abbiegestreifen wurde mit Konfliktflächen modelliert, um mögliche Rückstaus berücksichtigen zu können. Dadurch war sichergestellt, dass sich Fahrzeuge tatsächlich hintereinander einreihen. Für die (teil-)signalisierten Fälle waren an den entsprechenden Stellen (Abrückung der Haltlinien) im Hauptstrom Signalgeber eingefügt.

Es wurde versucht, das in der Empirie beobachtete Zögern beim Einfahren durch den Einbau von Langsamfahrbereichen zu berücksichtigen.

7.3.4 Signalprogramme

In den Modellen kamen immer zweiphasige Festzeitprogramme zum Einsatz. Mehrphasige Steuerungen wurden wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht betrachtet, obgleich diese für gewisse Konstellationen vorteilhafter gewesen wären. In der ersten Phase floss die Hauptrichtung und in der zweiten Phase die Nebenrichtung. Angegeben wurde eine Umlaufzeit und die Sperrzeit der Hauptrichtung. Daraus ergab sich für die vollsignalisierten Fälle die Freigabezeit der Nebenrichtung. Sie betrug die Umlaufzeit abzüglich der Übergangszeit und der Zwischenzeiten. Diese betragen pauschal bei AS0EI, AS1EI, AS0KR und AS1KR 5s und bei den übrigen Ausbaustandards aufgrund der längeren Wege 7s.

Für alle Simulationsläufe wurden dieselben Kombinationen aus Umlauf- und Sperrzeit als Signalprogramm verwendet. Die Umlaufzeit betrug 60s bzw. 90s. Die Sperrzeiten variierten zwischen 10s und 40s je nach Umlaufzeit. Die möglichen Kombinationen sind in Tabelle 7.1 aufgelistet. Die Bezeichnung setzt sich zusammen aus der Umlaufzeit und der Sperrzeit. Die Sperrzeiten von 10s kamen lediglich bei den ersten Simulationsläufen zum Einsatz, da diese Sperrzeit keine nennenswerten Effekte zeigte. Aufgrund der großen Abrückung wurde fast die gesamte Sperrzeit zum Räumen des Knotenpunktes beansprucht. Daher wurden die Ergebnisse verworfen und das Signalprogramm nicht weiter verwendet.

Eine verkehrsabhängige Steuerung wurde aufgrund der im betrachteten Zeitintervall konstanten Verkehrsstärken im Modell nicht implementiert.

Umlaufzeit	Sperrzeit	Bezeichnung
60	10	6010
	20	6020
	30	6030
90	10	9010
	20	9020
	30	9030
	40	9040

Tabelle 7.1: Umlauf- und Sperrzeiten für die Simulationen

7.4 Vorgehensweise der Auswertungen

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Simulationsläufe für Einmündungen und Kreuzungen dargelegt. Zunächst wird in Kapitel 7.5 nochmals auf die Manipulierung der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom eingegangen. Die weiteren Auswertungen erfolgen anhand der Merkmale:

- Teilsignalisierungsfall
- Signalprogramm
- Ausbaustandard

Eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung eines Knotenpunktes ist die Verlustzeit, die im Vergleich zur ungehinderten Durchfahrt zwischen zwei Messquerschnitten auftritt. Dabei kann entweder eine stromweise oder eine aggregierte Auswertung zur Anwendung kommen. Werden mehrere Ströme in einer Auswertung zusammengefasst, wie dies beispielsweise bei der Gesamtknotenverlustzeit der Fall ist, so werden die einzelnen Verlustzeiten mit den Verkehrsstärken des jeweiligen Stroms gewichtet. Höher belastete Ströme gehen somit stärker in die Gesamtbetrachtung ein als niedrig belastete.

In den folgenden Analysen wird jeweils zwischen den Auswirkungen auf den Gesamtknotenpunkt, die Hauptrichtung (Z1 und Z3) und Nebenrichtung (Z2 und ggf. Z4) unterschieden. Als Beurteilungskriterium wird immer die mittlere Verlustzeit herangezogen. Für den Gesamtknoten und die Nebenrichtung geschieht dies in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Nebenrichtung. In der Hauptrichtung ist sie in Abhängigkeit der eigenen Verkehrsstärke dargestellt. Die Verkehrsstärke der jeweils anderen Richtung bleibt dabei konstant.

Die Diagramme, die die Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls zeigen, haben folgendes Farbschema:

- hellblau: Vorfahrtregelung (0)
- gelb: TS ohne Furt (TS2378)
- grau: TS mit Furt rechts (TS78F)
- orange: TS mit Furt links (TS23F)
- dunkelblau: Vollsignalisierung (V)

Die Diagramme, in denen der Einfluss des geschalteten Signalprogramms dargestellt ist, sind wie folgt eingefärbt:

- hellblau: Vorfahrtregelung (0)
- orange: $t_U = 60s, t_S = 20s$ (6020)
- grau: $t_U = 60s, t_S = 30s$ (6030)
- gelb: $t_U = 90s, t_S = 20s$ (9020)

- dunkelblau $t_U = 90s, t_S = 30s$ (9030)
- grün: $t_U = 90s, t_S = 40s$ (9040)

Die Diagramme, die die Effekte der unterschiedlichen Ausbaustandards aufzeigen, folgen dem Farbschema:

- blau: Ausbaustandard ohne Linksabbiegestreifen (AS0EI)
- orange: Ausbaustandard mit Linksabbiegestreifen in der Hauptrichtung (AS1EI)
- grau: Ausbaustandard mit Linksabbiegestreifen in Haupt- und Nebenrichtung (AS2EI)

7.5 Manipulierung der Zeitlückenverteilung im Hauptstrom

Durch den Einsatz einer LSA an einem Knotenpunkt kommt es, wie bereits in den empirischen Untersuchungen festgestellt wurde, zu einer Verschiebung der Zeitlückenverteilung weg von der idealisierten angenommenen negativen Exponentialverteilung (siehe Abbildungen 7.5 und 7.6). Bei der logarithmischen Auftragung ergibt die negative Exponentialverteilung eine Gerade und die Veränderungen werden deutlich sichtbarer (vgl. Abbildungen 7.7 und 7.8).

In Abbildung 7.5 sind diese zum einen aus Simulationen (durchgezogene Linie) und zum anderen rechnerisch (gestrichelte Linie) für den unsignalisierten Fall ermittelt worden. Die unterschiedlichen Farben stehen für verschiedene Verkehrsstärken. Abbildung 7.6 hingegen zeigt für dieselben Verkehrsstärken die Zeitlückensummenlinien beim Einsatz einer LSA. Der Grad der Störung ist dabei abhängig von der Verkehrsstärke und dem Signalprogramm. Hohe Verkehrsstärken und Sperrzeitanteile führen zu einer größeren Gebundenheit des Verkehrs. Der Übergang vom freien Verkehr bis zum vollständig gestörten Verkehrsfluss ist fließend. Bei geringen Verkehrsstärken ist der Effekt der LSA fast nicht sichtbar. Es kommen zu wenige Fahrzeuge an, als dass die LSA eine Verpulkung der Fahrzeuge bewirken könnte. Dies ändert sich mit zunehmender Verkehrsstärke bis irgendwann eine Sättigung eintritt, bei der nur noch Lücken um die 2 Sekunden und Lücken in Größe der Sperrzeit auftreten. Das heißt, die Fahrzeuge fließen während der Freigabezeit einmal als Pulk ab. Es gibt keine natürlich auftretenden Lücken mehr.

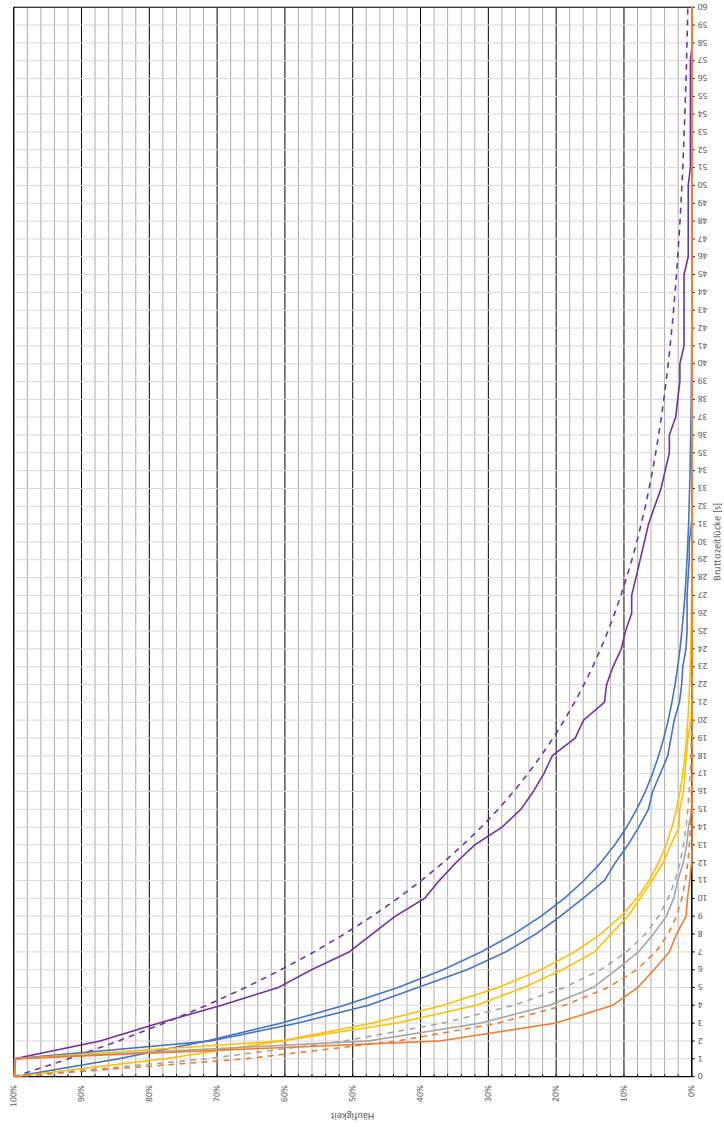


Abbildung 7.5: Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrsstrom ohne Beeinflussung durch eine LSA ermittelt durch Simulation

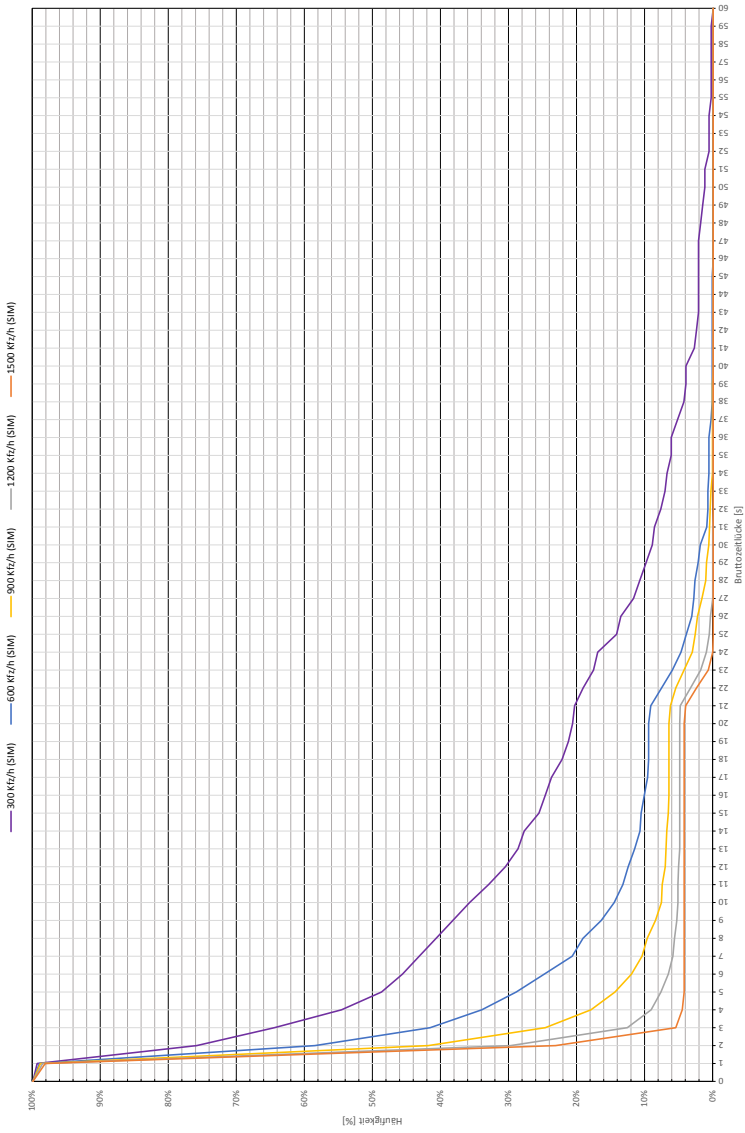


Abbildung 7.6: Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrsstrom beeinflusst durch eine LSA mit $t_u = 60s$ und $t_s = 20s$ ermittelt durch Simulation

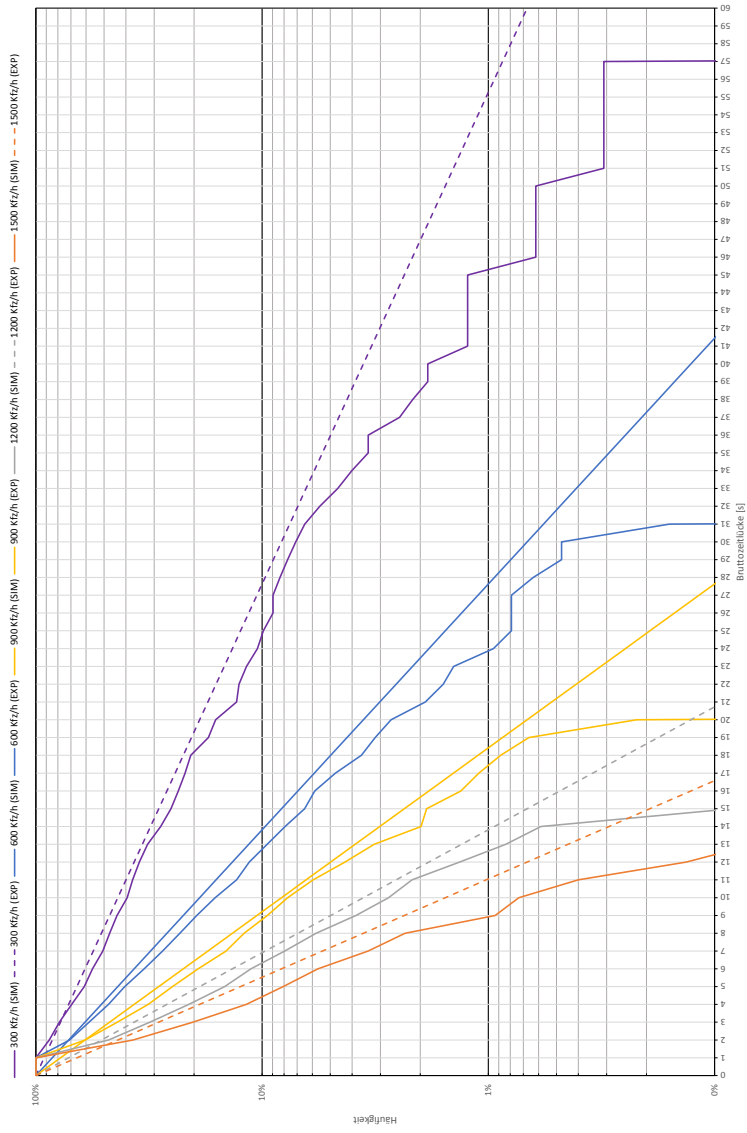


Abbildung 7.7: Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrsstrom ohne Beeinflussung durch eine LSA ermittelt durch Simulation (logarithmische Auftragung)

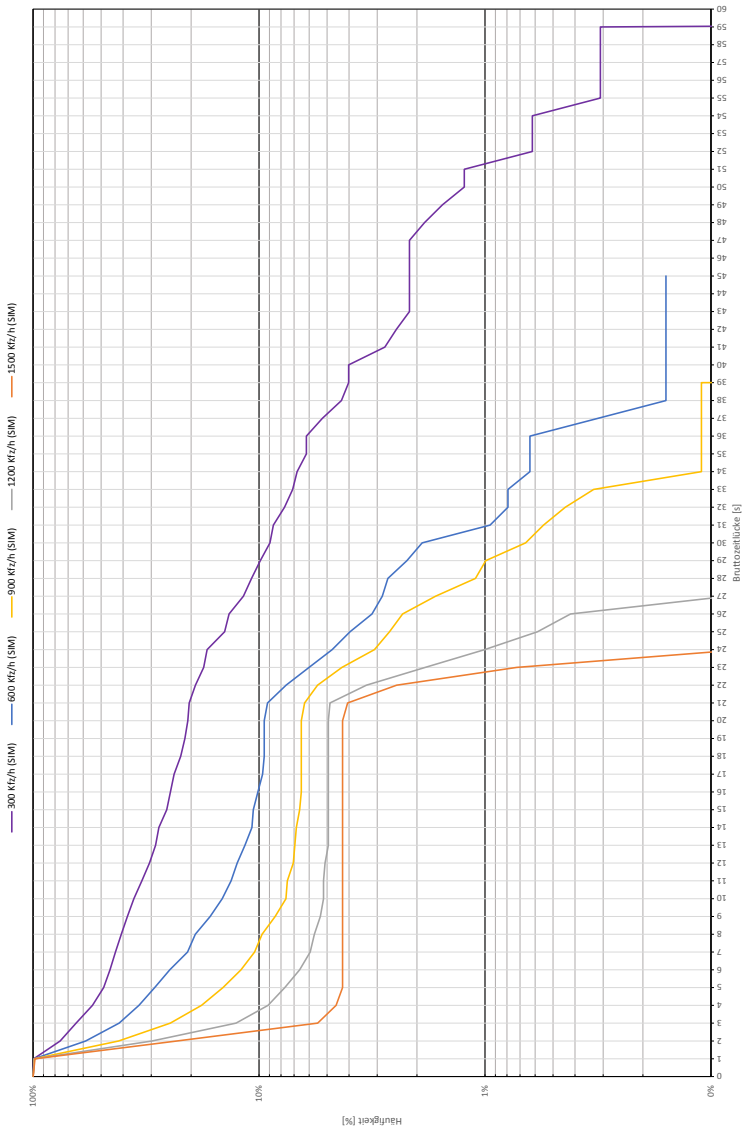


Abbildung 7.8: Zeitlückensummenlinie für einen Verkehrstrom beeinflusst durch eine LSA mit $t_u = 60s$ und $t_s = 20s$ ermittelt durch Simulation (logarithmische Auftragung)

7.6 Ergebnisse für Einmündungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationsläufe für Einmündungen in folgender Reihenfolge beschrieben:

1. Teilsignalisierungsfall
2. Signalprogramm
3. Ausbaustandard

7.6.1 Einflussfaktor Teilsignalisierungsfall

Auswirkungen auf den Gesamtknoten Die Auswertung der Gesamtknotenverlustzeit in den Abbildungen 7.9 und 7.10 für die verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung zeigen keine nennenswerten Verbesserungen gegenüber dem Vorfahrtknoten. Es kann sich kein Fall signifikant von den anderen absetzen. Dies gilt ebenso für die Vollsignalisierung. Jede Signalisierung bedeutet eine Verschlechterung für die Hauptrichtung. Somit werden die Verlustzeitgewinne der Nebenstromfahrzeuge durch die Beeinträchtigungen in der Hauptrichtung aufgewogen. Durch die höhere Anzahl an Fahrzeugen in dieser Relation reichen bereits geringe Beeinträchtigungen aus, um die Vorteile in der Nebenrichtung zunichte zu machen. Dieses Phänomen zeigt sich bei allen Ausbaustandards und Signalprogrammen.

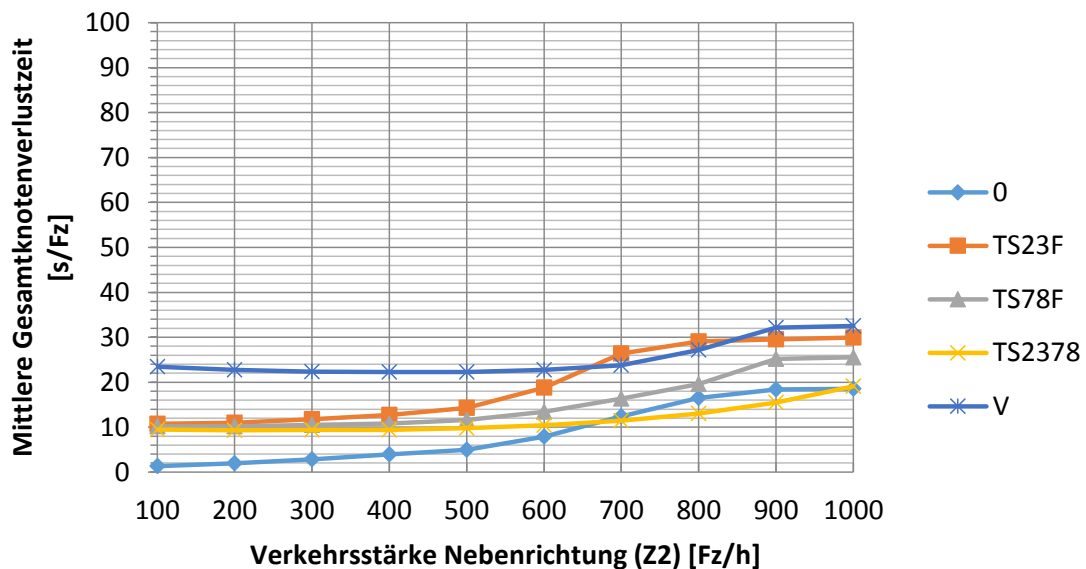


Abbildung 7.9: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf den Gesamtknoten bei Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z1,Z3

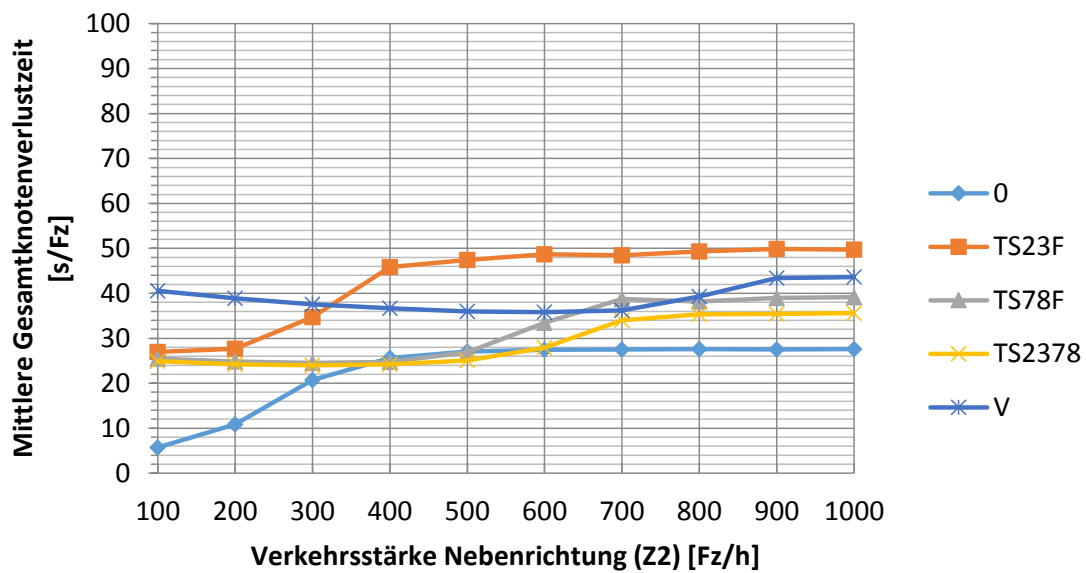


Abbildung 7.10: Auswirkungen des Teilsignalierungsfalls auf den Gesamtknoten bei Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 900 Fz/h in Z1,Z3

Auswirkungen auf die Hauptrichtung Der Verkehrsablauf in der Hauptrichtung ist nahezu unabhängig vom Teilsignalisierungsfall. Im Vergleich zum vorfahrtgeregelten Zustand ergeben sich erwartungsgemäß Nachteile. Diese fallen jedoch geringer aus als bei einer Vollsignalisierung. Hier macht sich deutlich der Wegfall der Zwischenzeiten bemerkbar. Die Beeinträchtigung der Hauptrichtung ergibt sich allein durch das Verhältnis von Umlaufzeit zu Sperrzeit (vgl. Kapitel 7.6.2). Die Auswirkungen sind in Zufahrt 1 (vgl. Abbildung 7.11) geringer als in Zufahrt 3 (vgl. Abbildung 7.12), da dort noch die Linksabbieger aus Strom 7 sich gegen den Verkehr aus Zufahrt 1 durchsetzen müssen. Dies ist bei der Vollsignalisierung schwieriger, da aufgrund der Zwischenzeiten eine stärkere Pulkbildung einsetzt. Somit müssen Linksabbieger zunächst abwarten, bis der gesamte Pulk des Gegenverkehrs abgeflossen ist, bevor eine ausreichende Zeitlücke zur Verfügung steht.

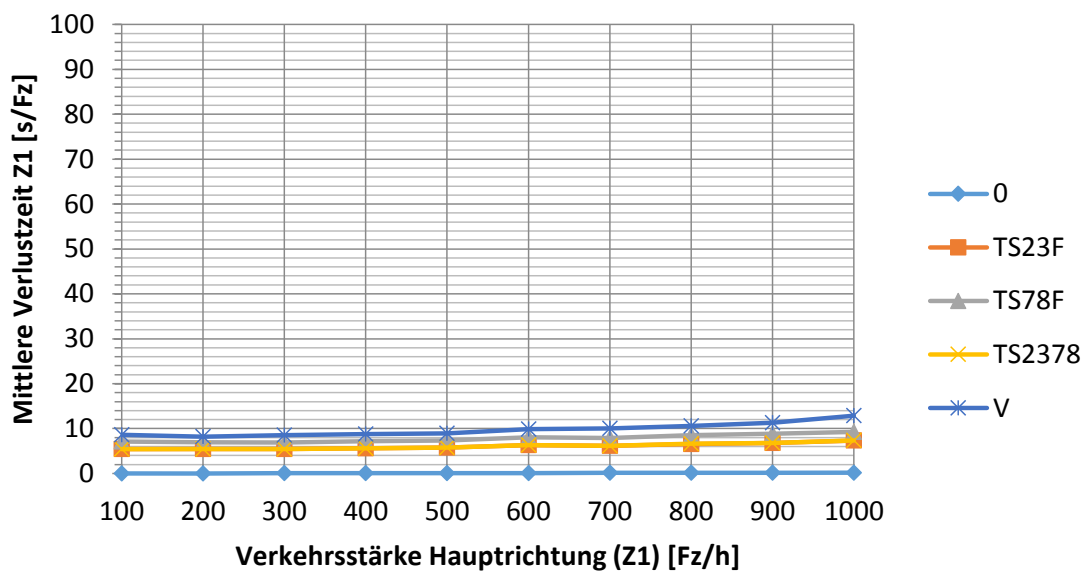


Abbildung 7.11: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Hauptrichtung (Z1) an Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Signalprogramm: 6020

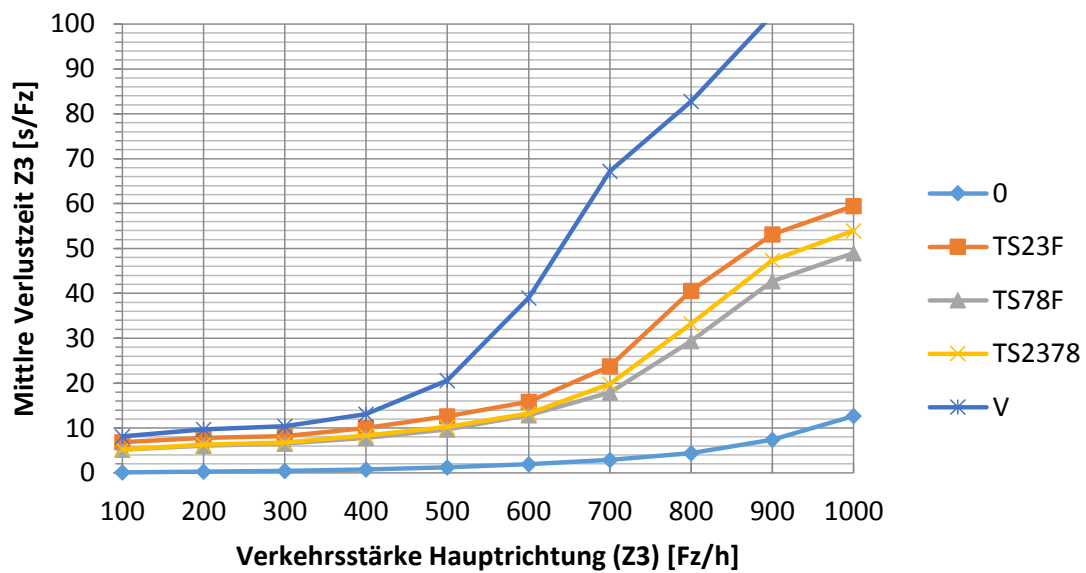


Abbildung 7.12: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Hauptrichtung (Z3) an Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Signalprogramm: 6020

Auswirkungen auf die Nebenrichtung Die größten Effekte einer Signalisierung zeigen sich in der Nebenrichtung (vgl. Abbildungen 7.13 und 7.14). Ein großer Einflussfaktor ist hier die Verkehrsstärke der Hauptrichtung, da diese das Auftreten von natürlichen Zeitlücken sowie die Pulkbildung bestimmt. Die Analyse zeigt, dass der Teilsignalisierungsfall mit Furten auf der linken Seite (TS23F) sehr nachteilig auf den Verkehrsablauf wirkt. Die Verlustzeiten liegen sogar über dem vorfahrtsregeltem Fall. Dies kommt dadurch zustande, dass Linkseinbieger aus der Nebenrichtung aufgrund des niedrigen Ranges ohnehin am benachteiligten sind. Durch das zusätzliche Halten vor der Fußgängerfurt erhöht sich die Verlustzeit weiter. Bessere Ergebnisse liefern die Fälle mit einer Furt rechts (TS78F) und der Fall ohne Furt (TS2378). Letzterer erreicht die Werte einer Vollsignalisierung oder unterbietet diese sogar. Bei sehr hohen Verkehrsstärken in der Hauptrichtung hat eine Vollsignalisierung Vorteile, da Fahrzeuge aus der Nebenrichtung mit einem niedrigeren Zeitbedarfswert einfahren als dies bei den Teilsignalisierungen der Fall ist. Beim Fall TS78F ist wichtig, dass sich vor der Fußgängerfurt genügend Fahrzeuge aufstellen können.

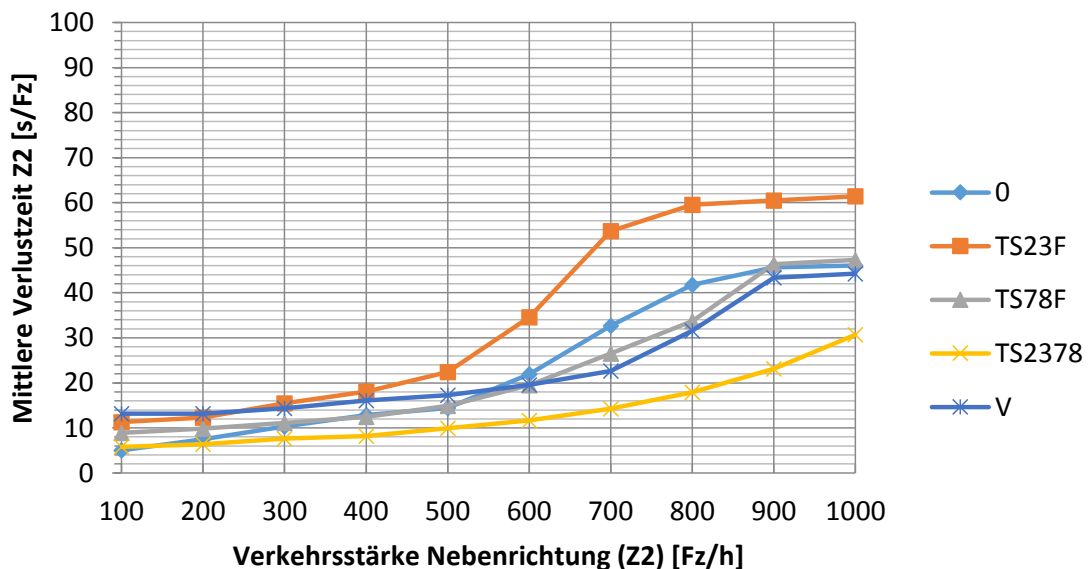


Abbildung 7.13: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Nebenrichtung an Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z1,Z3

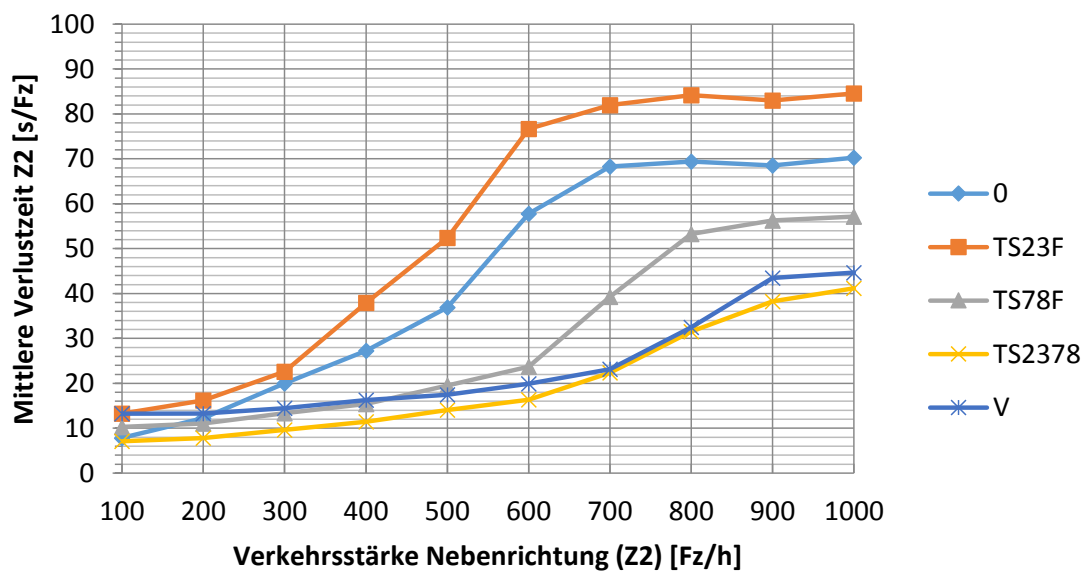


Abbildung 7.14: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Nebenrichtung an Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 700 Fz/h in Z1,Z3

Zwischenfazit Die Analyse des Einflusses des Teilsignalisierungsfalls hat ergeben, dass nur zwei der möglichen Teilsignalisierungsfälle brauchbare Ergebnisse zur Verbesserung des Verkehrsablaufs liefern. Dies sind der Fall mit Fußgängerfurt rechts der Einmündung in Zufahrt Z3 (TS78F) und der einfache Teilsignalierungsfall ohne Furten (TS2378). Der Fall mit der Furt auf der gegenüberliegenden Seite (TS23F) führt hingegen sogar zu einer Verschlechterung im Vergleich zum vorfahrtgeregelten Fall. Ebenso konnte gezeigt werden, dass eine Vollsignalisierung größere Beeinträchtigungen für die Hauptrichtung aufweist als eine Teilsignalisierung. In der Nebenrichtung ist eine Vollsignalisierung erst bei hohen Verkehrsstärken in dieser aufgrund der niedrigeren Zeitbedarfswerte der Fahrzeuge vorteilhafter.

Es wird im Folgenden nur noch auf die Fälle mit Furt auf der rechten Seite (TS78F) und ohne Furt (TS2378) eingegangen und der Fall TS23F aus den Untersuchungen ausgeschlossen.

7.6.2 Einflussfaktor Signalprogramm

Neben dem Fall der Teilsignalisierung wird der Verkehrsablauf am Knotenpunkt auch vom gewählten Signalprogramm beeinflusst. In den nachfolgenden Diagrammen sind die Verlustzeiten in Abhängigkeit der verschiedenen Signalprogramme aufgetragen. Dabei bezeichnet „0“ den vorfahrtgeregelten Fall. Hier zeigen sich ebenfalls große Unterschiede bezogen auf den Gesamtknoten sowie die Haupt- und Nebenrichtung.

Auswirkungen Gesamtknoten Bezogen auf den Gesamtknoten zeigt sich, dass Signalprogramme mit hohen Sperrzeitanteilen große Verlustzeiten bedeuten (vgl. Abbildung 7.15). Dies ergibt sich zum einen durch die Berechnung der Gesamtknotenverlustzeit, in die starke Verkehrsströme, in diesem Fall die Hauptrichtung, stärker eingehen und zum anderen durch die starke Pulkbildung. Mit zunehmender Verkehrsstärke in der Nebenrichtung nehmen die Unterschiede ab und die Verlustzeiten der unterschiedlichen Signalprogramme nähern sich an. Während geringe Sperrzeitanteile bzw. eine Vorfahrtregelung vor allem für die Hauptrichtung günstig sind, so gilt dies in der Nebenrichtung für hohe Sperrzeitanteile. Wenn sich die Verkehrsstärken der beiden Richtungen angleichen, so schlägt sich dies auch in der Gesamtknotenverlustzeit wieder.

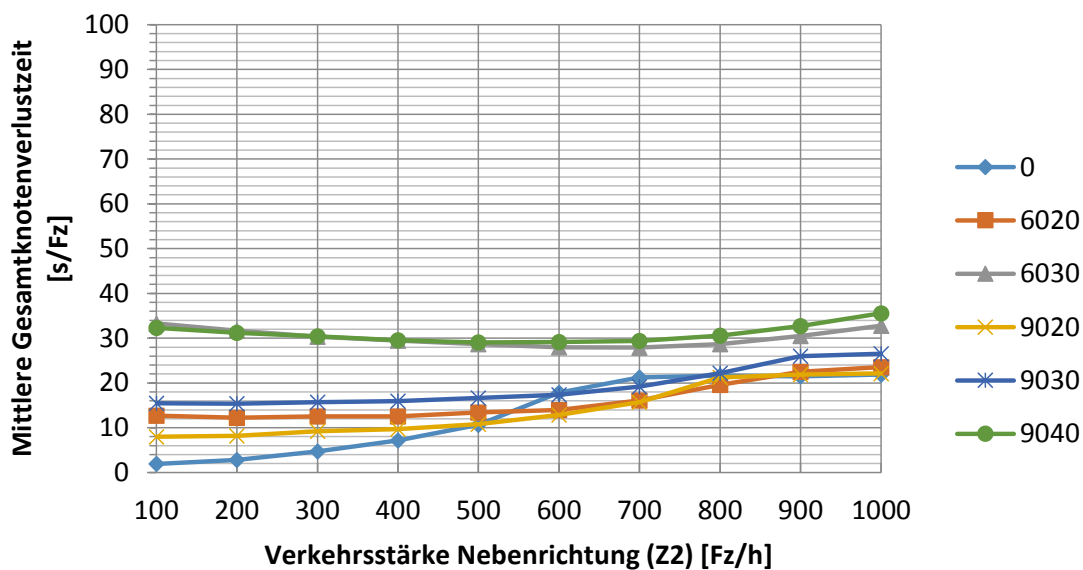


Abbildung 7.15: Auswirkungen des Signalprogramms auf den Gesamtknoten an Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Fall: TS2378, Verkehrsstärke: 700 Fz/h in Z1,Z3

Auswirkungen in Hauptrichtung Die Signalprogramme mit hohem Sperrzeitanteil in der Hauptrichtung schneiden erwartungsgemäß nachteiliger ab. Dargestellt ist in Abbildung 7.16 die Verlustzeit in Abhängigkeit der simulierten Signalprogramme für die rechte Zufahrt Z3. Es lassen sich drei Klassen ausmachen. Die Signalprogramme 6030 und 9040, beide mit Sperrzeitanteilen größer 50% führen vor allem ab Verkehrsstärken von 500 Fz/h zu sehr hohen Verlustzeiten. Die beiden Signalprogramme 9020 und 9030 mit Sperrzeitanteilen von 22% bis 33% weisen die geringsten Verlustzeiten auf. Dazwischen ordnet sich das Signalprogramm 6020, ebenfalls mit einem Sperrzeitanteil von 33%, ein. Mit steigendem Sperrzeitanteil kommt es wiederum zu einer stärkeren Pulkbildung, wodurch der Abfluss der Linksabbieger (Strom 7) erschwert wird und sich die starken Anstiege der Verlustzeiten erklären lassen.

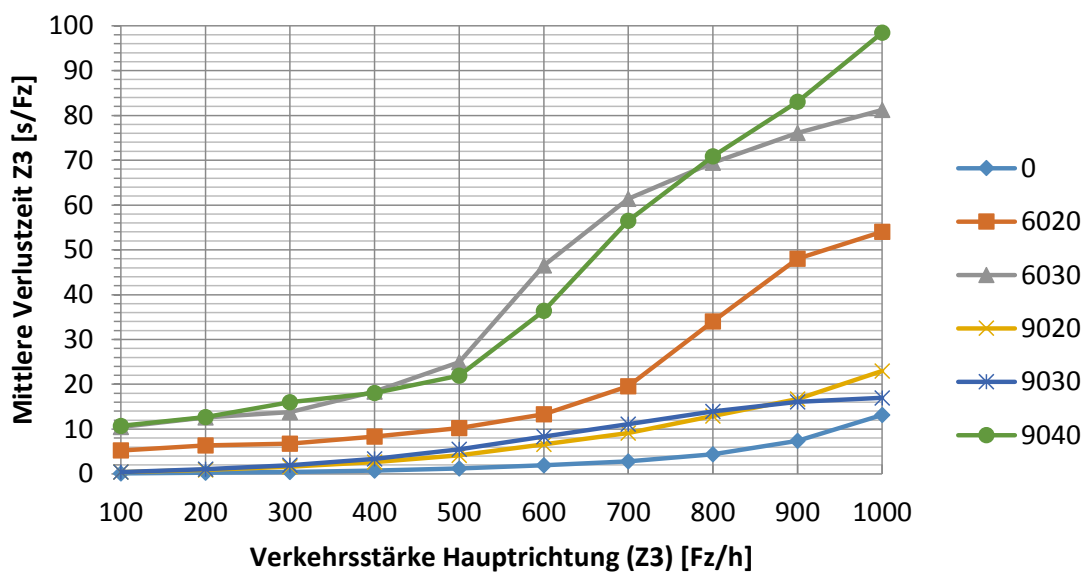


Abbildung 7.16: Auswirkungen des Signalprogramms auf die Hauptrichtung an Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Fall: TS2378

Auswirkungen in Nebenrichtung In der Nebenrichtung zeigt sich das gegenteilige Bild. Hier birgt eine Teilsignalisierung bereits ab Verkehrsstärken von 200 Fz/h Vorteile gegenüber der Vorfahrtregelung. Hier sind lange Sperrzeiten vorteilhafter, wobei die Unterschiede wesentlich geringer ausfallen als in der Hauptrichtung. Ab 700 Fz/h in der Nebenrichtung tritt in Abbildung 7.17 eine Sättigung im Vorfahrtfall auf. Dies ist daran zu erkennen, dass die Verlustzeiten trotz steigender Verkehrsstärke nicht weiter steigen. Das heißt die gesamte Zulaufstrecke zum Knotenpunkt ist zugestaut. Dieser Effekt tritt bei den Teilsignalisierungen erst bei höheren Verkehrsstärken auf. Lange Sperrzeiten wirken sich nur im Fall ohne Furten kapazitätssteigernd aus, da hier ein ungehinderter Fahrzeugabfluss gewährleistet ist. Dies ist beim Vorhandensein einer Fußgängerfurt nicht möglich, so daß die Kapazität eines Umlaufs durch die Anzahl der Aufstellplätze vor der Furt limitiert ist.

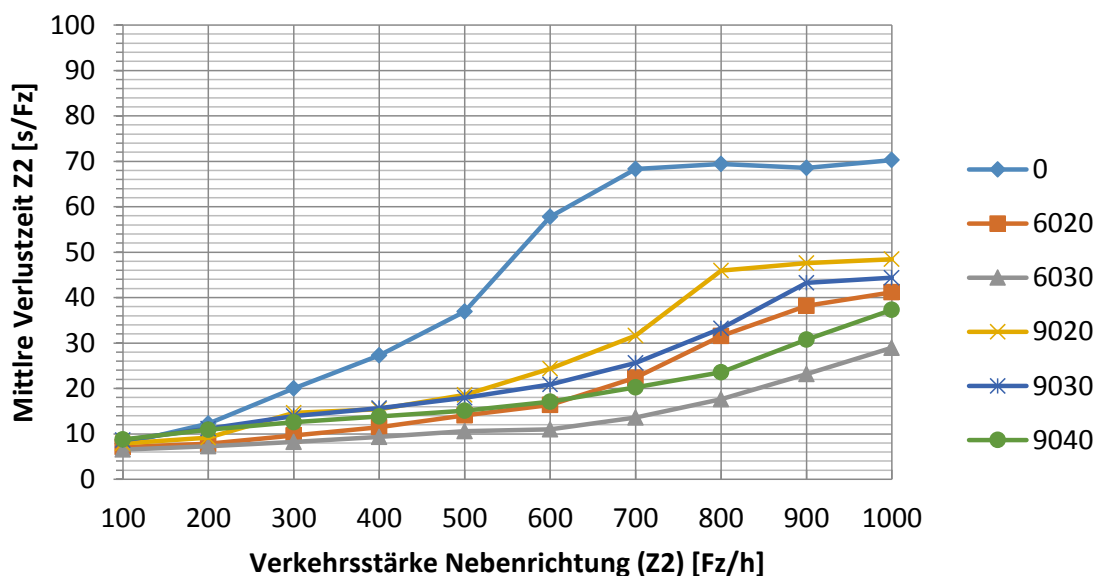


Abbildung 7.17: Auswirkungen des Signalprogramms auf die Nebenrichtung an Einmündungen, Ausbaustandard: AS0EI, Fall: TS2378, Verkehrsstärke: 700 Fz/h in Z1,Z3

Zwischenfazit Während lange Sperrzeiten Vorteile für die Nebenrichtung bedeuten, sind diese für die Hauptrichtung unvorteilhaft, was sich dort in stark steigenden Verlustzeiten ausdrückt. Eine lange Sperrzeit führt zu einer starken Pulkbildung im Hauptstrom. Linksabbieger sowie Nebenstromfahrzeuge müssen daher länger warten, bis sich eine ausreichend große Lücke auftut. Die Auswertungen haben gezeigt, dass Sperrzeitanteile unter 33% den besten Kompromiss darstellen. Dies trifft in diesem Fall auf die Signalprogramme 6020, 9020 und 9030 zu. Da sich die Programme 9020 und 9030 sehr ähnlich sind, werden in den nachfolgenden Untersuchungen nur noch die Signalprogramme 6020 und 9030 betrachtet. Alle übrigen werden nicht weiter untersucht.

7.6.3 Einflussfaktor Ausbaustandard

Schlussendlich wird der Einfluss der Fahrstreifenaufteilung analysiert. Wie bereits in den Grundlagen aufgezeigt, hat die Anlage von Abbiegestreifen großen Einfluss auf den Verkehrsablauf, weswegen Ausbaustandards definiert wurden, in die Fahrstreifenaufteilungen mit ähnlichem Verkehrsablauf zusammengefasst wurden.

Auswirkungen Gesamtknoten Die Ausrüstung einer Einmündung mit einem Linksabbiegestreifen in der Hauptrichtung (AS1EI) bringt Vorteile für die Gesamtknotenverlustzeit. Im Vergleich zur Einmündung ohne Abbiegestreifen (AS0EI) ergeben sich Verlustzeitreduzierungen zwischen 10 und 20 Sekunden (vgl. Abbildung 7.18). Die Anlage eines zusätzlichen Linksabbiegestreifens in der Nebenrichtung (AS2EI) ist hingegen in den meisten Fällen obsolet, da sich meist keine weiteren Verbesserungen des Verkehrsablaufs erzielen lassen. Lediglich im Bereich zwischen 600 und 1000 Fz/h in der Nebenrichtung lassen sich hier nochmals Verbesserungen im Vergleich zu den beiden anderen Ausbaustandards erzielen.

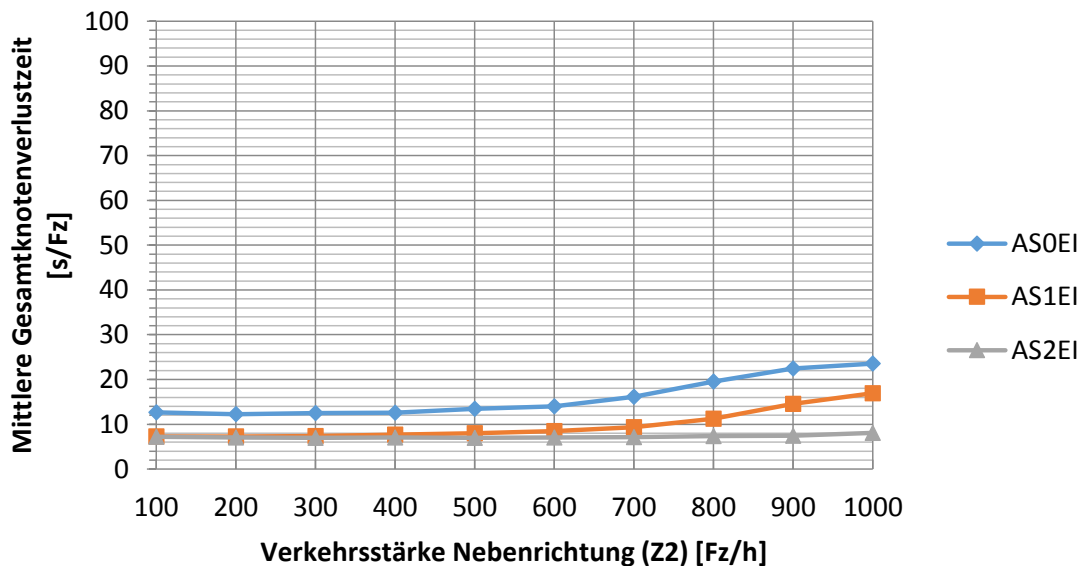


Abbildung 7.18: Auswirkungen des Ausbaustandards auf den Gesamtknoten an Einmündungen, Fall: TS2378, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 900 Fz/h in Z1,Z3

Auswirkungen in Hauptrichtung In der Hauptrichtung ist lediglich das Vorhandensein eines Linksabbiegestreifens in dieser von Belang, wie Abbildung 7.19 zeigt. Bei niedrigen Verkehrsstärken sind die Effekte dadurch marginal. Erst ab Verkehrsstärken von 500 Fz/h lassen sich durch den zusätzlichen Linksabbiegestreifen Verlustzeitreduzierungen erzielen, da sich die Fahrzeuge vorher noch problemlos gegen die Gegenrichtung durchsetzen können. Der Ausbaustandard AS1EI führt zu einer deutlichen Senkung der Verlustzeiten in der Zufahrt Z3, da linksabbiegende Fahrzeuge den Hauptstrom nicht mehr stören, wenn sie auf eine Lücke im Gegenverkehr warten. Der Strom 8 kann während dieser Zeit abfließen, wenn der Stauraum ausreichend dimensioniert ist.

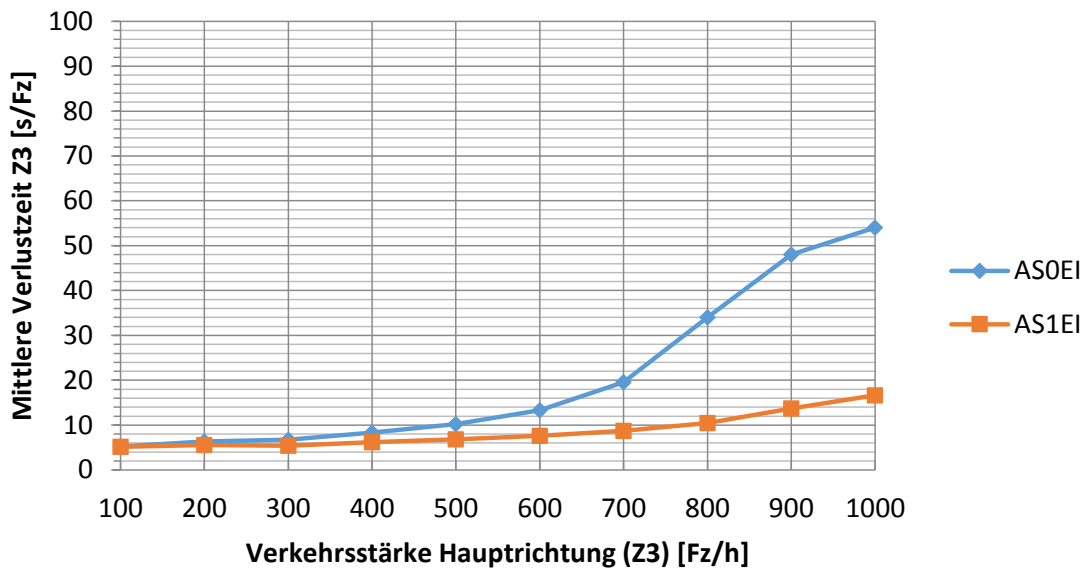


Abbildung 7.19: Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Hauptrichtung an Einmündungen, Fall: TS2378, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 900 Fz/h in Z1,Z3

Auswirkungen in Nebenrichtung Im Gegensatz zur Hauptrichtung, sind für die Nebenrichtung sowohl Linksabbiegestreifen in der Hauptrichtung als auch in der Nebenrichtung relevant (vgl. Abbildung 7.20). Zum einen werden dadurch in der Nebenrichtung zusätzliche Aufstellplätze geschaffen, so dass während der Sperrzeit mehr Fahrzeuge gleichzeitig abfließen können und zum anderen können Fahrzeuge in der Hauptrichtung schneller den Knotenpunkt zu Beginn der Sperrzeit räumen. Somit steht der Nebenrichtung ein größerer Anteil der Sperrzeit zum Abfließen zur Verfügung. Die Effekte werden wiederum ab ca. 500 Fz/h in der Nebenrichtung spürbar.

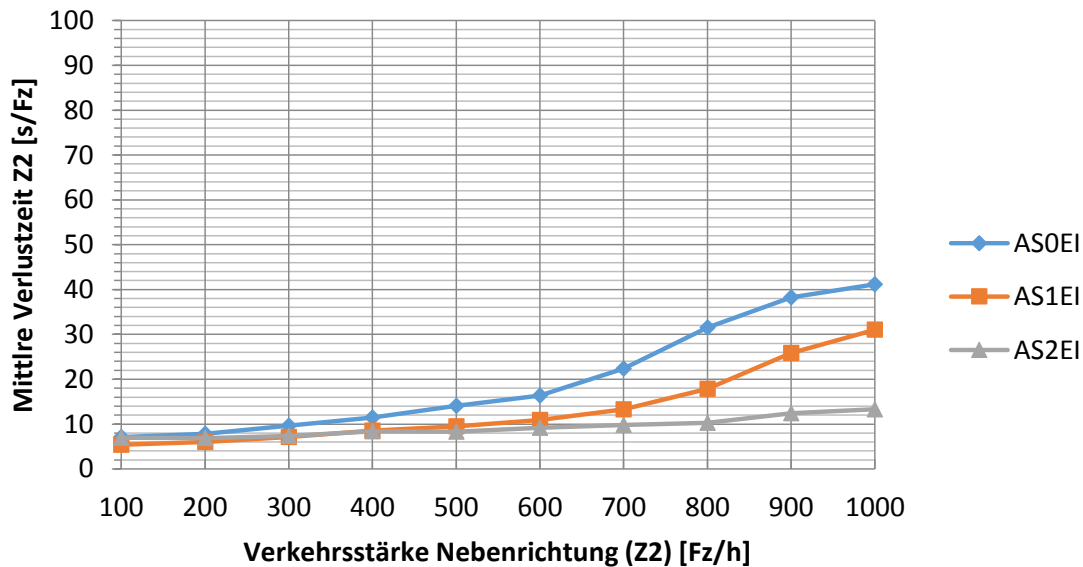


Abbildung 7.20: Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Nebenrichtung an Einmündungen, Fall: TS2378, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 900 Fz/h in Z1,Z3

7.6.4 Zwischenfazit

Die Untersuchungen an Einmündungen haben gezeigt, dass die verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung, das Signalprogramm und der Ausbaustandard erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf haben. Zusätzlich hat sich erwiesen, dass eine einseitige Beurteilung der Anlage nicht ausreicht. Während in der Gesamtbetrachtung meist nur geringe Effekte sichtbar sind, sind die Auswirkungen auf Haupt- und Nebenrichtung sehr unterschiedlich.

Als Teilsignalisierungsfälle kommen an Einmündungen nur die Fälle mit Fußgängerfurt rechts (TS78F) und ohne Furten (TS2378) infrage. Der Fall mit Fußgängerfurt auf der linken Seite (TS23F) schnitt in allen Belangen schlechter ab als der vorfahrtgergelte Fall. Verglichen mit einer Vollsignalisierung ergaben sich mitunter sogar Vorteile, vor allem in der Hauptrichtung aufgrund weggefallener Zwischenzeiten.

Als günstige Signalprogramme haben sich die Kombinationen 6020 und 9030 herauskristallisiert. Sie sind ein Kompromiss für Haupt- und Nebenrichtung und sorgen für einen guten Abfluss der Nebenstromfahrzeuge bei gleichzeitig akzeptabler Störung der Hauptrichtung.

Bezogen auf den Ausbaustandard der Einmündung konnte gezeigt werden, dass die Anlage eines Linksabbiegestreifen in der Hauptrichtung große Vorteile birgt. Bei einem zusätzlichen Linksabbiegestreifen in der Nebenrichtung hingegen sind die Effekte etwas geringer, aber immer noch spürbar.

7.7 Ergebnisse für Kreuzungen

Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse für Kreuzungen vorgestellt. Sie folgen demselben Schema wie bei Einmündungen und gehen, jeweils für die Haupt- und Nebenrichtung sowie den Gesamtknoten, auf die Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls, des Signalprogramms und des Ausbaustandards ein. Die Fälle TS78F und TS23F sind gespiegelt. Aufgrund der symmetrischen Verkehrsbelastungen ergeben sich daher keine Veränderungen. Daher wird im Folgenden nur der Fall TS23F stellvertretend betrachtet.

7.7.1 Einflussfaktor Teilsignalisierungsfall

Auswirkungen Gesamtknoten Die mittleren Verlustzeiten zeigen in der Gesamtknotenbetrachtung nur eine geringe Abhängigkeit vom Teilsignalisierungsfall. Beide Teilsignalisierungsfälle können sich nicht signifikant von der Vorfahrtregelung bzw. der Vollsignalisierung abheben. Dies zeigen die Abbildungen 7.21 und 7.22.

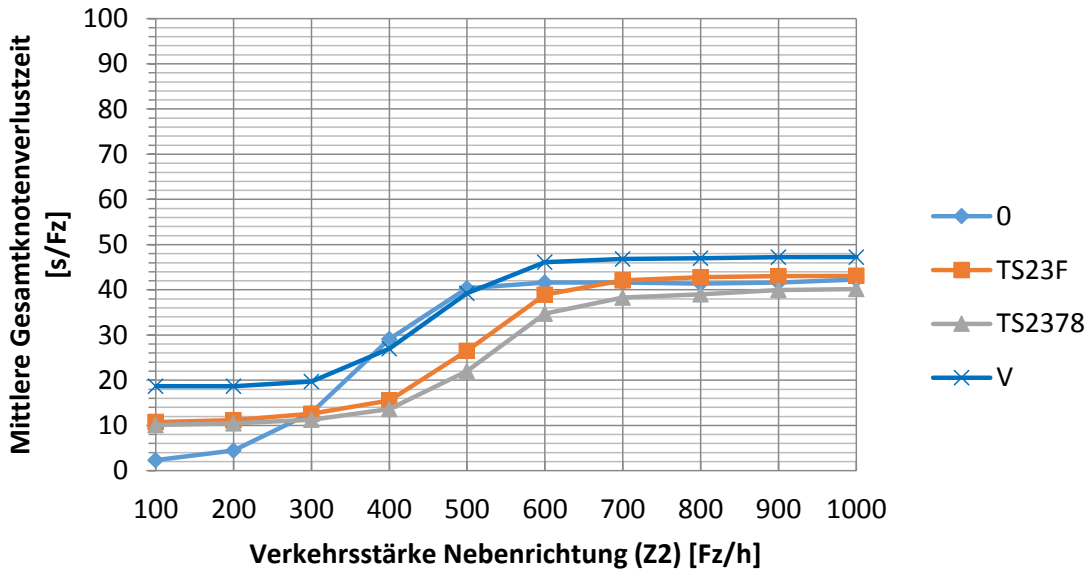


Abbildung 7.21: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf den Gesamtknoten an Kreuzungen, Ausbaustandard: AS0KR, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

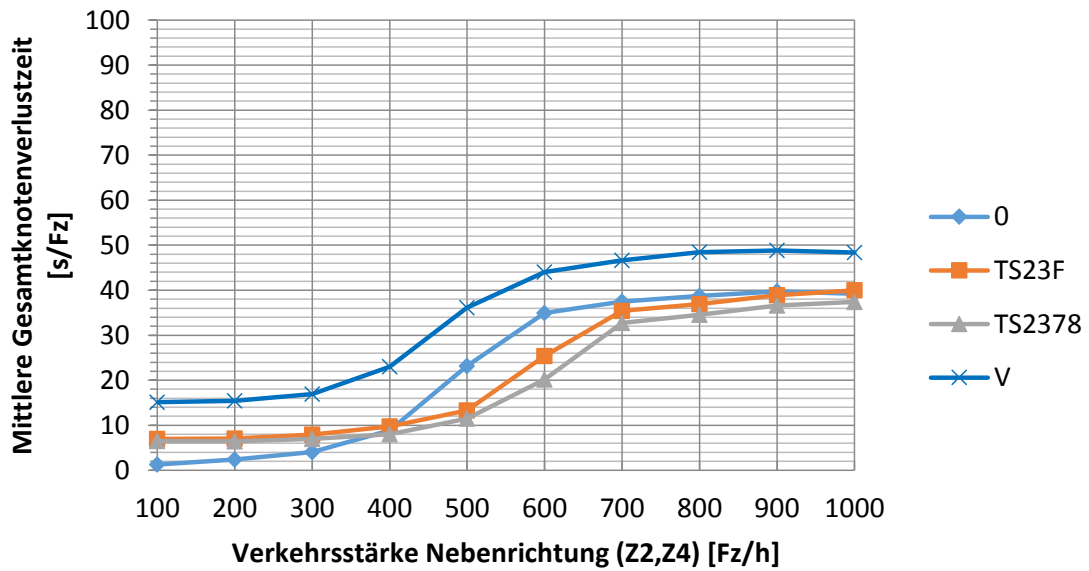


Abbildung 7.22: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf den Gesamtknoten an Kreuzungen, Ausbaustandard: AS1KR, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

Auswirkungen in Hauptrichtung In der Hauptrichtung sorgt die Teilsignalisierung für geringere Verlustzeiten als eine Vollsignalisierung. Dies ist wiederum auf die wegfallenden Zwischenzeiten zurückzuführen. Für den Ausbaustandard AS0KR ergeben sich Vorteile bis zu 14 Sekunden bei hohen Verkehrsstärken in der Hauptrichtung. Im Vergleich zur Vorfahrtregelung ergeben sich die erwartbaren leicht erhöhten Verlustzeiten, wie Abbildung 7.23 zu entnehmen ist.

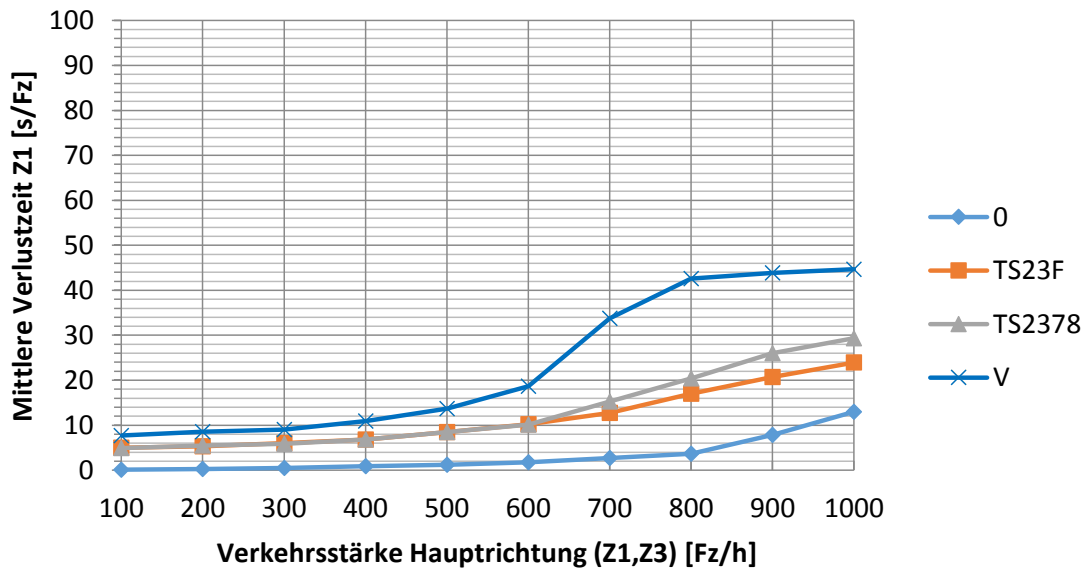


Abbildung 7.23: Auswirkungen des Teilsignalierungsfalls auf die Hauptrichtung an Kreuzungen, Ausbaustandard: AS0KR, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

Auswirkungen in Nebenrichtung Im Gegensatz zu Einmündungen lässt sich mit einer Teilsignalisierung an Kreuzungen in der Nebenrichtung nur sehr geringe Vorteile im Vergleich zu einer Vollsignalisierung erzielen. Die Verlustzeitvorteile sind als marginal einzustufen (vgl. Abbildung 7.24). Dies liegt an den durch den zusätzlichen Arm hervorgerufenen zusätzlichen Konfliktpunkten, die bei Kreuzungen auftreten. Linkseinbieger aus der Nebenrichtung haben hier zusätzlich den Gegenverkehr zu berücksichtigen. Dies kann auch die anderen Nebenstromfahrzeuge höheren Ranges betreffen, wenn diese auf einem Mischfahrstreifen geführt werden (AS0KR und AS1KR). Für die Rechtseinbieger stellt sich die Situation ebenfalls schlechter dar, da sie erst abfließen können, wenn vor ihnen kein Geradeausfahrer wartet, der an Kreuzungen beide Hauptrichtungen berücksichtigen muss.

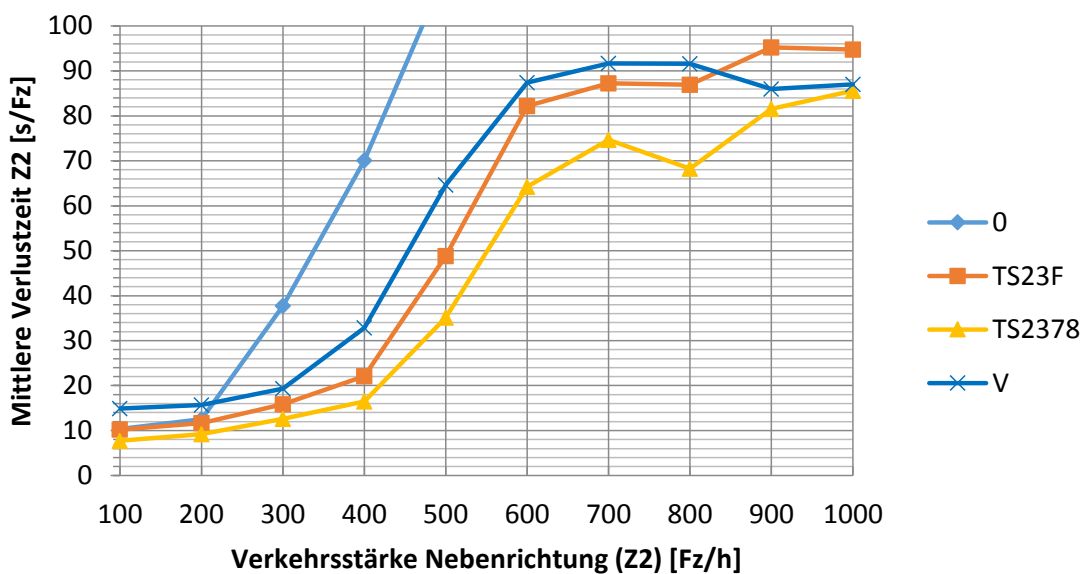


Abbildung 7.24: Auswirkungen des Teilsignalisierungsfalls auf die Nebenrichtung an Kreuzungen, Ausbaustandard: AS0KR, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

7.7.2 Einflussfaktor Signalprogramm

Auswirkungen Gesamtknoten Für den Gesamtknoten ergeben sich kaum Unterschiede in den mittleren Verlustzeiten bei unterschiedlichen Signalprogrammen (vgl. Abbildung 7.25). Dies lässt sich auch wiederum mit dem an Kreuzungen geringeren Abfluss durch den Gegenverkehr erklären. Nur wenige Fahrzeuge der Nebenrichtung können die künstlich geschaffene Zeitlücke überhaupt nutzen. Somit gibt es keine Verlustzeitvorteile, welche die Nachteile der Hauptrichtung aufwiegen könnten.

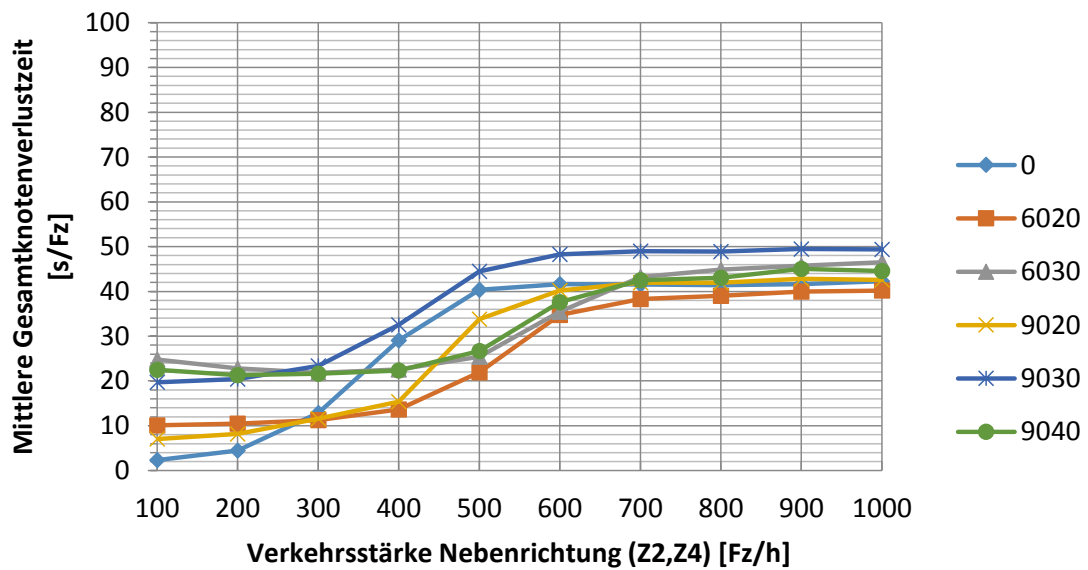


Abbildung 7.25: Auswirkungen des Signalprogramms auf den Gesamtknoten an Kreuzungen, Fall: TS2378, Ausbaustandard: AS0KR, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

Auswirkungen in Hauptrichtung Für die Hauptrichtung lassen sich wie bei Einmündungen größere Unterschiede zwischen den Signalprogrammen feststellen. Je größer der Sperrzeitanteil ist, desto mehr steigen die Verlustzeiten in der Hauptrichtung an. Aus Sicht der Hauptrichtung sind gemäß Abbildung 7.26 daher die Signalprogramme 6020 und 9020 zu bevorzugen.

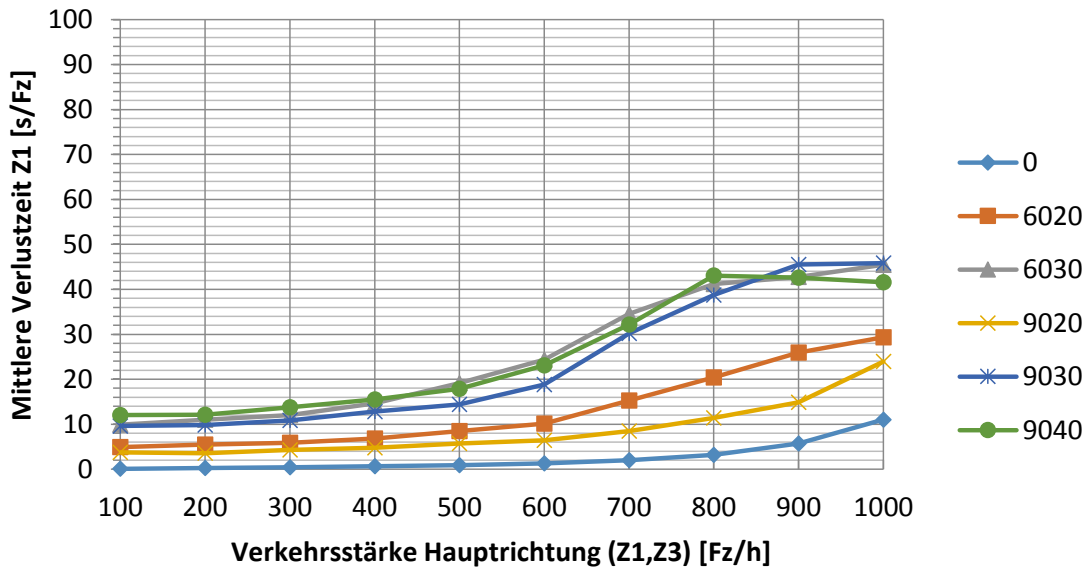


Abbildung 7.26: Auswirkungen des Signalprogramms auf die Hauptrichtung an Kreuzungen, Fall: TS2378, Ausbaustandard: AS0KR

Auswirkungen in Nebenrichtung Für die Nebenrichtung sind Signalprogramme mit hohem Sperrzeitanteil vorteilhafter, wobei die Unterschiede geringer ausfallen als bei Einmündungen (vgl. Abbildung 7.27). Dies zeigt sich beim Ausbaustandard AS2KR noch deutlicher (vgl. Abbildung 7.28). Hier ergeben sich laut Simulation in der Nebenrichtung nur vernachlässigbare Unterschiede zwischen den einzelnen Signalprogrammen. Dies ist ebenfalls auf den Einfluss des Gegenverkehrs zurückzuführen, der ein ungehindertes Einbiegen verhindert.

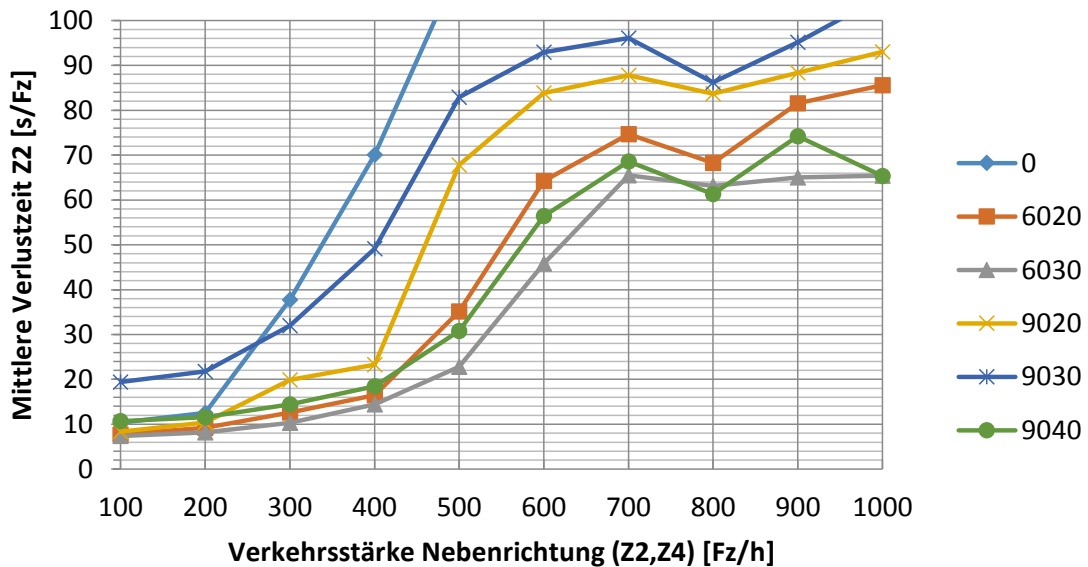


Abbildung 7.27: Auswirkungen des Signalprogramms auf die Nebenrichtung an Kreuzungen, Fall: TS2378, Ausbaustandard: AS0KR, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

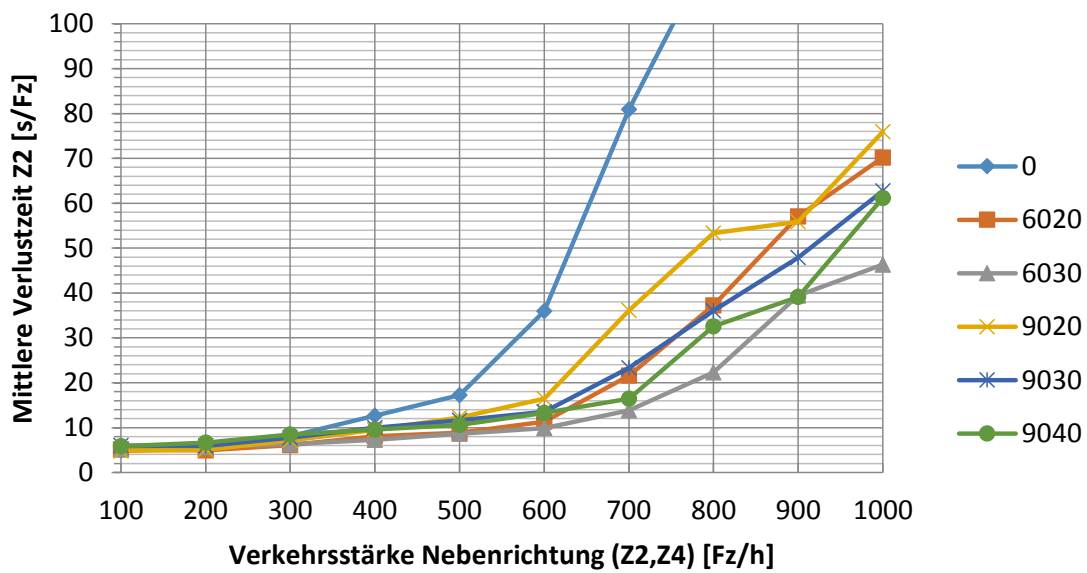


Abbildung 7.28: Auswirkungen des Signalprogramms auf die Nebenrichtung an Kreuzungen, Fall: TS2378, Ausbaustandard: AS2KR, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

7.7.3 Einflussfaktor Ausbaustandard

Auswirkungen Gesamtknoten Bei niedrigen Verkehrsstärken ist der Einfluss des Ausbaustandards vernachlässigbar. Erst bei steigenden Verkehrsbelastungen in der Nebenrichtung bringt die Anlage zusätzlicher Linksabbiegestreifen Vorteile (vgl. Abbildung 7.29). Im Gegensatz zu Einmündungen sind die Verbesserungen beim Übergang von AS1KR zu AS2KR spürbarer, da bei Kreuzungen Linksabbieger im Gegenverkehr aus der Nebenrichtung bei den Ausbaustandards AS0KR und AS1KR den Abfluss behindern. Steht der Nebenrichtung hingegen auch ein separater Linksabbiegestreifen zur Verfügung, so kann dieser verbessert und die Verlustzeit somit vermindert werden.

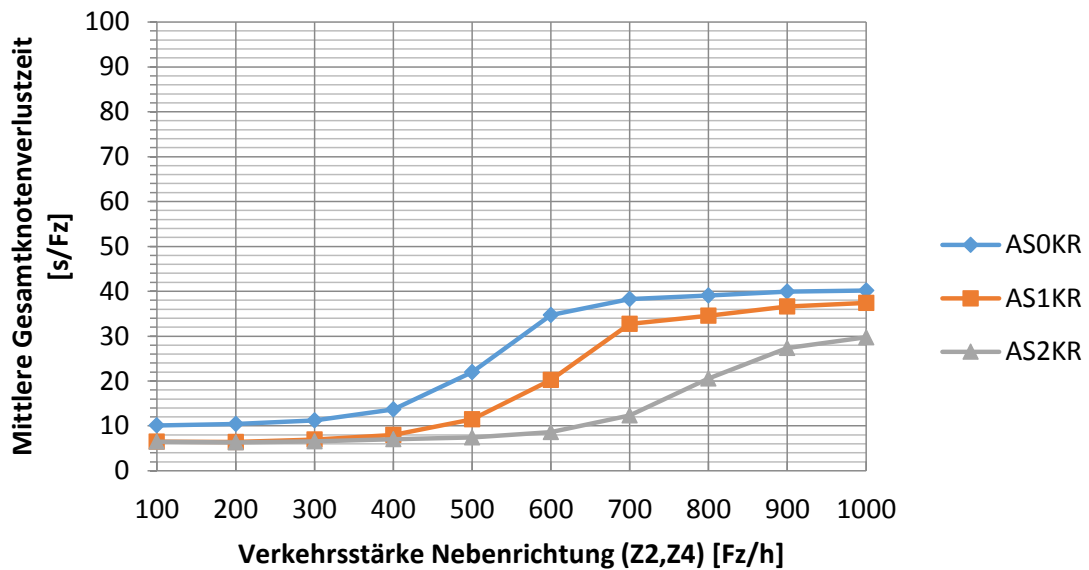


Abbildung 7.29: Auswirkungen des Ausbaustandards auf den Gesamtknoten an Kreuzungen, Fall: TS2378, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

Auswirkungen in Hauptrichtung Der Verkehrsablauf verbessert sich, wie in Abbildung 7.30 zu sehen, beim Übergang von AS0KR zu AS1KR ab Verkehrsstärken von 600 Fz/h in den Hauptstromzufahrten (Z1,Z3). Bei niedrigeren Verkehrsstärken ist ein Durchsetzen gegenüber dem Gegenverkehr noch problemlos möglich und nachfolgende Geradeausfahrer werden nahezu nicht in ihrer Fahrt behindert.

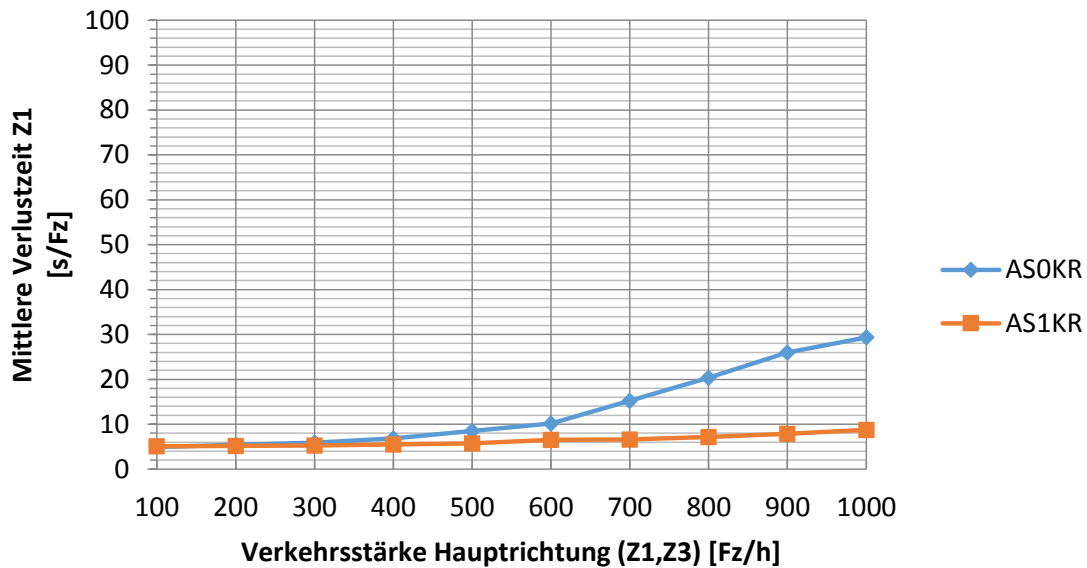


Abbildung 7.30: Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Hauptrichtung an Kreuzungen, Fall: TS2378, Signalprogramm: 6020

Auswirkungen in Nebenrichtung In der Nebenrichtung ergibt sich das gegenteilige Bild. Während bei Einmündungen bereits die Anlage eines Linksabbiegestreifen in der Zufahrt Z3 große Vorteile bringt, so ist dies bei Kreuzungen erst bei gleichzeitiger Anlage dieser in den Nebenarmen der Fall. Aus Abbildung 7.31 geht hervor, dass die beiden Ausbaustandards, in denen keine Linksabbiegestreifen in der Nebenrichtung vorhanden sind (orange und blau), sich nur unwesentlich bezüglich der mittleren Verlustzeiten in der Nebenrichtung voneinander unterscheiden, während bei AS2KR ab einer Verkehrsstärke von 400 Fz/h in den Nebenrichtungszufahrten sich große Differenzen zu den beiden anderen ergeben. Bei sehr hohen Verkehrsstärken verringert sich diese jedoch wieder.

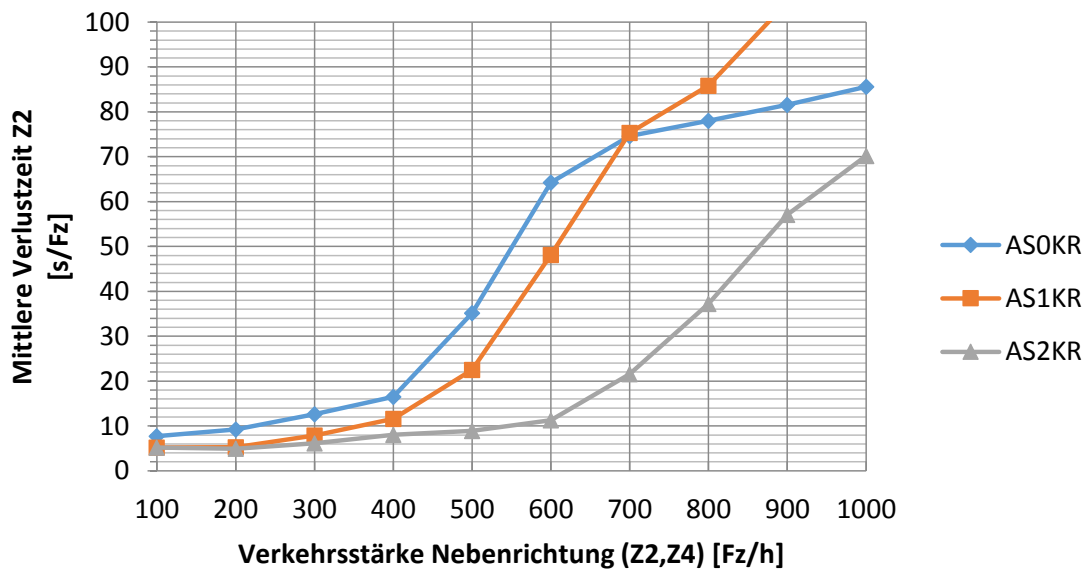


Abbildung 7.31: Auswirkungen des Ausbaustandards auf die Nebenrichtung an Kreuzungen, Fall: TS2378, Signalprogramm: 6020, Verkehrsstärke: 600 Fz/h in Z2,Z4

7.7.4 Zwischenfazit

Die Simulationsläufe an Kreuzungen zeigen, dass die Effekte einer Teilsignalisierung hier weitaus geringer ausfallen als an Einmündungen. Hauptgrund ist die gegenseitige Blockade der Linksabbieger im Gegenverkehr aus der Nebenrichtung. Insbesondere bei den beiden Ausbaustandards ohne Linksabbiegestreifen in der Nebenrichtung wird der Fahrzeugabfluss sehr gehemmt und der Effekt der künstlich geschaffenen Zeitlücken verpufft nahezu. Zwar kommt es auch hier durch eine Teilsignalisierung zu geringeren Einbußen für die Haupttrichtung, es können jedoch im Vergleich zur Vollsignalisierung keine Vorteile für die Nebenrichtung geschaffen werden. Das Resultat stellt sich wahrscheinlich anders dar, wenn die Verkehrsstärken und Routenentscheidungen verändert werden. Dies ist in diesem Modell jedoch nicht untersucht worden. Das Signalprogramm hat so gut wie keinen Einfluss auf die Verlustzeiten sowohl für den Gesamtknoten, als auch für Haupt- und Nebenrichtung.

7.8 Zusammenschau

Auch in den Simulationen zeigt sich die erwartete Manipulation der Zeitlückenverteilung durch eine deutliche Abweichung von der idealisierten negativen Exponentialfunktion. Mit steigender Verkehrsstärke und steigendem Sperrzeitanteil nimmt diese Verschiebung zu.

Die Auswertung der Simulationen hat gezeigt, dass bei Einmündungen nur die Teilsignalisierungsfälle mit Fußgängerfurt rechts (TS78F) und ohne Furten (TS2378) spürbare Effekte, vor allem in der Nebenrichtung, erzielen. Die Gesamtknotenverlustzeit verändert sich durch eine Signalisierung jedweder Art kaum. Der vermutete Vorteil einer reduzierten Behinderung des Hauptstroms im Vergleich zur Vollsignalisierung wird bestätigt. Ein Linksabbiegestreifen in der Haupttrichtung (AS1EI) birgt sehr große Kapazitätseffekte. Als Signalprogramm haben sich die Programme 6020, 9020 und 9030 als die besten Alternativen erwiesen. Limitierender Faktor ist beim Fall TS78F die Anzahl der Aufstellplätze vor der Fußgängerfurt.

An Kreuzungen fallen die Ergebnisse hingegen anders aus. Im Vergleich zum vorfahrtgeregelten Fall ergeben sich weitaus geringere Verlustzeitreduzierungen als bei Einmündungen. Dies zeigt sich unabhängig von Teilsignalisierungsfall und Signalprogramm. Lediglich der Ausbaustandard AS2KR mit Linksabbiegestreifen in allen Zufahrten kann mit einer Teilsignalisierung zu einem bessern Verkehrsablauf beitragen, da hier geringere, durch Linkseinbieger im Gegenverkehr hervorgerufene, Behinderungen bestehen. Ebenso kann es durch die zusätzlichen Konfliktpunkte zu einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit, insbesondere auch für Fußgänger, kommen.

Im nächsten Schritt werden die Möglichkeiten zur Integration des Fuß- und Radverkehrs analysiert, bevor anschließend die Einsatzgrenzen einer Teilsignalisierung abgeleitet werden können.

8 Integration des Fuß- und Radverkehrs

Wie bereits in Kapitel 7 dargelegt, weisen die unterschiedlichen Fälle der Teilsignalisierung erhebliche Unterschiede in der Leistungsfähigkeit im Kfz-Verkehr auf. Da eine Auswahl vor allem innerorts, wo mit erhöhtem Fußgängerverkehrsaufkommen zu rechnen ist, nicht alleine aus Sicht des MIV getroffen werden darf, müssen diese Belange in die Auswahl mit einbezogen werden.

Das folgende Kapitel widmet sich daher der Integration des Fuß- und Radverkehrs in teilsignalisierte Knotenpunkte. Es werden zunächst die in der Praxis relevanten Führungsformen vorgestellt, ihre Tauglichkeit für den Einsatz an teilsignalisierten Knotenpunkten überprüft und anschließend darauf adaptiert. Abgerundet wird das Kapitel durch Beobachtungen aus den empirischen Untersuchungen in Bad Kreuznach (vgl. auch Kapitel 6) sowie Überlegungen zum Radverkehr. Der Einsatz von Teilsignalisierungen zur Fußgängerführung an Kreisverkehren wird gesondert im Kapitel 10.4 behandelt.

Letztlich münden die Erkenntnisse in einen Entscheidungsbaum zur Auswahl eines passenden Falls der Teilsignalisierung.

8.1 Übersicht der Querungsanlagen

Unter Querungsanlagen werden Einrichtungen verstanden, die speziell für Fußgänger im Straßenquerschnitt integriert werden, um das Queren der Straße zu erleichtern und sicherer zu gestalten. Es werden folgende Maßnahmen unterschieden:

- Keine Maßnahme
- Fußgängerüberwege mit und ohne bauliche Erweiterungen (FGÜ bzw. FGÜ+)
- Mittelinseln (MI)
- Fußgängerfurt mit Fußgängerlichtsignalanlage (FLSA)
- Über- und Unterführungen
- Fahrbahnaufpflasterungen (nur im nachrangigen Straßennetz)

Die Auswahl einer geeigneten Querungsanlage erfolgt in Deutschland nach den RaSt⁷⁸. Das entsprechende Diagramm ist in Abbildung 8.1 abgedruckt. Die Einflussparameter sind die Kfz-Verkehrsstärke, das Fußgängeraufkommen, die Fahrbahnbreite und die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Aus diesen vier Größen kann eine passende Querungsanlage ermittelt werden.

⁷⁸FGSV 2006b

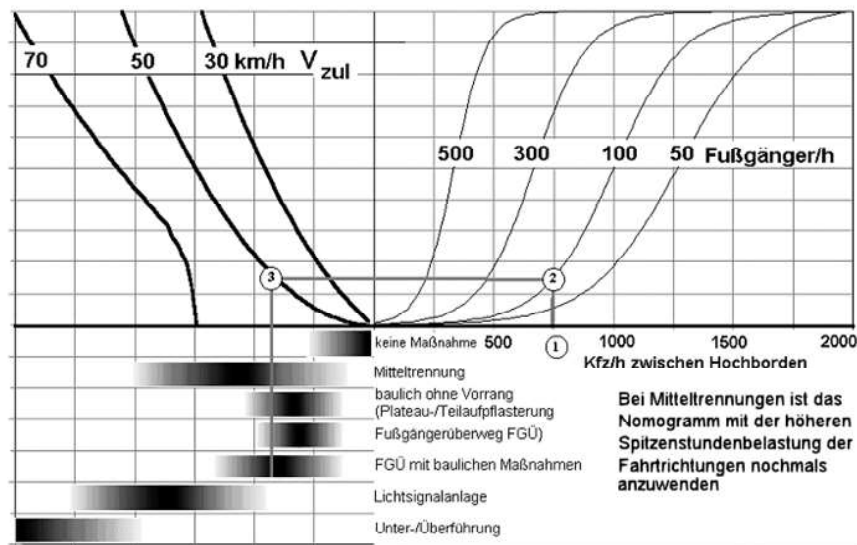


Abbildung 8.1: Einsatzbereiche von Überquerungsanlagen an zweistreifigen Straßen mit Fahrbahnbreiten unter 8,5m
Quelle: FGSV 2006c

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Lesbarkeit wird dieses Diagramm für diese Arbeit in eine Tabellenform für Straßen bis 6,5m Fahrbahnbreite (S) und Straßen zwischen 6,5m und 8,5m Fahrbahnbreite überführt (vgl. Tabellen 8.1 und 8.2). Links dargestellt sind die Einflussparameter aus dem Kfz-Verkehr. Hierunter fallen die zulässige Höchstgeschwindigkeit und die Verkehrsstärke. Diese werden überlagert mit dem Fußgängeraufkommen, welches in vier Kategorien unterteilt ist. Daraus ergibt sich die Wahl der zulässigen Fußgängerführung. Die Anforderungen steigen von links oben (weißer Bereich) nach rechts unten (lila Bereich). Die beiden Tabellen bilden die Grundlage für die Wahl der Querungsanlage und sind auch auf teilsignalisierte Knotenpunkte übertragbar. Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Querungsanlagen beschrieben, bevor diese im Abschnitt 8.1.4 auf teilsignalisierte Knotenpunkte adaptiert werden.

		S ≤ 6,50 m			
km/h	Kfz/h	Fg/h			
		≤50	50 bis <100	100 bis <300	300 bis ≤500
30	< 500	Keine Maßnahme			
	500 bis <1000	FGÜ	MI FGÜ		
	1000 bis <1500	MI FGÜ		MI FLSA	
	1500 bis ≤ 2000				
60	< 500	Keine Maßnahme		MI FGÜ	
	500 bis <1000	FGÜ	MI FLSA		
	1000 bis <1500	MI FLSA		FLSA	
	1500 bis ≤2000				

Tabelle 8.1: Auswahl der Querungsanlagen für Straßenbreiten bis 6,5m

		6,50m < S ≤ 8,5m			
km/h	Kfz/h	Fg/h			
		≤50	50 bis <100	100 bis <300	300 bis ≤500
30	< 500	Keine Maßnahme			
	500 bis <1000	FGÜ+	MI FGÜ+		
	1000 bis <1500	MI FGÜ+		MI FLSA	
	1500 bis ≤ 2000				
60	< 500	Keine Maßnahme		MI FGÜ+	
	500 bis <1000	FGÜ+	MI FLSA		
	1000 bis <1500	MI FLSA		FLSA	
	1500 bis ≤2000				

Tabelle 8.2: Auswahl der Querungsanlagen für Straßenbreiten zwischen 6,5m und 8,5m

8.1.1 Fußgängerüberweg

Ein Fußgängerüberweg (siehe Abbildung 8.2) gewährt mittels einer Straßenmarkierung (Z 293, StVO) einen Vorrang für Fußgänger zum Queren der Fahrbahn gegenüber dem Kfz-Verkehr. Dieser Vorrang ist in §26 Absatz 1 der StVO⁷⁹ geregelt:

An Fußgängerüberwegen haben Fahrzeuge mit Ausnahme von Schienenfahrzeugen den zu Fuß Gehenden sowie Fahrenden von Krankenfahrstühlen oder Rollstühlen, welche den Überweg erkennbar benutzen wollen, das Überqueren der Fahrbahn zu ermöglichen. Dann dürfen sie nur mit mäßiger Geschwindigkeit heranfahren; wenn nötig, müssen sie warten⁸⁰.

Ein Fußgängerüberweg darf nur innerhalb geschlossener Ortschaft auf zweispurigen Straßen mit Höchstgeschwindigkeiten von maximal 50 km/h und beidseitigem Gehweg oder, wenn ein Fußweg weiterführt, angelegt werden⁸¹. Die Fahrbahnbreite sollte nicht größer als 6,50 m sein. Wenn dies doch der Fall sein sollte, ist eine bauliche Anlage vorzusehen. Hier sollte der erste Lösungsweg eine Mittelinsel und der zweite Lösungsweg eine seitliche Einengung sein. Mittelinseln werden als sehr positiv gewertet, da der Fußgänger in zwei Etappen queren kann⁸². In der Regel sollte ein Fußgängeraufkommen von mindestens 50 Personen pro Stunde vorhanden sein, um einen Fußgängerüberweg anordnen zu können. Bei ausreichender Begründung können Fußgängerüberwege auch bei weniger als 50 Fußgängern pro Stunde zur Anwendung kommen, zum Beispiel bei regelmäßiger und punktueller Fußgängerführung⁸³.

Großer Vorteil des Fußgängerüberwegs ist seine gute Akzeptanz bei den Fußgängern, da sie sich bezüglich des Vorrangs sicher fühlen und außerdem kurze Wartezeiten entstehen, da der Kfz-Verkehr anhalten muss, sobald ein Fußgänger queren möchte. Dies spiegelt sich auch in der Unfallstatistik wieder. Im Jahr 2008 ergaben sich lediglich 8,2 % der Gesamtunfälle beim Überschreiten der Fahrbahn auf innerörtlichen Strecken an Fußgängerüberwegen⁸⁴.

Ein Fußgängerüberweg darf jedoch nicht in unmittelbarer Nähe zu einer Lichtsignalanlage angeordnet werden. Es muss ein ausreichender Abstand zwischen Signalgeber und Fußgängerüberweg vorhanden sein, damit die Signalanlage nicht die Aufmerksamkeit der Fahrer auf sich zieht und der Fußgänger somit übersehen wird. Die Anwendung in Kombination mit einer Teilsignalisierung ist daher eingeschränkt.

⁷⁹Straßenverkehrs-Ordnung vom 6. März 2013 (BGBl. I S. 367), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. Oktober 2014 (BGBl. I S. 1635) geändert worden ist

⁸⁰FGSV 2002, S. 18

⁸¹FGSV 2001 S. 2.1

⁸²ebd. S. 3.1

⁸³FGSV 2002 S. 22

⁸⁴GDV 2013 S. 5



Abbildung 8.2: Fußgängerüberweg

8.1.2 Mittelinseln

Eine Mittelinsel ist eine bauliche Anlage, welche in der Mitte des Straßenquerschnitts angebracht wird (siehe Abbildung 8.3), wodurch das Queren der Straße für Fußgänger erleichtert wird. Sie ist eine Querungshilfe ohne Vorrang für den Fußverkehr und bietet dem Fußgänger die Möglichkeit der etappenweisen Querung der Straße. Dies erhöht die Sicherheit enorm, da die Aufmerksamkeit zunächst auf Fahrzeuge aus einer Fahrtrichtung und auf der Mittelinsel dann auf Fahrzeuge aus der anderen Richtung gerichtet wird⁸⁵. Es herrschen somit kurze Querungszeiten sowie lange Orientierungszeiten⁸⁶. Diese hierdurch erzielte Sicherheit bestätigt auch die Unfallstatistik. Lediglich 4,6 % der Gesamtunfälle der Überschreitenunfälle entfielen auf diesen Querungsanlagentyp⁸⁷. Sie übertrifft damit sogar den Fußgängerüberweg an Sicherheit.

Mittelinseln sollten innerorts für Fußgänger 2,00m und für Radfahrer und Rollstuhlfahrer 2,00m – 3,00m breit sein, sodass ein ausreichender Sicherheitsraum entsteht. Die Breite der Wartefläche sollte größer gleich 4,00m betragen. Da dies außer bei Neubauten selten realisiert werden kann, darf in Ausnahmefällen eine Mittelinsel mit einer geringeren Breite als als 2,00m Breite angesetzt werden, um Fußgängern und Radfahrern dennoch einen Schutzraum bei der Querung der Fahrbahn bieten zu können⁸⁸.

Die Sicherheit ist Hauptvorteil der Mittelinsel. Nachteilig ist die benötigte Breite des Straßenquerschnitts, weil nach Aufbringen einer Mittelinsel jeweils zwei Fahrspuren mit einer Mindestbreite von 3,25 m vorhanden sein müssen⁸⁹. Dies gewährleistet eine optimale Befahrbarkeit für alle Verkehrsteilnehmer und einen problemlosen Winterdienst.

⁸⁵BRÄUER und DREAGER 2001 S. 60

⁸⁶GLASL et al. 1993, S. 85

⁸⁷GDV 2013, S. 5

⁸⁸FGSV 2006c, S. 89

⁸⁹ebd., S. 89

Es bestehen keine Restriktionen bezüglich eines Mindestabstandes von Mittelinseln zu einer Lichtsignalanlage. Daher kann sie im Gegensatz zum Fußgängerüberweg auch knotenpunktsnah angebracht werden und eignet sich somit besser für teilsignalisierte Knotenpunkte, da Mehrwege minimiert werden können.



Abbildung 8.3: Mittelinsel

8.1.3 Signalisierte Fußgängerfurten an Knotenpunkten

Bei starkem Verkehrsaufkommen - vor allem im Schwerverkehr - und hohen Geschwindigkeiten ist es sinnvoll, eine Fußgängerlichtsignalanlage (FLSA) wie in Abbildung 8.4 anzubringen, da der Fußgänger bei GRÜN an der Fußgängerfurt gegenüber dem Kfz-Verkehr bevorzugt ist. Unverträgliche Ströme sind während der Freigabezeit gesperrt. Konfliktpunkte gibt es an Fußgängerfurten im Zuge von Lichtsignalanlagen an Knotenpunkten. Hier sind die Fußgänger häufig nur bedingt verträglich geführt.

Die Breite der Fußgängerfurt richtet sich nach der Anzahl der querenden Fußgänger und den örtlichen Gegebenheiten, sollte jedoch ein Mindestmaß von 4,00 m aufweisen⁹⁰.

Mit 14,7 % der Gesamtunfälle beim Überschreiten der Fahrbahn auf innerörtlichen Strecken, ist die Fußgängerfurt mit Fußgängerlichtsignalanlage die unsicherste Querungsanlage im Vergleich zu Fußgängerüberweg und Mittelinsel. Grund dafür ist, dass zum einen bei einer bedingt verträglichen Führung von Fußgängern mit abbiegenden Kraftfahrzeugen der Vorrang missachtet wird und zum anderen bei zu langen Wartezeiten die Anzahl der Rotgeher zunimmt.

Bei der Gestaltung sollte darauf geachtet werden, dass die Fußgängerfurt so nah wie möglich an den Kreuzungspunkten des Fußgängerwegenetzes liegen, sodass keine Umwege entstehen und der Fußgänger die Querungsanlage auch nutzt⁹¹. Dieses Kriterium kann an

⁹⁰FGSV 2006c, S. 91

⁹¹BRÄUER und DREAGER 2001, S. 68ff.

teilsignalisierten Knotenpunkten aufgrund der nötigen Abrückung nicht eingehalten werden.

Die Investitions- und Unterhaltungskosten sind im Vergleich zum Fußgängerüberweg und der Mittelinsel durch die benötigte Technik am höchsten.



Abbildung 8.4: Fußgängerfurt mit Lichtsignalanlage

8.1.3.1 Über- und Unterführungen

Fußgängerüber- und unterführungen sind Querungsanlagen, welche die Fußgänger über beziehungsweise unter der Straße hindurchführen und somit eine räumliche Trennung der Verkehrsströme schaffen⁹². Da keine Konfliktpunkte zwischen Fußverkehr und Kfz-Verkehr entstehen, ist das niedrige Unfallrisiko ein großer Vorteil gegenüber den zuvor beschriebenen Querungsanlagen. Zusätzlich entstehen für den FG und auch den Fahrzeugführer keine Wartezeiten.

Sowohl aus städtebaulicher Sicht als auch aus Kosten- und Akzeptanzgründen bei den Nutzern sind Über- und Unterführungen nur in Ausnahmefällen sinnvoll⁹³. Sie werden daher nicht weiter in die Überlegungen einbezogen.

8.1.4 Adaption der Querungsanlagen auf die Teilsignalisierung

In diesem Abschnitt werden die vier verbleibenden Führungsmöglichkeiten auf die verschiedenen Fälle der Teilsignalisierung adaptiert, die Führungsformen in Schemazeichnungen visualisiert und anschließend hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit bewertet. Hierbei ist zwischen Haupt- und Nebenrichtung sowie den unterschiedlichen Teilsignalisierungsfällen aus Kapitel 5 zu unterscheiden. Eine signalisierte Fußgängerführung kann bei einer Teilsignalisierung maximal in einem Hauptstromast erfolgen. Alle anderen Beziehungen bleiben

⁹²FGSV 2002, S. 18

⁹³BRÄUER und DREAGER 2001, S. 77

unsignalisiert. Daher scheidet neben den Leistungsfähigkeitsüberlegungen aus Kapitel 7 eine Teilsignalisierung an Kreuzungen aus, da zu viele ungesicherte Querungen vorhanden sind.

Grundsätzlich ergeben sich aufgrund der notwendigen Abrückungen der Haltlinien an teilsignalsiierten Knotenpunkten Umwege für Fußgänger. Diese sind außerorts größer als innerorts. Die Querungsanlagen sollten daher möglichst so attraktiv gestaltet sein, dass sie von den Benutzern auch angenommen werden und es nicht zu ungeordneten Querungen kommt.

8.1.4.1 Fußgängerführung in Hauptrichtung

In der Hauptrichtung können je nach Fahrbahnbreite und Lage Fußgängerüberwege mit und ohne bauliche Ergänzung, Mittelinseln sowie Fußgängerfurten zur Anwendung kommen. Wenn nach Tabelle 8.1 bzw. 8.2 eine Fußgängerfurt mit Fußgängerlichtsignalanlage vorgesehen werden muss, so bedingt dies die Teilsignalisierungsfälle TS78F bzw. TS23F.

Die Tabellen 8.3 und 8.4 zeigen die möglichen Kombinationen der Querungsanlagen in der Hauptrichtung. Beim Fall ohne Furten (TS2378) ergeben sich mehr Möglichkeiten als beim Fall mit einer Fußgängerfurt, da hier die Querungsart in der einen Zufahrt bereits vorab festgelegt ist.

Die möglichen Führungen sind für den Fall TS78F in den Abbildungen 8.5 bis 8.8 skizziert. Die dargestellten Möglichkeiten können prinzipiell auch auf die anderen Knotenpunkttypen übertragen werden. Wichtig ist in allen Fällen, dass Fußgängerüberwege aus Sicherheitsgründen einen ausreichend großen Abstand zum Signalgeber haben. Dies ist auch in den entsprechenden gesetzlichen Vorgaben geregelt. Die Mittelinseln sind hingegen variabel und können auch näher an den Signalgeber herangerückt werden.

TS2378		Z3				
		Z0	ZFGÜ	ZFGÜ+	ZMI	ZFLSA
Z1	Z0	X	X	X	X	
	ZFGÜ	X	X	X	X	
	ZFGÜ+	X	X	X	X	
	ZMI	X	X	X	X	
	ZFLSA					

Tabelle 8.3: Mögliche Querungsanlagen für den Teilsignalisierungsfall TS2378

TS78F		Z3				
		Z0	ZFGÜ	ZFGÜ+	ZMI	ZFLSA
Z1	Z0					X
	ZFGÜ					X
	ZFGÜ+					X
	ZMI					X
	ZFLSA					

Tabelle 8.4: Mögliche Querungsanlagen für den Teilsignalisierungsfall TS78F

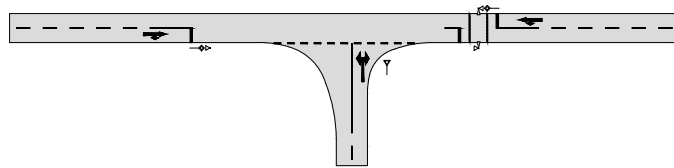


Abbildung 8.5: Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F ohne Querungshilfe links

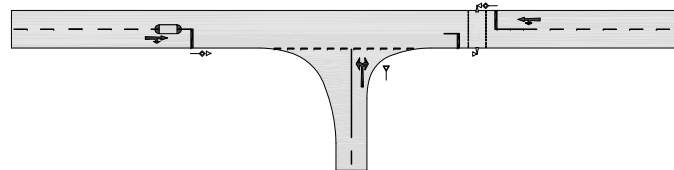


Abbildung 8.6: Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F mit Mittelinsel links

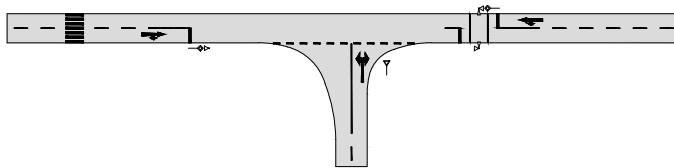


Abbildung 8.7: Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F mit FGÜ links

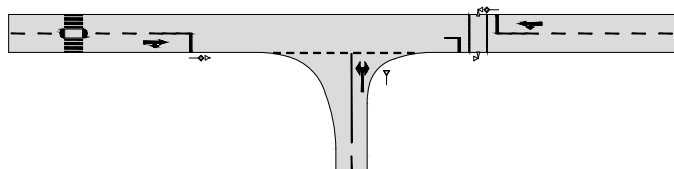


Abbildung 8.8: Fußgängerquerung in der Hauptrichtung bei AS0EI/TS78F mit FGÜ und Mittelinsel links

8.1.4.2 Fußgängerführung in Nebenrichtung

Zunächst muss für die Nebenrichtung überprüft werden, ob das dort vorhandene Queraufkommen eine Fußgängerfurt mit Fußgängerlichtsignalanlage notwendig macht. Ist dies der Fall, so kann keine Teilsignalisierung angewendet werden. Der Knotenpunkt muss in diesem Fall mit einer Vollsignalisierung ausgerüstet werden, da es ansonsten zu Widersprüchen mit der StVO und der RiLSA kommt (vgl. Kapitel 5).

Es kann in der Nebenrichtung zwischen knotenpunktsnahen und knotenpunktsfernen Führungen unterschieden werden.

Erstere bieten den Vorteil einer direkten Führung und einer höheren Akzeptanz auf Fußgängerseite. Hierzu zählt ein Tropfen, der gleichzeitig als Mittelinsel dient. Knotenpunktsferne Lösungen bedeuten einen Mehrweg für Fußgänger, worauf diese sehr sensibel reagieren und die Anlage im Zweifel ablehnen. Knotenpunktsferne Lösungen (Fußgängerüberweg oder Mittelinsel) sind daher zu vermeiden, obgleich sie eine höhere Sicherheit und einen besseren Verkehrsablauf gewährleisten. Ein Einsatz kann erfolgen, wenn es die Fußwegebeziehungen, insbesondere die Anzahl, am Knotenpunkt erlauben. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn es ausgeprägte Fußgängerströme nicht entlang der Hauptrichtung gibt oder diese an Einmündungen auf der anderen Straßenseite geführt werden. Diese Möglichkeit entfällt an Kreuzungen. Mögliche Lösungen für die Fußgängerführung in der Nebenrichtung sind in den Abbildungen 8.9 bis 8.11 dargestellt.

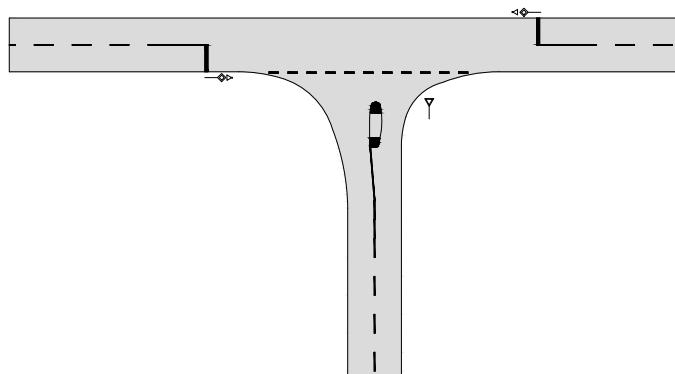


Abbildung 8.9: Fußgängerquerung in der Nebenrichtung mit Tropfen (knotenpunktsnah)

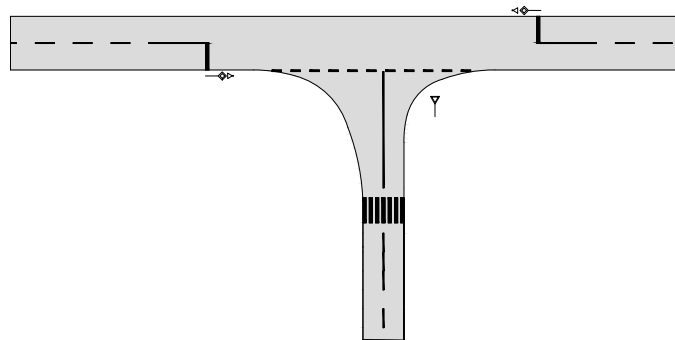


Abbildung 8.10: Fußgängerquerung in der Nebenrichtung mit Fußgängerüberweg (knotenpunktsfern)

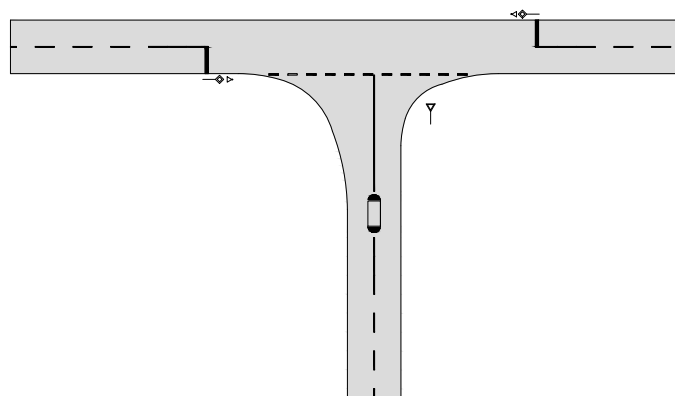


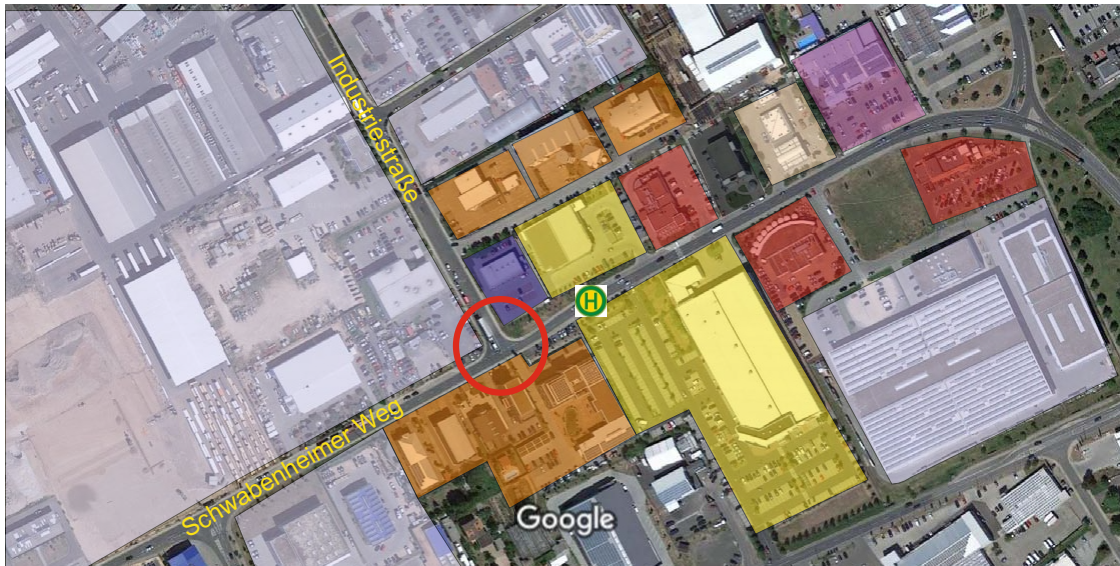
Abbildung 8.11: Fußgängerquerung in der Nebenrichtung mit Mittelinsel (knotenpunktsfern)

8.1.5 Empirische Beobachtungen zum Querungsverhalten

Im Rahmen der empirischen Erhebungen zum Verkehrsablauf wurden auch Analysen zum Fußgängerverhalten angestellt. Folgende Ziele wurden verfolgt:

- Lassen sich Verhaltensmuster erkennen?
- Wo treten Konflikte mit dem Kraftfahrzeugverkehr auf?
- Wo wird die Fahrbahn gequert?

Das Untersuchungsgebiet ist geprägt von Gewerbe und Einzelhandel (siehe Abbildung 8.12). Wohnnutzungen liegen weit entfernt. Quelle-Ziel Verkehre spielen daher im Fußverkehr eine untergeordnete Rolle. Fußverkehr findet vor allem von den Gewerbebetrieben hin zu den Versorgungseinrichtungen (Schnellrestaurants, Supermärkte, Bäckereien) statt. Das Gebiet wird außerdem von einer Buslinie durchfahren. Es kommt somit auch zu Fußverkehr zwischen der Haltestelle und den umliegenden Betrieben.










	Gewerbebetriebe		Supermärkte
	Büro / Verwaltung		Schnellrestaurants
	Kfz-Werkstätten		Tankstelle
	Fitnesszentrum		

Abbildung 8.12: Umfeldnutzungen am Knotenpunkt 1
Kartenbasis: Google Earth

Es stand das Videomaterial des Knotenpunkts 1 von Montag bis Donnerstag (30.11.2015 bis 4.12.2015) jeweils zwischen 14 und 17 Uhr zur Verfügung. Insgesamt querten in den 12 ausgewerteten Stunden 75 Fußgänger die Straße in Hauptrichtung und 65 in Nebenrichtung.

Im Schwabenheimer Weg querten 48 Passanten die Straße zwischen den Signalgebern (63%) und 27 Passanten davor (37%). Des Weiteren ergibt sich die Tendenz, dass Fußgänger bei hohen Verkehrsstärken die Sperrzeit des Hauptstroms abwarten und dann die Fahrbahn überqueren. Teilweise war dies zufällig, aber einige warteten diese Phase bewusst ab, um dann durch die entstandenen Zeitlücken die Straße zu passieren. Ist jedoch stockender Verkehr oder wenig bis kein Verkehr vorhanden, ergeben sich keine zeitlichen Präferenzen.

In der Nebenrichtung war das Verhältnis zwischen knotenpunktnaher und knotenpunktferner Querung mit 32 zu 33 Fußgängern nahezu ausgeglichen. Knotenpunktfern sind im vorliegenden Fall alle Querungen, die mehr als 12m von der Haltlinie entfernt sind.

Die folgenden Schnappschüsse aus den Videodaten demonstrieren das Querungsverhalten und die Konfliktsituationen. Abbildung 8.13 und Abbildung 8.14 zeigen querende Fußgänger in der Hauptrichtung, die die Sperrzeit im Hauptstrom abgewartet und zwischen den Signalgebern gequert haben. Im Gegensatz dazu querten die Passanten in den Abbildungen 8.15 und 8.16 die Fahrbahn davor, da in beiden Situationen entweder kein oder stockender Verkehr vorherrschte. Das Querungsverhalten in der Nebenrichtung ist exemplarisch in Abbildung 8.18 dargestellt. Dem Fußgänger ist deutlich anzumerken, dass er versuchte, den Kreuzungsbereich schnellstmöglich vor dem abbiegenden Fahrzeug zu räumen. Eine ähnliche Situation trat auch in der Hauptrichtung mit einem einbiegenden Fahrzeug auf, wie Bild 8.17 zeigt.

Die angestellten Beobachtungen zeigen, dass Zeitlücken den Fußgängern helfen, die Fahrbahn zu überqueren. Ein Verzicht auf Querungshilfen wie im vorliegenden Fall ist jedoch kritisch zu bewerten, da häufig Konflikte zwischen querenden Fußgängern und ein- bzw. abbiegenden Fahrzeugen bestehen. Im Rückblick war die Fußgängerführung während der empirischen Erhebung am Knotenpunkt 1 somit mangelhaft und dürfte in dieser Form nicht für eine dauerhafte Lösung angewandt werden.



Abbildung 8.13: Nutzung von Zeitlücken im Hauptstrom für die Querung



Abbildung 8.14: Querung im inneren Knotenpunktbereich während der Sperrzeit



Abbildung 8.15: Querung bei geringem Verkehr



Abbildung 8.16: Querung bei stockendem Verkehr



Abbildung 8.17: Konfliktsituation mit einbiegendem Fahrzeug



Abbildung 8.18: Konfliktsituation mit abbiegendem Fahrzeug

8.2 Radverkehrsführung

An teilsignalisierten Knotenpunkten gibt es keine speziellen Anforderungen zur Führung des Radverkehrs im Vergleich zu vorfahrtgeregelten oder vollsignalisierten Knotenpunkten.

Für Radfahrer aus den Nebenrichtung können sich vermutlich sogar geringe Vorteile im Vergleich zu einer Vollsignalisierung ergeben, da sie jederzeit rechts in den Hauptstrom einbiegen können ohne eine Freigabezeit abwarten zu müssen. Detektoren sollten auch linkseinbiegende Radfahrer auf der Fahrbahn erkennen, damit diesen auch die Zeitlücken im Hauptstrom geschaffen werden können.

Konflikte könnten an Kreuzungen vor allem zwischen einbiegenden Kraftfahrzeugen und geradeausfahrenden Radfahrern aus der Nebenrichtung entstehen, wenn die Aufmerksamkeit der Autofahrer zu stark auf die Fahrzeuge im Hauptstrom fokussiert ist und die Radfahrer dadurch übersehen werden, weshalb auch aus diesem Grund eine Teilsignalisierung für Kreuzungen nicht empfohlen wird. In der Hauptrichtung sollten die Haltlinien des Radverkehrs wie bei vollsignalisierten Knotenpunkten vor denen des Kfz Verkehrs angebracht werden, um die Radfahrer in das Sichtfeld der Autofahrer zu rücken.

In den empirischen Beobachtungen konnten keine Konfliktsituationen im Radverkehr festgestellt werden. Die Radfahrer fahren allesamt im Kfz-Verkehr mit.

8.3 Zusammenschau

Die Untersuchungen zur Integration des Fuß- und Radverkehrs in teilsignalisierte Knotenpunkte haben gezeigt, dass die Belange dieser Verkehrsteilnehmergruppen bereits in der Anfangsplanung berücksichtigt werden müssen. Dies gilt vor allem für den Fußverkehr, da es sonst zu konfliktbehafteten Querungssituationen kommt. Die Wahl des anwendbaren Teilsignalisierungsfalles hängt demnach maßgeblich auch von den vorhandenen Fußgängerströmen und Verkehrsstärken ab.

Der Entscheidungsbaum aus Abbildung 8.19 unterstützt bei der Auswahl eines Teilsignalisierungsfalles unter Berücksichtigung der Fußgängerbelange. Zunächst wird geprüft, ob eine Teilsignalisierung aus Fußgängersicht möglich ist. Es schließt sich die Überprüfung im MIV (siehe folgendes Kapitel) an. Wenn die Fragen positiv beantwortet sind, kann die Einmündung mit einer Teilsignalisierung versehen werden. Falls nicht, sollte eine Vollsignalisierung oder ein Umbau erwogen werden.

Der Fall ohne Fußgängerfurten (TS2378) bietet zwar im Kfz-Verkehr die größten Potentiale, kann aber nicht die Anforderungen an eine sichere Fußgängerführung gewährleisten. Er kann daher nur an Stellen zum Einsatz kommen, an denen mit einem geringen bis gar keinem Fußgängeraufkommen zu rechnen ist. Dies ist vor allem außerorts der Fall. Für

eine gesicherte Fußgängerführung kommt nur der Fall mit Fußgängerfurt rechts (TS78F) infrage. Er kann angewendet werden, wenn entweder nur ein einseitiger Querungsbedarf vorhanden ist oder es gelingt, die Fußgängerströme gezielt über diese Zufahrt zu lenken. Andernfalls sollte eine Vollsignalisierung präferiert werden.

Als beste Querungsanlage erweist sich die Mittelinsel, da sie auch in unmittelbarer Nähe zu den Signalgebern aufgestellt werden kann und somit Umwege vermieden werden können. Sie kann sowohl beim Fall TS2378 in beiden Zufahrten als auch beim Fall TS78F in der linken Zufahrt angewendet werden.

Im Radverkehr bestehen weniger Bedenken. Dieser sollte wenn möglich in der Nebenrichtung auf der Fahrbahn mit dem Kfz-Verkehr ohne bauliche Anlagen geführt werden. In der Hauptrichtung sollten die Haltlinien des Radverkehrs vor denen des KFZ Verkehrs liegen und entsprechende Aufstellflächen geschaffen werden, wie dies auch bei vollsignalisierten Knotenpunkten praktiziert wird.

An Kreuzungen ist eine Teilsignalisierung auch im Hinblick auf die Fußgängerführung und die Radverkehrsführung in den Nebenrichtungen nicht angeraten. Es entstehen viele ungesicherte Konfliktpunkte mit dem Kfz-Verkehr. Eine weitere Betrachtung findet daher nicht statt.

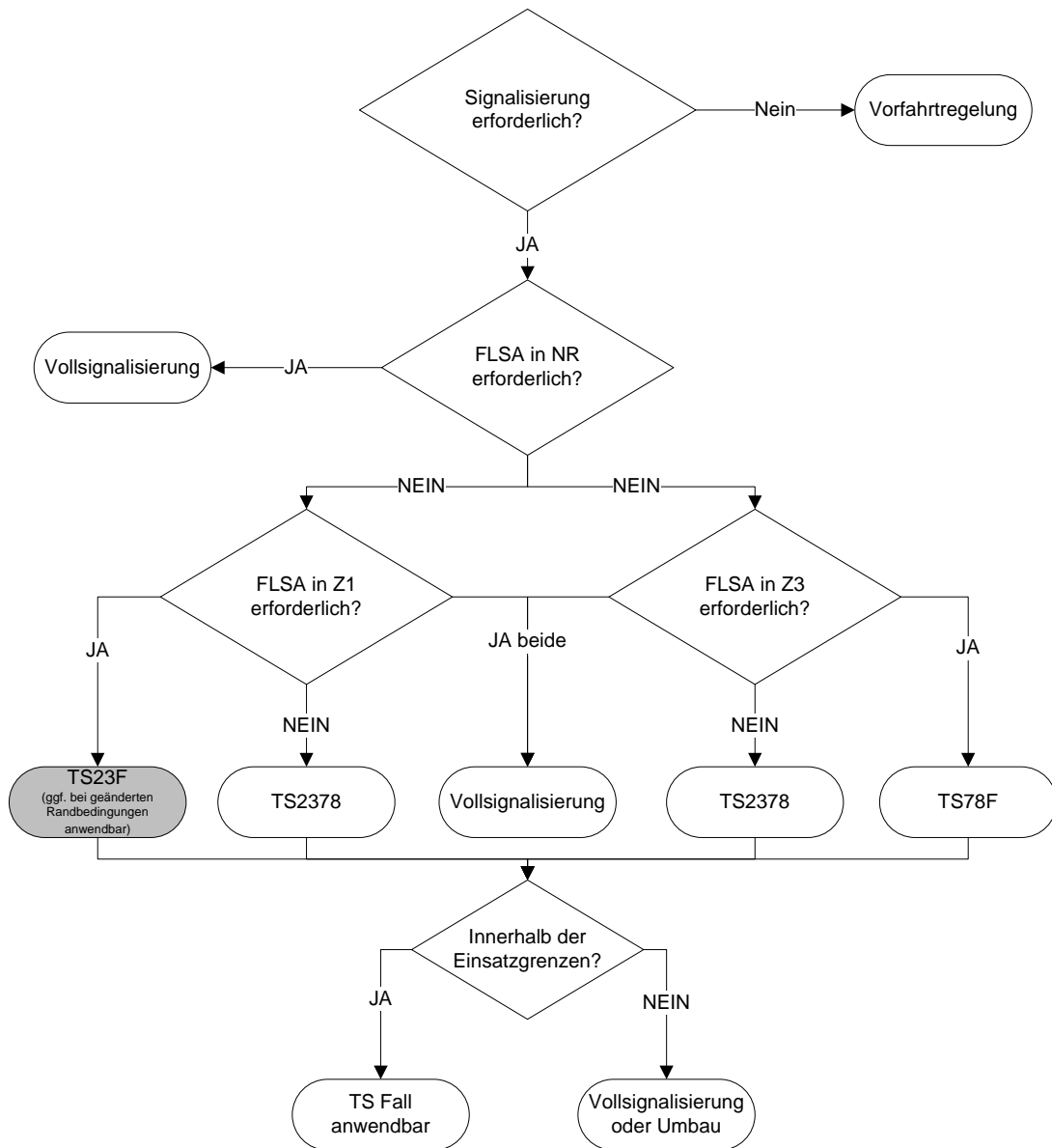


Abbildung 8.19: Entscheidungsbaum

9 Ableitung der Einsatzgrenzen im MIV für Einmündungen

In diesem Kapitel werden für Einmündungen die Einsatzgrenzen der Teilsignalisierung herausgearbeitet. Kreuzungen finden vor allem aufgrund der problematischen Fußgänger- und Radverkehrsführung und der sich bereits in Kapitel 7 gezeigten geringeren Potentiale keine weitere Betrachtung.

Für die Ermittlung der Einsatzgrenzen werden nur die Kombinationen aus Ausbaustandard, Teilsignalisierungsfall und Signalprogramm herangezogen, die sich bereits in Kapitel 7 als zweckmäßig erwiesen haben. Diese sind in Abbildung 9.1 grün hervorgehoben. Hierunter fallen die Teilsignalisierungsfälle mit einer Fußgängerfurt rechts (TS78F) sowie ohne Furt (TS2378) mit den beiden Signalprogrammen 6020 und 9030. Das Programm 9030 zeigte ebenfalls gute Werte, ähnelt jedoch stark dem Programm 9020 und wird daher aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert aufgeführt.

Zunächst werden die Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten vorgestellt, auf denen die Ermittlung der Einsatzgrenzen basiert. Die Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten stellen für den Gesamtknoten sowie die Nebenrichtung in Abhängigkeit der Verkehrsstärken in Haupt- (Z1 und Z3) und Nebenrichtung (Z2) die mittleren Verlustzeiten dar. Auf der Abszisse sind die Verkehrsstärken der Nebenrichtung (Z2) in Fahrzeugen pro Stunde aufgetragen. Die Ordinate zeigt die Verkehrsstärke in den Hauptstromzufahrten (Z1, Z3). Die eingefärbten Flächen geben die mittleren Verlustzeitbereiche wider. Die Farbskala reicht von dunkelgrün (0s-10s) über gelb bis lila (80s-90s). Werte darüber sind schwarz eingefärbt. Für die drei verschiedenen Ausbaustandards existieren jeweils Diagramme für die Signalisierungsfälle:

- Fall 0: Vorfahrtregelung ohne Signalisierung
- Fall V: Vollsignalisierung
- TS2378: Teilsignalisierung ohne Fußgängerfurten
- TS78F : Teilsignalisierung mit Fußgängerfurt auf der rechten Seite

sowie die beiden Signalprogramme:

- 6020: $t_U = 60s$ und $t_F = 20s$
- 9030: $t_U = 90s$ und $t_F = 20s$

Eine Teilsignalisierung ist im MIV in erster Linie dann sinnvoll, wenn die Verlustzeiten im Vergleich zu den etablierten Regelungen geringer ausfallen. Für die Auswahl kommen daher folgende Kriterien zur Anwendung:

- Der teilsignalisierte Fall muss mehr als 3s Verlustzeitreduzierung in der Nebenrichtung bringen
- Die Verlustzeit darf nicht mehr als 40s betragen, sonst ist aufgrund der langen Wartezeit keine Regelung sinnvoll
- Die Verlustzeit in der Hauptrichtung darf 40s nicht überschreiten

Die Einsatzgrenzen werden im Folgenden für die drei Ausbaustandards aufgezeigt. In den Matrizen sind die Verkehrsstärken der Haupt- und Nebenrichtung aufgetragen. Ein ungefüllter Kreis bedeutet, dass keine Signalisierung nötig ist. Halbgefüllte Kreise weisen den Einsatzbereich der Teilsignalisierung aus, wohingegen gefüllte Kreise den Bereich der Vollsignalisierung kennzeichnen.

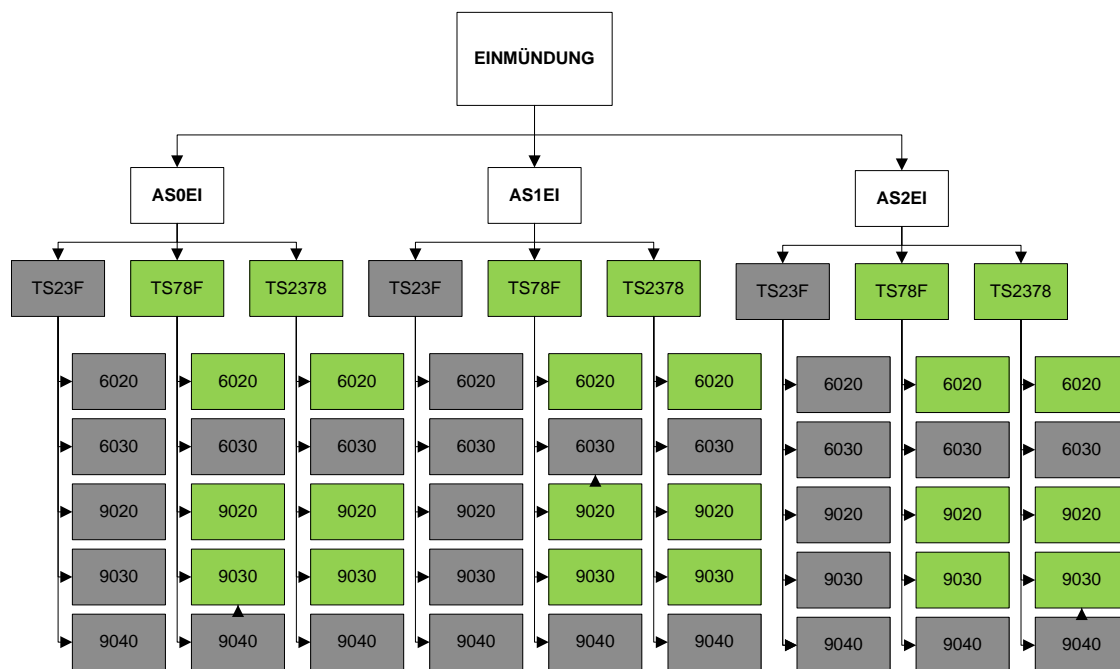


Abbildung 9.1: Auswahl der Teilsignalisierungskombinationen für die Ermittlung der Einsatzgrenzen

9.1 Einmündungen mit Ausbaustandard AS0EI

9.1.1 Diagramme zur Bestimmung der Verlustzeiten

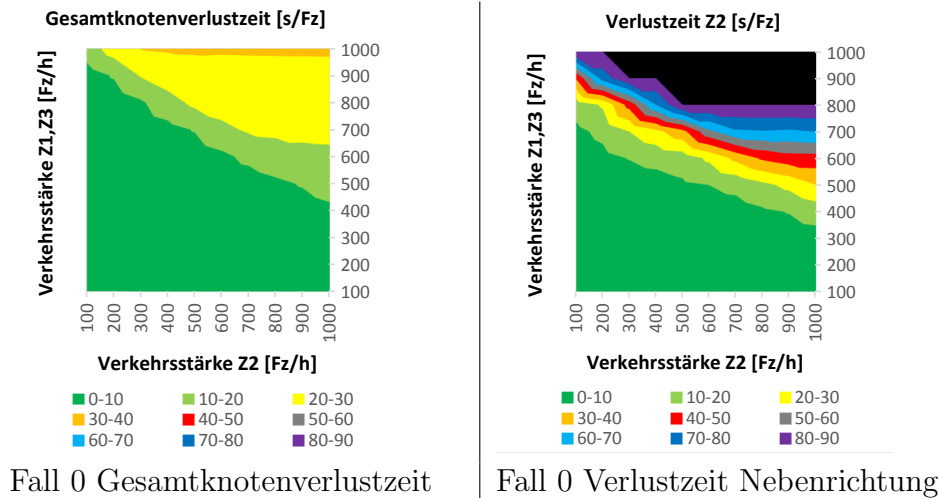


Abbildung 9.2: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS0EI vorfahrtgeregelter Fall

In diesem Abschnitt werden die beiden Fälle TS78F und TS2378 mit dem Signalprogramm 6020 für den Ausbaustandard AS0EI analysiert. Die mittlere Gesamtknotenverlustzeit zeigt schlechtere Werte als bei der Vorfahrtregelung, da Fahrzeuge in der Hauptrichtung zum Anhalten gezwungen werden und somit eine Verlustzeit erhalten. Dennoch ist die Verkehrsqualität am Knotenpunkt weiterhin als akzeptabel zu bewerten. Die großen Vorteile werden bei den Verlustzeiten der Nebenrichtung (Z2) ersichtlich. Es können lange hohe Verlustzeiten bei unveränderten Verkehrsstärken im Vergleich zur Vorfahrtregelung (siehe Abbildung 9.2) reduziert und der Verkehrsablauf somit über einen größeren Bereich aufrecht erhalten werden. Dies zeigt sich wesentlich deutlicher für den Fall TS2378, bei dem Verlustzeiten über 70s gar nicht auftreten.

Das Signalprogramm 9030 weist leicht schlechtere Ergebnisse als das Programm 6020 auf. Die Gesamtknotenverlustzeit erhöht sich. Aufgrund der längeren Sperrzeit müssen Fahrzeuge im Hauptstrom länger warten und es kommt zu einer verstärkten Kolonnenbildung, die sich langsamer auflöst. Im Fall TS78F macht sich die längere Sperrzeit auch negativ bemerkbar, da einbiegende Fahrzeuge im Strom 6 länger vor der Fußgängerfurt warten müssen und es dementsprechend zu Rückstau in die Zufahrt kommt, so dass auch der Strom 4 behindert wird. Diese Problematik gibt es bei TS2378 nicht. Hier sind die Werte für die Gesamtknotenverlustzeit und die Verlustzeit der Zufahrt 2 vergleichbar mit dem Signalprogramm 6020.

In den Abbildungen 9.3 und 9.4 sind die entsprechenden Diagramme abgedruckt.

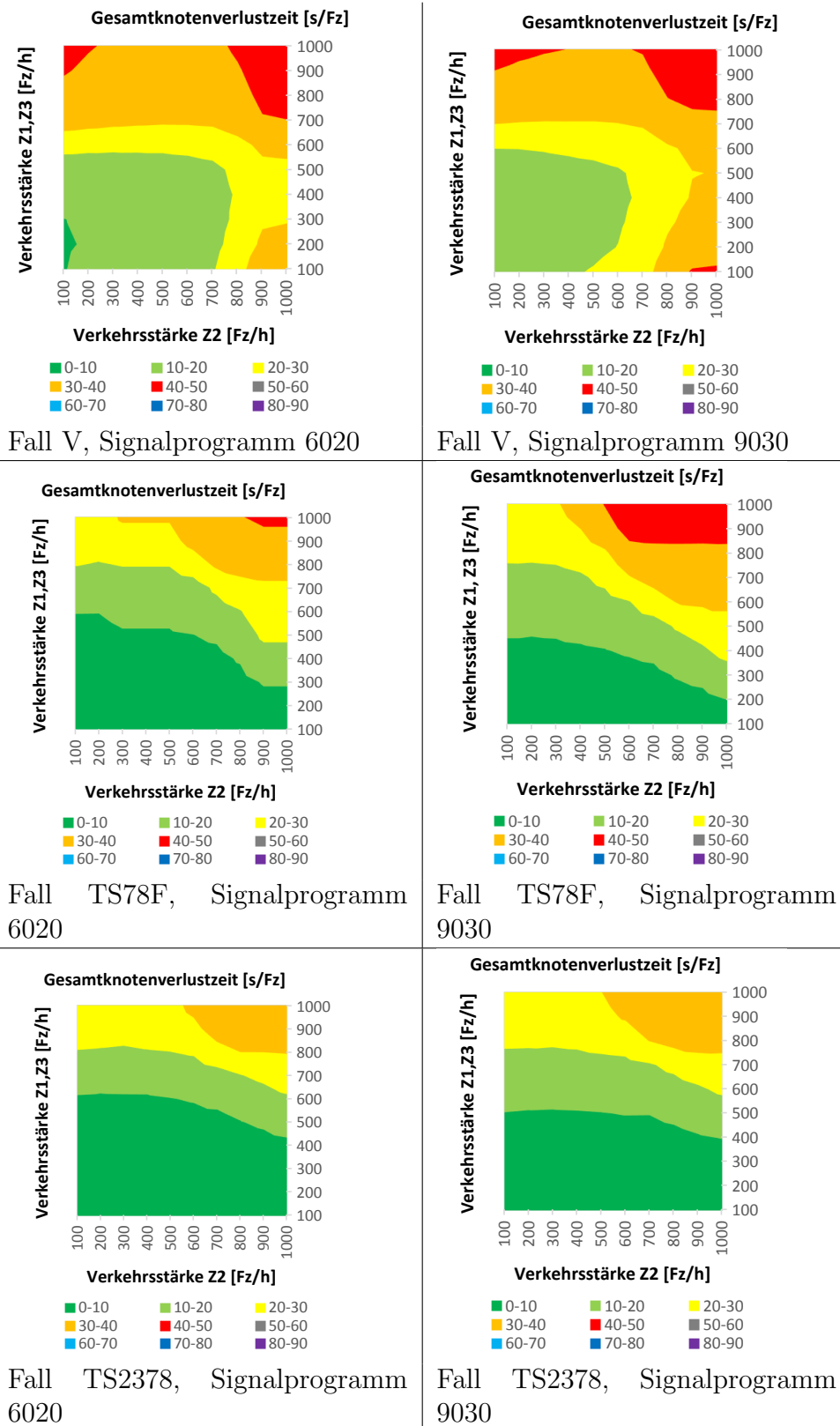
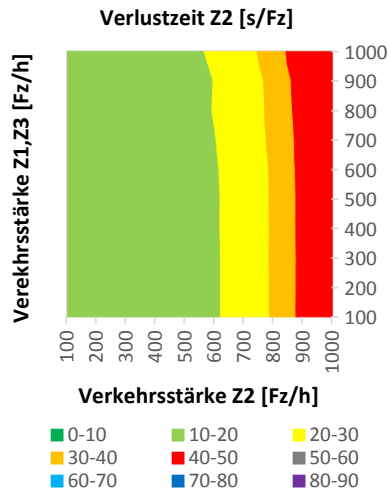
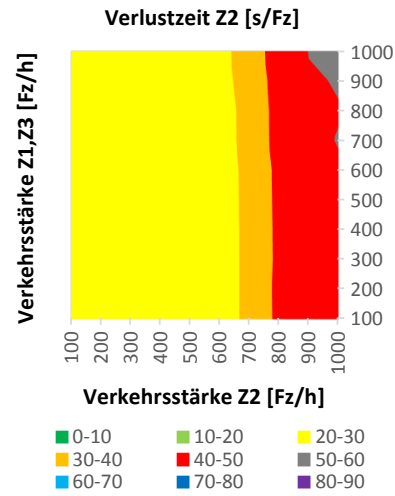


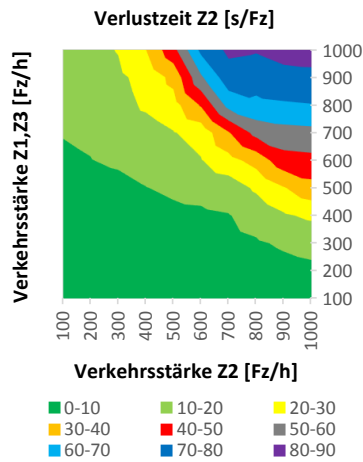
Abbildung 9.3: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS0EI (teil-)signalisierte Fälle



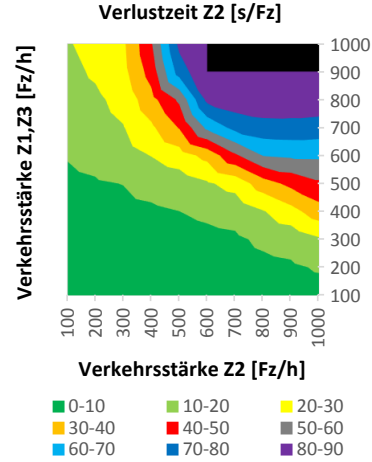
Fall V, Signalprogramm 6020



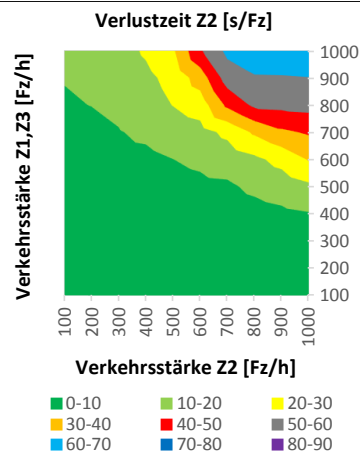
Fall V, Signalprogramm 9030



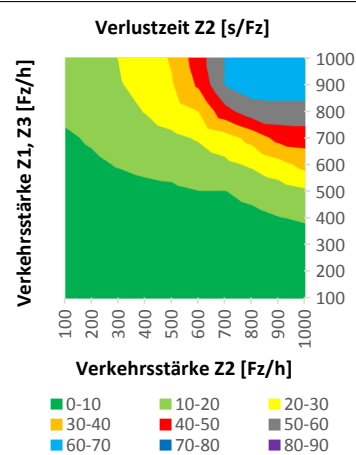
Fall TS78F, Signalprogramm 6020



Fall TS78F, Signalprogramm 9030



Fall TS2378, Signalprogramm 6020



Fall TS2378, Signalprogramm 9030

Abbildung 9.4: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten der Nebenrichtung (Z2) für Ausbaustandard AS0EI

9.1.2 Einsatzgrenzen für Fall mit Furt rechts (TS78F)

Der Teilsignalisierungsfall mit einer Furt rechts der Einmündung (TS78F) kann in Kombination mit dem Ausbaustandard ohne Linksabbiegestreifen keine Verbesserung des Verkehrsablaufs im Vergleich zu den anderen Regelungen erzielen. Lediglich mit dem Signalprogramm 9030 kann eine Teilsignalisierung in einem sehr engen Bereich eingesetzt werden. Hier ergeben sich leichte Vorteile gegenüber einer Vollsignalisierung.

Die Einsatzbereiche für den Fall TS78F können den Matrizen in den Abbildungen 9.5 sowie 9.6 entnommen werden.

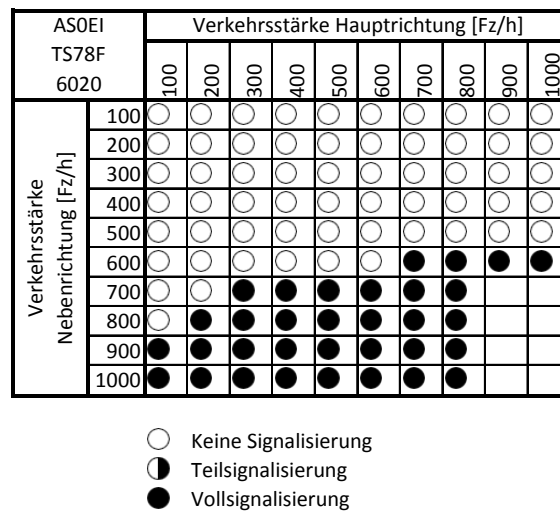


Abbildung 9.5: Einsatzgrenzen für AS0EI, TS78F mit Signalprogramm 6020

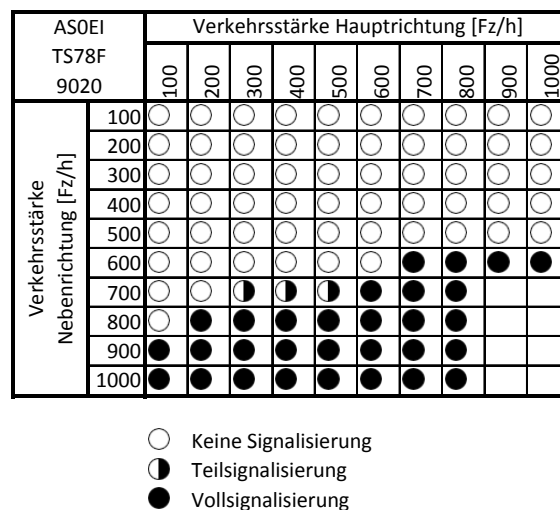


Abbildung 9.6: Einsatzgrenzen für AS0EI, TS78F mit Signalprogramm 9020

9.1.3 Einsatzgrenzen für Fall ohne Furten (TS2378)

Der Teilsignalisierungsfall ohne Furten (TS2378) weist ein größeres Einsatzspektrum auf. Er kann vor allem bei mittleren Verkehrsstärken in der Nebenrichtung um 500 Fz/h und gleichzeitig hohen Verkehrsstärken in den Hauptrichtungszufahrten Anwendung finden. Bei weiter steigenden Verkehrsstärken in der Nebenrichtung empfiehlt sich jedoch der Einsatz einer Vollsignalisierung. Zwischen den beiden Signalprogrammen existieren nur geringe Unterschiede.

Die Einsatzbereiche für den Fall TS2378 können den Matrizen in den Abbildungen 9.7 sowie 9.8 entnommen werden.

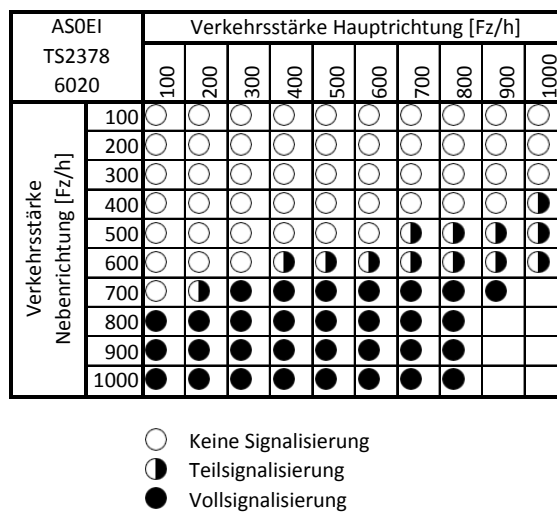


Abbildung 9.7: Einsatzgrenzen für AS0EI, TS2378 mit Signalprogramm 6020

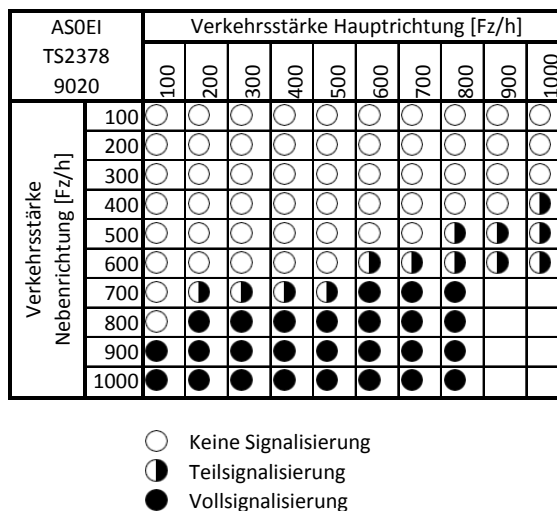


Abbildung 9.8: Einsatzgrenzen für AS0EI, TS2378 mit Signalprogramm 9020

9.2 Einmündungen mit Ausbaustandard AS1EI

9.2.1 Diagramme zur Bestimmung der Verlustzeiten

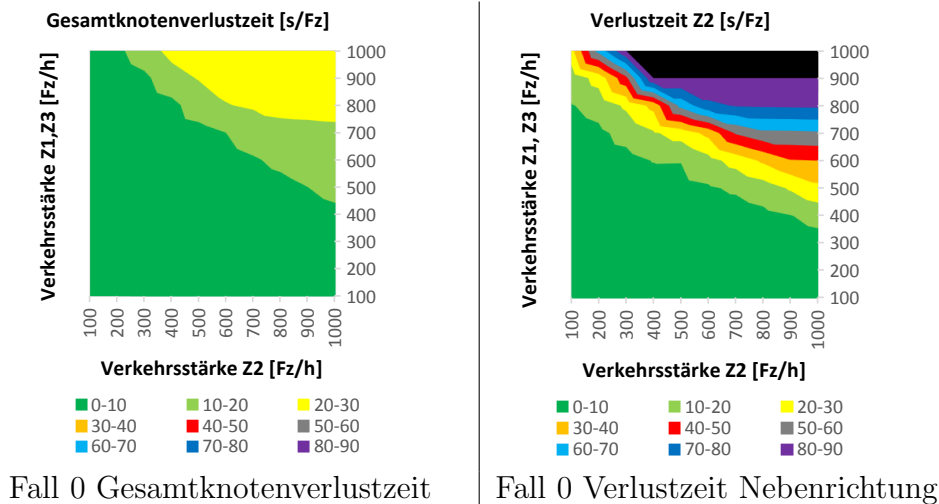


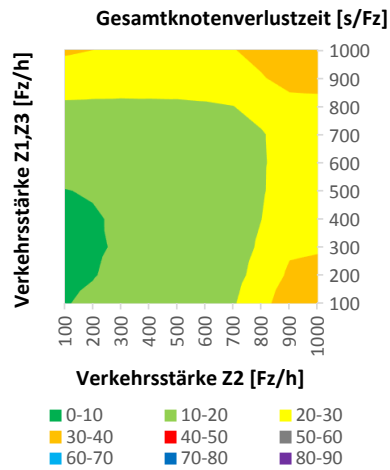
Abbildung 9.9: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS1EI vorfahrt geregelter Fall

Die Einrichtung eines Linksabbiegestreifens in der Hauptrichtung bei AS1EI weist große Vorteile auf. Bereits im vorfahrt geregelten Zustand lassen sich Verlustzeitminimierungen im Vergleich zum Ausbaustandard AS0EI feststellen, da linksabbiegende Fahrzeuge, die sich im Gegenverkehr durchsetzen müssen, nicht mehr die Geradeausfahrer behindern und der Knotenpunkt zu Beginn der Sperrzeit schneller geräumt werden kann. Die problematischen Verlustzeitbereiche treten erst bei deutlich höheren Verkehrsstärken auf. Ein Ausbau der Einmündung erzeugt somit ähnliche Effekte wie eine Teilsignalisierung ohne bauliche Veränderungen, wobei diese für die Nebenrichtung geringer ausfallen.

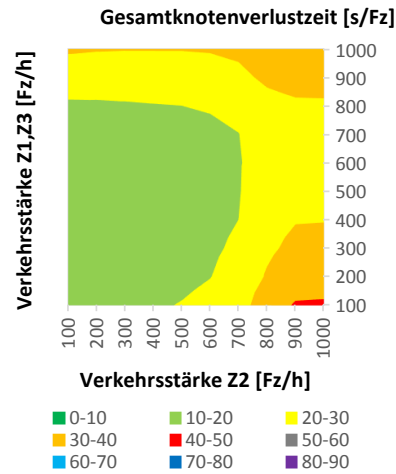
Die Wirkungen der Teilsignalisierung sind bei AS1EI erwartungsgemäß deutlich größer als bei AS0EI. In diesem Fall werden bereits mit dem Fall TS78F ähnliche Ergebnisse erreicht wie bei TS2378 im Ausbaustandard AS0EI.

Im direkten Vergleich zum Signalprogramm 6020 stellen sich mit dem Programm 9030 auch bei AS1EI schlechtere Werte ein. Dies ist wiederum im Fall TS78F am sichtbarsten.

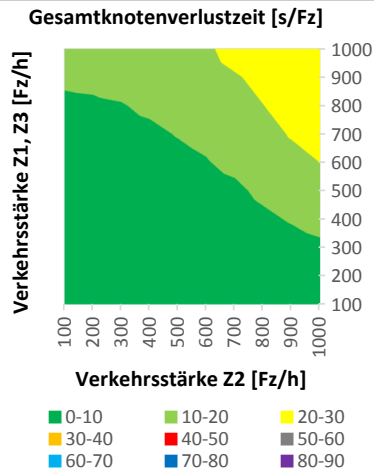
Die Diagramme in Abbildung 9.9 zeigen wiederum die Verlustzeiten für den vorfahrt geregelten Fall, während in den Abbildungen 9.10 und 9.11 die Diagramme für die Teilsignalisierungen zu finden sind.



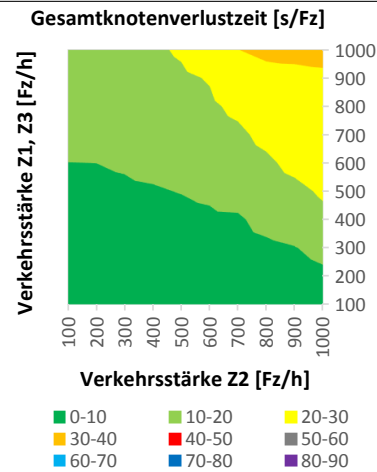
Fall V, Signalprogramm 6020



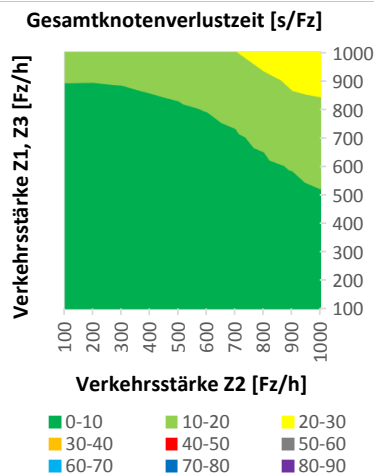
Fall V, Signalprogramm 9030



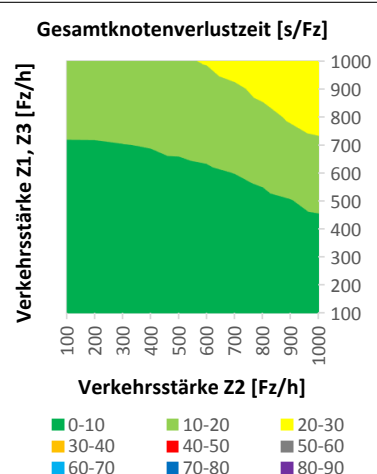
Fall TS78F, Signalprogramm 6020



Fall TS78F, Signalprogramm 9030



Fall TS2378, Signalprogramm 6020



Fall TS2378, Signalprogramm 9030

Abbildung 9.10: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS1EI

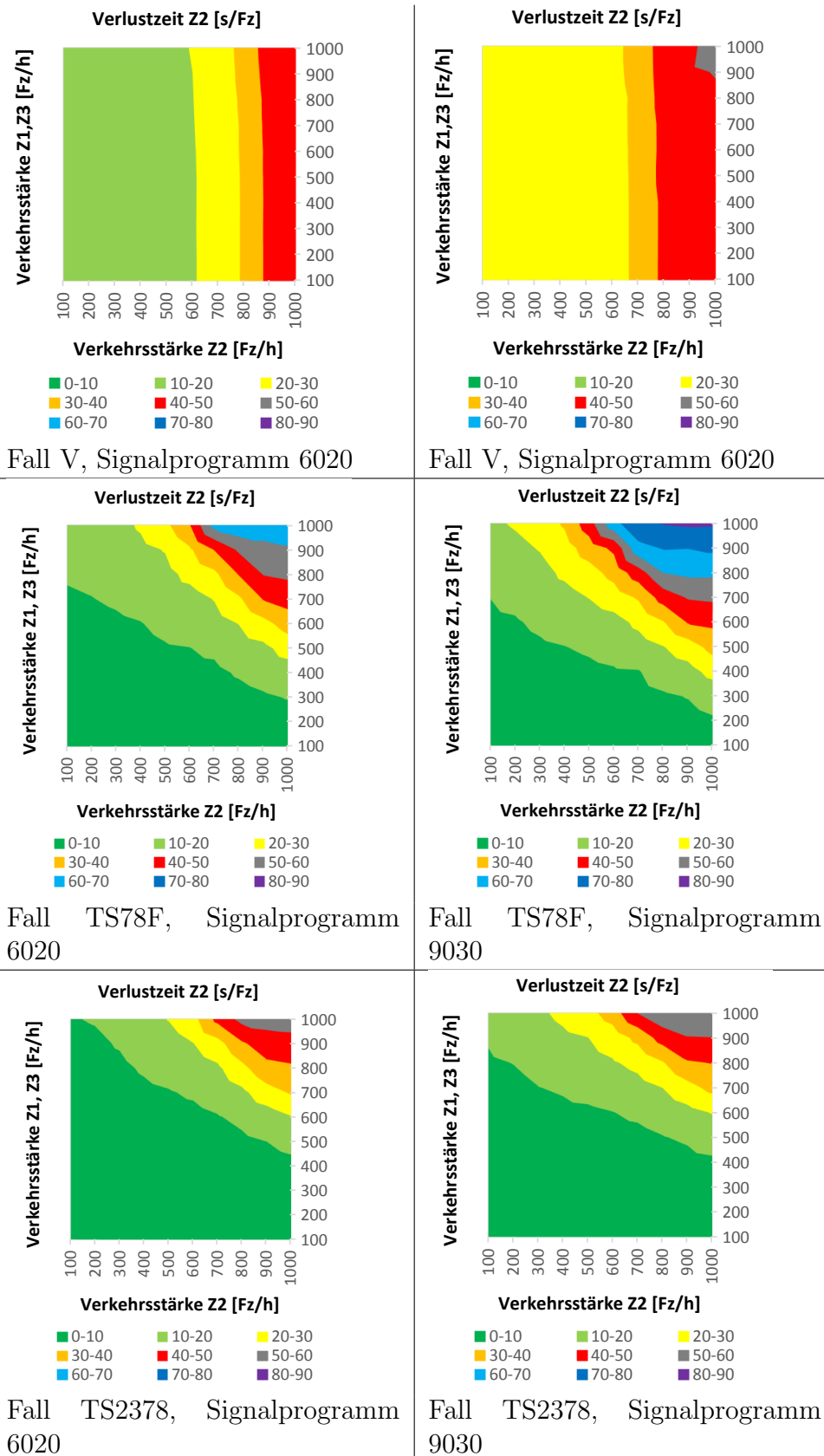


Abbildung 9.11: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten der Nebenrichtung (Z2) für Ausbaustandard AS1EI (teil-)signalisierte Fälle

9.2.2 Einsatzgrenzen für Fall mit Furt rechts (TS78F)

Der Ausbaustandard mit Linksabbiegestreifen in der Hauptrichtung (AS1EI) sorgt für eine Verschiebung des Einsatzbereiches der Teilsignalisierung zu höheren Verkehrsstärken in der Nebenrichtung. Während im Signalprogramm 6020 eine Vollsignalisierung bei sehr hohen Verkehrsstärken in der Nebenrichtung noch eine weitere Verbesserung bringt, ist dies beim Signalprogramm 9030 nicht mehr der Fall. Hier endet der Einsatzbereich bereits schon bei geringeren Verkehrsbelastungen.

Die Einsatzbereiche für den Fall TS78F können den Matrizen in den Abbildungen 9.12 sowie 9.13 entnommen werden.

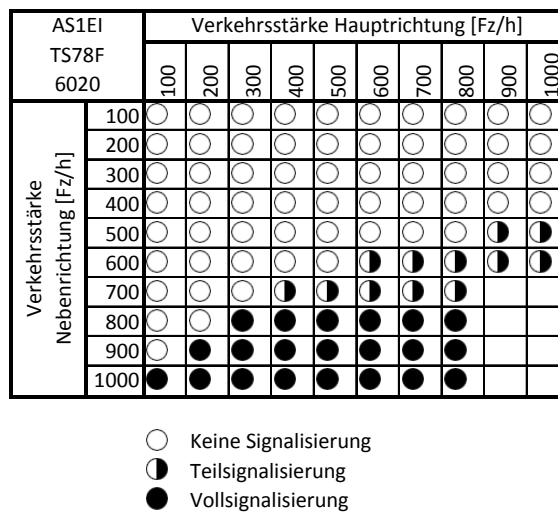


Abbildung 9.12: Einsatzgrenzen für AS1EI, TS78F mit Signalprogramm 6020

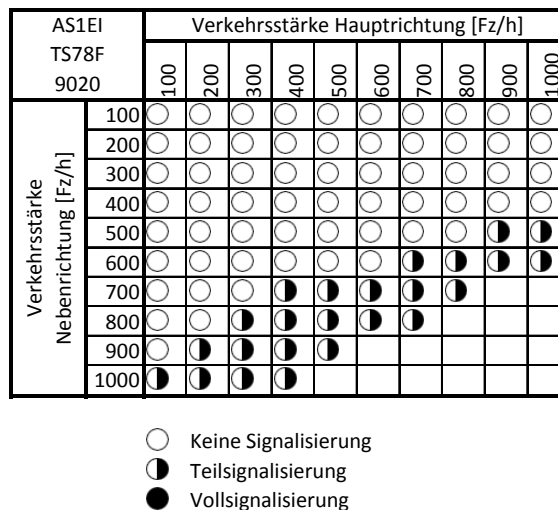


Abbildung 9.13: Einsatzgrenzen für AS1EI, TS78F mit Signalprogramm 9020

9.2.3 Einsatzgrenzen für Fall ohne Furten (TS2378)

Auch im Ausbaustandard AS1EI ist eine Teilsignalisierung ohne Furten (TS2378) leistungsfähiger. Sie führt im Gegensatz zu TS78F bereits bei geringeren Verkehrsstärken zu einer Verbesserung des Verkehrsablaufs. Dieser Zustand hält auch bei größeren Verkehrsstärken an. Lediglich bei sehr hohen Verkehrsstärken in der Nebenrichtung über 800 Fz/h sollte über eine Vollsignalisierung nachgedacht werden. Wiederum kann eine Vollsignalisierung beim Signalprogramm 9020 keine weiteren Verbesserungen herbeiführen.

Die Einsatzbereiche für den Fall TS2378 können den Matrizen in den Abbildungen 9.14 sowie 9.15 entnommen werden.

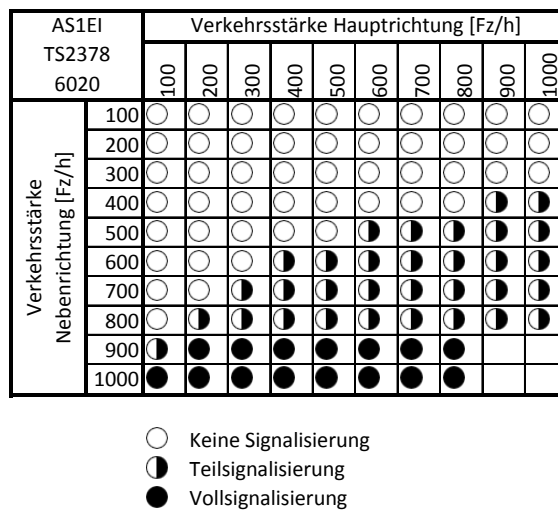


Abbildung 9.14: Einsatzgrenzen für AS1EI, TS2378 mit Signalprogramm 6020

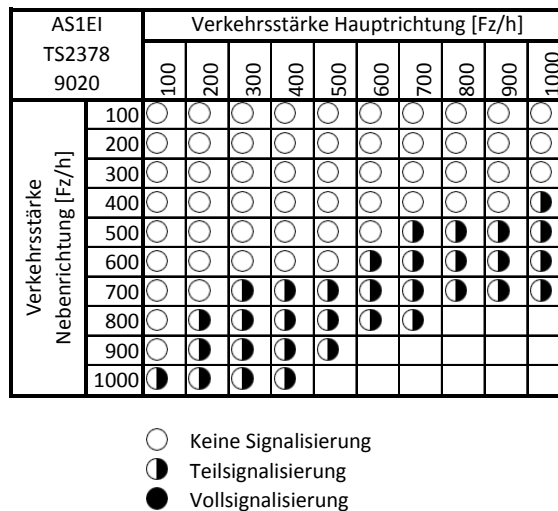


Abbildung 9.15: Einsatzgrenzen für AS1EI, TS2378 mit Signalprogramm 9020

9.3 Einmündungen mit Ausbaustandard AS2EI

9.3.1 Diagramme zur Bestimmung der Verlustzeiten

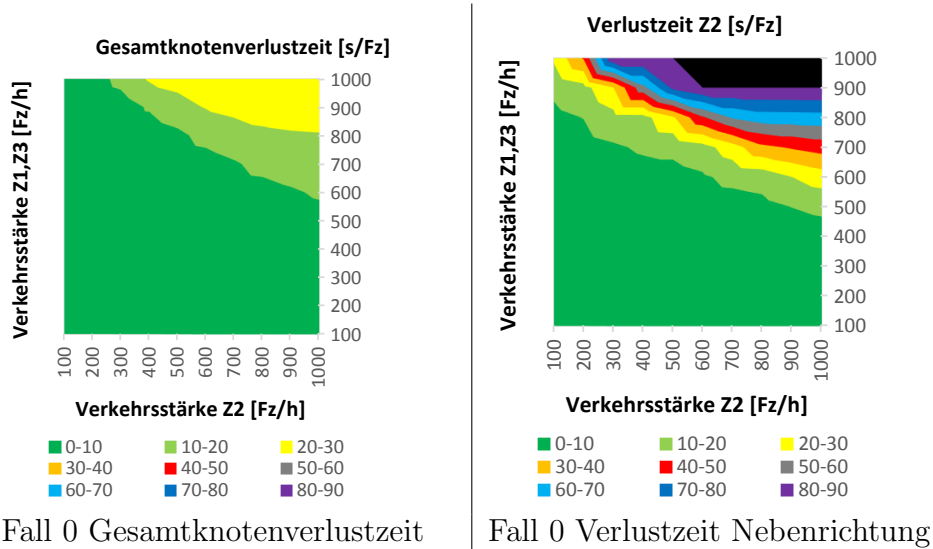


Abbildung 9.16: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS2EI vorfahrts geregelter Fall

Der Ausbaustandard mit jeweils einem separaten Linksabbiegestreifen in der Haupt- und Nebenrichtung (AS2EI) zeigt im Vergleich mit AS1EI nur noch geringe Verbesserungen. Es können nochmals höhere Verkehrsstärken bei gleichbleibender Verlustzeit am Knotenpunkt abgewickelt werden, da nun auch in der Nebenrichtung keine Behinderung durch Ströme verschiedenen Ranges mehr auftreten. Dieser Effekt verpufft jedoch, sobald der Linksabbiegestreifen zugestaut ist, was bei hohen Verkehrsstärken der Fall sein kann.

Die Diagramme in Abbildung 9.16 zeigen wiederum die Verlustzeiten für den vorfahrts geregelten Fall, während in den Abbildungen 9.17 und 9.18 die Diagramme für die Teilsignalisierungen zu finden sind.

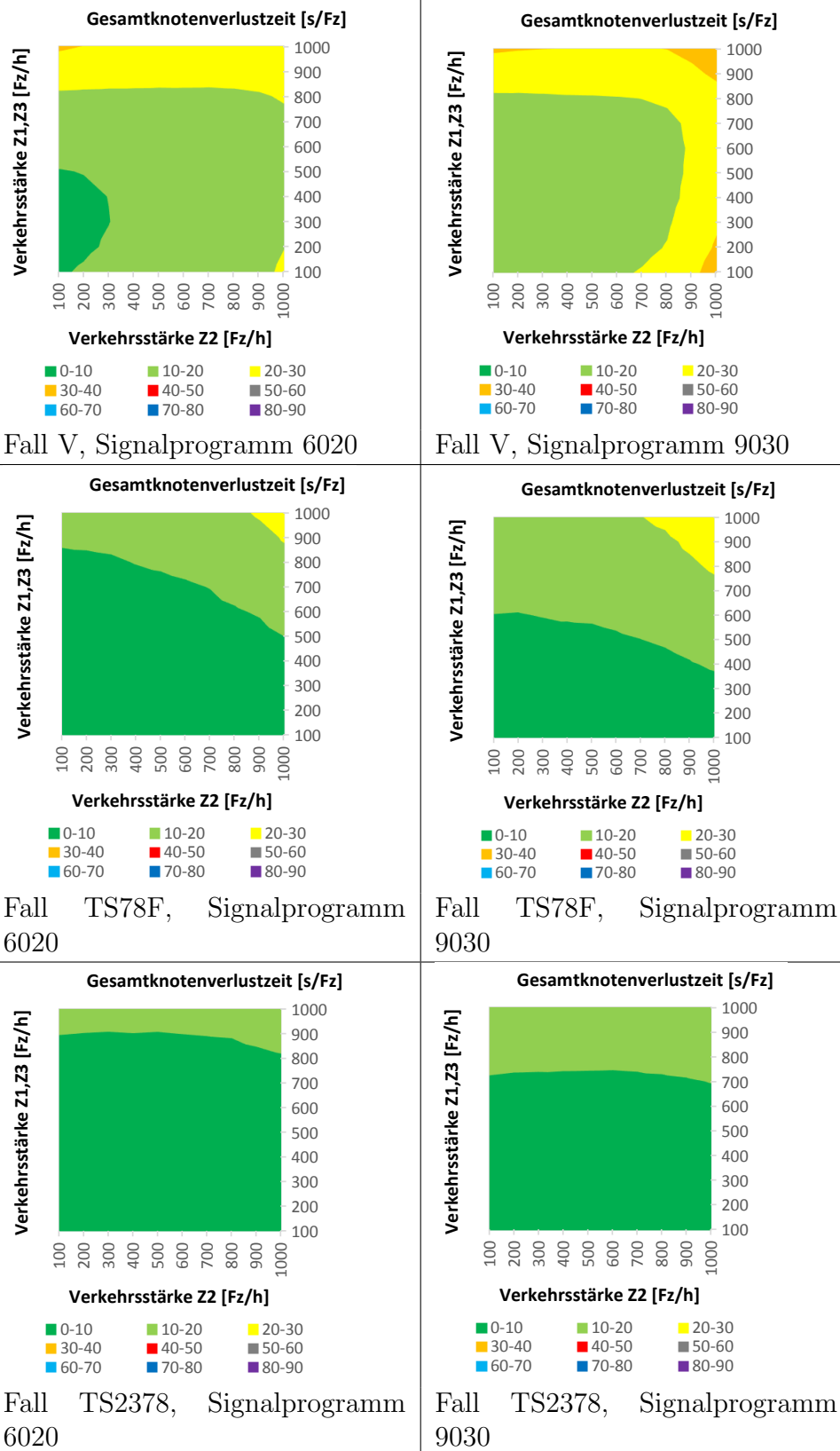
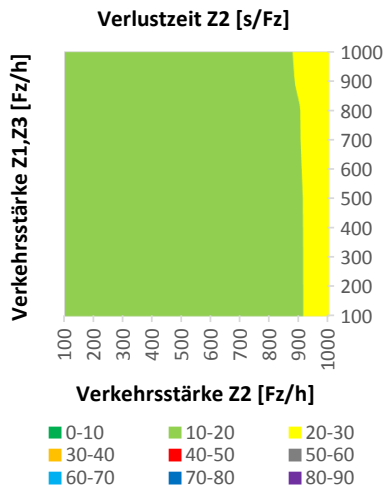
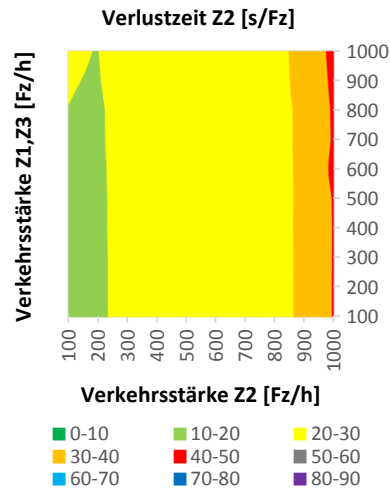


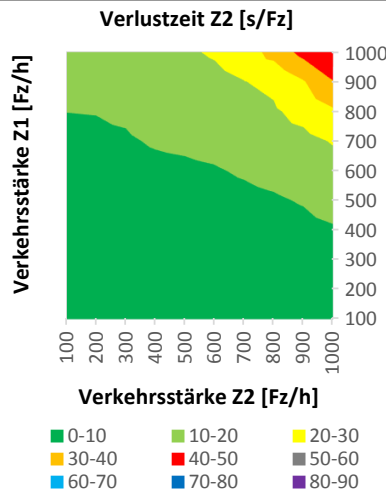
Abbildung 9.17: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Gesamtknotenverlustzeiten für Ausbaustandard AS2EI (teil-)signalisierte Fälle



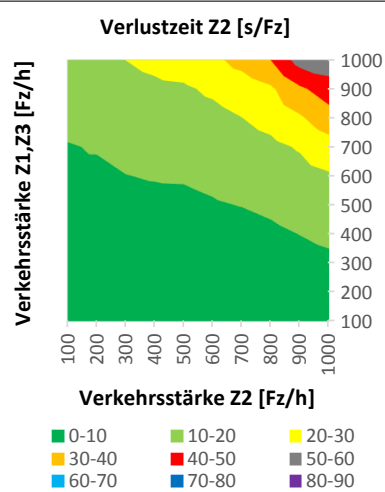
Fall V, Signalprogramm 6020



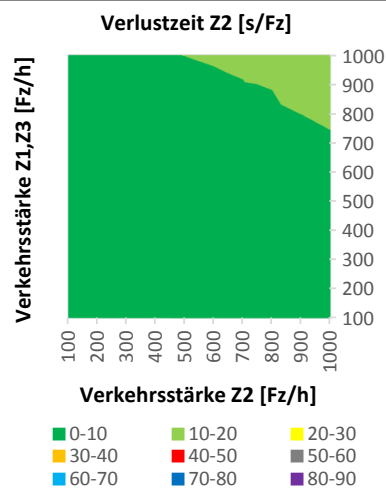
Fall V, Signalprogramm 6020



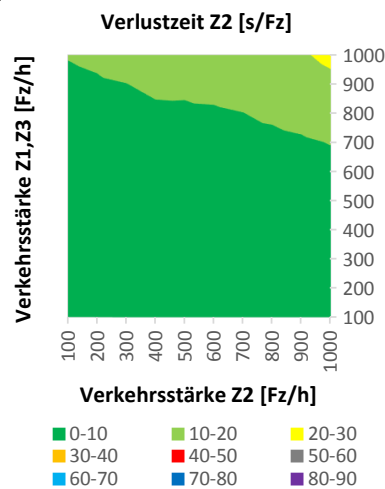
Fall TS78F, Signalprogramm 6020



Fall TS78F, Signalprogramm 9030



Fall TS2378, Signalprogramm 6020



Fall TS2378, Signalprogramm 9030

Abbildung 9.18: Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten der Nebenrichtung (Z2) für Ausbaustandard AS2EI

9.3.2 Einsatzgrenzen für Fall mit Furt rechts (TS78F)

Im Ausbaustandard mit jeweils Linksabbiegestreifen in der Haupt- und Nebenrichtung, kann eine Teilsignalisierung des Falls TS78F nur im Signalprogramm 9020 zu Verbesserungen des Verkehrsablaufs beitragen. Jedoch sorgt der zusätzliche Linksabbiegestreifen in der Nebenrichtung dafür, dass nun auch bei hohen Verkehrsbelastungen in beiden Richtungen eine Signalisierung eingesetzt werden kann.

Die Einsatzbereiche für den Fall TS78F können den Matrizen in den Abbildungen 9.19 sowie 9.20 entnommen werden.

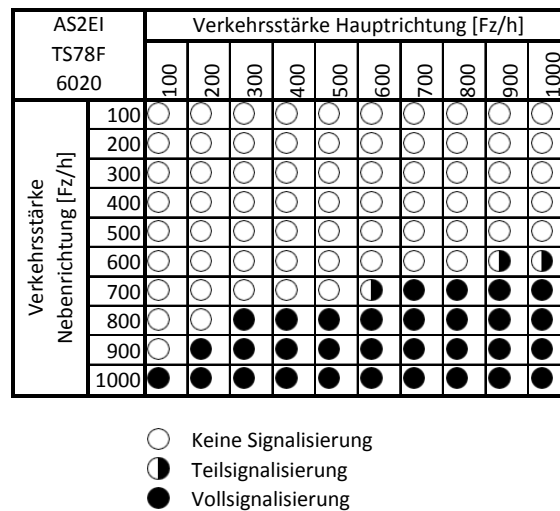


Abbildung 9.19: Einsatzgrenzen für AS2EI, TS78F mit Signalprogramm 6020

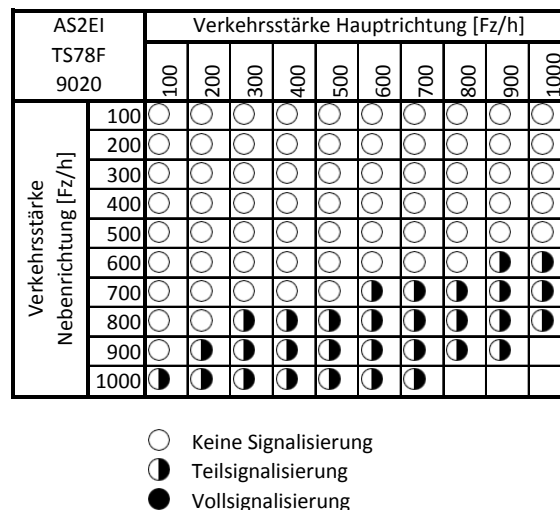


Abbildung 9.20: Einsatzgrenzen für AS2EI, TS78F mit Signalprogramm 9020

9.3.3 Einsatzgrenzen für Fall ohne Furten (TS2378)

Aus Leistungsfähigkeitssicht im MIV ist die Kombination aus Ausbaustandard AS2EI und TS2378 am besten zu bewerten. Mit beiden Signalprogrammen kann durch eine Teilsignalisierung über einen weiten Einsatzbereich eine Verbesserung erzielt werden. Eine Vollsignalisierung scheint in dieser Konstellation nicht mehr nötig.

Die Einsatzbereiche für den Fall TS2378 können den Matrizen in den Abbildungen 9.21 sowie 9.22 entnommen werden.

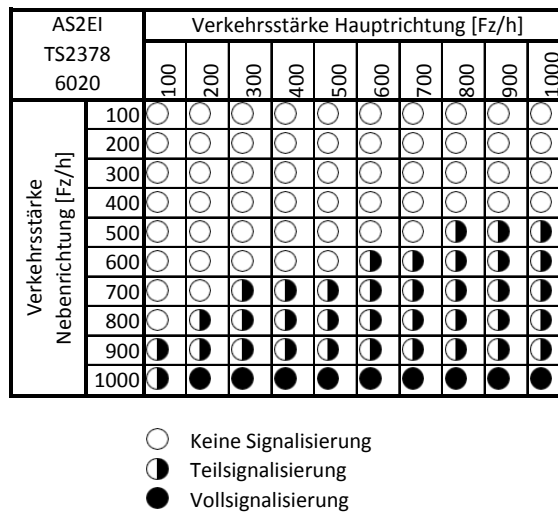


Abbildung 9.21: Einsatzgrenzen für AS2EI, TS2378 mit Signalprogramm 6020

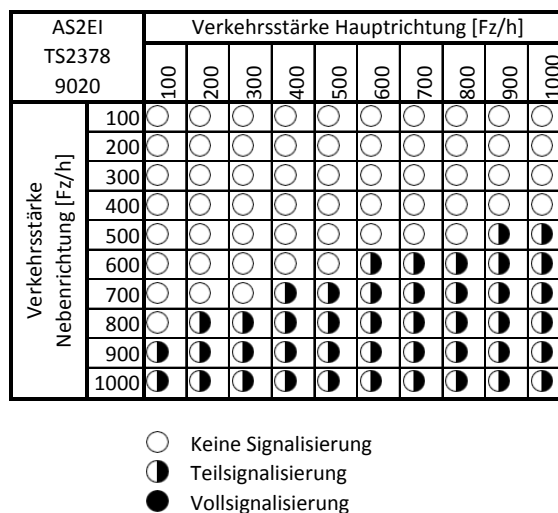


Abbildung 9.22: Einsatzgrenzen für AS2EI, TS2378 mit Signalprogramm 9020

9.4 Zusammenschau

Durch die Auswertungen der Verlustzeiten für den Gesamtknoten und die Nebenrichtung konnten in Abhängigkeit der Verkehrsstärken in Haupt- und Nebenrichtung in diesem Kapitel die Einsatzgrenzen abgeleitet werden.

Durch den Einsatz einer Teilsignalisierung ist es möglich, den Abfluss aus der Nebenrichtung zu verbessern, ohne hierfür übermäßige Behinderungen im Hauptstrom zu provozieren. Dies zeigt sich daran, dass die Gesamtknotenverlustzeiten nur geringfügig ansteigen, während es in der Nebenrichtung zu großen Verlustzeitreduzierungen kommt.

Der Fall TS2378 liefert durchweg die besseren Ergebnisse als der Fall TS78F, wobei die Differenz durch eine Erhöhung des Ausbaustandards weitestgehend ausgeglichen werden kann. Als Signalprogramm erweist sich das Programm 6020 als vorteilhafter, obschon mit dem Programm 9020 der Einsatzbereich der Teilsignalisierung zu hohen Verkehrsstärken ausgedehnt werden kann, da es zu einer geringeren Kolonnenbildung in der Hauptrichtung beiträgt und einbiegende Nebenstromfahrzeuge kürzer vor der Fußgängerfurt warten müssen.

10 Teilsignalisierung an Kreisverkehren

In diesem Kapitel wird der Einsatz einer Teilsignalisierung an kleinen, einstreifigen Kreisverkehren untersucht. Zum einen kann damit die Kapazität einzelner Zufahrten gesteigert werden und zum anderen bietet sich eine Teilsignalisierung auch zur Sicherung von Fußgängerquerungen am Kreisverkehr an. Diese beiden Anwendungsmöglichkeiten werden in diesem Kapitel näher betrachtet.

10.1 Teilsignalisierung an Kreisverkehren im MIV

Eine Teilsignalisierung an Kreisverkehren im MIV kann aus zwei Gründen erfolgen:

- Verbesserung des Zuflusses aus einer Richtung
- Priorisierung einzelner Fahrzeuge bzw. Fahrzeuggruppen (siehe Kapitel 11)

Im ersten Fall ist eine überstaute Zufahrt Auslöser, deren Fahrer aufgrund mangelnder Zeitlücken auf der Kreisfahrbahn nicht oder nur erschwert einfahren können. Eine solche Situation tritt auf, wenn stromaufwärts stark belastete Zufahrten liegen, deren Fahrer wiederum selten durch andere Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn am Einfahren gehindert werden. Es entsteht somit ein fast kontinuierlicher Zustrom auf die Kreisfahrbahn. Solche Situationen treten bei asymmetrisch belasteten Kreisverkehren auf. Vor allem geschieht dies dann, wenn viele Fahrzeuge vor einer stark belasteten Zufahrt die Kreisfahrbahn verlassen und die Anlage großzügig bemessen ist und somit wenig Beeinflussungen zwischen aus- und einfahrenden Fahrzeugen bestehen.

Ziel ist es daher, den Zustrom signaltechnisch zu dosieren, um somit den Pulk auf der Kreisfahrbahn aufzulösen. Eine Signalisierung der Kreisfahrbahn ist im ersten Fall nicht anzustreben, da dadurch der Verkehrsfluss der gesamten Anlage behindert wird, auch von nicht beteiligten Fahrzeugen.

Ähnlich wie bei Einmündungen und Kreuzungen ist auf eine geeignete Abrückung der Haltlinie und des Signalgebers zu achten. Hier steht allerdings die Sicherheit von querenden Fußgängern im Vordergrund. In einem Modellversuch in Kaiserslautern wurde nach Absprache mit Polizei und Ordnungsamt eine Abrückung von 5m von der Fußgängerfurt gewählt. Damit soll sichergestellt werden, dass wiederanfahrende Fahrzeuge nicht nur die Kreisfahrbahn beachten, sondern auch auf vor ihnen querende Fußgänger Rücksicht nehmen.

In dieser Arbeit werden ausschließlich 4-armige Kreisverkehre mit 90 Grad Winkeln der Zufahrten betrachtet. Die Ergebnisse lassen sich später auch auf andere Formen übertragen.

10.2 Beschreibung des Modells

Die Teilsignalisierung an Kreisverkehren wird mit einem vereinfachten Modell aus Abbildung 10.1 untersucht. Dieses bildet nicht den Gesamtkreisverkehr nach, sondern besteht nur aus einer Ringfahrbahn mit zwei Ein- und Ausfahrten. Das Modell reicht aus, um die Wirkungsweise der Teilsignalisierung an Kreisverkehren aufzuzeigen. Die Modellierung eines gesamten Kreisverkehrs wäre an dieser Stelle aufgrund sehr vieler Parameter zu aufwendig.

Das Auftreten von Zeitlücken auf der Ringfahrbahn an der oberen Zufahrt bestimmt das dortige Einfahrverhalten. Je mehr Zeitlücken dort auftreten, desto ungehinderter können Fahrzeuge von dort in den Kreis einfahren und es entsteht ein kontinuierlicher Zustrom an Fahrzeugen, der dazu führt, dass Fahrzeuge aus der linken Zufahrt nicht mehr in den Kreis einfahren können. Dies tritt auf, wenn viele Fahrzeuge an der oberen Ausfahrt ausfahren. Durch eine Teilsignalisierung soll der kontinuierliche Zustrom unterbrochen und somit Zeitlücken für die linke Zufahrt geschaffen werden.

Im Modell gibt es Fahrzeugzuflüsse auf der Ringfahrbahn, der oberen und der linken Zufahrt. Der Zufluss der Ringfahrbahn verbleibt mit 1000 Fz/h konstant. Es wird lediglich über Routenentscheidungen bestimmt, wie viele Fahrzeuge die Ringfahrbahn an der ersten, zweiten und dritten Ausfahrt verlassen. Ebenso kann die Routenentscheidung der Fahrzeuge aus der ersten Zufahrt eingestellt werden. Variabel sind zudem die Fahrzeugzuflüsse der beiden Zufahrten in einem Bereich von 300 bis 1000 Fz/h. Die Simulationsumgebung entspricht ansonsten der von Einmündungen und Kreuzungen aus Kapitel 7.

Untersucht werden soll somit die Auswirkung einer Teilsignalisierung der oberen Zufahrt auf das Einfahrverhalten der linken Zufahrt. Das Einfahren aus der linken Zufahrt ist erschwert, umso mehr:

- Fahrzeuge an der ersten Ausfahrt ausfahren
- Fahrzeuge in der ersten Zufahrt einfahren
- Fahrzeuge an der zweiten Zufahrt insgesamt vorbeifahren
- Fahrzeuge der ersten Zufahrt nicht direkt wieder ausfahren

10.3 Ergebnisse

Im ersten Schritt wurde der Kreisverkehr ohne Lichtsignalanlagen simuliert. Hierbei wurde festgestellt, dass für das Einfahren aus der linken Zufahrt auf die Kreisfahrbahn nicht allein die Anzahl der am Querschnitt vorbeifahrenden Fahrzeuge maßgebend ist, sondern auch der Kolonnencharakter auf der Ringfahrbahn entscheidend ist. Abbildung 10.2 zeigt die mittlere Verlustzeit der linken Zufahrt in Abhängigkeit von der an der ersten Ausfahrt ausfahrenden Fahrzeuge. Obgleich die Verkehrsstärke auf der Ringfahrbahn konstant ist,

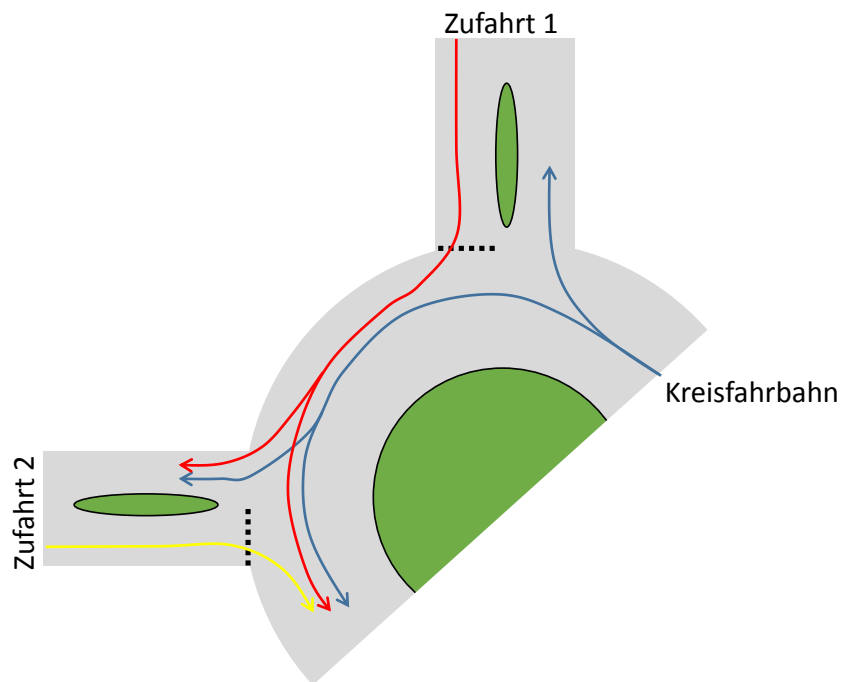


Abbildung 10.1: Skizze des vereinfachten Kreisverkehrsmodells mit den möglichen Fahrzeugrouten

ergeben sich Unterschiede in der mittleren Verlustzeit der zweiten Zufahrt. Je mehr Fahrzeuge den Kreis an der ersten Ausfahrt verlassen, desto schwieriger ist das Einfahren an der zweiten Zufahrt, da der Zustrom der ersten Zufahrt ungehindert auf die Kreisfahrbahn fließen kann und fast nie durch vorbeifahrende Fahrzeuge auf der Kreisfahrbahn unterbrochen wird.

Zur Unterstützung der Fahrzeuge in Zufahrt 2 wurde im zweiten Schritt mittels einer Signalisierung der kontinuierliche Zustrom aus Zufahrt 1 unterbrochen, um somit die entsprechenden Zeitlücken auf der Ringfahrbahn zu schaffen. Untersucht wurde, wie sich dies auf die mittleren Verlustzeiten der beiden Zufahrten auswirkt.

Wird mit einer Signalisierung die nördliche Zufahrt kurzzeitig angehalten, so werden die Kolonnen unterbrochen und das Einfahren aus der zweiten Zufahrt erheblich verbessert, was sich in niedrigeren Verlustzeiten niederschlägt. Gleichzeitig steigt mit einer Signalisierung auch die Verlustzeit in der ersten Zufahrt an. Wie bereits bei Einmündungen und Kreuzungen aufgezeigt, muss also ein Kompromiss für beide gefunden werden.

Auswirkungen auf Zufahrt 1 Abbildung 10.3 zeigt den Einfluss des Signalprogramms auf die Verlustzeiten der Zufahrt 1 in Abhängigkeit der Verkehrsstärke in dieser Zufahrt. Dargestellt ist der Fall, in dem 40% der Fahrzeuge der Ringfahrbahn vorher ausfahren. Dies ist demnach der für die Zufahrt 1 vorteilhafteste und für die Zufahrt 2 unvorteil-

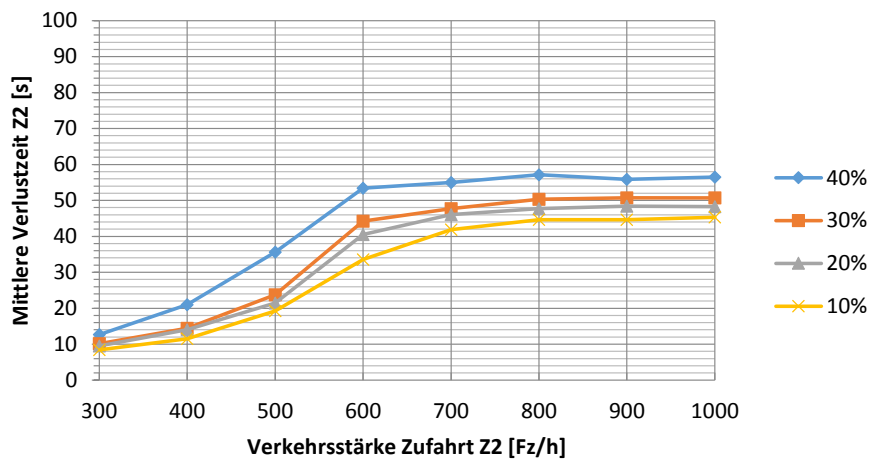


Abbildung 10.2: Auswirkungen des Anteils der Ausfahrer an Ausfahrt 1 auf die Verlustzeit der Zufahrt 2 an Kreisverkehren ohne LSA, $q_{Z1} = 1000Fz/h$, Route $Z1 > Z2$: 40%

hafteste Zustand. Es zeigt sich deutlich, dass geringe Freigabezeitanteile für diese Zufahrt vorteilhaft sind. Die Verlustzeiten steigen über einen weiten Bereich an und erreichen je nach Signalprogramm ab ca. 650 Fz/h eine Sättigung. Dies bedeutet, dass die gesamte Zufahrt mindestens bis zum Start der Reisezeitmessung zugestaut ist.

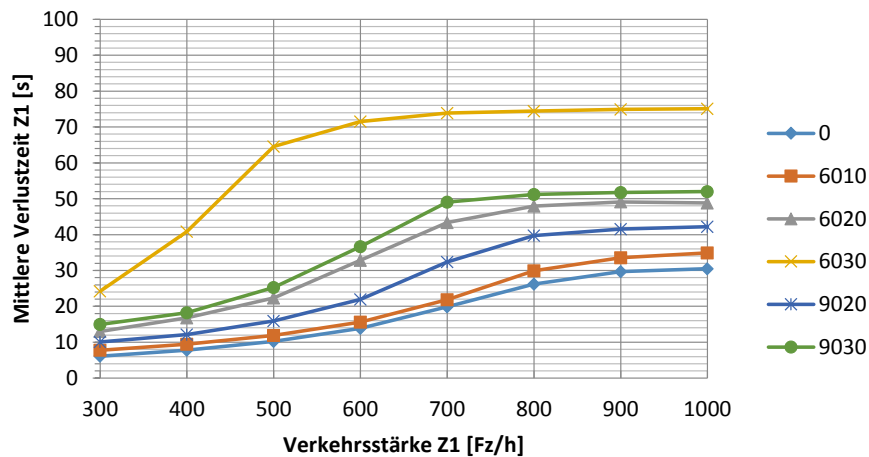


Abbildung 10.3: Auswirkungen Signalprogramm auf Zufahrt 1, Route Ringfahrbahn $> Z1$: 40%

Auswirkungen auf Zufahrt 2 Für Zufahrt 2 ergibt sich das gegenteilige Bild (vgl. Abbildung 10.4). Hier führen vor allem lange Sperrzeitanteile zu einer Verbesserung der Verlustzeiten. Als Kompromiss wird im folgenden das Signalprogramm 6020 näher beleuchtet. Die Abbildungen 10.5 und 10.5 zeigen die mittlere Verlustzeit dieser Zufahrt zum einen für den unsignalisierten und zum anderen für den signalisierten Fall mit dem Signalprogramm 6020 in Abhängigkeit von den Verkehrsstärken in Zufahrt 1 und 2 bei vorgegebenen Routenentscheidungen. Durch die Signalisierung kann eine deutliche Reduzierung der mittleren Verlustzeiten erreicht werden.

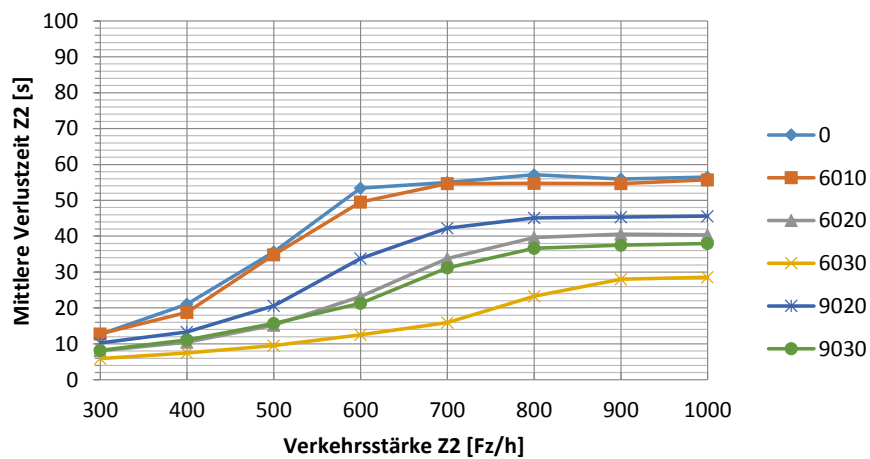


Abbildung 10.4: Auswirkungen Signalprogramm auf Zufahrt 2, Route Ringfahrbahn > Z1: 40%, Route Z1 > Z2: 10%, Verkehrsstärke Z1: 1000 Fz/h

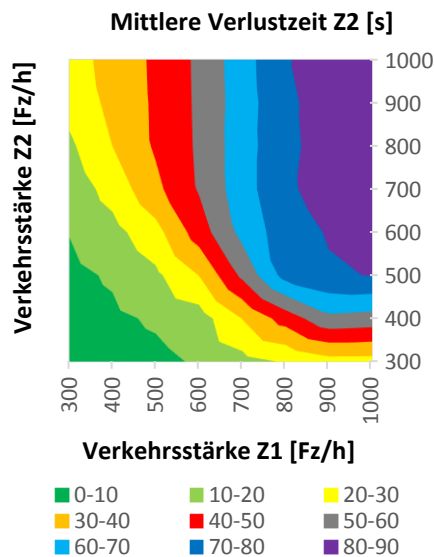


Abbildung 10.5: Mittlere Verlustzeit Z2 an Kreisverkehren ohne Signalisierung, Route Ringfahrbahn > Z1: 40%, Route Z1 > Z2: 10%

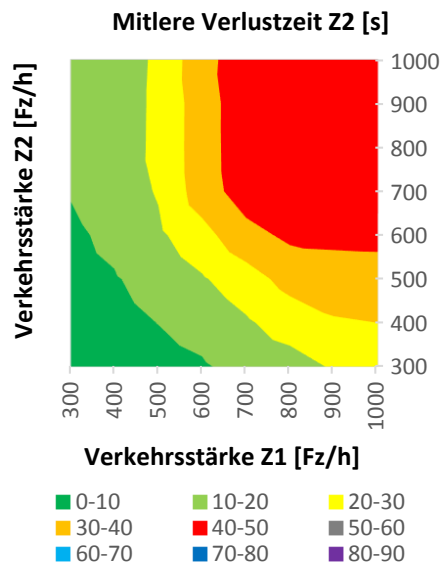


Abbildung 10.6: Mittlere Verlustzeit Z2 an Kreisverkehren, Signalprogramm: 6020,
Route Ringfahrbahn > Z1: 40%, Route Z1 > Z2: 10%

Auswirkungen auf beide Zufahrten Die Gesamtbetrachtung des Knotenpunktes zeigt sich gegenüber einer Teilsignalisierung weitestgehend unbeeinflusst. Die Verlustzeitreduzierungen der einen Zufahrt wiegen die Nachteile der signalisierten Zufahrt auf. Dies ist aus den Abbildungen 10.7 und 10.8 ersichtlich. Es kommt in der mittleren Gesamtknotenverlustzeit nur zu leichten Verschiebungen. Die Vorteile für Zufahrt 2 kompensieren somit die Nachteile der Zufahrt 1.

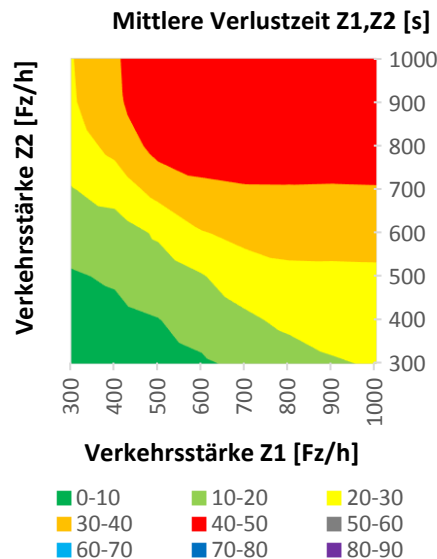


Abbildung 10.7: Mittlere Gesamtknotenverlustzeit an Kreisverkehren ohne Signalisierung, Route Ringfahrbahn > Z1: 40%, Route Z1 > Z2: 10%

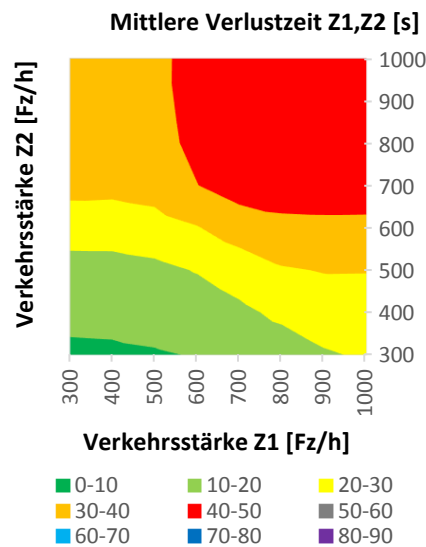


Abbildung 10.8: Mittlere Gesamtknotenverlustzeit an Kreisverkehren, SP: 6020, Route Ringfahrbahn > Z1: 40%, Route Z1 > Z2: 10%

10.4 Fußgängerführung an teilsignalisierten Kreisverkehren

Die Querung von Ein- und Ausfahrten von Kreisverkehren ist für Fußgänger immer konfliktbehaftet. Die Vorrangregelung für Fußgänger ist zwischen Ein- und Ausfahrten nicht eindeutig. Der sicheren Querung der Ein- und Ausfahrten kommt daher große Bedeutung zu. Eine Teilsignalisierung kann daher an Kreisverkehren unter Umständen auch hierfür zweckmäßig sein. Im Folgenden werden zwei Beispielanlagen vorgestellt.

Vorreiter in der Sicherung solcher Querungsstellen ist der Landesbetrieb Mobilität in Bad Kreuznach. Dort existieren zwei Beispiele signalisierter Querungsanlagen an Kreisverkehren, sowohl innerorts als auch außerorts. Beide Lösungen sind Eigenentwicklungen. Die Konzeption der Anlagen wurde wissenschaftlich durch die Fachhochschule Frankfurt am Main begleitet⁹⁴

Einer dieser Kreisverkehre befindet sich am Knotenpunkt Alzeyer Straße / Ringstraße (siehe Abbildungen 10.9 und 10.10). Grund für dessen Errichtung war nach Aussage des örtlichen Ordnungsamtes eine Schulwegroute. Die Ein- und Ausfahrten sind mit zweibe-griffigen Signalgebern für den Kfz-Verkehr ausgestattet. In Grundstellung ist die Anlage sowohl für den Fußverkehr als auch den KFZ Verkehr dunkel. Dies soll verdeutlichen, dass Fußgänger auch ohne Anforderung queren dürfen, wenn es die Verkehrslage erlaubt. Kraftfahrzeuge und Fußgänger müssen sich dann wie an gewöhnlichen Kreisverkehren verhalten. Es soll verhindert werden, dass der Verkehrsfluss im MIV unnötigerweise beeinträchtigt wird. Ein Queren ohne Anforderung der LSA ist schneller abgeschlossen, da keine Zwischenzeiten und Mindestgrünzeiten abgewartet werden müssen.

Nach Anforderung eines Fußgängers wechseln die Fußgängersignale von DUNKEL nach ROT. Die Anlage schaltet anschließend im Kfz-Verkehr von DUNKEL über GELB nach ROT. Die Kreisfahrbahn wird in diesem Fall zugestaut, wobei vermehrt zu beobachten ist, dass die Einfahrt aus Richtung Ringstraße freigehalten wird, so dass diese Fahrbeziehungen möglich bleiben. Nach der Freigabezeit für die Fußgänger schaltet die Anlage wieder zurück in die Grundstellung. Nach Aussagen der Stadtverwaltung wird die Anlage gut angenommen. Probleme sind den Verantwortlichen nicht bekannt.

Die zweite Anlage befindet sich im Gewerbegebiet von Bad Kreuznach zur Sicherung der Querung des Radwegs von der Innenstadt zum Stadtteil Planig (siehe Abbildung 10.11). Hier wird die B428 gequert. Der signalisierte Ast verfügt über eine zweistreifige Zufahrt, eine Ausfahrt sowie einen Bypass aus Richtung Planig. Auch hier kommt ein Steuerungsverfahren zum Einsatz, das den Verkehrsfluss einbezieht. Je nach Verkehrsaufkommen kann der Ast demnach entweder etappenweise oder bei wenig Verkehr auch in einem Zug überquert werden. Bei starkem Verkehr muss der Radfahrer ggf. auf einer Mittelinsel warten, bis er eine weitere Freigabezeit für den nächsten Abschnitt erhält. Dies ist insbesondere

⁹⁴NEIDERT 2014

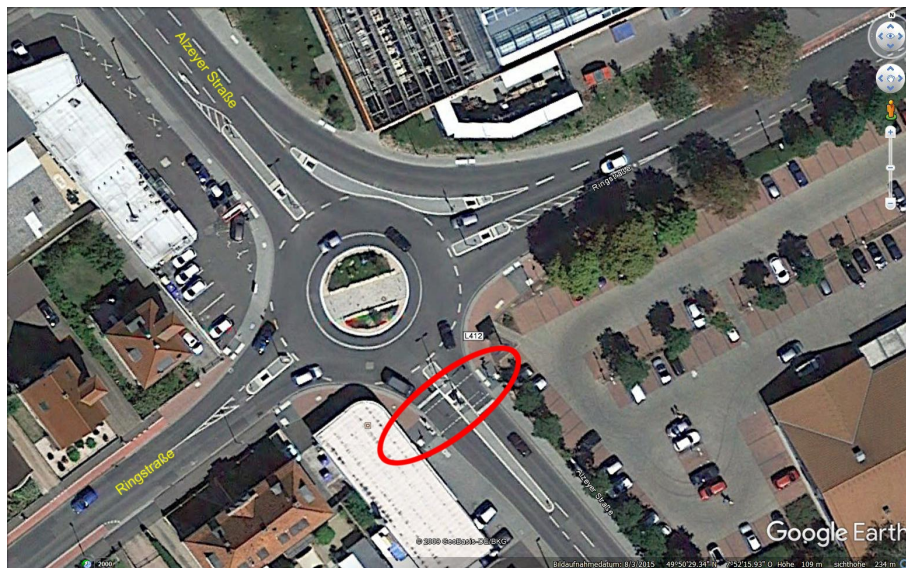


Abbildung 10.9: Luftbild des Kreisverkehrs Alzeyer Straße / Ringstraße
Quelle: Google Earth

bei der zweistreifigen Zufahrt der Fall. Im Gegensatz zum Kreisverkehr in der Innenstadt ist hier die Grundstellung für Radfahrer und Fußgänger ROT. Eine ungesicherte Querung ist aufgrund der Komplexität, der höheren Geschwindigkeiten und des starken Verkehrsaufkommens nicht vorgesehen.

Die beiden Praxisbeispiele zeigen, dass eine Teilsignalisierung für eine gesicherte Fußgängerführung an Kreisverkehren eingesetzt werden kann. Insbesondere an komplexen und unübersichtlichen Stellen, bei hohem Fußgängerverkehrsaufkommen und besonders schützenswerten Verkehrsteilnehmern (Kinder, Senioren, Mobilitätseingeschränkte) sind solche Lösungen sinnvoll, auch wenn es im Gegensatz zur ungesicherten Querung zu größeren Einbußen für den KFZ Verkehr kommt. Hier könnte jedoch Aufklärung dazu beitragen, dass Personen, die ohne LSA queren möchten, dies auch tun.

Die Unfallstatistik weist laut NEIDERT eine Abnahme der Unfälle an den Anlagen auf. Genaue Zahlen liegen jedoch nicht vor, so dass die Wirkungen solcher Anlagen noch nicht genügend empirisch abgesichert sind und demnach weiterer Forschungsbedarf besteht.



Abbildung 10.10: Fußgängerlichtsignalanlage am Kreisverkehr in Bad Kreuznach

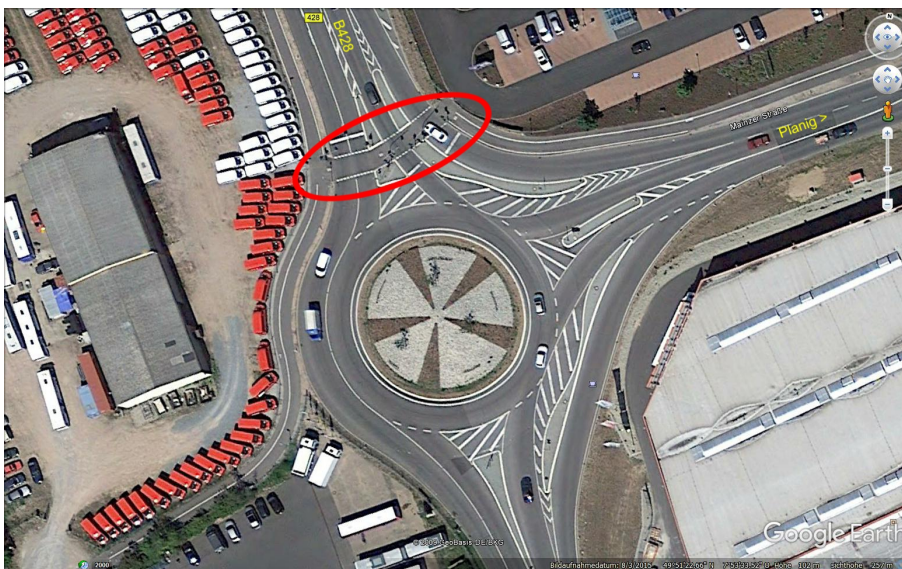


Abbildung 10.11: Luftbild des Kreisverkehrs B428 / Mainzer Straße
Quelle: Google Earth

10.5 Zusammenschau

Eine Teilsignalisierung an Kreisverkehren ist unter bestimmten Belastungskonstellationen sinnvoll, um die Verlustzeiten einzelner Zufahrten zu reduzieren. Es sollte nämlich nicht nur die Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn herangezogen werden, wie dies derzeit im HBS der Fall ist, sondern auch der Kolonnencharakter Berücksichtigung finden. Stehen auf der Kreisfahrbahn zu wenig Zeitlücken zur Verfügung, wird das Einfahren erschwert. Hier kann eine Teilsignalisierung künstlich Lücken erzeugen, falls diese aufgrund ungünstiger Routen und Verkehrsstärken nicht von sich aus auftreten. Es ist auf jeden Fall darauf zu achten, einen Kompromiss zwischen den einzelnen Zufahrten zu finden, da sonst nur eine Verlagerung des Problems in eine andere Zufahrt stattfindet.

Somit können die positiven Aussagen zur Signalisierung von Kreisverkehren aus der Schweiz und Kaiserslautern bestätigt werden. Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen auf eine Gesamtanlage, da an dieser Stelle nur ein abstrahiertes Teilmodell betrachtet wurde, um die prinzipielle Wirkungsweise einer Teilsignalisierung zur Kapazitätssteigerung einer Zufahrt aufzuzeigen.

Bezogen auf die Sicherung von querenden Fußgängern konnten erste Ansätze zur Sicherung der konfliktbelasteten Stellen aufgezeigt werden. Untersuchungen zur Akzeptanz bei Fußgängern und Autofahrern sowie zum Unfallgeschehen fehlen bislang noch. An dieser Stelle besteht ebenfalls weiterer Forschungsbedarf.

11 Priorisierung von Einzelfahrzeugen

Neben der zuvor ausführlich behandelten Kapazitätssteigerung von Knotenpunkten im MIV kann eine Teilsignalisierung auch zur Priorisierung einzelner Verkehrsteilnehmer bzw. Verkehrsteilnehmergruppen eingesetzt werden. Dieser Anwendungsfall wird im folgenden Kapitel vorgestellt und rundet damit die vorliegende Arbeit ab. Zum einen geht es um die Priorisierung von ÖV Fahrzeugen, dem Einsatz der Teilsignalisierung im Rettungswesen und Notfallmanagement und das Zusammenspiel mit dem Schienenverkehr. Alle drei Möglichkeiten fallen unter die Definition einer Teilsignalisierung, da normalerweise wartepflichtige Verkehrsteilnehmer in die LSA-Steuerung eingreifen, um somit eine Sperrung des Hauptstroms zu bewirken. Die hier gezeigten Möglichkeiten lassen eine Teilsignalisierung auch an Kreuzungen zu, obgleich weiterhin die Problematik einer adäquaten Fußgängerführung existiert, was bei der Planung berücksichtigt werden muss.

Diese werden im Folgenden detaillierter mit Beispielen aus der Praxis vorgestellt und ergänzt. Eine Kombination von Einsatzfällen ist grundsätzlich möglich und im Einzelfall zu prüfen. Ebenso kann eine Teilsignalisierung, die zur Kapazitätssteigerung im MIV eingesetzt wird, zusätzlich auch zur Priorisierung von Einzelfahrzeugen genutzt werden.

11.1 Priorisierung von ÖV-Fahrzeugen

Erste weitere Anwendungsmöglichkeit der Teilsignalisierung besteht in der Priorisierung von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs. Dieser Anwendungsfall wird auch in der aktuellen RiLSA⁹⁵ aufgezählt und mit Beispielen erläutert. Das Prinzip beruht darauf, höherrangige Verkehrsströme, die zur ÖV-Route in Konflikt stehen, rechtzeitig vor Ankunft des ÖV Fahrzeuges anzuhalten, so dass die Konfliktfläche geräumt werden kann und anschließend eine zügige Befahrung des Knotenpunktes möglich ist. Dieses Verfahren ist sowohl an Einmündungen und Kreuzungen als auch an Kreisverkehren anwendbar.

In Abbildung 11.1 ist eine teilsignalisierte Kreuzung zur ÖV-Beschleunigung dargestellt. Durch Sperrung des Hauptstroms werden linkseinbiegende Busse aus der Nebenrichtung priorisiert. Der Nebenstrom hingegen wird aufgrund der engen Radien angehalten, sobald ein Bus rechts abbiegt, da dies nur unter Mitbenutzung des Gegenfahrstreifens möglich ist.

Zur Priorisierung des ÖV an Kreisverkehren hat LAGEMANN in seiner Dissertation Lösungsmöglichkeiten erarbeitet⁹⁶. Eine Möglichkeit ist demnach die Einrichtung einer Teilsignalisierung. Prominentes Beispiel hierfür ist der Borsigplatz in Dortmund in Abbildung 11.2. Hier wird mittels Signalisierung die Straßenbahn priorisiert. Daneben existieren an diesem Knotenpunkt noch weitere Signalgeber, die das Ein- und Ausfahren von Kraftfahr-

⁹⁵cgl. FGSV 2010 S. 52f

⁹⁶LAGEMANN 2005

11.2 Rettungswesen und Notfallmanagement

Der Anwendungsfall der Teilsignalisierung im Rettungswesen und Notfallmanagement beruht auf demselben Prinzip wie die ÖV-Priorisierung. Übergeordnete, nicht verträgliche Verkehrsströme an Ausfahrten von Rettungswachen oder Knotenpunkten können mit einer Teilsignalisierung ausgerüstet werden, um eine Beschleunigung dieser Fahrzeuge zu erreichen. Durch solche Maßnahmen kann der Aktionsradius von Rettungsdiensten ausgeweitet sowie die Fahrtdauer zum Einsatzort reduziert werden. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn dadurch der Bau neuer Rettungswachen vermieden werden kann. Ein Beispiel ist in Abbildung 11.3 zu sehen.



Abbildung 11.3: Feuerwehrausfahrt in Landstuhl
Foto: Carsten Frobin

Ebenfalls kann eine Teilsignalisierung in diesem Zusammenhang genutzt werden, um im Notfall das Räumen sensibler Bereiche wie beispielsweise Tunnels oder Brücken zu erleichtern. In diesen Fällen wird versucht, einen maximalen Abfluss aus diesen Bereichen zu erzielen und das Einfahren weiterer Fahrzeuge in diesen Bereich zu verhindern. Ein gelungenes Beispiel hierfür findet sich am Schlossbergtunnel in Dillenburg⁹⁷. Dort sorgt eine Teilsignalisierung für ein zügiges Räumen des Tunnels im Notfall oder bei Rückstau, indem der sich anschließende Kreisverkehr entsprechend gesperrt wird. Fahrzeuge aus dem Tunnel können somit ungehindert die Gefahrenstelle verlassen. Durch eine weitere Signalisierung mit zusätzlichen Schranken wird ein Einfahren weiterer Fahrzeuge in den Tunnel verhindert.

⁹⁷vgl. HOFMANN und KREMLING 2011

11.3 Teilsignalisierung und Schienenverkehr

Eine Teilsignalisierung kommt sehr häufig in Kombination mit der Sicherung von Bahnübergängen vor, die sich in unmittelbarer Nähe zu Knotenpunkten befinden. Dies zeigen viele Beispiele aus der Praxis. Ziel ist es, bei Annäherung eines Schienenfahrzeuges ein rechtzeitiges und zügiges Räumen des Bahnübergangs zu gewährleisten. Dies wird durch eine Sperrung der übergeordneten Ströme am Knotenpunkt erreicht. Dies funktioniert gleichermaßen an Kreuzungen, Einmündungen und Kreisverkehren wie Beispiele aus dem In- und Ausland zeigen. Wichtig ist in jedem Fall die Abstimmung mit dem Eisenbahninfrastrukturunternehmen. Dort werden solche Anlagen als Bahnübergangssteuerungsanlagen (BÜSTRA) bezeichnet. Die Sperrzeit des Hauptstroms muss so bemessen sein, dass vor Schließung der Schranken alle Fahrzeuge den Bahnübergang räumen können. Nach der Schrankenschließung kann die Anlage wieder in die Dunkelstellung gehen. Somit werden die übrigen Fahrbeziehungen aufrecht erhalten.

Das Beispiel in Abbildung 11.4 zeigt eine solche Anlage. Bei Annäherung von Zügen wird die Bundesstraße gesperrt, so dass alle Fahrzeuge, die sich auf dem Bahnübergang oder der Brücke befinden abfließen können. Danach geht die Anlage wieder zurück in die Dunkelstellung. Somit kann der Verkehr auf der Bundesstraße weiter fließen und lediglich der Bahnübergang bleibt geschlossen.



Abbildung 11.4: Teilsignalisierung am Bahnübergang in Schweisweiler

Teil III

Fazit, Diskussion und Ausblick

12 Fazit und Diskussion der Ergebnisse

12.1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

In dieser Arbeit wurden der Verkehrsablauf und die Einsatzmöglichkeiten teilsignalisierter Knotenpunkte untersucht. Betrachtet wurden Einmündungen, Kreuzungen und Kreisverkehre. Diese Form der Signalisierung ist bereits seit mehreren Jahrzehnten bekannt, wird jedoch nur vereinzelt angewendet. Mit der Neuauflage der RiLSA im Jahre 2010 wurde sie erstmals in eine Richtlinie aufgenommen. Die Analyse des Stands in Wissenschaft und Praxis hat gezeigt, dass auch im Ausland kaum Erfahrungen hierzu vorliegen und dementsprechend eine Wissenslücke besteht.

Anhand der einschlägigen Literatur wurde der Verkehrsablauf an vorfahrtgeregelten und lichtsignalgeregelten Knotenpunkten dargestellt und daraus Schlüsse auf den Verkehrsablauf an teilsignalisierten Knotenpunkten gezogen. Es wurde ein Unterschied zwischen dem Einfahren in natürlich auftretende Zeitlücken und künstlich durch Lichtsignaleingriffe geschaffene Lücken konstatiert. Der Verkehrsablauf ist demnach davon abhängig, in welchem Verhältnis die beiden Zeitlückenarten zueinander stehen. Das Einfahren in natürliche Zeitlücken ähnelt stark dem vorfahrtgeregelten Verkehrsablauf, während das Einfahrverhalten in die künstlichen Lücken eher der Vollsignalisierung zugerechnet werden kann. Jedoch sind bei beiden Verfahren die Randbedingungen stark verändert, so dass nicht mit den etablierten Verfahren des HBS gearbeitet werden kann. Zum einen kommt es durch die LSA zu einer starken Kolonnenbildung unmittelbar vor dem Knotenpunkt, so dass die Fahrzeugankünfte nicht mehr unabhängig voneinander sind und somit die zugrundeliegende Verteilung der Zeitlücken nicht mehr valide ist und zum anderen unterscheiden sich die Zeitbedarfswerte von denen vollsignalisierter Knotenpunkte.

Da die Richtlinien für Lichtsignalanlagen keine Angaben machen, wie Teilsignalisierungen konkret ausgestaltet sein können, sondern in dieser Beziehung sehr allgemein bleiben, wurde in einem ersten Schritt eine Typisierung teilsignalisierter Knotenpunkte vorgenommen.

Anhand der möglichen Fahrstreifenaufteilungen wurden sogenannte Ausbaustandards hergeleitet, die jeweils einen ähnlichen Verkehrsablauf aufweisen. Es wurden in dieser Arbeit drei verschiedene Ausbaustandards verwendet:

- Alle Zufahrten mit Mischfahrstreifen (AS0EI / AS0KR)
- Linksabbiegestreifen in der Hauptrichtung (AS1EI / AS1KR)
- Linksabbiegestreifen in der Haupt- und Nebenrichtung (AS2EI / AS2KR)

Für die verschiedenen Ausbaustandards wurde anschließend analysiert, welche Signalisierungen theoretisch ohne Berücksichtigung rechtlicher Randbedingungen denkbar sind. Hierzu wurden alle Kombinationsmöglichkeiten möglicher Signalisierungen der einzelnen

Fahrstreifen am Knotenpunkt aufgelistet. Darauf basierend kann dann zwischen unmöglichen und möglichen Teilsignalisierungen unterschieden werden. Unmöglich sind alle Signalisierungen, die im Widerspruch zur Straßenverkehrsordnung bzw. zu den Richtlinien stehen. Die möglichen Teilsignalisierungen können weiter in empfohlene und nicht empfohlene Teilsignalisierungen unterschieden werden. Letztere scheidet vor allem aufgrund von Sicherheitsbedenken aus der weiteren Betrachtung aus. Mithin verbleiben drei Teilsignalisierungsfälle, die sich vor allem hinsichtlich der Anordnung von Fußgängerfurten unterscheiden.

- TS ohne Furten (TS2378)
- TS mit Furt links (TS23F)
- TS mit Furt rechts (TS78F)

Diese Fälle bildeten in Kombination mit den Ausbaustandards die Grundlage für die sich anschließenden Untersuchungen.

Die empirischen Versuche fanden an zwei Einmündungen in Bad Kreuznach statt. An provisorisch eingerichteten Teilsignalisierungen, die mittels Baustellen LSA realisiert wurden, sollten erstmals die Wirkungen auf Verkehrsablauf und Sicherheit untersucht und wichtige Kenngrößen abgeleitet werden. Die Erkenntnisse hieraus flossen danach in den Aufbau der Mikrosimulationsmodelle ein. Es hat sich gezeigt, dass die Teilsignalisierung vor allem in der Nebenrichtung zu einer Reduzierung der Wartezeiten beigetragen hat ohne jedoch den Hauptstrom übermäßig zu benachteiligen. Jedoch liegen die Zeitbedarfswerte unter denen vollsignalisierter Knotenpunkte, was zu Lasten der Kapazität geht. Entscheidend sind ausreichend große Sichtfelder. Die subjektiven Beobachtungen während der Versuchslaufzeit haben eine spürbare Abnahme riskanter Fahrmanöver gezeigt.

Der zweite Teil der Untersuchungen fokussiert sich auf die Anwendung von Mikrosimulationsverfahren. Hierzu wurden die zuvor definierten Modellknotenpunkte mit den unterschiedlichen Fällen der Teilsignalisierung unter verschiedenen Verkehrsbelastungen mit einem „ceteris paribus“ Ansatz untersucht. Somit konnte der Einfluss der einzelnen Parameter:

- Ausbaustandard
- Teilsignalisierungsfall
- Signalprogramm
- Verkehrsstärke Hauptrichtung
- Verkehrsstärke Nebenrichtung

auf den Verkehrsablauf aufgezeigt werden.

Eine Teilsignalisierung eignet sich vor allem für Einmündungen. An Kreuzungen werden weitaus geringere Effekte erzielt, da ein ungehindertes Abfließen des Nebenstroms wäh-

rend der Sperrzeit des Hauptstroms nicht möglich ist, da Linkseinbieger sich nun gegen den Gegenverkehr durchsetzen und Geradeausfahrer zwei Richtungen beachten müssen. Diese fielen daher aus der weiteren Betrachtung heraus. Des weiteren ist nicht jedes Signalprogramm gleichermaßen für eine Teilsignalisierung geeignet. Aufgrund der Abrückung der Haltlinien wird eine gewisse Räumzeit im Hauptstrom benötigt. Sind die Sperrzeiten zu kurz, so kann keine Verbesserung erzielt werden. Werden die Sperrzeiten zu lang gewählt, geht dies zu Lasten des Hauptstroms und es kommt zu einer verstärkten Pulkbildung. Es sollte in jedem Fall eine Mindestsperrzeit von 20s geschaltet werden. Als zielführend haben sich Signalprogramme mit Sperrzeiten zwischen 20s und 30s sowie Umlaufzeiten zwischen 60s und 90s erwiesen. Ebenso haben die Wahl eines Teilsignalisierungsfalles und die Fahrstreifenaufteilung erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf. Geeignet sind nur die Fälle ohne Furten (TS2378) oder mit einer Furt auf der rechten Seite (TS78F). Die Anlage von Linksabbiegestreifen hat erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf.

Weiteres wichtiges Kriterium für den Einsatz teilsignalisierter Knotenpunkte ist die sichere Führung von Fußgängern und Radfahrern. Hier erweisen sich teilsignalisierte Knotenpunkte schwieriger als vollsignalisierte. Vor allem Kreuzungen weisen hier Defizite auf. Hier kann eine sichere Fußgängerführung nur mit großen Umwegen realisiert werden, was in aller Regel zu geringer Akzeptanz führen wird. Geradeausfahrende Radfahrer der Nebenrichtung stehen im Konflikt mit abbiegenden Fahrzeugen, deren Aufmerksamkeit in erster Linie vermutlich dem Verhalten der Fahrer in der Hauptrichtung gilt. Dies ist der zweite Grund, weshalb eine Teilsignalisierung an Kreuzungen nicht empfohlen wird. Der Fall ohne Furten (TS2378) erlaubt in der Hauptrichtung keine gesicherte Fußgängerführung, sondern kann nur mit Querungshilfen ausgestattet werden, die zudem aufgrund der notwendigen Abrückung der Haltlinien in einer gewissen Entfernung zur Schnittachse liegen. Es kommt somit zu Umwegen für die Fußgänger. Der Fall mit einer Fußgängerfurt kann zumindest in einem Ast eine gesicherte Querung ermöglichen, wobei auch hier die Furt abgerückt ist. Es wurde ein Entscheidungsbaum für Einmündungen entwickelt, mit dem überprüft werden kann, ob eine Teilsignalisierung anwendbar ist oder ob auf andere Lösungen ausgewichen werden muss. Als Querungshilfe sollten Mittelseln eingesetzt werden, da sie auch in unmittelbarer Nähe zu Signalgebern gebaut werden dürfen.

Nach der Kontrolle, ob eine Teilsignalisierung aus Fußgängersicht möglich ist, schließt sich die Überprüfung aus MIV Sicht an. Für die Ermittlung der Einsatzgrenzen an Einmündungen wurden die beiden Fälle TS78F und TS2378 mit den Signalprogrammen 6020 und 9030 für alle drei Ausbaustandards weiter betrachtet. Zunächst wurden Diagramme zur Bestimmung der mittleren Verlustzeiten in Abhängigkeit der Verkehrsstärken erstellt. Aus der Gegenüberstellung des vorfahrtgeregeltem, teilsignalisierten und vollsignalisierten Falls wurden die Einsatzgrenzen anhand folgender Kriterien abgeleitet.

- Der teilsignalisierte Fall muss mehr als 3s Verlustzeitreduzierung in der Nebenrichtung bringen
- Die Verlustzeit darf nicht mehr als 40s betragen, sonst ist eine Regelung nicht sinnvoll
- Die Verlustzeit in der Hauptrichtung darf 40s nicht überschreiten

Je nach Kombinationen unterscheiden sich die Einsatzbereiche einer Teilsignalisierung. Der weiteste Einsatzbereich ergibt sich bei den Ausbaustandards AS1EI und AS2EI mit dem Fall ohne Furten (TS2378).

Für Kreisverkehre wurde an einem vereinfachten Modell untersucht, wie eine Teilsignalisierung die Kapazität einer Zufahrt erhöhen kann. Es wurde festgestellt, dass nicht nur die Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn, sondern auch ihr Kolonnencharakter entscheidend für das Auftreten der entsprechenden Zeitlücken ist. Können Fahrzeuge einer Zufahrt nahezu ungehindert in den Kreis einfahren, so entstehen Probleme an der nächsten Zufahrt. Durch kurzzeitiges Anhalten dieses Stromes kann dem entgegen gewirkt werden. Zudem konnten Lösungen aufgezeigt werden, um die Fußgängerführung an Kreisverkehren sicherer zu gestalten.

Letztlich wurden in dieser Arbeit auch noch weitere Anwendungsmöglichkeiten einer Teilsignalisierung erwähnt, bei denen es um die Priorisierung von Einzelfahrzeugen oder speziellen Fahrzeuggruppen geht. Diese reichen von der ÖV-Priorisierung über den Einsatz im Notfall- und Rettungsmanagement bis hin zur Bahnübergangssicherung. Es geht in allen Fällen darum, mittels einer Teilsignalisierung eine zügige Räumung eines nicht bevorrechtigten Stromes zu erreichen.

Die Untersuchungen zeigen in der Gesamtschau, dass eine Teilsignalisierung eine konkurrenzfähige Alternative zu den etablierten Regelungen darstellt. Insbesondere an Einmündungen kann mit ihr eine Verbesserung des Verkehrsablaufs erwirkt werden. Wichtig ist in jedem Fall vorab zu prüfen, ob dies auch mit den vorherrschenden Fußwegebeziehungen in Einklang gebracht werden kann. An Kreuzungen ist eine Teilsignalisierung aus Kapazitätssicht im MIV und der problematischen Fuß- und Radverkehrsführung nicht sinnvoll anwendbar. Für Kreisverkehre konnte gezeigt werden, dass eine Teilsignalisierung durchaus die Kapazität einzelner Zufahrten erhöhen kann, wenn der Kolonnencharakter auf der Kreisfahrbahn aufgrund ungünstiger Verkehrsstärken zu groß ist. Daneben existiert auch großes Potential bei der ÖV-Priorisierung sowie dem Notfall- und Rettungsmanagement, wo mit einfachen technischen Mitteln große Effekte erzielt werden können.

12.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Die gewählte Vorgehensweise hat sich zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen als zweckmäßig erwiesen. Sämtliche Fragestellungen aus Kapitel 3.2 konnten im Rahmen der Arbeit beantwortet werden. Die Antworten auf die einzelnen Forschungsfragen werden im Folgenden noch einmal kurz wiedergegeben.

Welche Ausprägungen der Teilsignalisierung gibt es und wie sinnvoll sind diese einsetzbar? Es konnten insgesamt drei sinnvolle Teilsignalisierungsfälle extrahiert werden. Diese unterscheiden sich hauptsächlich in der Lage von Fußgängerfurten und Signalgebern.

Je nach Lage der Furten ergibt sich eine unterschiedliche Wirkung auf den Verkehrsablauf sowie die mögliche Führung von Fußgängern. Der Fall ohne Fußgängerfurten erzielt im MIV die größten Effekte. Es stehen in jeder Zufahrt der Hauptrichtung Signalgeber. Bei den Fällen mit Fußgängerfurt können diese entweder in der einen oder anderen Zufahrt angelegt werden. In der gegenüberliegenden Richtung befindet sich eine zusätzliche Haltlinie, um den inneren Knotenpunktbereich freizuhalten, damit die Nebenstromfahrer einbiegen können. Der Fall mit Fußgängerfurt auf der linken Seite (TS23F) hat sich als unbrauchbar erwiesen.

Für welche Anwendungszwecke kann eine Teilsignalisierung eingesetzt werden? Eine Teilsignalisierung kann für verschiedene Zwecke genutzt werden. Neben der Steigerung der Kapazität der Nebenrichtung an Knotenpunkten ist dies die Priorisierung von Einzelfahrzeugen beziehungsweise bestimmter Fahrzeuggruppen. Diese kann im ÖV, Rettungswesen oder an Bahnübergängen Anwendung finden. An Einmündungen können größere Effekte als an Kreuzungen erzielt werden. An Kreisverkehren ist dies ebenfalls bei bestimmten Verkehrsbelastungskonstellationen oder zur Sicherung von Fußgängern möglich.

Wie ist der Verkehrsablauf im MIV an teilsignalisierten Knotenpunkten charakterisiert? Der Verkehrsablauf enthält sowohl Elemente der Vorfahrtregelung als auch einer Vollsignalisierung, jeweils mit geänderten Randbedingungen, so dass die bekannten Berechnungsverfahren nicht mehr greifen. Zum einen kommt es durch die LSA zu einer starken Kolonnenbildung vor dem Knotenpunkt und zum anderen sind die Zeitbedarfswerte spürbar höher.

Wie muss ein Signalprogramm für teilsignalisierte Knotenpunkte aussehen? Die Mindestsperrzeit des Hauptstroms sollte 20s betragen, damit ausreichend Zeit zum Räumen besteht und Nebenstromfahrzeuge anschließend die künstliche Lücke auch nutzen können. Zu lange Sperrzeiten wirken sich negativ auf den Hauptstrom aus. Werden lange Sperrzeiten (größer 30s) aus Sicht des Nebenstroms erforderlich, sollte über eine Vollsignalisierung mit höheren Zeitbedarfswerten nachgedacht werden.

Unter welchen Verkehrsbelastungen kann eine Teilsignalisierung an Knotenpunkten eingesetzt werden? Die Einsatzbereiche der Teilsignalisierung sind neben den Verkehrsstärken abhängig vom Ausbaustandard, dem gewählten Fall der Teilsignalisierung sowie dem geschalteten Signalprogramm. Ein pauschaler Einsatzbereich wie er in früheren Studien angegeben wurde macht demnach keinen Sinn. Die Teilsignalisierung ist zwischen den etablierten Regelungen angesiedelt.

Welchen Einfluss hat die Teilsignalisierung auf nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer? Eine Teilsignalisierung weist gewisse Defizite für Fußgänger auf. Die Nebenrichtung ist per definitionem nicht signalisiert. In der Hauptrichtung ist dies abhängig vom gewählten Fall der Teilsignalisierung. Es wurde ein Entscheidungsbaum entwickelt, mit dessen Hilfe der passende Fall unter Berücksichtigung der Belange des Fußverkehrs ausgewählt werden kann. Anschließend ist die Leistungsfähigkeit im MIV zu überprüfen. Sollte

sich zeigen, dass eine sichere Fußgängerführung nicht gewährleistet werden kann, ist auf andere Lösungen auszuweichen. Im Radverkehr ergeben sich keine Abweichungen zu einer Vollsignalisierung.

Welchen Platz nimmt die Teilsignalisierung zwischen den etablierten Regelungen ein? Gerade im Übergangsbereich, der je nach Ausbaustandard und Teilsignalisierungsfall variiert, kann eine Teilsignalisierung sehr gut eingesetzt werden. Zum einen kann der Abfluss der untergeordneten Richtung gesteigert werden, ohne dass die Hauptrichtung hierdurch lange warten muss. Werden jedoch sehr hohe Abflüsse benötigt, sollte man aufgrund der niedrigeren Zeitbedarfswerte eine Vollsignalisierung einrichten.

Welche Möglichkeiten ergeben sich für den ÖV? Eine Teilsignalisierung kann unabhängig von der Knotenpunktform sehr gut für eine ÖV-Priorisierung verwendet werden. Durch die Signalisierung wird ein rechtzeitiges Räumen der vor dem Fahrzeug liegenden Knotenpunktbereiche erreicht und somit das Einfahren erleichtert beziehungsweise beschleunigt.

12.3 Verwertbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Werte aus den empirischen Untersuchungen sind für eine Verallgemeinerung nicht ausreichend, sondern bieten erste Ansatzpunkt für weitere Forschungsaktivitäten. Zum einen waren die Erhebungszeiträume vergleichsweise kurz gewesen und zum anderen wurden nur Knotenpunkte ähnlichen Typs betrachtet. Somit blieben hier viele Einflussfaktoren wie beispielsweise Schwerverkehr, Sichtfelder, Längsneigungen und Abbiegeradien unberücksichtigt, die sich unmittelbar auf den Verkehrsablauf auswirken können.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Simulationen unterliegt ebenfalls gewissen Restriktionen. Die Ergebnisse sind nur für die hier getroffenen Annahmen gültig, die aufgrund der beschränkten Zeit- und Rechenkapazität vorgenommen wurden. Gerade die Festlegung auf einen festen Schwerverkehrsanteil und die fixen Routenentscheidungen führen zu einem eingeschränkten Lösungsraum. Veränderungen an diesen Parametern führen zwangsläufig zu anderen Ergebnissen. Die Beschränkung auf Verkehrsstärken bis 1000 Fz/h in den Simulationen erweist sich im Nachhinein als zu eng gewählt. Der Übergang zwischen Teil- und Vollsignalisierung kann somit nicht eindeutig abgegrenzt werden. Es ist durchaus denkbar, dass eine Teilsignalisierung auch noch bei höheren Verkehrsstärken ein tragfähiges Konzept darstellt. Ebenso fehlt in den Simulationen der Einfluss von Fußgängern, durch die sich eine Abminderung der Kapazität ergeben kann.

Trotz der genannten Einschränkungen konnte mit dieser Arbeit eine Planungshilfe für die Praxis erarbeitet werden. Unter Berücksichtigung gewisser Restriktionen ist es nun möglich, die Einsetzbarkeit von Teilsignalisierungen an Knotenpunkten abzuschätzen. Die Ergebnisse können zur Fortschreibung der Regelwerke genutzt werden.

Darüber hinaus kann die gewählte Simulationsumgebung für weitere Forschungsaktivitäten genutzt und adaptiert werden, um beispielsweise weitere Faktoren in die Betrachtungen einzubeziehen. Mit steigender Rechenleistung können an dieser Stelle zeitliche Einsparungen realisiert werden. Somit wäre es möglich, die Einsatzgrenzen unter Einbeziehung weiterer Einflussparameter detaillierter zu beschreiben.

Der Aufbau der empirischen Erhebungen steht ebenfalls für weitere Forschungsaktivitäten zur Verfügung. Der gewählte modulare und flexible Aufbau ermöglicht eine einfache Adaption an neue Fragestellungen. Die Genauigkeit der Messungen war in diesem Fall ausreichend. Es sind jedoch weitere Anstrengungen zur Überprüfung der Datengüte nötig. Der Einsatz von Zeitrafferkameras zur Beobachtung des Verkehrs kann ebenfalls positiv angesehen werden. Die langen Akkulaufzeiten sowie die Kompaktheit der Geräte mit der einfachen Montagemöglichkeit an Schildermasten erlauben diskrete Langzeiterhebungen. Bei schwachen Lichtverhältnissen sowie Gegenlicht kommen die Geräte hingegen an ihre Grenzen. Mit neuen Modellen, die zwischenzeitlich am Lehrstuhl angeschafft wurden, konnte dies weitestgehend behoben werden.

13 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Forschung im Bereich teilsignalisierter Knotenpunkte ist mit dieser Arbeit in mehrerer Hinsicht noch nicht abgeschlossen und sollte weitergeführt werden, da sich gezeigt hat, dass die Teilsignalisierung sich sehr gut zwischen den etablierten Regelungen einfügt und diverse Vorteile bezogen auf den Verkehrsablauf bietet.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollten um weitere empirische Untersuchungen ergänzt werden. Insbesondere die vergleichsweise kurzen Erhebungszeiträume sowie die Beschränkung auf zwei Einmündungen in einer Mittelstadt lassen keine Verallgemeinerung der Ergebnisse der empirischen Untersuchungen in Bad Kreuznach zu.

Mit den Ergebnissen aus den Simulationsläufen in dieser Arbeit konnten Einsatzgrenzen und Diagramme zur Bestimmung von Verlustzeiten ermittelt werden, die es erlauben, für zuvor definierte Knotenpunkte eine einfache Dimensionierung vorzunehmen. Die Untersuchungen mittels Mikrosimulation sollten mit demselben Ansatz auch für höhere Verkehrsstärken fortgeführt werden. Es wird ein größeres Einsatzspektrum als in dieser Arbeit dargestellt vermutet.

Durch weitere Forschungsaktivitäten sollten die Diagramme in ein Berechnungsschema überführt werden, das es erlaubt, für beliebige Knotenpunkte eine Teilsignalisierung bemessen zu können. Erste Ansätze, die Kolonnenbildung in der Zeitlückenverteilung abzubilden, gibt es bereits. Diese sollten weitergeführt werden, um neben der Verkehrsstärke auch das Signalprogramm einbeziehen zu können. In der Literatur finden sich Ansätze zum Umgang mit abweichenden Zeitlückenverteilungen. Ihre Eignung für teilsignalisierte Knotenpunkte sollte in weiteren Untersuchungen geprüft werden. Insbesondere müssen die Faktoren dieser Funktionen in Abhängigkeit von Verkehrsstärke und Sperrzeitanteil ermittelt werden.

Darüber hinaus sind auch weitere Untersuchungen hinsichtlich der Fußverkehrsführung und ihrer Sicherheit vonnöten. Es wurden in dieser Arbeit prinzipielle Führungsformen erarbeitet. Eine Überprüfung auf ihre Praxistauglichkeit und Akzeptanz bei den Nutzern fand jedoch nicht statt. Dies sollte in den kommenden Jahren bei steigender Verbreitung teilsignalisierter Knotenpunkte nachgeholt werden.

Die Erhebungsgeräte haben sich im Einsatz als robust, zuverlässig und ausreichend genau erwiesen. Sie können somit auch bei weiteren Erhebungen genutzt werden. Es sollten jedoch weitergehende Tests bezüglich der Datengüte folgen.

Ebenfalls hat sich während der Bearbeitung gezeigt, dass es große Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen, die mittels des HBS und VISSIM erstellt wurden, gibt. Dies war der Grund, weshalb von der ursprünglich geplanten Vorgehensweise abgewichen werden musste, die eine Vorauswahl relevanter Simulationsdatensätze treffen sollte. Es sollten daher unbedingt Forschungsanstrengungen unternommen werden, die beiden Ansätze vergleichbarer zu machen. Es darf nicht sein, dass eine HBS Bewertung wesentlich andere Ergebnisse liefert als die Mikrosimulation unter sonst gleichen Randbedingungen.

Die Gesamtschau der Resultate zeigt, dass teilsignalisierte Knotenpunkte großes Potential aufweisen und daher in der Praxis zukünftig vermehrt eingesetzt werden können. Die Wissenschaft sollte diesen Prozess durch weitere Untersuchungen begleiten, so dass mittelfristig auch ein formalisiertes Bemessungsverfahren zur Verfügung steht.

Teil IV

Literaturverzeichnis und Anhang

Literaturverzeichnis

- AARGAU, Baudepartement Kanton (2004): *Empfehlungen Kreisverkehrsplätze*, deutsch, Baudepartement Kanton Aargau, Abteilung Verkehr
- ALRUTZ, Dankmar und Jörg STELLMACHER-HEIN (2002): „Fußgänger- und radfahrerfreundliche Gestaltung von kleinen Kreisverkehrsplätzen im Innerortsbereich“, in: *Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung*, Kap. 5.3.2.1
- ANDROSCH, Wolfgang (1976): *Untersuchungen zur Signalfolge an Knotenpunkten*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 200, Bonn-Bad Godesberg: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- ARBEITSKREIS LICHTSIGNALANLAGEN UND KNOTENPUNKTGESTALTUNG (1983): „Berücksichtigung des Fußgängerverkehrs an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage“, in: *Straße und Autobahn* 4/1983, S. 156–161
- AXHAUSEN, Kai, Martin FELLENDORF und D. HOOK (1989): „Zur Abhängigkeit der Zeitbedarfswerte von der Knotenpunktgeometrie“, in: *Straßenverkehrstechnik*, 33. Ser., S. 170–174
- BACHMANN, E. (1943): „Die Verkehrsleistung von Kreuzung und Kreisel“, in: *Straße und Verkehr* 12. Jahrgang, S. 1–12; 19–28
- BEIERL, Annette (2012): „Modellierung von Wartezeiten an Lichtsignalanlagen: Vergleich von HBS, HCM und einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“, Diplomarbeit, Stuttgart: Universität Stuttgart
- BONDZIO, Lothar, Karl VOSSLOH und Peter MÜLLER (2012): *Verkehrssicherheit innerörtlicher Kreisverkehre*, 1. Aufl, Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, ISBN: 9783939163466
- BOSSERHOFF, Dietmar (2008): *Grundsätzliche Aspekte und Vergleich plangleicher Knotenpunkte*, Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung, Wiesbaden, (besucht am 03.09.2014)
- BRÜHLMANN, Thomas (2015): *Arduino Praxiseinstieg*, 3. Auflage, MITP Verlags GmbH, 684 S., ISBN: 3958450709
- BRILON, Werner (1993): *Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Kreisverkehrsplätzen*, Schlußbericht, Bochum: Ruhr-Universität Bochum
- BRILON, Werner und Michael GROSSMANN (1988): *Entwicklung eines Simulationsmodells für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik

- BRILON, Werner und Thorsten MILTNER (2003): *Verkehrsqualität unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft 100, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen
- BRILON, Werner und Birgit STUWE (1991): „Kreisverkehrsplätze - Leistungsfähigkeit, Sicherheit und verkehrstechnische Gestaltung“, in: *Straßenverkehrstechnik* 35.Nr. 6, S. 296–304
- BRILON, Werner und Antje WEINERT (2001): *Ermittlung aktueller Grenz- und Folgezeitlücken für Außerortsknoten ohne Lichtsignalanlage*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 828, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau und Straßenverkehr
- BRILON, Werner und Ning WU (2008): „Kapazität von Kreisverkehren - Aktualisierung“, in: *Straßenverkehrstechnik* 5/2008, S. 280–288
- BRILON, Werner, Michael GROSSMANN und Harald BLANKE (1994): *Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablauf auf Straßen*, Forschungs Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 669, Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau
- BRÄUER, Dirk und Werner DREAGER (2001): *Fußverkehr. Eine Planungshilfe für die Praxis*, hrsg. von Institut für Landes- und Stadtentwicklung des LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (ILS), 1. Auflage
- FGSV (1988): *Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Knotenpunkte (RAK-1)*, Ausgabe 1988, Köln: FGSV Verlag
- (1991): *Merkblatt zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen*, hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen- und VERKEHRSWESEN, Bd. Band 127, Köln
 - (1994): *Verkehrsabhängige Steuerung am Knotenpunkt*, Kassel: FGSV Verlag
 - (1996): *Arbeitspapier Fußgängerquerungsanlagen innerhalb bebauter Gebiete*, Bd. 39, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
 - (2001): *Richtlinie für die Anlage und Ausstattung von Fußgängerüberwegen (R-FGÜ)*, hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen und VERKEHRSWESEN
 - (2002): *Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen (EFA)*, hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen- und VERKEHRSWESEN, Köln
 - (2006a): *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflußsimulation*, Köln: FGSV Verlag

-
- (2006b): *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*, hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen- und VERKEHRSWESSEN, Köln: FGSV Verlag
 - (2006c): *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen*, hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen- und VERKEHRSWESSEN, Ausgabe 2006, Köln: FGSV Verlag
 - (2008): *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung*, hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen- und VERKEHRSWESSEN, Ausgabe 2008, Köln: FGSV Verlag
 - (2010): *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*, hrsg. von Forschungsgesellschaft für Straßen- und VERKEHRSWESSEN, Ausgabe 2010, Köln: FGSV Verlag
 - (2012): *Empfehlungen für Verkehrserhebungen*, Köln: FGSV Verlag
 - (2015): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*, hrsg. von FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN, Ausgabe 2015, Köln: FGSV Verlag
- FSSV (2014): *Unvollständige Verkehrslichtsignalregelung RVS05.04.37 Merkblatt*, hrsg. von Österreichische FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE SCHIENE VERKEHR
- FINDEISEN, Hans-Günter (1975): *Das Verhalten verkehrsrechtlich untergeordneter Fahrzeuge an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen*, Heft 178, Bonn: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- FOLLMANN, Jürgen, Thomas NOVOTNY und Michael SCHENK (1994): *Grundlagen und Berechnungsverfahren zur verkehrstechnischen Bearbeitung eines Knotenpunktes*, Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Straßenbau
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG (2008): *Planungshinweise für Stadtstraßen, Teil 5 Knotenpunkte, II Kreisverkehre*, Freie und Hansestadt Hamburg
- FROST, Uwe und Wolfgang SCHULZE (2008): *Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit*, hrsg. von BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESSEN, Bd. 168, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach
- GDV (2013): *Unfallforschung kompakt. Untersuchungen zur Sicherheit von Zebrastreifen*, hrsg. von Gesamtverband der deutschen VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT, URL: <https://udv.de/de/node/50817> (besucht am 11.09.2016)
- GLASL, Peter, Wolfgang RAUH, Franz SKALA und Christoph STADLHUBER (1993): „Vorrang für Fußgänger“, in: *Wissenschaft & Verkehr*, 1/1993

- GRABE, Walter (1954): *Leistungsermittlung von nicht lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten des Straßenverkehrs*, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen Heft 11, Bielefeld: Kirschbaum Verlag
- GREENSHIELDS, Bruce Douglas (1947): *Traffic performance at urban street intersections*, New Haven, Connecticut, USA: Yale Bureau of Highway Traffic, Yale University
- GROSSMANN, Michael (1990): *Aktualisiertes Berechnungsverfahren für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen*, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik Heft 596, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr
- (1991): *Methoden zur Berechnung und Beurteilung von Leistungsfähigkeit und Verkehrsqualität an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen*, Bd. 9, Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen Ruhr Universität Bochum
- HALLER, Wolfgang (2000): *Fußgänger- und Radverkehrsführung an Kreisverkehrsplätzen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 793, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen Abt. Straßenbau und Straßenverkehr, ISBN: 3934458173
- (2007): „Das neue Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren“, in: *Straßenverkehrstechnik* 3/2007, S. 121–127
- HARDERS, Jürgen (1968): *Die Leistungsfähigkeit nicht signal geregelter städtischer Verkehrsknoten*, Heft 76 Bde., Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau
- (1976): *Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstraßen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 216, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau und Straßenverkehr
- HARTZ, Birgit (1995): „Geschichte der Kreisverkehrsplätze und ihrer Berechnungsverfahren“, in: *Straßenverkehrstechnik* 12/1995, S. 585–592
- HEUSCH, H. und Boesefeldt J. (1991): *Mehr Sicherheit für Fußgänger an Verkehrsampeln: Verbesserung der Lichtzeichenregelung in städtischen Straßennetzen für den Fußgänger*, Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
- HOFMANN, Markus und Sabine KREMLING (2011): *Schlossbergtunnel Dillenburg: Fortschreibung der verkehrstechnischen Begleitmaßnahmen im Straßennetz*, Verkehrstechnische Unterlagen, Habermehl und Follmann Ingenieurgesellschaft mbH

- HUBBERTEN, Christoph, Johannes SCHLAICH und Markus FRIEDRICH (2009): „Einfluß von Fußgängern auf den Verkehrsablauf an kleinen einstreifigen Kreisverkehrsplätzen“, in: *Straßenverkehrstechnik* 10/2009, S. 637–642
- HUEBER, David, Johannes SCHLAICH und Markus FRIEDRICH (2007): „Empirische Untersuchung zur Kapazität von kleinen einstreifigen Kreisverkehrsplätzen“, in: *Straßenverkehrstechnik* 11/2007, S. 561–565
- J.W.KORTE (1959): *Stadtverkehr gestern, heute und morgen*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-94763-6
- KAEMMERER, Heribert und Joachim SCHÖNLEITER (2006): „Der Siegeszug der Ampel, 75 Jahre Verkehrsregelung in deutschen Großstädten“, in: *Archiv für die Geschichte des Straßen- und Verkehrswesens*, Bd. 21, Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- KENNEDY, J. V., R. D. HALL und S. R. BARNARD (1998): *Accidents at urban mini-roundabouts*, Transport Research Laboratory
- KERSCHBAUM (2000): „Teilsignalisierung“, Diplomarbeit, FH Stuttgart
- KNOTE, Thoralf (2003): *Die Kapazität von Nebenströmen auf städtischen Vorfahrt-knoten*, Bd. 7, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Technische Universität Dresden
- KRELL, Karl (1956): „Beitrag zur Theorie der Zeitlücken und deren Bedeutung für die Leistungsfähigkeit von Straßen und Knoten“, Dissertation, Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt
- KÖRNER, Reiner (2000): „Simulation des Verkehrsablaufes an kleinen Kreisverkehrsplätzen mit Simple++“, Magisterarb., Fachgebiet Verkehrswesen - TU Kaiserslautern
- LAGEMANN, Arndt (2005): „Vorrang für Busse und Straßenbahnen an Kreisverkehren“, Dissertation, Kaiserslautern: TU Kaiserslautern
- LEUTZBACH, Wilhelm (1956): „Ein Beitrag zur Zeitlückenverteilung gestörter Straßenverkehrsströme“, Dissertation, Aachen: RWTH
- LISTL, Gerhard (2003): „Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs“, Dissertation, Universität Kassel
- LOHMILLER, Jochen (2006): „Mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Entwicklung eines Auswertungstool und Ermittlung der notwendigen Anzahl von Simulationsdurchläufen.“, Studienarbeit, Stuttgart: Universität Stuttgart

- MAIER, Reinhold, Markus ENKE, Martin SCHMOTZ und Michael M. BAIER (2012): *Berechnungsverfahren für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage unter Einbeziehung nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1075, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau
- MAURO, Raffaele (2010): *Calculation of Roundabouts*, Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 9783642045509
- MELLINGER, Nicolas (2015): „Entwicklung eines Zeitlückenerhebungsgerätes auf Mikrocontrollerbasis“, Vertieferarbeit, TU Kaiserslautern
- (2016): „Empirische Untersuchung zur Teilsignalisierung eines innerstädtischen Knotenpunkts“, Diplomarbeit, TU Kaiserslautern
- MELLINGER, Nicolas und Johannes ROOS (2017): „Empirische Untersuchung zum Verkehrsablauf an einer teilsignalisierten Einmündung“, in: *Straßenverkehrstechnik* 1/2017, S. 7–14
- MELLINGER, Nicolas, Johannes ROOS, Oliver HAHN und Sascha BARON (2016): „imovino - Kosteneffiziente, flexible Verkehrserhebungslösungen für Hochschulen und Kommunen Teil 1+2“, in: *Straßenverkehrstechnik* 2-2016, 3-2016
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER (1991): *Instruction interministerielle sur la signalisation routiere*
- MUNAWAR, Achmed (1994): „Entwicklung eines Simulationsmodells für Kreisverkehrsplätze mit Lichtsignalanlagen“, Diss., Bochum: Ruhr-Universität
- NEIDERT, Christian (2014): „Beurteilung der Zweckmäßigkeit von Fußgängerschutzanlagen an Kreisverkehrsplätzen“, Bachelorarbeit, Frankfurt: FH FFM
- RADICKE, Eberhard (1954): „Kreisverkehrsplätze mit Gruppenbetrieb“, Dissertation, Dresden: Hochschule für Verkehrswesen
- RAFF, Morton (1950): *A volume warrant for urban stop signs*, Saugatuck, Connecticut, USA: The Eno Foundation for Highway Traffic Control
- RETZKO, Hans-Georg (1961): *Vergleichende Bewertung verschiedener Arten der Verkehrsregelung an städtischen Straßenverkehrsknotenpunkten*, Bd. 12, Bonn: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik
- RICHTER, Thomas und Bernd HÜSKEN (1998): *Einsatzkriterien für Kreisverkehrsplätze außerhalb bebauter Gebiete*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 757, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen Abt. Straßenbau und Straßenverkehr, ISBN: 3934458173

- ROOS, Johannes und Ulrike REUTTER (2014): „Lichtsignalgestützter Kreisverkehr - Erfahrungen aus Kaiserslautern“, in: *Straßenverkehrstechnik* 5/2014, S. 311–315
- SCHNABEL, Werner und Dieter LOHSE (2011): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*, Bd. 1, 3. vollständige und überarbeitete Auflage, Berlin, Bonn: Beuth Verlag
- SCHNÜLL, Robert (2003): „Vorfahrtgeregelte Kreuzungen und Kreisverkehrsplätze um jeden Preis oder ehrliche Lichtsignalanlage?“, in: *Straßenverkehrstechnik* 11/2003, S. 565–575
- SCHNÜLL, Robert und Stefan GOLTERMANN (2000): *Einsatzkriterien für große Kreisverkehrsplätze mit und ohne Lichtsignalanlage an klassifizierten Straßen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 788, Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, ISBN: 3934458246
- SCHOENWIESE, Sebastian (2015): „Analyse des Einflusses des Fahrstreifenlayouts auf die Leistungsfähigkeit und anschließende Typisierung von Kreuzungen“, Vertiefenarbeit, TU Kaiserslautern
- SCHÜTZE, Peter (1974): *Überlastungswahrscheinlichkeit und Wartezeiten an Lichtsignalanlagen*, Heft 160, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau
- SIEGLOCH, Werner (1973): *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung*, Heft 154 Bde., Forschungsberichte aus d. Forschungsprogramm d. Bundesverkehrsministeriums u.d. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V, Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr
- STRASMANN, Burkhard (2014): „Die Autorität“, in: *Die Zeit* Nr. 32 vom 31.07.2014, Wissen 29
- STUWE, Birgit (1992): „Untersuchung der Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit an deutschen Kreisverkehrsplätzen“, Dissertation, Bochum: Ruhr-Universität
- STUWE, Birgit und Lothar BONDZIO (1993): *Kleine Kreisverkehre: Empfehlungen zum Einsatz und zur Gestaltung*, 1. Aufl, Bd. 16, Bausteine für die Planungspraxis in Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf: MSV, ISBN: 3817690169
- (TRB), Transportation Research Board (2000): *Highway Capacity Manual (HCM)*, Ausgabe 2000
- TOLLAZZI, Tomaz (2015): *Alternative Types of Roundabouts - An Informational Guide*, Springer Verlag, ISBN: 978-3-319-09084-9

- TONKE, Ferdinand (1983): *Wartezeiten bei instationärem Verkehr an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage*, Heft 401, Bonn-Bad Godesberg: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- VSS (1996): *Lichtsignalanlagen Phasentrennung*
- VSS (2005): *Verkehrsbeeinflussung an Kreiseln*, hrsg. von SCHWEIZERISCHER VERBAND DER STRASSEN- UND VERKEHRSFACHLEUTE, Forschungsauftrag VSS 1998/193, Zürich: Ausgeführt durch Bühlmann Ingenieur- und Planungsbüro sowie Marty + Partner AG
- VESPER, Andreas (2003): „Nicht vollständige Signalisierungen“, Diplomarbeit, TU Darmstadt
- WALDHERR, Steffen (2004): *Zwei Algorithmen zur Zuflußregelung an Schnellstraßen: Implementation und Vergleich in einer mikroskopischen Verkehrsflußsimulation*, Vertiefearbeit, Stuttgart: Universität Stuttgart
- WEINERT, Antje (2001): „Grenz- und Folgezeitlücken an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen“, Dissertation, Ruhr Universität Bochum
- WENZEL, Marc (2012): „Untersuchung der Zeitbedarfswerte mittels Videoanalyse“, Lehrstuhl für Verkehrstechnik - Technische Universität München
- WÖHE, Günter und Ulrich DÖRING (2013): *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, Auflage 25, Vahlen
- WIEDEMANN, Rainer (1974): „Simulation des Straßenverkehrsflusses“, Dissertation, Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen
- WU, Ning (1997): *Eine universelle Formel für die Berechnung der Kapazität von Kreisverkehrsplätzen*, Hochschulschrift, Bochum: Ruhr-Universität
- ZHANG, Xiwen (1989): „Einfluß des Grades der Teilgebundenheit auf die Wartezeit an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage“, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt

A Liste der abgefragten Einmündungen

KPID	Stadt	Knotenbezeichnung
1	Aalen	1 Hirschbachstr./ Braunenstr.
2	Aalen	220 Bahnhofstr./ Wilh.-Zapf-Str.
3	Aalen	450 Burgstallstr./ Bauschstr.
7	Bayreuth	LSA BT 211 Königs-allee/ Hühlweg
123	Hoyerswerda	Schweitzer Str./ Külzstr.
148	Kaiserslauter	Donnersbergstr./ Friedensstr.
158	Konstanz	Fürstenberg-/ Hardstr.
160	Konstanz	Radolfzeller-/ Dettingerstr.
164	Leipzig	Bornaische Str./ Wiedebachstr. NKL 01570
192	Offenburg	L3:
195	Offenburg	N12: Otto-Hahn-Str.
197	Offenburg	W2: Wilhelmstr.
198	Offenburg	W4:
239	Ravensburg	K204 Leonhardstr.
240	Ravensburg	K503 Tiefgarage Marienplatz
242	Ravensburg	LSA 303 Gartenstr./ Friedensstr./ Reichlestr.
243	Ravensburg	LSA 407 Jahnstr./ Hindenburgstr.
246	Rostock	Goerdeler-/ C.-Zetkin-Str.
B2	Aalen	B270/ Washington Square
B3	Leipzig	Zschochersche Str./ Kuhturmstr.
B4	Offenburg	Moltkestr./ Friedenstr.

B Liste der abgefragten Kreuzungen

KPID	Stadt	Knotenbezeichnung
5	Bautzen	B 6 Fichtestr.
8	Bayreuth	LSA BT 215 Königs-allee/ Hasenweg
9	Bayreuth	LSA BT 219 Spitz-wegstr./ Böcklinstr.
76	Denkendorf	LSA 26 L 1204 Neuhauser Str./ Heerweg
77	Denkendorf	LSA 28 Karlstraße/ Eichersteige
122	Hoyerswerda	Weinertstr./ Beethovenstr.
159	Konstanz	Europa-/ Grenzbachstr.
161	Konstanz	Reichenau-/Riedstr.
189	Offenburg	I2: Marlene Str.
191	Offenburg	L2: Hauptstr./ Krommstr.
193	Offenburg	L6:
196	Offenburg	N13: Otto-Hahn-Str./ Kinzig
244	Rostock	Detharding/ Schillingallee
261	Rostock	Hohe Düne/ Yachthafen
B1	Bayreuth	Universitätsstr./ Zufahrt Uni

C Fragebogen Einmündung

Befragung zu teilsignalisierten Knotenpunkten

Formularbogen Einmündung **BLANKO**

Knotenpunktbezeichnung:		
Stadt:		
Jahr der Inbetriebnahme:	Jahr der letzten Änderung:	

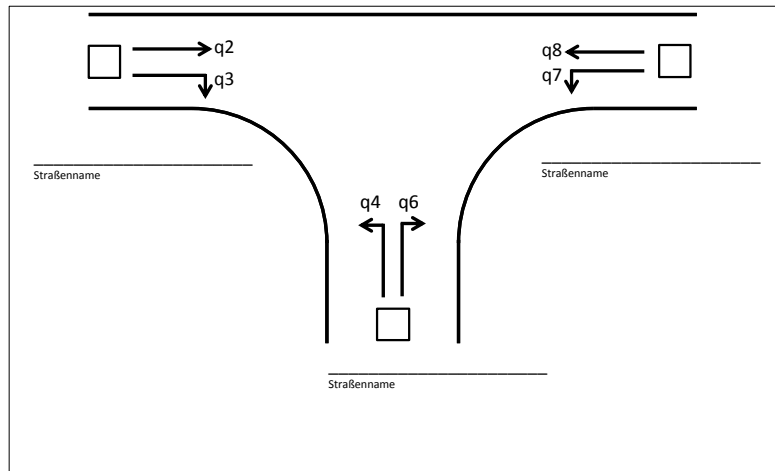
Bitte die Grundinformationen oben eintragen.

Ist die Verkehrsführung noch aktuell?

Ja Nein →

Bitte verwenden Sie statt diesem einen beigegefügt Blanko-Formularbogen für die Befragung oder laden diese herunter

Block A: Bauliche Gegebenheiten

Bitte tragen Sie die Straßennamen ein, markieren Sie durch welche Ströme auf Mischfahrstreifen geführt werden.

Bitte geben Sie bei separater an, wie viele Fahrzeuge sich auf dem Abbiegestreifen aufstellen können.

Strom q4: _____ Keine, da Mischfahrstreifen Strom q7: _____ Keine, da Mischfahrstreifen

Block B: Verkehrsdaten

Bitte tragen Sie die (Schwer-)Verkehrsbelastungen ein.

MSV (KFZ/h)	SV (%)		MSV (KFZ/h)	SV (%)
		→ q2		
		↓ q3	q8 ←	
			q7 ↓	
<input type="checkbox"/> Liegt nicht vor		<input type="checkbox"/> Liegt nicht vor		
Jahr der letzten Erhebung _____				
		q4 ←	q6 →	
SV (%)				MSV (KFZ/h)
		<input type="checkbox"/> Liegt nicht vor		

Bitte geben Sie das Fußgängerverkehrsaufkommen an.

- Niedrig (bis 200 Fg/h) → geschätzt?
- Mittelmäßig (200 Fg/h bis 400 Fg/h) → geschätzt?
- Hoch (über 400 Fg/h) → geschätzt?
- Liegt nicht vor

Bitte geben Sie das Radverkehrsaufkommen am gesamten Knotenpunkt an.

- Niedrig (bis 5% DTV) → geschätzt?
- Mittelmäßig (5% bis 10% DTV) → geschätzt?
- Hoch (über 10% DTV) → geschätzt?
- Liegt nicht vor

Wird der Knotenpunkt durch Linienbusse oder Straßenbahnen befahren?

- Ja Nein

Block C: Steuerungsverfahren

Bitte geben Sie das eingesetzte Steuerungsverfahren an.

Festzeitsteuerung

→ Umlaufzeit: _____ Sperrzeit: _____

Verkehrsabhängige Steuerung MIV

→ Mittels Rückstaulängen im Nebenstrom → Schwellwert: _____

→ Mittels Wartezeiten im Nebenstrom → Schwellwert: _____

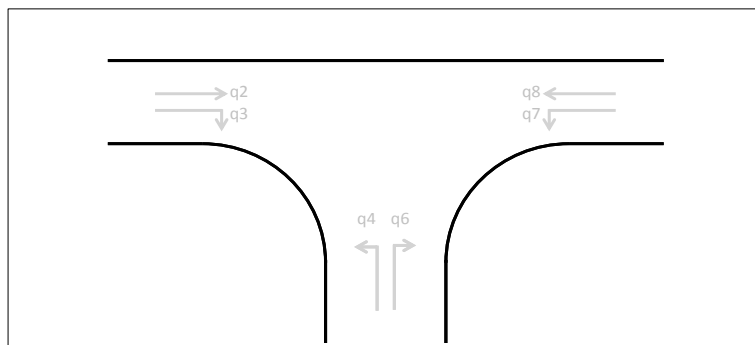
→ Mittels Zeitlücken im Hauptstrom → Schwellwert: _____

Anforderung durch ÖV Ja Nein

Anforderung durch Fußgänger Ja Nein

Sonstiges _____

Bitte tragen Sie die Lage der Signalgeber durch „▲“ ein und skizzieren Sie die Vorfahrtsbeschilderung.



Separater Signallageplan liegt bei

Block D: Bewertung des Verkehrsablaufs

Bitte tragen Sie sofern vorhanden die mittleren Wartezeiten und/oder die QSV nach HBS ein.

Strom q4 Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: _____

Strom q6 Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: _____

Strom q7 Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: _____

Ggf. Mischstrom q4/q6 Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: _____

Ggf. Mischstrom q7/q8 Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: _____

QSV_{gesamt} vor Implementierung der Teilsignalisierung: _____

Liegt nicht vor

Gibt es Ergebnisse aus einer Mikrosimulation (z.B. PTV VISSIM)?

Strom q4 Mittlere Verlustzeit: _____ [s]

Strom q6 Mittlere Verlustzeit: _____ [s]

Strom q7 Mittlere Verlustzeit: _____ [s]

Ggf. Mischstrom q4/q6 Mittlere Verlustzeit: _____ [s]

Ggf. Mischstrom q7/q8 Mittlere Verlustzeit: _____ [s]

Liegt nicht vor

Weitere Ergebnisse (bitte im Block F angeben oder auf separatem Blatt)

Block E: Ansprechpartner

Bitte nennen Sie einen Ansprechpartner für Rückfragen zum Knotenpunkt.

Nachname: _____

Vorname: _____

E-Mail: _____

Telefon: _____

Block F: Sonstiges

Vielen Dank für Ihre Unterstützung. Möchten Sie uns noch etwas mitteilen?

Möchten Sie über den weiteren Verlauf des Projektes informiert werden? Ja Nein

D Fragebogen Kreuzung

Befragung zu teilsignalisierten Knotenpunkten

Formularbogen Kreuzung **BLANKO**

Knotenpunktbezeichnung:			
Stadt:			
Jahr der Inbetriebnahme:		Jahr der letzten Änderung:	

Bitte die Grundinformationen oben eintragen.

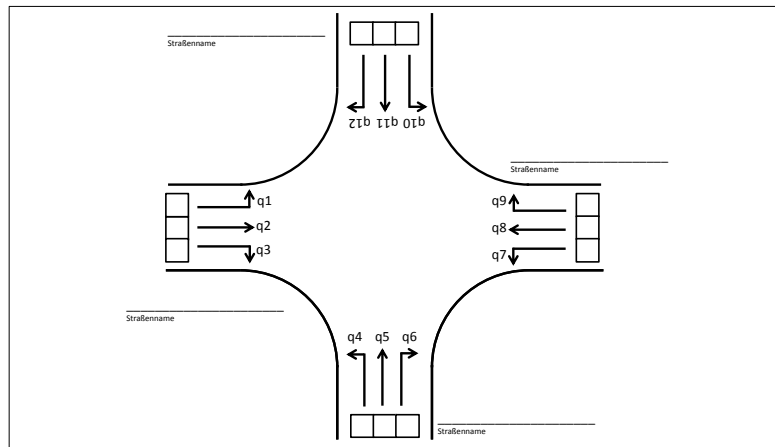
Ist die Verkehrsführung noch aktuell?

Ja Nein →

Bitte verwenden Sie statt diesem einen beigegefügt Blau-Formularbogen für die Befragung oder laden diesen herunter

Block A: Bauliche Gegebenheiten

Bitte tragen Sie die Straßennamen ein, markieren Sie durch welche Ströme auf Mischfahrstreifen geführt werden.



Bitte geben Sie bei separater an, wie viele Fahrzeuge sich auf dem Abbiegestreifen aufstellen können.

Strom q1: _____ Keine, da Mischfahrstreifen

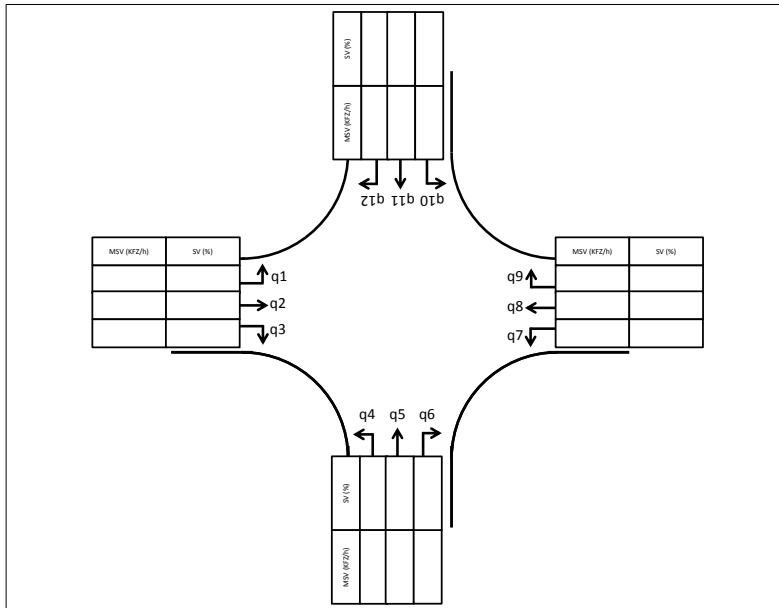
Strom q4: _____ Keine, da Mischfahrstreifen

Strom q7: _____ Keine, da Mischfahrstreifen

Strom q10: _____ Keine, da Mischfahrstreifen

Block B: Verkehrsdaten

Bitte tragen Sie die (Schwer-)Verkehrsbelastungen ein.



Bitte geben Sie das Fußgängerverkehrsaufkommen an.

- Niedrig (bis 200 Fg/h) → geschätzt?
- Mittelmäßig (200 Fg/h bis 400 Fg/h) → geschätzt?
- Hoch (über 400 Fg/h) → geschätzt?
- Liegt nicht vor

Bitte geben Sie das Radverkehrsaufkommen am gesamten Knotenpunkt an.

- Niedrig (bis 5% DTV) → geschätzt?
- Mittelmäßig (5% bis 10% DTV) → geschätzt?
- Hoch (über 10% DTV) → geschätzt?
- Liegt nicht vor

Wird der Knotenpunkt durch Linienbusse oder Straßenbahnen befahren?

Ja Nein

Block C: Steuerungsverfahren

Bitte geben Sie das eingesetzte Steuerungsverfahren an.

Festzeitsteuerung

→ Umlaufzeit: _____ Sperrzeit: _____

Verkehrabhängige Steuerung MIV

→ Mittels Rückstaulängen im Nebenstrom → Schwellwert: _____

→ Mittels Wartezeiten im Nebenstrom → Schwellwert: _____

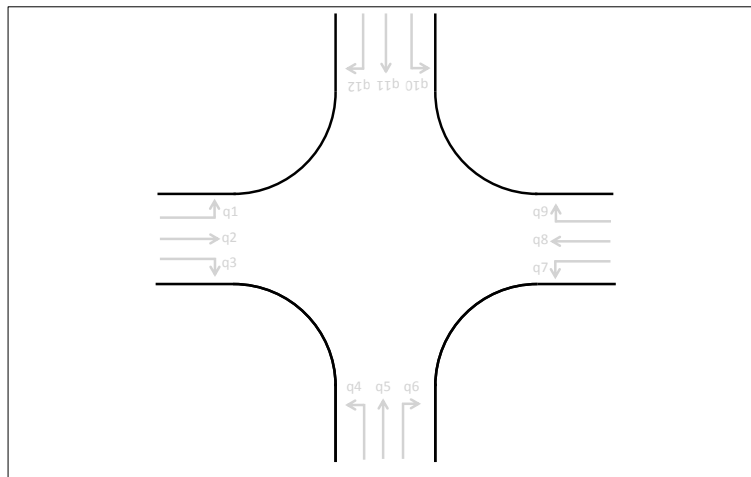
→ Mittels Zeitlücken im Hauptstrom → Schwellwert: _____

Anforderung durch ÖV Ja Nein

Anforderung durch Fußgänger Ja Nein

Sonstiges _____

Bitte tragen Sie die Lage der Signalgeber durch „▲“ ein und skizzieren Sie die Vorfahrtsbeschilderung.



Separater Signallageplan liegt bei

Block D: Bewertung des Verkehrsablaufs

Bitte tragen Sie sofern vorhanden die mittleren Wartezeiten und/oder die QSV nach HBS ein.

Strom q1	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Strom q4	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Strom q6	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Strom q7	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Strom q10	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Strom q11	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Ggf. Mischstrom q1/q2	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Ggf. Mischstrom q4/q6	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Ggf. Mischstrom q7/q8	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____
Ggf. Mischstrom q10/q11	Mittlere Wartezeit: _____ [s] QSV: ____

QSV_{gesamt} vor Implementierung der Teilsignalisierung: ____

Liegt nicht vor

Gibt es Ergebnisse aus einer Mikrosimulation (z.B. PTV VISSIM)?

Strom q1	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Strom q4	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Strom q6	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Strom q7	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Strom q10	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Strom q11	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Ggf. Mischstrom q1/q2	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Ggf. Mischstrom q4/q6	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Ggf. Mischstrom q7/q8	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]
Ggf. Mischstrom q10/q11	Mittlere Verlustzeit: _____ [s]

Liegt nicht vor

Weitere Ergebnisse (bitte im Block F angeben oder auf separatem Blatt)

Block E: Ansprechpartner

Bitte nennen Sie einen Ansprechpartner für Rückfragen zum Knotenpunkt.

Nachname: _____

Vorname: _____

E-Mail: _____

Telefon: _____

Block F: Sonstiges

Vielen Dank für Ihre Unterstützung. Möchten Sie uns noch etwas mitteilen?

Möchten Sie über den weiteren Verlauf des Projektes informiert werden? Ja Nein

E Fragebogen Kreisverkehr

Befragung zu teilsignalisierten Knotenpunkten

Formularbogen Kreisverkehr **BLANKO**

Knotenpunktbezeichnung:	
Stadt:	
Jahr der Inbetriebnahme:	Jahr der letzten Änderung:

Bitte die Grundinformationen oben eintragen.

Ist die Verkehrsführung noch aktuell?

Ja Nein → Bitte verwenden Sie statt diesem einen beigegefügt Blau-
Formularbogen für die Befragung oder laden diesen herunter

Block A: Bauliche Gegebenheiten

Bitte tragen Sie die Anzahl der Zufahrten ein.

3 4 5 Sonstiges: ____ Keine Angabe

Bitte geben Sie die Anzahl der Fahrspuren der Kreisfahrbahn an.

1 2 3 Keine Angabe

Bitte geben Sie den Durchmesser der Kreisfahrbahn an.

Durchmesser: _____ [m] Keine Angabe

Block B: Verkehrsdaten

Bitte tragen Sie die (Schwer-)Verkehrsbelastungen ein (Nicht benötigte Zellen bitte streichen).

Von / Nach	Ast 1		Ast 2		Ast 3		Ast 4		Ast 5	
	MSV [Kfz/h]	SV [%]	MSV [Kfz/h]	SV [%]	MSV [Kfz/h]	SV [%]	MSV [Kfz/h]	SV [%]	MSV [Kfz/h]	SV [%]
Ast 1										
Ast 2										
Ast 3										
Ast 4										
Ast 5										

Liegt nicht vor

Bitte geben Sie das Fußgängerverkehrsaufkommen an.

- | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| Niedrig (bis 200 Fg/h) | <input type="checkbox"/> | → geschätzt? | <input type="checkbox"/> |
| Mittelmäßig (200 Fg/h bis 400 Fg/h) | <input type="checkbox"/> | → geschätzt? | <input type="checkbox"/> |
| Hoch (über 400 Fg/h) | <input type="checkbox"/> | → geschätzt? | <input type="checkbox"/> |
| Liegt nicht vor | | | <input type="checkbox"/> |

Bitte geben Sie das Radverkehrsaufkommen am gesamten Knotenpunkt an.

- | | | | |
|------------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| Niedrig (bis 5% DTV) | <input type="checkbox"/> | → geschätzt? | <input type="checkbox"/> |
| Mittelmäßig (5% bis 10% DTV) | <input type="checkbox"/> | → geschätzt? | <input type="checkbox"/> |
| Hoch (über 10% DTV) | <input type="checkbox"/> | → geschätzt? | <input type="checkbox"/> |
| Liegt nicht vor | | | <input type="checkbox"/> |

Wird der Knotenpunkt durch Linienbusse oder Straßenbahnen befahren?

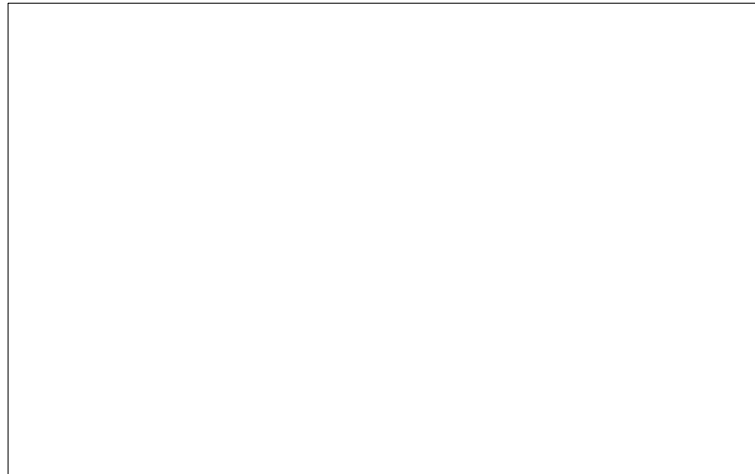
- Ja Nein

Block C: Steuerungsverfahren

Bitte geben Sie das eingesetzte Steuerungsverfahren an.

- Festzeitsteuerung
- Umlaufzeit: _____ Sperrzeit: _____
- Verkehrsabhängige Steuerung MIV
- Mittels Rückstaulängen im Nebenstrom → Schwellwert: _____
- Mittels Wartezeiten im Nebenstrom → Schwellwert: _____
- Mittels Zeitlücken im Hauptstrom → Schwellwert: _____
- Anforderung durch ÖV Ja Nein
- Anforderung durch Fußgänger Ja Nein
- Sonstiges _____

Bitte skizzieren Sie den Kreisverkehr tragen Sie die Lage der Signalgeber durch „▲“ ein.



Separater Signallageplan liegt bei

Block D: Bewertung des Verkehrsablaufs

Bitte tragen Sie sofern vorhanden die mittleren Wartezeiten und/oder die QSV nach HBS ein.

Von / Nach	Ast 1		Ast 2		Ast 3		Ast 4		Ast 5	
	t_w [s]	QSV	t_w [s]	QSV	t_w [s]	QSV	t_w [s]	QSV	t_w [s]	QSV
Ast 1										
Ast 2										
Ast 3										
Ast 4										
Ast 5										

QSV_{gesamt} vor Implementierung der Teilsignalisierung: _____

Liegt nicht vor

Gibt es Ergebnisse aus einer Mikrosimulation (z.B. PTV VISSIM)?

Von / Nach	Ast 1	Ast 2	Ast 3	Ast 4	Ast 5
	t_w [s]	t_w [s]	t_w [s]	t_w [s]	t_w [s]
Ast 1					
Ast 2					
Ast 3					
Ast 4					
Ast 5					

Liegt nicht vor

Weitere Ergebnisse (bitte im Block F angeben oder auf separatem Blatt)

Block E: Ansprechpartner

Bitte nennen Sie einen Ansprechpartner für Rückfragen zum Knotenpunkt.

Nachname: _____

Vorname: _____

E-Mail: _____

Telefon: _____

Block F: Sonstiges

Vielen Dank für Ihre Unterstützung. Möchten Sie uns noch etwas mitteilen?

Möchten Sie über den weiteren Verlauf des Projektes informiert werden?

 Ja

 Nein

H Kombinationsmöglichkeiten der Fahrstreifenaufteilung für Kreuzungen

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		M		M		M		M		M		
2	X	M		M		M		M		M		
3		M	X		M		M		M			
4		M		X	M		M		M			
5		M		M	X		M		M			
6		M		M		X	M		M			
7		M		M		M	X		M			
8		M		M		M		X	M			
9		M		M		M		M		X		
10	X	M		X	M		M		M			
11	X	M		M	X		M		M			
12	X	M		M		X	M		M			
13	X	M		M		M	X		M			
14	X	M		M		M		X	M			
15	X	M		M		M		M		X		
16	M	X	X		M		M		M			
17	M	X		M	X		M		M			
18	M	X		M		X	M		M			
19	M	X		M		M	X		M			
20	M	X		M		M		X	M			
21	M	X		M		M		M		X		
22	M		X	M	X		M		M			
23	M		X	M		M	X		M			
24	M		X	M		M		X	M			
25	M		X	M		M		M		X		
26	M		M	X	X		M		M			
27	M		M	X		M	X		M			
28	M		M	X		M		X	M			
29	M		M	X		M		M		X		
30	M		M		X	M	X		M			
31	M		M		X	M		M		X		
32	M		M		M	X	X		M			
33	M		M		M	X		M		X		
34	X	M		X	M	X	M		M			
35	X	M		X	M		M	X		M		
36	X	M		X	M		M		X		M	
37	X	M		X	M		M		M		X	
38	X	M		M	X	X	M		M			
39	X	M		M	X		M	X		M		
40	X	M		M	X		M		X		M	
41	X	M		M	X		M		M		X	
42	X	M		M	X		M	X		M		
43	X	M		M	X		M		M		X	
44	X	M		M		M	X	X		M		
45	X	M		M		M	X		M		X	
46	M	X	X		M	X		M		M		
47	M	X	X		M		M	X		M		
48	M	X	X		M		M		X		M	

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
129	X	X	X		M		X	M		X	M	
130	X	X	X		M		X	M		M		X
131	X	X	X		M		M	X		X		M
132	X	X	X		M		M	X		M		X
133	X	M	X	X	X	X	M			M		
134	X	M	X	X	X	M	X			M		
135	X	M	X	X	X	M		X		M		
136	X	M	X	X	X	M			X	M		X
137	M	X	X	X	X	X	M			M		
138	M	X	X	X	X	M	X			M		
139	M	X	X	X	X	M		X		M		
140	M	X	X	X	X	M			M		X	
141	M	X	X	X	X	M		X		M		
142	M	X	X	X	X	M			M		X	
143	M	X	X	X	M	X		X		M		X
144	M	X	X	X	M	X			M		X	
145	X	M	X	M	X	X	X			M		
146	X	M	M	X	X	X	X			M		
147	X	M		M	X	X	X		X		M	
148	X	M		M	X	X	X			M		X
149	M	X	X	M	X	X	X			M		
150	M	X	M	X	X	X	X			M		
151	M	X		M	X	X	X		X		M	
152	M	X		M	X	X	X			M		X
153	M	X		M	X	X	X		X		M	
154	M	X		M	X	X	X			M		X
155	M		M	X	X	X	X		X		M	
156	M		M	X	X	X	X			M		X
157	X	M	X		M		M		X	X	X	
158	X	M		M	X		M		X	X	X	
159	X	M		M	X		M		X	X	X	
160	X	M		M		M	X		X	X	X	
161	M	X	X		M		M		X	X	X	
162	M	X		M	X		M		X	X	X	
163	M	X		M	X		M		X	X	X	
164	M	X		M		M	X		X	X	X	
165	M	X		M	X		M		X	X	X	
166	M	X		M		M	X		X	X	X	
167	M		M	X	X		M		X	X	X	
168	M		M	X		M	X		X	X	X	
169	X	X	X	X	M	X	M		X	M		
170	X	X	X	X	M	X	M		M		X	
171	X	X	X	M	X	X	M		X		M	
172	X	X	X	M	X	X	M		M		X	
173	X	X	X	X	M		M	X		X	M	
174	X	X	X	X	M		M	X		M		X
175	X	X	X	M	X		M	X		X		M
176	X	X	X	M	X		M	X		M		X

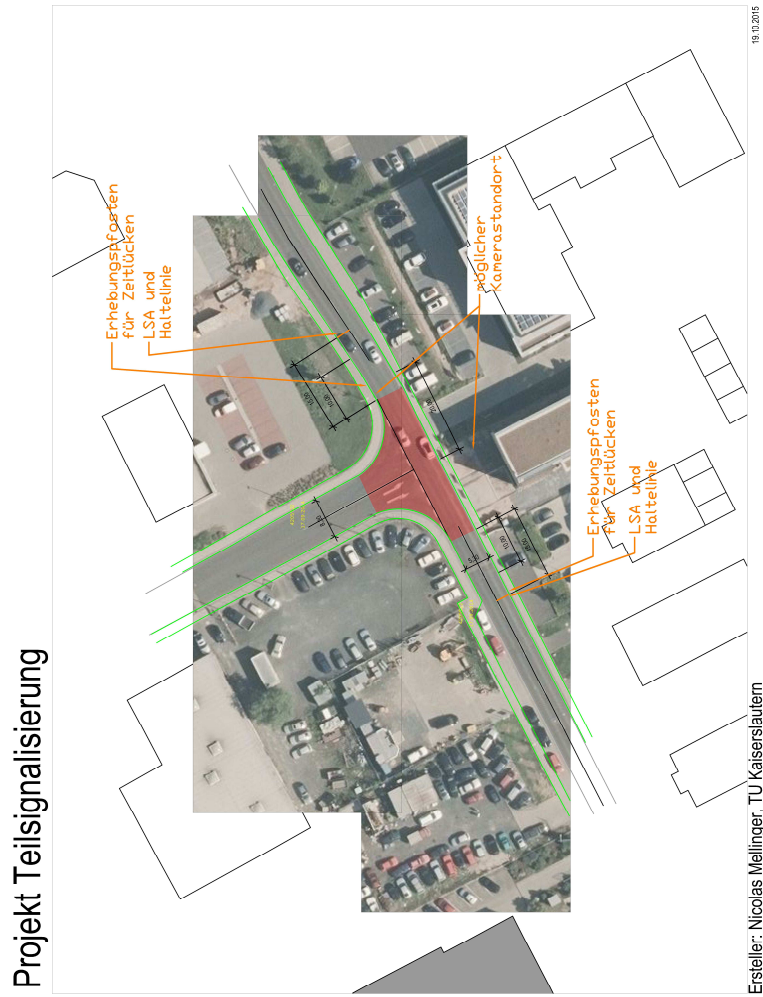
I Teilsignalisierungen an AS1EI

AS1EI	Fall	Z1	Z2	Z3	
		MFS q2/q3	MFS q4/q6	q7	q8
Keine Signalisierung	0	O	O	O	O
Nicht empfohlene Teilsignalisierungen		O	O	O	X
		O	O	X	O
		X	O	O	O
		X	O	O	X
		X	O	X	O
		F	O	O	O
		O	O	F	F
	TS23F78F	F	O	X	X
Mögliche Teilsignalisierungen	TS23F	F	O	X	X
	TS78F	X	O	F	F
	TS2378	X	O	X	X
Vollsignalisierung	V	X	X	X	X
Unmögliche Teilsignalisierungen		O	X	O	O
		O	X	O	X
		O	X	X	O
		O	X	X	X
		X	X	O	O
		X	X	O	X
	X	X	X	O	

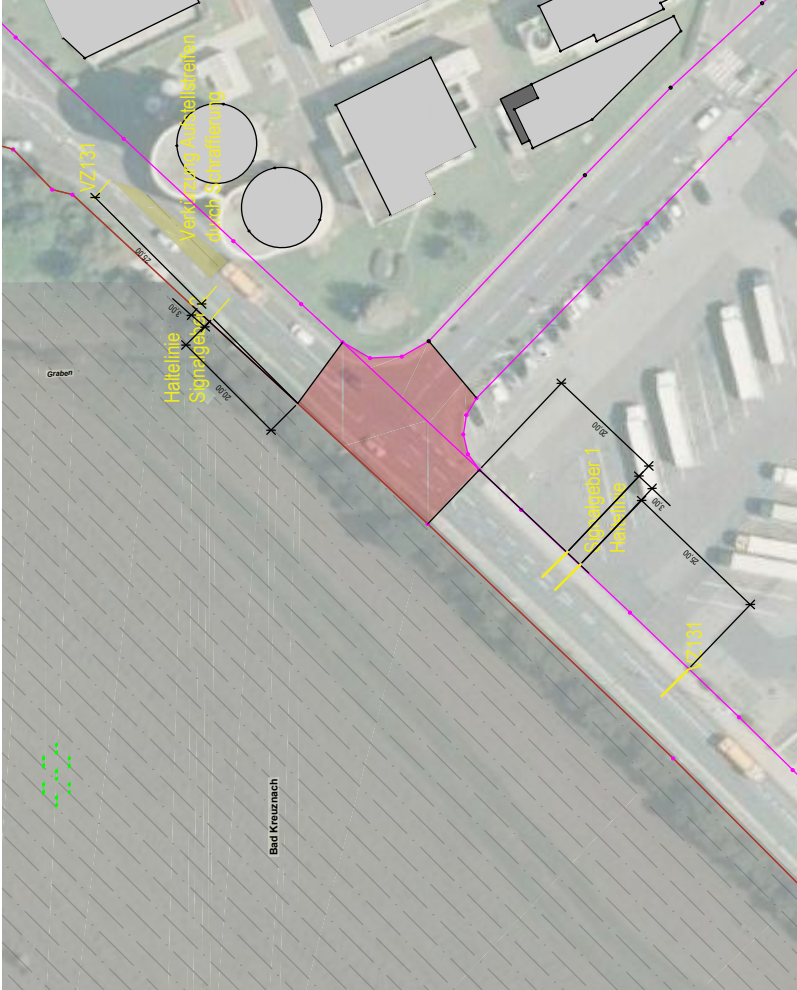
J Teilsignalisierungen an AS2EI

AS2EI	Fall	Z1 MFS q2/q3	q4	Z2 q6	q7	Z3 q8
Keine Signalisierung	0	0	0	0	0	0
Nicht empfohlene Teilsignalisierungen		0	0	0	0	X
		0	0	0	X	0
		0	0	0	X	X
		X	0	0	0	0
		X	0	0	0	X
		F	0	0	0	0
		0	0	0	F	F
	TS23F78F	F	0	0	F	F
Mögliche Teilsignalisierungen	TS2378	X	0	0	X	X
	TS23F	F	0	0	X	X
	TS78F	X	0	0	F	F
Vollsignalisierung	V	X	X	X	X	X
Unmögliche Teilsignalisierungen		0	0	X	0	0
		0	0	X	0	X
		0	0	X	X	X
		0	0	X	X	0
		0	X	0	0	0
		0	X	0	0	X
		0	X	0	X	0
		0	X	0	X	X
		0	X	X	0	0
		0	X	X	0	X
		0	X	X	X	0
		X	0	X	0	0
		X	0	X	0	X
		X	0	X	X	0
		X	0	X	X	X
		X	X	0	0	0
		X	X	0	0	X
		X	X	0	X	0
		X	X	0	X	X
		X	X	X	0	0
	X	X	X	0	X	
	X	X	X	X	0	

M Lageplan Knotenpunkt 1



N Lageplan Knotenpunkt 2



O Zähldaten Knotenpunkt 1

Zufahrt 1 Schwabenheimer Weg aus Richtung Kreisel											
	Rad	Kfz	LKW <7,5	LKW > 7,5	Bus	Sonst	PKW-E	Summe	SV [%]	Anteil q2	Anteil q3
16:30	0	129	1	3	1	0	139	134	4%		
16:45	0	175	0	3	0	0	181	178	2%		
17:00	1	146	1	0	1	0	150	149	1%		
17:15	1	152	0	1	1	0	157	155	1%		
17:30	2	602	2	7	3	0	627	616	2%	79,1%	20,9%
STUNDENWERT											
Zufahrt 2 Industriestraße											
	Rad	Kfz	LKW <7,5	LKW > 7,5	Bus	Sonst	PKW-E	Summe	SV [%]	Anteil q4	Anteil q6
16:30	1	101	1	0	0	0	103	103	1%		
16:45	3	97	3	0	0	0	104	103	3%		
17:00	2	101	1	0	0	0	104	104	1%		
17:15	1	99	0	0	0	0	100	100	0%		
17:30	7	398	5	0	0	0	411	410	1%	28,5%	71,5%
STUNDENWERT											
Zufahrt 3 Schwabenheimer Weg aus Richtung Innenstadt											
	Rad	Kfz	LKW <7,5	LKW > 7,5	Bus	Sonst	PKW-E	Summe	SV [%]	Anteil q7	Anteil q8
16:30	0	135	0	0	1	0	137	136	1%		
16:45	1	119	1	0	1	0	123	122	2%		
17:00	0	137	0	2	0	0	141	139	1%		
17:15	0	116	0	1	1	0	120	118	2%		
17:30	1	507	1	3	3	0	521	515	1%	30,3%	69,7%
STUNDENWERT											

P Zähldaten Knotenpunkt 2

		Zufahrt 1 Gesinger Straße stadtauswärts										Anteil q2	Anteil q3
		Rad	Kfz	LKW <7,5	LKW > 7,5	Bus	Sonst	PKW-E	Summe	SV [%]			
16:30	16:45	1	234	0	5	0	0	245	240	2%			
16:45	17:00	1	234	0	5	0	0	245	240	2%			
17:00	17:15	1	234	0	5	0	0	245	240	2%			
17:15	17:30	1	234	0	5	0	0	245	240	2%			
STUNDENWERT		4	936	0	20	0	0	980	960	2%	97,5%	2,5%	

		Zufahrt 2 Michelinstraße										Anteil q4	Anteil q6
		Rad	Kfz	LKW <7,5	LKW > 7,5	Bus	Sonst	PKW-E	Summe	SV [%]			
16:30	16:45	0	85	2	2	0	0	92	89	4%			
16:45	17:00	0	85	2	2	0	0	92	89	4%			
17:00	17:15	0	85	2	2	0	0	92	89	4%			
17:15	17:30	0	85	2	2	0	0	92	89	4%			
STUNDENWERT		0	340	8	8	0	0	368	356	4%	2,2%	97,8%	

		Zufahrt 3 Gesinger Straße stadteinwärts										Anteil q7	Anteil q8
		Rad	Kfz	LKW <7,5	LKW > 7,5	Bus	Sonst	PKW-E	Summe	SV [%]			
16:30	16:45	1	163	1	7	1	0	182	173	5%			
16:45	17:00	1	163	1	7	1	0	182	173	5%			
17:00	17:15	1	163	1	7	1	0	182	173	5%			
17:15	17:30	1	163	1	7	1	0	182	173	5%			
STUNDENWERT		4	652	4	28	4	0	728	692	5%	30,1%	69,9%	

Q Lebenslauf

Schule & Studium

1992 – 1996	Besuch der Grundschule Pfaffen-Schwabenheim
1996 – 2005	Besuch des humanistischen Gymnasiums an der Stadtmauer in Bad Kreuznach
2005 – 2009	Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit Schwerpunkt Produktentwicklung an der FH Bingen
2009 – 2012	Studium des Verkehrswesens (Traffic and Transport) an der TU Darmstadt
WS 2010/2011	Auslandssemester an der Eidgenössisch Technischen Hochschule Lausanne (EPFL)

Abschlüsse

2005	Abitur am Gymnasium a.d. Stadtmauer
2009	Abschluss als Dipl. Wirtsch.-Ing. (FH)
2012	Abschluss als M.Sc. in Verkehrswesen (Traffic and Transport)

Beruflicher Werdegang

2005 / 2006	Zwei Praktika bei der Real I.S. AG, Gesellschaft für Immobilien-Assetmanagement, in München
2005	Techn. Vorpraktikum zum Studium bei der Allit Kunststofftechnik AG in Bad Kreuznach
2008 / 2009	Praxissemester in der Qualitätssicherung der Audi AG in Ingolstadt
2009	Diplomarbeit bei Dr. Heinrich Schneider Messtechnik in Bad Kreuznach
2009 – 2012	Studentische Hilfskraft am Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der TU Darmstadt
ab 2012	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mobilität und Verkehr der TU Kaiserslautern
ab 2016	Geschäftsführer und Mitgründer der imovino UG - Lösungen im Verkehrswesen

23. Februar 2018

Zuletzt erschienene Bände der Grünen Reihe

Band 72: Pendlerverkehr im ländlichen Raum - Ansatzpunkte für eine kollaborative Mobilität

Sascha Baron

Band 71: Erfassung und Bewertung der Arbeit von Verkehrsverbänden

Oliver Dümmler

Band 70: Fahrradmitnahme im Schienenpersonennahverkehr

Sascha Baron, Dr. Michal Beim, Oliver Dümmler, Volker Schmitt

Band 69: Verkehrsmanagement Fußball-Weltmeisterschaft 2006 – Konzept, Akzeptanz Wirkung, Übertragbarkeit

Hartmut H. Topp, Stephan Bogusch, Torsten von Einem, Annette Spellerberg, Christina West

Band 68: Wir gestalten Mobilität - Ehemalige berichten aus heutiger Arbeit

Hartmut Topp, Karin Arndt, Juliane Krause, Volker Böhn, Frank Schleicher-Jester, Silvia Körntgen, Ralf Huber-Erler, Martin Haag, Jan Riel, Kristin Blomqvist, Ulrike Huwer, Tadashi Ito, Christine Krämer, Joachim Kröh

Band 67: Segway in public spaces

André Darmochwal

Band 66: S-Bahn - Planung & Betrieb

Joachim F. Kröh, Michael Heilmann, Joel Forthoffer, Christian Schindler, Werner Schreiner

Band 65: Öffentlicher Nachtverkehr in Großstadtregionen - Konzeptentwicklung am Beispiel Berlin

André Darmochwal

Band 64: Basic Conditions for the Implementation of Speed Adaptation Technologies in Germany

Christoph Menzel

Band 63: Intelligent Speed Adaptation - Expertenstatements

Christoph Menzel, Annette Spellerberg, Heiner Erke, Werner Köppel, Volker Meewes, Kai Tobias, Andras Varhelyi, Magnus Hjalmdahl, Hans-Jürgen Marker, Christoph Huß, Joachim Feldges, Klaus Brandenburg, Heiner Müller-Merbach, Lothar Kaufmann

Band 62: Verkehr und Tourismus in sensiblen Naturräumen

Reinhard Grebe, Stephan Zimmermann, Horst Schumacher, Veronika Holzer, Christiane Brandenburg, Hartmut Strunz, Wolfgang Heinze, Gernot Steinberg, Werner Schreiner, Sébastien Morelle, Mathias Herrmann

Band 61: Straßenbahnen in Fußgängerzonen - Verträglichkeit und Gestaltung

Martin Schmidt

Band 60: Visionen für Stadt und Verkehr

Kurt Ackermann, Thomas Sieverts, Hartmut Topp, Uwe Köhler, Gisela Stete, Juliane Krause, Silvia Körntgen, Peter Kirchhoff, Klaus J. Beckmann, Joachim F. Kröh, Karlheinz Jacobitz, Jörg Nagel, Robert Schnüll, Gerd Sammer, Wolfgang J. Berger, Peter Müller

Band 59: Lärmschutz und gestalterische Integration hochbelasteter Straßen durch Einhausung

Pia Lohnes

Band 58: mobil & barrierefrei planen, bauen, nachrüsten

Andrea Rau, Gunnar Heipp, Ursula Fuss, Bernhard Claus, Heinrich Mockenhaupt, Dirk Bräuer, Jürg Rügger, Carola Mennicken u.a.

Band 57: Integration von S- und U-Bahn-Systemen

Bernhard Meier

Band 56: Modellierung von Störungen des Verkehrsablaufs durch Ein- und Ausparken am Fahrbahnrand

Jan Riel

Grüne Reihe Nr. 73

Institut für Mobilität & Verkehr | Institute for Mobility & Transport | Paul-Ehrlich-Straße 14 | 67663 Kaiserslautern

www.imove-kl.de

info@imove-kl.de | Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz

ISSN: 1613-5040 | D 386