

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verkehrstechnik

Kooperative Lichtsignalsteuerung
Integration von Fahrzeugen in die Steuerung
vernetzter Verkehrssysteme

Dipl.-Ing. Univ. Hans Jakob Kathz

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Constantinos Antoniou

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch
2. Prof. Dr. Ir. Hans Hellendoorn, TU Delft
3. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, TU Braunschweig
(schriftliche Beurteilung)

Die Dissertation wurde am 18.09.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 29.11.2017 angenommen.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Fritz Busch bedanken, der zum einen mit viel fachlicher Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, mir zum anderen aber auch immer wieder Möglichkeiten gegeben hat, über den Tellerrand hinauszublicken. Vielen Dank für Dein Vertrauen und Deine scheinbar unerschöpfliche Motivation.

Bei Hans Hellendoorn möchte ich mich ganz herzlich für die Übernahme des Korreferats und die detaillierte Kommentierung der Arbeit bedanken. Außerdem möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, von ihm und seinen Mitarbeitern in Delft lernen zu dürfen. Insbesondere Bart de Schutter möchte ich an dieser Stelle für die intensiven Gespräche danken, in denen er mir mit seiner Erfahrung aus einer Sackgasse geholfen hat.

Bernhard Friedrich gilt mein Dank für die Anfertigung des dritten Gutachtens. Vito Mauro möchte ich dafür danken, dass er seine langjährige Erfahrung mit mir in interessanten Gesprächen geteilt hat.

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrstechnik entstanden. Die Zeit am Lehrstuhl wird mir stets in bester Erinnerung bleiben. Das liegt nicht nur an der sehr guten Arbeitsatmosphäre und dem Teamgeist, die den Alltag so viel schöner gemacht haben, sondern auch an den vielen Unternehmungen, die außerhalb des Lehrstuhls stattfanden. Besonders der Forschungsgruppe für Stadtverkehr und Lichtsignalsteuerung möchte ich für die vielen Diskussionen danken, die von grundsätzlichen Ideen meiner Forschung bis hin zu den Details dieser Arbeit reichten.

Meine Promotion wurde maßgeblich von der Bosch-Forschungstiftung (ehemals Hans L. Merkle-Stiftung) finanziert, wofür ich sehr dankbar bin. Weiterhin möchte ich mich für die Betreuung durch die Abteilung Automated Driving and Driver Assistance Systems der Robert Bosch GmbH bedanken, die ich im Rahmen der Förderung erhielt. Vielen Dank für das Interesse an dem weitgehend fachfremden Thema, insbesondere an Frank Niewels und Gernot Schröder.

Ich möchte auch meinen Freunden und meiner Familie danken, die mich während des Anfertigens dieser Arbeit unterstützt haben. Ihr wusstet, wann es an der Zeit ist, mich nach der Dissertation zu fragen und wann es besser ist, über alles andere zu sprechen. Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium und damit den Grundstein für diese Arbeit ermöglicht haben.

Dir, liebe Heather, kann ich gar nicht genug dafür danken, dass du mich während der letzten Jahre so liebevoll begleitet hast. Du warst nicht nur an den erfolgreichen Tagen für mich da, sondern auch, wenn ich gezweifelt und gegrübelt habe. Die Dissertationen sind jetzt geschrieben und ich freue mich unheimlich auf unsere nächsten Kapitel als Familie.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiges Lichtsignalsteuerungsverfahren für vernetzte Verkehrssysteme vorgestellt. Das Verfahren zielt darauf ab, die Daten vernetzter Fahrzeuge als Entscheidungsgrundlage für die Lichtsignalsteuerung zu nutzen und Geschwindigkeits-hinweise an Fahrzeuge zu übermitteln. Im Falle nicht vernetzter Fahrzeuge wird auf stationäre Detektion zurückgegriffen. Bei der entwickelten kooperativen Lichtsignalsteuerung wird eine vollständige Integration der Fahrzeuge in den Regelkreis angestrebt, womit eine größtmögliche Ausnutzung des Potentials vernetzter Verkehrssysteme am Beispiel der Lichtsignalsteuerung erzielt werden soll. Hierzu wird eine modellprädiktive Regelung erstellt, welcher ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell zugrunde liegt. Durch mathematische Optimierung werden als Stellgrößen neben den Schaltzeitpunkten auch die Annäherungsgeschwindigkeiten der in den Zufahrten befindlichen Fahrzeugen berechnet. Da sich die modellprädiktive Regelung das Prinzip des gleitenden Zeithorizonts zu Nutze macht, liegt eine systemimmanente Vorhersage von Schaltzeitpunkten vor. Um eine hohe Verkehrseffizienz zu erreichen, sollen die Schaltzeitpunkte möglichst flexibel bestimmt werden. Aus diesem Grund wird ein signalgruppenbasiertes Steuerungsverfahren entwickelt, dessen Entscheidungen lediglich durch die Berücksichtigung der Verträglichkeit von Verkehrsströmen, durch minimale Freigabe- und Sperrzeiten, Zwischenzeiten sowie durch maximale Sperrzeiten eingeschränkt werden. Das knotenpunktbasierte Steuerungsverfahren wird auf die Verwendung in Netzen erweitert, wozu die einzelnen Knotenpunkte untereinander Informationen austauschen. Eine zentrale Steuerungsinstanz wird nicht genutzt.

Das entwickelte Verfahren wird mit Hilfe mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen untersucht. Dabei werden Steigerungen der Verkehrseffizienz beobachtet. So reduziert sich die Anzahl der Halte bei Vollausrüstung um bis zu 50 % gegenüber den gewählten Referenzsteuerungen. Derart große Verbesserungen zeigen sich vor allem bei geringen Verkehrsstärken, aber auch bei hoher Auslastung von Knotenpunkten werden deutliche positive Wirkungen ermittelt. Generell führen höhere Ausstattungsraten zu stärkeren verkehrlichen Wirkungen. Durch die Nutzung eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells eignet sich das entwickelte Steuerungsverfahren zur modellbasierten Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen. Diese Möglichkeit wird anhand einer Busbevorrechtigung untersucht. Gegenüber konventionellen regelbasierten Verfahren wird eine verbesserte Priorisierung bei gleichzeitig geringerer Beeinträchtigung des Gesamtverkehrs erzielt. Signalbedingte Haltevorgänge von Bussen können dabei fast vollständig vermieden werden. Auch die Möglichkeiten zur Steuerung in Netzen wird untersucht. Trotz des rein dezentralen Charakters des entwickelten Steuerungsverfahrens zeigt sich eine Steigerung der Verkehrseffizienz gegenüber einer koordinierten Festzeitsteuerung. So wird die gesamte im Netz verbrachte Zeit um bis zu 30 % reduziert. Die Verbesserung im Gesamtnetz geht allerdings mit einer moderaten Erhöhung der Anzahl der Halte auf den in der Festzeitsteuerung koordinierten Streckenzügen einher.

Abstract

An innovative traffic signal control for connected transportation systems is presented in this thesis. The developed technique aims to use the data stemming from connected vehicles as a basis for control decisions while simultaneously influencing the vehicles' behavior by means of a speed advisory system. Stationary detection is incorporated to account for unequipped vehicles. The goal of the developed cooperative signal control is the exploitation of the full potential of connected transportation systems, which is achieved by a full integration of vehicles in the control loop. This integration is facilitated by using model predictive control in combination with a microscopic traffic flow model. The manipulated variables, which include signal timings and the approaching speed of vehicles at the intersection, are derived in a mathematical optimization procedure. Because model predictive control relies on the rolling horizon principle, an intrinsic prediction of future signal timings is available. With the aim of high traffic efficiency, the signal timings are chosen with the highest possible flexibility. Therefore, individual movements are considered as the control entity. Constraints are given only in consideration of the compatibility of movements, minimum green and red times, intergreen times and maximum red times. The developed technique focusses on the control of an intersection, but is extended for the use in networks by establishing an exchange of information between intersections. However, a central control entity is not used.

The conducted simulation studies show an increase in traffic efficiency. In comparison to the chosen baseline scenarios, the number of stops is reduced by up to 50 %. Such large reductions are mainly observed at low traffic volumes. However, considerable positive effects are also observed with high traffic volumes. Higher equipment rates of connected vehicles generally lead to an increase in traffic efficiency. As a microscopic traffic flow model is used, the developed signal control is applicable for a model-based transit signal priority. This possibility is investigated with a bus prioritization. In comparison to conventional, rule-based methods, a higher level of prioritization with reduced disturbances for private transport is achieved. In the case of buses, stops that are caused by signals can be almost entirely avoided. Furthermore, the control of a network with multiple intersections is investigated and the results show an increase in traffic efficiency in comparison to a coordinated fixed-time control. The total time spent in the network is reduced by up to 30 %. However, a moderate increase of the number of stops on the main routes that are coordinated in fixed-time is observed.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Potentiale der kooperativen Lichtsignalsteuerung.....	3
1.2	Forschungsfragen.....	5
1.3	Vorgehen	6
2.	Ausgangssituation.....	7
2.1	Verkehrsablauf an lichtsignalisierten Knotenpunkten.....	7
2.2	Signalisierung von Knotenpunkten als regelungstechnische Aufgabe	10
2.2.1	Erweiterung der Signalsteuerung um kooperative Systeme	13
2.3	Vernetzung von Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur.....	17
2.3.1	Drahtloskommunikation zur Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur 17	
2.3.2	Ausgewählte Nachrichtentypen zur Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur.....	19
3.	Stand der Wissenschaft und Technik zur Lichtsignalsteuerung in vernetzten Verkehrssystemen.....	21
3.1	Beeinflussung vernetzter Fahrzeuge auf Grundlage der Lichtsignalsteuerung	21
3.1.1	Bestehende Lichtsignalsteuerungsverfahren und möglicher Einbezug von Systemwissen zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte	22
3.1.2	Prädiktionsverfahren zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte ohne Einbezug von Systemwissen.....	44
3.2	Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung durch vernetzte Fahrzeuge	46
3.2.1	Verfahren zur Schätzung der Rückstaulänge.....	49
3.3	Gleichzeitige Beeinflussung von vernetzten Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen ..	51
3.4	Zwischenfazit zur Ausgangssituation	54
4.	Entwicklung eines Verfahrens zur kooperativen Lichtsignalsteuerung.....	57
4.1	Modellbasierte prädiktive Regelung.....	60
4.1.1	Optimierung	66
4.2	Modellierung des Verkehrsflusses zur prädiktiven Regelung von Knotenpunkten.	69
4.3	Modellierung von Lichtsignalen zur prädiktiven Regelung von Knotenpunkten.....	80
4.4	Bestimmung der Kostenfunktion.....	86
4.5	Erweiterung der Knotenpunktsteuerung auf Netze.....	92
4.6	Algorithmus des Verfahrens preXible	96
4.6.1	Konfiguration des Algorithmus	98
4.6.2	Erstellen von Nebenbedingungen.....	98
4.6.3	Schätzung des Verkehrszustands	99

4.6.4 Aktualisierung dynamischer Nebenbedingungen und Gewichtungen.....	101
4.6.5 Beeinflussung von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen	102
4.6.6 Ermittlung von Kenngrößen zur Bewertung der Wirkung von preXible	103
4.7 Theoretische Überlegungen zur Leistungsfähigkeit von preXible.....	104
5. Simulationsstudien zur Untersuchung von preXible.....	109
5.1 Statistische Analyse.....	110
5.2 Isolierter Knotenpunkt.....	112
5.2.1 Szenariobeschreibung.....	112
5.2.2 Referenzsteuerung	114
5.2.3 Konfiguration von preXible	115
5.2.4 Ergebnisse	115
5.3 Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen.....	124
5.3.1 Szenariobeschreibung.....	125
5.3.2 Referenzsteuerung	126
5.3.3 Konfiguration von preXible	127
5.3.4 Ergebnisse	128
5.4 Netz geregelter Knotenpunkte	133
5.4.1 Szenariobeschreibung.....	133
5.4.2 Referenzsteuerung	134
5.4.3 Konfiguration von preXible	135
5.4.4 Ergebnisse	136
6. Bewertung und Übertragbarkeit	145
6.1 Beantwortung der Forschungsfragen.....	145
6.2 Übertragbarkeit von preXible auf reale Systeme.....	146
6.3 Einbindung von preXible in Verkehrsmanagementzentralen.....	148
6.4 Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes auf weitere Verkehrssteuerungsinstrumente	153
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	155
Literaturverzeichnis.....	159
Abkürzungsverzeichnis.....	167
Abbildungsverzeichnis.....	169
Tabellenverzeichnis	173
Anhang A: Ergebnistabellen.....	175
A.1 Ergebnistabellen zu Kapitel 5.2 – Isolierter Knotenpunkt	175

A.2 Ergebnistabellen zu Kapitel 5.3 – Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen.....	181
A.3 Ergebnistabellen zu Kapitel 5.4 – Netz geregelter Knotenpunkte.....	184

1. Einleitung

Die Mobilität von Personen und Gütern trägt erheblich zum gesellschaftlichen Wohlstand bei und die Verkehrsleistung wächst selbst in den hochentwickelten Industrienationen weiter an. So stieg die Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs in Deutschland von 1998 bis 2015 um etwa 12 % von 845,3 Mrd. Personenkilometern auf 947,1 Mrd. Personenkilometer [RADKE, 2016]. Die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr wuchs im selben Zeitraum sogar um 45 %. Ein Ausbau der Infrastruktur zur Befriedigung der erhöhten Verkehrsnachfrage ist aber nur bedingt möglich und sinnvoll, da das Raumangebot zum Ausbau begrenzt ist. Zudem kann der Ausbau der Straßeninfrastruktur weiteren Verkehr induzieren, welcher wiederum negative Einflüsse wie Schadstoff- und Lärmemissionen zur Folge hat. An dieser Stelle sollen Intelligente Verkehrssysteme (IVS) ansetzen und zu einer effizienteren sowie sichereren Ausnutzung der bestehenden Infrastruktur beitragen. Sie können darüber hinaus dazu genutzt werden, verkehrspolitische Ziele durch Verkehrsmanagementmaßnahmen umzusetzen. Der Einsatz von IVS wird legislativ auf multinationaler Ebene durch die Richtlinie 2010/40 [EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT, 2010] sowie auf nationaler Ebene durch das Intelligente Verkehrssysteme Gesetz (IVSG) [BMJV, 2013] aus den genannten Gründen gefordert. Im IVSG wird die „Verbindung zwischen Fahrzeug und Verkehrsinfrastruktur“ als einer der vier vorrangigen Bereiche zur Einführung von IVS genannt.

Bei dieser Kategorie von IVS werden neuartige Funktionen zur Verkehrsbeeinflussung demnach auf Grundlage eines Datenaustauschs zwischen Fahrzeugen (engl.: Vehicle to Vehicle, kurz: V2V) oder zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur (engl.: Vehicle to Infrastructure, kurz: V2I) ermöglicht. Derartige Systeme (engl.: Vehicle to X, kurz: V2X) sind von den Entwicklungen in der Kommunikationstechnologie getrieben und werden auch als vernetzte oder kooperative Verkehrssysteme bezeichnet. Die drahtlose Datenübertragung kann für die Ableitung verschiedener Funktionen mit unterschiedlichen Zielrichtungen verwendet werden. Insbesondere V2V Kommunikation kann zur Erhöhung der Verkehrssicherheit eingesetzt werden, beispielsweise, um nachfolgende Fahrzeuge im Falle einer starken Bremsung zu warnen. Für die Steigerung der Verkehrseffizienz und der damit häufig einhergehenden Verringerung negativer Umwelteffekte des Verkehrs eignet sich dagegen vor allem V2I Kommunikation. So können beispielsweise Geschwindigkeitshinweise an Fahrzeuge übermittelt werden, um die Annäherungsgeschwindigkeit an die Haltlinie einer Lichtsignalanlage so zu verringern, dass signalbedingte Haltevorgänge reduziert werden können.

Das Potential kooperativer infrastrukturbasierter Verkehrssysteme zur Verbesserung der Verkehrsbeeinflussung lässt sich allgemein in zwei Richtungen der Beeinflussung einteilen:

- Erstens können vernetzte Fahrzeuge Daten wie beispielsweise Position, Geschwindigkeit, Fahrtziel oder Fahrzeugtyp an die Infrastruktur übermitteln. Der Informations-

gehalt geht weit über denjenigen konventioneller, stationärer Detektion hinaus und kann zu einer Verbesserung der Verkehrsbeeinflussung genutzt werden.

- Zweitens können durch die Vernetzung mit der Infrastruktur Fahrzeuge beeinflusst und damit aktiv in die Verkehrssteuerung einbezogen werden. Die Beeinflussung kann durch Information oder automatisierte Eingriffe in die Fahrzeugführung erfolgen.

Die verbesserte Datenlage, die durch die Übermittlung von Informationen von Fahrzeugen an die Verkehrsinfrastruktur erzielt werden kann, kann dazu beitragen, in Echtzeit auf stochastisch auftretende Ereignisse zu reagieren und diese damit besser abzuwickeln. Zwar wird nach dem Stand der Technik stationäre Detektion eingesetzt, um auf die aktuelle Verkehrssituation reagieren zu können. Jedoch ist eine vollständige Erfassung nicht mit vertretbarem Aufwand möglich, weshalb häufig Schätzverfahren zum Einsatz kommen. Auch kann konventionelle stationäre Detektion nur punktuell Informationen über die Verkehrssituation liefern, während die Informationen vernetzter Fahrzeuge eine räumlich und zeitlich kontinuierliche Erfassung ermöglichen.

Da eine bidirektionale Kommunikation möglich ist, können auch Informationen von der Infrastruktur an vernetzte Fahrzeuge übermittelt werden, wie zuvor unter zweitens beschrieben. Während infrastrukturbasierte Verkehrsbeeinflussungssysteme in der Regel das gesamte Fahrzeugkollektiv beeinflussen, können mit Hilfe vernetzter Verkehrssysteme individuelle Beeinflussungen der Fahrzeuge erfolgen, welche über die Möglichkeiten infrastrukturbasierter, kollektiv wirkender Anzeigesysteme hinausgehen. Somit können Fahrzeuge individuell und aktiv in die Verkehrsbeeinflussung einbezogen werden. Dabei sind Beeinflussungen auf den drei von DONGES [1982] beschriebenen Ebenen der Fahraufgabe möglich: Navigationsebene, Bahnführungsebene und Stabilisierungsebene. So kann mit der Routenwahl die Navigationsebene oder mit Geschwindigkeit und Fahrstreifenwahl die Bahnführungsebene beeinflusst werden. Prinzipiell ist durch Eingriffe in die Fahrdynamikregelung auch eine Beeinflussung der Stabilisierungsebene denkbar.

Durch die Möglichkeit zur individuellen Beeinflussung von Fahrzeugen und die gleichzeitige Nutzung der beiden Beeinflussungswege ergeben sich weitreichende Verbesserungspotentiale für die Steuerung vernetzter Verkehrssysteme. Hierzu muss die Verkehrssteuerung allerdings zur Verarbeitung der fahrzeuggenerierten Daten und zur individuellen Beeinflussung der Fahrzeuge ertüchtigt werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass zukünftige Zustände des Verkehrssystems, also die Verkehrslage und Eingriffe der Verkehrssteuerung, zuverlässig vorhergesagt werden können, um Informationen an vernetzte Fahrzeuge zu übermitteln. Für eine größtmögliche Ausnutzung des Potentials vernetzter Verkehrssysteme sollten gleichzeitig die Effekte, die sich durch die Beeinflussung der Fahrzeuge einstellen, im Rahmen der Verkehrsbeeinflussung berücksichtigt werden. Im Falle einer Störung oder Überlastung auf einer Hauptroute ließen sich auf diese Weise Verkehrsströme, mit präzise auf die Verkehrslage abgestimmten Anteilen, auf mehrere Ausweichrouten umleiten. Anders als bei

den nach dem Stand der Technik eingesetzten Netzbeeinflussungsanlagen und Navigationssystemen würden nicht mehr alle Fahrzeuge dieselbe Umleitungsempfehlung erhalten und die Auswirkungen der Umleitungsempfehlung würden berücksichtigt werden. Damit könnten Überlastungen der Ausweichrouten vermieden und somit die Leistungsfähigkeit des Verkehrsnetzes erhöht werden. Auch die Wirkung von Streckenbeeinflussungsanlagen könnte stark erweitert werden. Derzeit erhalten alle Fahrzeuge, die einen Querschnitt durchfahren, dieselbe dynamische Geschwindigkeitsbegrenzung zum Zwecke der Geschwindigkeitsharmonisierung und zur Vermeidung instabiler Verkehrszustände. Bei genauer Kenntnis des Verkehrszustands, wird dagegen eine Beeinflussung einzelner Fahrzeuge möglich, um die Ausbreitung von Stoßwellen zu verhindern und so den Verkehrsablauf effizienter und sicherer zu gestalten. Auch im Bereich der Lichtsignalsteuerung birgt die Vernetzung große Potentiale. Deren Darstellung widmet sich das folgende Unterkapitel, da die Lichtsignalsteuerung im Fokus der vorliegenden Arbeit steht.

1.1 Potentiale der kooperativen Lichtsignalsteuerung

Aus verschiedenen Gründen liegt es nahe, die Lichtsignalsteuerung als Beispiel zur Ermittlung der Potentiale von vernetzten Verkehrssystemen heranzuziehen. So stellen Lichtsignalanlagen das wichtigste Instrument der Verkehrssteuerung in städtischen Verkehrsnetzen dar, da Knotenpunkte maßgeblich die Leistungsfähigkeit der städtischen Verkehrsinfrastruktur bestimmen. Die Steigerung der Verkehrseffizienz und die Reduktion der negativen Umwelteffekte des Verkehrs ist dabei insbesondere in Städten sinnvoll. Denn nicht nur die Weltbevölkerung insgesamt, sondern auch der in städtischen Gebieten lebende Anteil der Weltbevölkerung nimmt stetig zu. Lebten im Jahr 1950 noch 30 % der Weltbevölkerung in Städten, so waren es im Jahr 2014 bereits 54 % und für das Jahr 2050 wird ein weiterer Anstieg auf 66 % prognostiziert [VEREINTE NATIONEN, 2015]. In Anbetracht dieser Entwicklung und vor dem Hintergrund des ungebrochenen Mobilitätsbedürfnisses der Menschen, ergeben sich eine erhöhte Verkehrsnachfrage und damit einhergehend große Herausforderungen für städtische Verkehrssysteme. So entfallen einer Studie von GATELY ET AL. [2015] zu Folge 63 % der durch den Straßenverkehr erzeugten CO₂ Emissionen in den USA auf städtische Umgebungen. Zudem nimmt durch die stetig wachsende Bevölkerung in Städten nicht nur die Verkehrsnachfrage zu, sondern auch die Zahl derjenigen, die Schadstoffemissionen ausgesetzt sind. Die Verwendung einer kooperativen Lichtsignalsteuerung bietet dabei ein zweifaches Verbesserungspotential, welches den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit darstellt.

Im Sinne des im vorigen Kapitel unter erstens genannten Beeinflussungswegs kann mit Hilfe der Informationen vernetzter Fahrzeuge flexibler und präziser auf die aktuelle Verkehrssituation reagiert werden. Übertragen auf die kooperative Lichtsignalsteuerung kann die deutlich

erweiterte Datenbasis für verkehrsabhängige Steuerungsalgorithmen verwendet werden. Informationen wie etwa die aktuelle Position, Geschwindigkeit, ein möglicherweise vorhandener Abbiegewunsch oder der Fahrzeugtyp können dazu genutzt werden, die Freigabezeiten der Lichtsignalanlage effizienter aufzuteilen. Mit Schätzverfahren ermittelte Werte und zuvor als statisch angenommene Eingangsgrößen können so genauer bestimmt werden. Hierzu zählt beispielsweise die Schätzung von Staulängen und Abbiegeraten oder die Ermittlung von Quelle-Ziel-Beziehungen zur Koordinierung von Lichtsignalanlagen auf Streckenzügen. Die Verwendung der Informationen vernetzter Fahrzeuge kann somit zu einer höheren Flexibilität und Präzision bei der Wahl der Schaltzeitpunkte führen, als dies bei Verwendung konventioneller Detektionstechnologien und Steuerungsalgorithmen der Fall wäre.

Insbesondere die Beeinflussung der Bahnführungsebene kann dazu genutzt werden, Haltevorgänge an Lichtsignalanlagen zu reduzieren. So können die Geschwindigkeiten vernetzter Fahrzeuge in der Zufahrt zur Lichtsignalanlage gezielt verringert werden, um eine Ankunft der Fahrzeuge an der Haltlinie bei Grün zu erzielen. Diese Geschwindigkeiten können in Form einer Information (engl.: Green Light Optimized Speed Advisory, kurz: GLOSA) angezeigt werden oder, im Falle von automatisierten Fahrzeugsystemen, zu einem Eingriff in die Längsdynamik des Fahrzeugs führen. Auch Empfehlungen zur Fahrstreifenwahl in Abhängigkeit der Signalisierung sind möglich. Die Vermeidung von Haltevorgängen steht häufig im Fokus der Betrachtung, da durch die folgenden Anfahrvorgänge beim Einsatz von Verbrennungsmotoren ein erhöhter Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß zu erwarten ist. Weiterhin hat der beim Bremsen verursachte Abrieb eine erhöhte Feinstaubemission zur Folge. Bei elektrischen oder teilelektrischen Antriebssträngen sind die zuvor genannten Effekte durch die Energierückgewinnung beim Bremsen zwar abgeschwächt, aber durch die bei der Energiewandlung auftretenden Verluste weiterhin existent. Zudem sorgen Verzögerungen beim Anfahren für eine Verringerung der erzielbaren Verkehrsstärke und die Haltevorgänge wirken sich negativ auf den Fahrkomfort aus.

Bild 1.1 zeigt beispielhaft die Einsatzmöglichkeiten kooperativer Lichtsignalsteuerungsverfahren anhand der beiden zuvor beschriebenen Richtungen der Beeinflussung auf Seiten der Fahrzeuge sowie der Lichtsignalsteuerung.

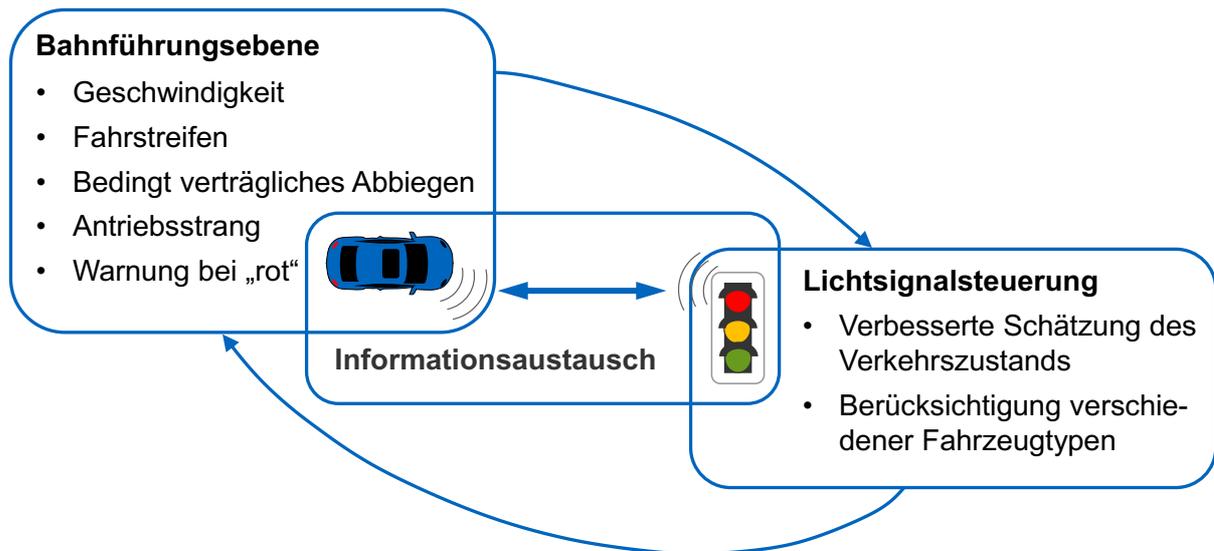


Bild 1.1 Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten kooperativer Lichtsignalsteuerungen auf Seiten der Fahrzeugbeeinflussung sowie der Lichtsignalsteuerung, vgl. SÁNTA ET AL. [2014]

1.2 Forschungsfragen

Häufig wird in Forschungsarbeiten nur einer der beiden Beeinflussungswege genutzt, jedoch kann das Potential der kooperativen Lichtsignalsteuerung erst durch die synergetische Verwendung beider Beeinflussungswege vollständig ausgeschöpft werden. Durch diese kombinierte Beeinflussung, wie sie in Bild 1.1 durch die Pfeile angedeutet ist, ergibt sich jedoch ein Zielkonflikt. So erfolgt die Steuerung durch Lichtsignalanlagen im Zeitbereich von Sekunden und weist damit im Vergleich zu anderen Verkehrsbeeinflussungssystemen eine hohe Dynamik auf. Durch die Daten vernetzter Fahrzeuge ist eine Steigerung von Präzision und Flexibilität der Freigabezeiteinteilung möglich. Um aber den zweiten Beeinflussungsweg kooperativer Systeme nutzen zu können, nämlich den aktiven Einbezug der Fahrzeuge in die Verkehrssteuerung, ist eine Kenntnis über die künftigen Steuereingriffe der Lichtsignalanlage von Nöten. Der aus gesteigerter Verkehrsabhängigkeit und Vorhersagbarkeit entstehende Zielkonflikt wird in der vorliegenden Arbeit adressiert, da bisher nur unzureichende Erkenntnisse zu kooperativen Systemen vorliegen, bei denen gleichzeitig Fahrzeuge und Lichtsignalsteuerung beeinflusst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird aus diesem Grund ein kooperatives Lichtsignalsteuerungsverfahren entwickelt, welches dazu dient, die folgende übergeordnete Fragestellung zu beantworten: *Welches Potential birgt die gleichzeitige Beeinflussung von kooperativen Fahrzeugen und kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz?*

Dieser Forschungsgegenstand soll weitgehend losgelöst von derzeitigen technischen Einschränkungen untersucht werden und unter realistischen Entwicklungen innerhalb der nächsten 10 bis 20 Jahre einsetzbar sein. Da in diesem Zeitraum aber nicht mit einer vollständigen

Durchdringung des Bestands mit vernetzten Fahrzeugen gerechnet werden kann, soll auch die folgende Frage untersucht werden: *Welche Effizienzsteigerungen können erzielt werden, wenn Ausstattungsraten unterhalb der Vollausstattung vorliegen?*

Zuvor wurde bereits der Konflikt beschrieben, der sich bei gleichzeitiger Beeinflussung von vernetzter Infrastruktur und vernetzten Fahrzeugen ergibt. So ist eine Reaktionsmöglichkeit auf die Stochastizität von Verkehrszuständen mit einer Vorhersagbarkeit der Lichtsignalsteuerung zu verbinden. Die Vorhersagbarkeit der Schaltzeitpunkte ist unabdingbar für die Beeinflussung der kooperativ ausgestatteten Fahrzeuge, was umso mehr bei automatisierten Eingriffen in die Fahrzeugführung gilt. Damit ergibt sich eine weitere Forschungsfrage: *Wie lässt sich eine möglichst große Flexibilität der infrastrukturellen Verkehrsbeeinflussung mit der gewünschten Vorhersagbarkeit zur Verwendung für Assistenzsysteme in Fahrzeugen verbinden?*

1.3 Vorgehen

Auf den Hintergrund und die technischen Entwicklungen, auf denen die vorliegende Arbeit aufbaut, wird in Kapitel 2 eingegangen. Einen umfassenden Einblick in den Stand der Wissenschaft zur Lichtsignalsteuerung in vernetzten Verkehrssystemen liefert Kapitel 3. Da die Vorhersage verkehrsabhängiger Steuerungsverfahren die größte Herausforderung bei der Vernetzung von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen darstellt, liegt hierauf das Hauptaugenmerk der Literaturrecherche. Gleichzeitig wird auf die bestehenden Verfahren zur Lichtsignalsteuerung und deren Wirkprinzipien eingegangen. Den Kern der Arbeit bildet Kapitel 4, da aus diesem Kapitel die Funktionsweise des entwickelten Steuerungsverfahrens hervorgeht. Hierzu wird zunächst auf die verwendete Methodik der modellprädiktiven Regelung eingegangen und anschließend die entwickelte mathematische Abbildung des Verkehrsflusses an signalisierten Knotenpunkten beschrieben. Zur Untersuchung des entwickelten Steuerungsverfahrens werden in Kapitel 5 Ergebnisse aus Simulationsstudien vorgestellt. Die betrachteten Szenarien umfassen einzelne Knotenpunkte sowie ein Straßennetz mit mehreren signalisierten Knotenpunkten. Den Betrachtungen liegen verschiedene Verkehrsstärken und Ausstattungsraten sowie eine Bevorrechtigung von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs zugrunde. In Kapitel 6 wird das Verfahren bewertet und dessen Übertragbarkeit diskutiert. Das Kapitel beginnt mit der Beantwortung der Forschungsfragen beantwortet und betrachtet anschließend die Übertragbarkeit des entwickelten Steuerungsverfahrens auf reale Systeme, die Einbindung des Verfahrens in eine zentrale Verkehrsmanagementinstanz sowie die Übertragbarkeit des Ansatzes auf weitere Verkehrssteuerungsmaßnahmen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse und einem Ausblick.

2. Ausgangssituation

Lichtsignalanlagen werden seit mehr als 100 Jahren zur Steuerung von Knotenpunkten eingesetzt und dienen zunächst vornehmlich der Steigerung der Sicherheit an städtischen Knotenpunkten. Der steuernde Eingriff ist als Reaktion auf das zunehmende Verkehrsaufkommen von motorisierten Fahrzeugen und Pferdekutschen in dieser Zeit anzusehen. Im Jahr 1914 wurde im US-amerikanischen Cleveland die erste elektrische Lichtsignalanlage eingesetzt, um die Freigabe einzelner Verkehrsströme zeitlich zu steuern. Diese Lichtsignalanlage bot bereits die Möglichkeit eines manuellen Eingriffs, um alle Verkehrsströme zu sperren und damit eine Bevorrechtigung für herannahende Feuerwehrfahrzeuge zu ermöglichen. Dieser elektrischen Variante, welche als Urform der heutigen Lichtsignalanlagen gilt, gingen Varianten mit mechanischen Anzeigen und gasbetriebenen Lampen voraus [MUELLER, 1970]. Lichtsignalanlagen dienen also maßgeblich der Sicherheit des Verkehrsablaufs, können aber auch die Verkehrseffizienz gegenüber vorfahrtsregeltem Knotenpunkten erhöhen und durch Bevorrechtigungen zur Umsetzung verkehrspolitischer Ziele genutzt werden. Bereits seit den 1920er Jahren werden erfolgreich Verfahren eingesetzt, die die Steigerung der Verkehrseffizienz an signalisierten Knotenpunkten zum Ziel haben [MUELLER, 1970]. Dies geschieht vor allem, indem die Lichtsignalanlage dazu ertüchtigt wird, auf auftretende Schwankungen der Verkehrsnachfrage zu reagieren. Hierzu wurden unterschiedliche Detektionstechnologien entwickelt, um die Präsenz von Fahrzeugen zu erfassen. Damit einhergehend wurden Steuerungsalgorithmen entwickelt, die diese Information verarbeiten können und eine verkehrsabhängige Steuerung von Lichtsignalanlagen ermöglichen.

Im Folgenden wird zunächst der Verkehrsablauf an lichtsignalisierten Knotenpunkten erläutert. Anschließend wird die dynamische Signalisierung von Knotenpunkten als regelungstechnische Aufgabe beschrieben und es werden damit einhergehend Begriffe eingeführt, die in den weiteren Ausführungen genutzt werden. Daraufhin werden auf dieser Basis die Möglichkeiten der Erweiterung der Steuerung durch kooperative Systeme aufgezeigt, indem auf die technischen Hintergründe zur Informationsübertragung und auf die Erweiterung des Regelkreises durch kooperative Systeme eingegangen wird.

2.1 Verkehrsablauf an lichtsignalisierten Knotenpunkten

Der Verkehrsablauf an lichtsignalisierten Knotenpunkten lässt sich anhand eines Zeit-Weg-Diagramms erläutern, wie es in Bild 2.1 gezeigt ist. Die Fahrzeuge bewegen sich zunächst auf die erste Lichtsignalanlage (LSA 1) zu, wo sich zur Sperrzeit ein Rückstau bildet, da die betrachtete Zufahrt nicht freigegeben ist. Der Rückstaubereich ist in Bild 2.1 gestrichelt dargestellt. Nach dem Beginn der Freigabezeit beginnt sich der Rückstau von der Haltlinie her aufzulösen, während weitere Fahrzeuge auf das Ende des Rückstaus auftreffen. Aus diesem Grund stellt sich die maximale Rückstaulänge im gezeigten Fall erst nach dem Beginn der

Freigabezeit ein. Alle aufgestauten Fahrzeuge können im dargestellten untersättigten Fall während der Freigabezeit abfließen. Der entstandene Fahrzeugpulk nähert sich nun der weiter stromabwärts gelegenen zweiten Lichtsignalanlage (LSA 2). Deren Freigabezeit beginnt im gezeigten Fall mit einer Versatzzeit gegenüber der ersten Lichtsignalanlage, wodurch den Fahrzeugen eine Durchfahrt ohne Halt ermöglicht wird.

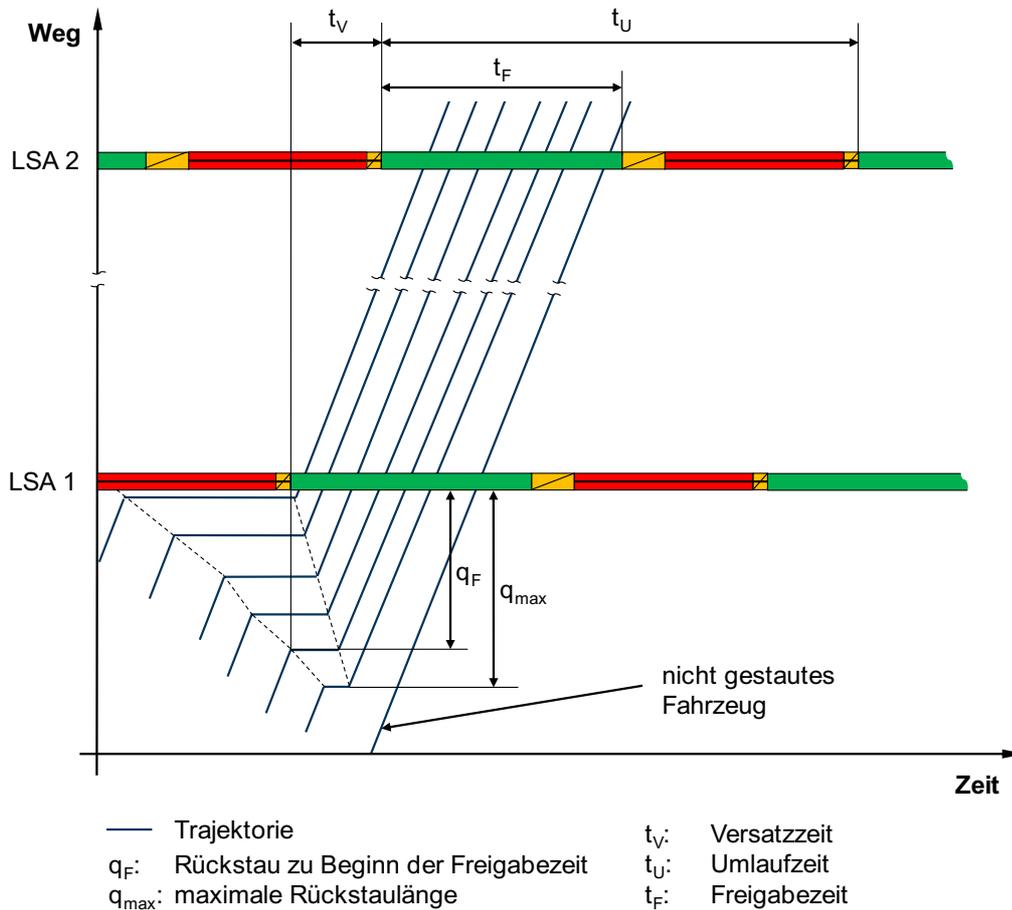


Bild 2.1 Verkehrsablauf an untersättigten lichtsignalisierten Knotenpunkten, basierend auf dem Highway Capacity Manual 2000 [NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.), 2000]

Die Versatzzeit sowie die Größen Umlaufzeit und Freigabezeit lassen sich mit Hilfe eines analogen Steuergeräts erläutern, wie es in Bild 2.2 gezeigt ist. Die rotierende Scheibe verfügt über Taster, welche durch Betätigung der Schalter die verschiedenen Signalisierungszustände auslösen. Die Abfolge der Signalisierung wiederholt sich mit jedem Umlauf der Drehscheibe, die Rotationsgeschwindigkeit der Drehscheibe gibt damit die Umlaufzeit vor. Über den Abstand der Taster kann die Dauer der einzelnen Signalisierungszustände, also die Freigabezeiteinteilung festgelegt werden. Mit Hilfe der innenliegenden Beschriftung lässt sich schließlich die Versatzzeit gegenüber benachbarten Knotenpunkten einstellen.

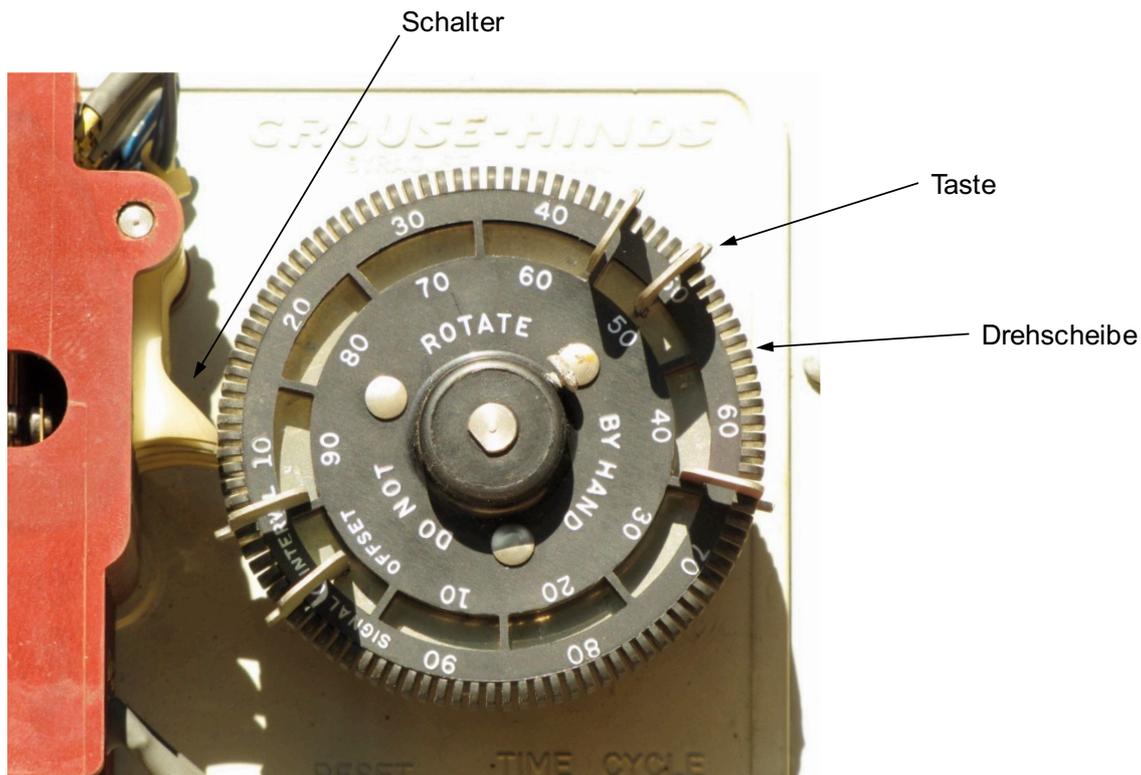


Bild 2.2 Analoges Steuergerät für Lichtsignalanlagen, Foto: CASTLEMAN [2015]

Obgleich aktuelle Steuergeräte mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung operieren, sind Umlaufzeit, Freigabezeiteinteilung und Versatzzeit weiterhin wichtige Einflussgrößen der meisten heute verfügbaren Steuerungsverfahren. Durch den Einsatz digitaler Technik besteht freilich größere Flexibilität und so kann auch die Struktur des Signalprogramms, also die Phasenfolge und die Anzahl der Phasen verändert werden. Als Phase bezeichnet man denjenigen „Teil eines Signalprogramms, während dessen ein bestimmter Grundzustand der Signalisierung unverändert bleibt. Die Freigabezeiten für die freigegebenen Verkehrsströme können zu verschiedenen Zeitpunkten beginnen oder enden“ [FGSV, 2010B]. Unter einer Signalgruppe fasst man diejenigen Signalgeber zusammen, welche zu jeder Zeit das gleiche Signalbild zeigen. In der Regel lässt sich ein Verkehrsstrom einer Signalgruppe zuordnen, allerdings können auch mehrere Verkehrsströme einer Signalgruppe zugeordnet sein oder mehrere Signalgruppen einem Verkehrsstrom. Ersteres ist beispielsweise der Fall, wenn Linksabbieger gemeinsam mit geradeaus fahrenden Fahrzeugen signalisiert werden. Letzteres ist zum Beispiel dann der Fall, wenn ein solcher Linksabbiegerstrom mittels eines hinter dem Knotenpunkt angebrachten Signalgebers eine Zugabezeit zum Abfließen erhält. Umlaufbasierte Steuerungsverfahren, die auf den oben genannten Grundlagen beruhen, werden auch als zyklische Verfahren bezeichnet. Einige neuere Verfahren verzichten vollständig auf die Grundlagen der Analogtechnik und stützen sich nicht auf Umläufe und feste Phaseneinteilungen, sie werden auch als azyklische Verfahren bezeichnet. Verfahren beider Kategorien werden in Kapitel 3.1.1 genauer vorgestellt.

2.2 Signalisierung von Knotenpunkten als regelungstechnische Aufgabe

Durch die Verwendung von Signalgebern lässt sich der Verkehrsablauf an Knotenpunkten gezielt über die Zeit beeinflussen. Diese Beeinflussung sollte im Rahmen der Sicherheitsvorgaben möglichst effizient vorgenommen werden. Um dieses Ziel zu erreichen, kann die Regelungstechnik methodische Grundlagen liefern, denn diese Ingenieursdisziplin befasst sich damit, „einen sich zeitlich verändernden Prozess von außen so zu beeinflussen, dass dieser Prozess in einer vorgegebenen Weise abläuft“ [LUNZE, 2010]. Der oben beschriebene Verkehrsablauf wird in diesem Fall also als dynamischer Prozess betrachtet, während der signalisierte Knotenpunkt als das dynamische System aufgefasst werden kann, in dem sich dieser Prozess abspielt. Zur Beeinflussung dienen dabei als Stellgrößen konventionell alle oder eine Auswahl der im vorigen Abschnitt genannten Einflussgrößen. Allgemein wird die zielgerichtete Beeinflussung eines dynamischen Systems als Steuerung bezeichnet [LUNZE, 2010]. Wenn die Steuerung dergestalt umgesetzt ist, dass sie direkt von der gemessenen Ausgangsgröße des dynamischen Systems abhängt und damit einen geschlossenen Wirkungskreis bildet, so spricht man von einer Regelung. LUNZE [2010] stellt hierzu fest, dass diese Rückkopplung das wichtigste Grundprinzip der Regelungstechnik ist und dass zur Umsetzung einer Regelung grundsätzlich die drei folgenden Schritte notwendig sind:

- **Messen** der Regelgröße mittels Sensoren,
- **Vergleichen** der Messung mit einem vorgegebenen Sollwert (Führungsgröße) und
- **Stellen** der Stellgröße mittels eines Aktors (Stellglied) unter Berücksichtigung des Vergleichs aus Messgröße und Sollwert sowie der Dynamik des Systems.

Die Regelung dient dazu, das gewünschte Verhalten des Systems zu erzielen und es dabei zu stabilisieren und gegebenenfalls auf das System einwirkende Störgrößen zu kompensieren. Als eingangs-ausgangs-stabil (E/A-stabil) wird ein System bezeichnet, „wenn für verschwindende Anfangsauslenkung und ein beliebiges beschränktes Eingangssignal das Ausgangssignal beschränkt bleibt“ [LUNZE, 2010]. Übertragen auf den signalisierten Knotenpunkt bedeutet diese Definition, dass bei einer Nachfrage unterhalb der Kapazitätsgrenze keine unendlich anwachsenden Rückstaulängen auftreten. Zur Analyse der Stabilität haben sich in der Regelungstechnik verschiedene Verfahren etabliert, die an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden.

Der zu entwerfende Regler bildet einen Zusammenhang zwischen der gemessenen Abweichung vom Sollwert und der auf das System einwirkenden Eingangsgröße. Um diesen Zusammenhang zu ermitteln, werden häufig mathematische Modelle des betrachteten Systems herangezogen. Man spricht in diesem Falle von modellbasierten Verfahren, auch wenn das entstehende Reglergesetz das Modell nicht direkt enthält, sondern dieses lediglich für den Entwurf des Reglers herangezogen wird [LUNZE, 2010]. In dem in Kapitel 4 beschriebenen

Verfahren wird das Modell dagegen unmittelbar zur Regelung verwendet, da eine modellbasierte prädiktive Regelung (engl.: Model Predictive Control, kurz: MPC) zum Einsatz kommt.

Obgleich sich unter der Vielzahl von Verfahren zur Signalisierung von Knotenpunkten sowohl solche mit offener Wirkungskette („Steuerung“) als auch solche mit geschlossenem Wirkungskreis („Regelung“) finden, wird im deutschen Sprachgebrauch allgemein von Lichtsignalsteuerung gesprochen. Auch in der vorliegenden Arbeit wird dieser Begriff verwendet, auch wenn es sich an einigen Stellen im engeren Sinne um Regelungen handelt. Bild 2.3 zeigt einen geschlossenen Regelkreis mit den zuvor eingeführten Begriffen der Regelungstechnik und Beispielen der Zuflussregelung ALINEA [PAPAGEORGIU ET AL., 1991] in kursiver Schrift.

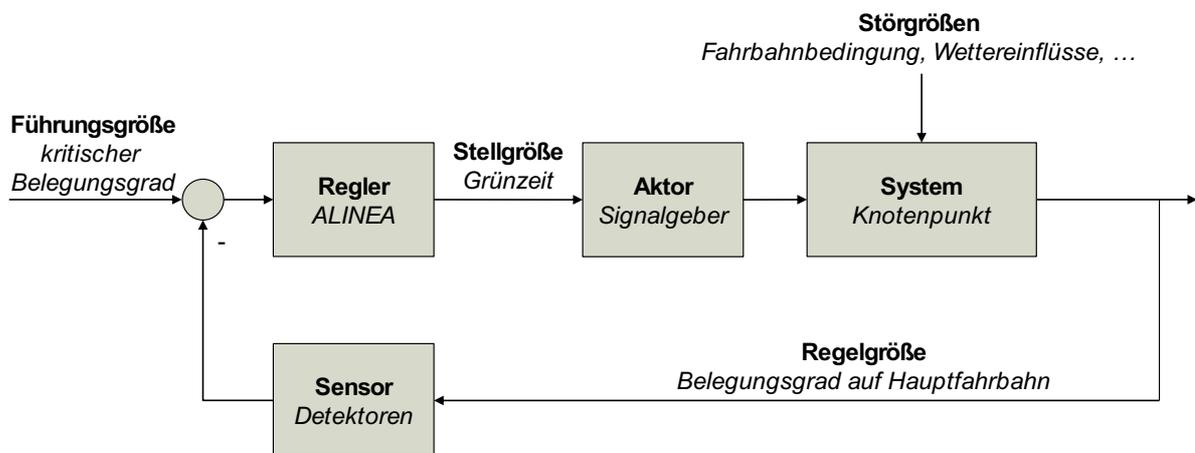


Bild 2.3 Geschlossener Regelkreis mit Beispielen der Zuflussregelung ALINEA (kursiv dargestellt)

ALINEA wird hier als Beispiel für einen Regler herangezogen, da dieser nach klassischen Methoden der Regelungstechnik entworfen wurde. Das Verfahren ALINEA dient der Zuflussregelung an Autobahnzufahrten und stellt aufgrund der planfreien Ausführung ein vereinfachtes Beispiel eines signalisierten Knotenpunkts dar, da keine konfligierenden Verkehrsströme betrachtet werden müssen. Als Regelgrößen wählen die Entwickler des Verfahrens den Belegungsgrad von Induktionsschleifen in der Hauptfahrbahn, welche sich flussabwärts der geregelten Zufahrt befinden. Die Autoren schlagen ein Reglergesetz vor, welches aus der Regelgröße den Verkehrsfluss der Zufahrt bestimmt:

$$r(k) = r(k - 1) + K_R [\hat{o} - o_{out}(k)] \quad (2.1)$$

r : Verkehrsstärke der Zufahrt

\hat{o} : kritischer Belegungsgrad

k : diskreter Zeitschritt

o_{out} : gemessener Belegungsgrad

K_R : konstanter Parameter

Mit Hilfe des zeitdiskreten Reglergesetzes aus Gleichung (2.1) wird die gewünschte Verkehrsstärke in der Zufahrt ermittelt. Diese kann nun unter Berücksichtigung der Sättigungsverkehrsstärke in einen Grünzeitanteil umgerechnet werden. Bei diesem Regler handelt es

sich um einen Integral-Regler, womit er der Gruppe der in technischen Anwendungen weit verbreiteten Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler) zuzuordnen ist. Der proportionale und differentiale Anteil ist im vorliegenden Fall gleich null. In verkehrstechnischen Anwendungen kommt diese Gruppe der Regler hingegen nur selten zum Einsatz und in einigen Fällen wird gänzlich auf den Einsatz von regelungstechnischer Methodik verzichtet. Dies ist unter anderem auf die folgenden Besonderheiten der Anwendungsdomäne Verkehr zurückzuführen:

- stark stochastisches Verhalten (z. B. schwankende Sättigungsverkehrsstärken durch schwankenden Lkw-Anteil),
- häufig diskrete Stellgrößen (z. B. Freigabe oder Sperrung durch Lichtsignalanlagen, abgestufte Geschwindigkeitsanzeigen von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen)
- notwendige Berücksichtigung von Nebenbedingungen (z. B. Mindestfreigabezeiten, Zwischenzeiten),
- aufwändige Detektion (z. B. Induktionsschleifen mit Beschränkung auf lokale Messgrößen) und
- schwierige Korrelation zwischen Zielgröße und Messgröße (z. B. Minimierung der Wartezeiten durch Messung von Zeitlücken).

Wenn aber regelungstechnische Verfahren für verkehrstechnische Anwendungen genutzt werden, handelt es sich häufig um solche, bei denen die Modellbeschreibung des Systems im Reglergesetz enthalten ist. Hierdurch können diskrete Stellgrößen und Nebenbedingungen besser berücksichtigt werden. Auf diese Methodik wird in Kapitel 4.1 genauer eingegangen. Zum Ausgleich der mangelnden und lokal beschränkten Detektion können Zustandsschätzer, wie etwa das Kalman Filter [BISHOP & WELCH, 2006] eingesetzt werden. Derartige Zustandsschätzer erweitern den Regelkreis und erhalten als Einganggröße die vorhandenen Messwerte sowie die Stellgröße und können, mit Hilfe eines mathematischen Modells des Systems, Aussagen über nicht direkt messbare Kenngrößen liefern beziehungsweise die Zuverlässigkeit gemessener Größen erhöhen.

Eine weitverbreitete verkehrsabhängige Steuerung von Knotenpunkten stellt die unten genauer erläuterte regelbasierte Zeitlückensteuerung dar. Dabei werden in der Zufahrt zur Lichtsignalanlage Detektoren platziert, welche kontinuierlich die auftretende Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen messen. Überschreitet die Zeitlücke einen festgelegten Schwellwert, wird der Phasenübergang zur nächsten Phase eingeleitet. Die Zeitlücke kann als Regelgröße aufgefasst werden. Diese pragmatische Knotenpunktsteuerung beinhaltet die drei zuvor genannten Schritte der Messung, des Sollwertvergleichs und der Beeinflussung, weshalb von einem geschlossenen Wirkungskreis, also einer Regelung, gesprochen werden kann. Die Zeitlückensteuerung ist als Zweipunktregler zu betrachten, der je Phase die Ausgangszustände „Phase beibehalten“ oder „Phasenübergang“ als Stellgröße einnehmen kann.

Die Beschreibung der Lichtsignalsteuerung als regelungstechnische Aufgabe bezieht sich in diesem Abschnitt bisher lediglich auf einzelne Knotenpunkte. Zwar findet die Signalisierung an Knotenpunkten statt, gleichwohl hat sie aber großen Einfluss auf den Verkehrsfluss auf Streckenzügen und in Netzen. Die Übertragung der regelungstechnischen Grundlagen auf Netze ist, bei entsprechender Anpassung der Definitionen des Systems, ebenfalls möglich. So stellt die Versatzzeit zwischen dem Grünzeitbeginn zweier aufeinanderfolgender Knotenpunkte eine wichtige Stellgröße dar, welche bei entsprechender Einstellung zur Koordinierung von Lichtsignalanlagen auf Streckenzügen und Netzen genutzt werden kann. Über Expertenwissen, gemessene Verkehrsstärken und Quelle-Ziel-Beziehungen werden Koordinierungsrichtungen und Versatzzeiten festgelegt. Diese Festlegungen sind in der Praxis häufig statisch, werden also offline berechnet. Typischerweise erfolgen die Berechnungen wiederholt für unterschiedliche Wochentage und Tageszeiten, womit eine zeitbasierte Auswahl von Signalprogrammen ermöglicht wird. Dies ist ein Beispiel für eine Steuerung mit offener Wirkungskette, es liegt keine Regelung im engeren Sinne vor. Bild 2.4 zeigt die offene Wirkungskette einer Steuerung am Beispiel einer zeitbasierten Signalprogrammwahl (kursiv dargestellt). Sind die auf das System einwirkenden Störgrößen, beispielsweise ein großer Zufluss von der Autobahn in das städtische Netz, messbar, so können diese im Sinne einer Störgrößen-aufschaltung zur Verbesserung der Steuerung genutzt werden (gestrichelt dargestellt).

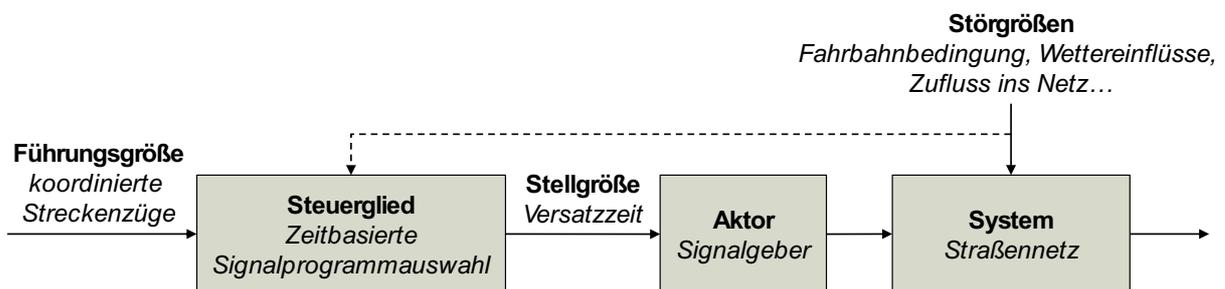


Bild 2.4 Steuerung mit Beispielen einer zeitbasierten Signalprogrammwahl (kursiv dargestellt)

Häufig liegen auf Knotenpunktebene Regelungen vor, während auf Netzebene meist Steuerungen eingesetzt werden. Die Ermittlung geeigneter Koordinierungen kann aber auch online unter der Verwendung von Messwerten durch Netzsteuerungsverfahren vorgenommen werden und damit als Regelung vorliegen.

2.2.1 Erweiterung der Signalsteuerung um kooperative Systeme

Bezogen auf den Regelkreis steht durch die zusätzlichen Informationen vernetzter Fahrzeuge eine erweiterte Sensorik zur Verfügung, welche zu einer verbesserten Steuerung genutzt werden kann. Durch die Beeinflussungsmöglichkeit der Fahrzeuge können darüber hinaus weitere Stellgrößen genutzt werden, wie etwa die Geschwindigkeit der Fahrzeuge oder deren Fahrstreifen. Die Vernetzung erlaubt den Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, stellt aber allein noch kein kooperatives System dar. So liegt Kooperation im

wirtschaftlichen Zusammenhang laut BIDLINGMAIER [1967] dann vor, „wenn zwei oder mehrere Unternehmungen aufgrund freiwilliger Abmachungen gewisse Aufgaben gemeinschaftlich erfüllen in der Erwartung, hierdurch einen – gegenüber dem jeweils individuellen Vorgehen – höheren Grad der Zielerfüllung zu erreichen.“ Übertragen auf die Lichtsignalsteuerung zeigen die beiden folgenden Beispiele, dass der Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalanlage allein nicht zu einem kooperativen System führt. Stattdessen müssen hierzu Lichtsignalsteuerung und Geschwindigkeitsempfehlungen aufeinander abgestimmt sein.

Beispiel 1

Eine Knotenpunktzufahrt bestehe aus einem Geradeaus- sowie einem Linksabbiegefahrstreifen, siehe Bild 2.5. Der Linksabbiege- sei getrennt vom Geradeausfahrstreifen signalisiert. Der Linksabbiegefahrstreifen sei derzeit rot signalisiert, während der Geradeausfahrstreifen freigegeben sei. Die Freigabezeiten werden als bekannt angenommen. Wird nun ein Fahrzeugpulk von einem Linksabbieger angeführt, gilt für diesen eine geringere optimale Geschwindigkeit als für die nachfolgenden, geradeausfahrenden Fahrzeuge. Bei fehlender Überholmöglichkeit würde das linksabbiegende Fahrzeug, durch einen für dieses Fahrzeug optimalen Geschwindigkeitshinweis, zwar einen Halt vermeiden können, die dahinterfahrenden Fahrzeuge würden aber unnötig verzögern und ein Teil der Freigabezeit der für sie relevanten Signalgruppe würde ungenutzt verstreichen. In diesem Fall erscheint es sinnvoller, entweder auf den Geschwindigkeitshinweis zu verzichten, oder Linksabbieger und Geradeausfahrer in einer gemeinsamen Phase freizugeben.

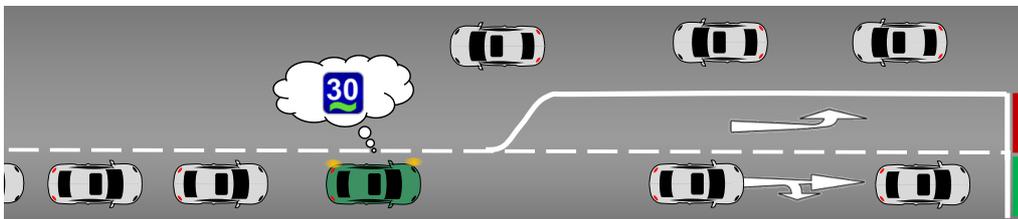


Bild 2.5 Geschwindigkeitshinweis für ein vernetztes, linksabbiegendes Fahrzeug (grün) bei getrennter Signalisierung der Linksabbieger

Beispiel 2

Eine Zufahrt sei mit einem Staudetektor versehen, der zur Umsetzung einer regelbasierten Steuerung diene (siehe Kapitel 3.1.1). Ist dieser Detektor für einen längeren Zeitraum belegt, wird die Freigabezeit verlängert. Der linke Teil von Bild 2.6 zeigt die Trajektorien nicht vernetzter Fahrzeuge, welche während der Sperrzeit einen Rückstau bilden. Das vernetzte Fahrzeug erhält einen Hinweis zur Geschwindigkeitsreduktion, um ein Auftreffen auf den Rückstau und den damit verbundenen Halt zu vermeiden. Der Staudetektor wird dabei überfahren und der eingestellte Schwellwert zur Verlängerung der Freigabezeit nicht überschritten. Dadurch erreicht das Fahrzeug die Haltlinie nicht mehr während der Freigabezeit, wodurch ein Halt an der Haltlinie und eine damit verbundene höhere Wartezeit verursacht werden. Im zweiten Fall,

der im rechten Teil von Bild 2.6 dargestellt ist, erhält das Fahrzeug dagegen keinen Hinweis zur Geschwindigkeitsreduktion. Dadurch wird zwar ein Halt aufgrund des Rückstaus verursacht, durch die längere Belegung des Detektors wird aber eine Freigabezeitverlängerung ausgelöst. Das Fahrzeug kann anschließend die Haltlinie passieren.

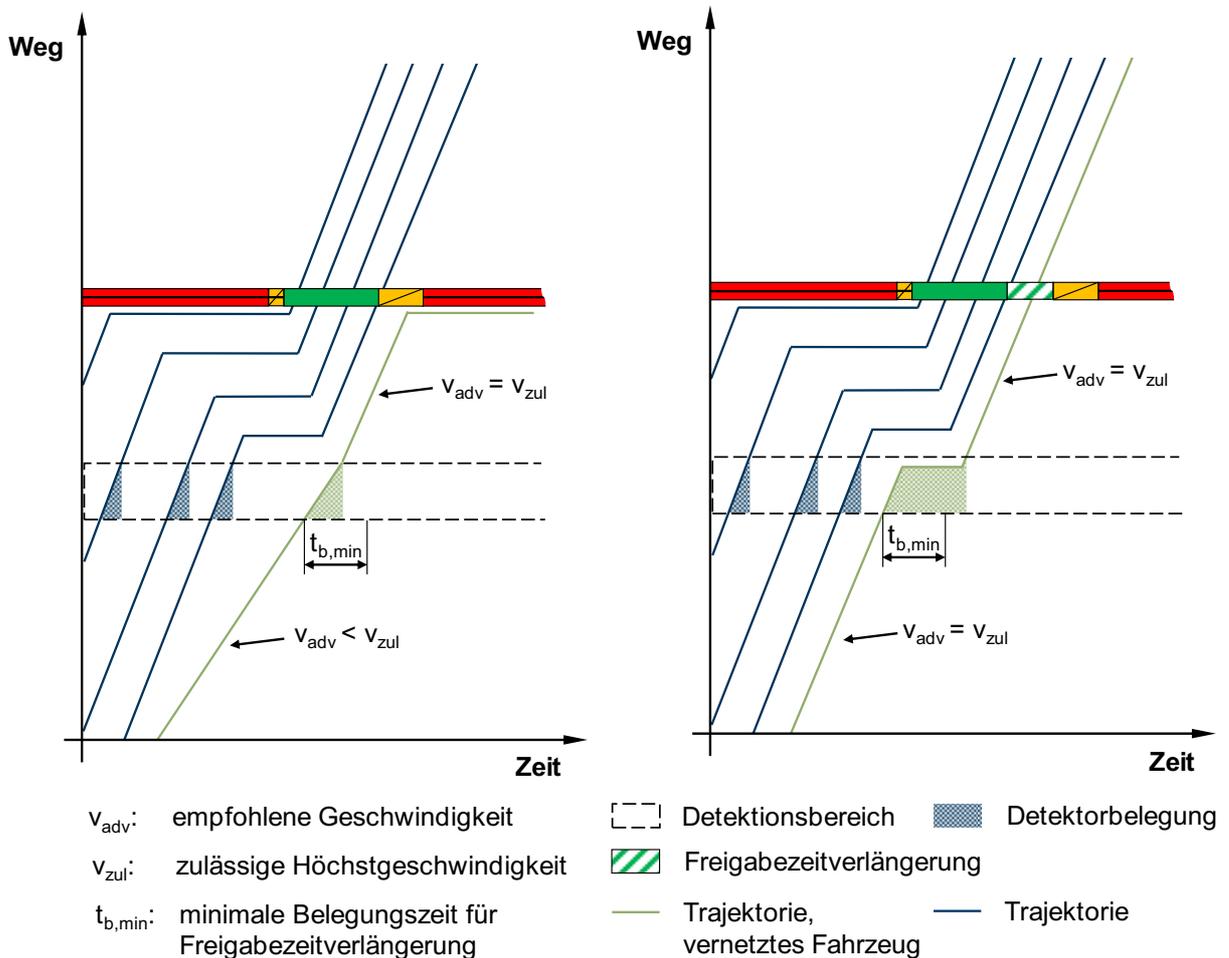
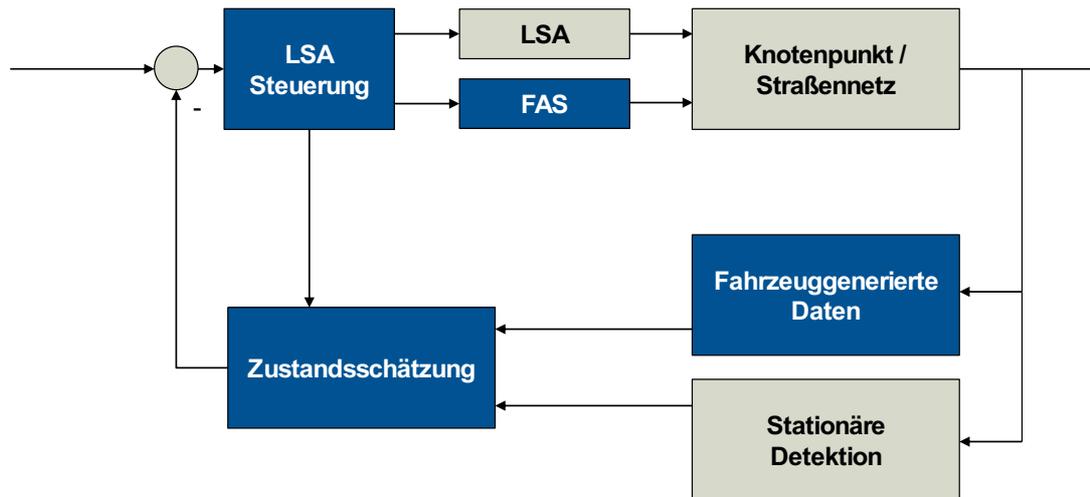


Bild 2.6 Zeit-Weg-Diagramm bei Bemessung mit Staulänge ohne Freigabezeitverlängerung (links) und mit Freigabezeitverlängerung (rechts)

Die beiden vorgestellten Beispiele sind zwar fiktiv und überzeichnet dargestellt, sie verdeutlichen aber, wie ein unerwünschtes Systemverhalten entstehen kann, obgleich eine Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur besteht. Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn Geschwindigkeitshinweise und Lichtsignalsteuerung unzureichend aufeinander abgestimmt sind. Um das Potential einer kooperativen Lichtsignalsteuerung vollständig ausschöpfen zu können, ist daher eine Integration der Fahrzeuge in den Regelkreis notwendig, wie sie in Bild 2.7 dargestellt ist. Die durch die Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur betroffenen Elemente sind hierzu farblich hervorgehoben.



LSA: Lichtsignalanlage

FAS: Fahrerassistenzsystem

Bild 2.7 Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit gleichzeitiger Beeinflussung von Fahrzeugen und Nutzung fahrzeuggenerierter Daten mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau)

Neben den konventionellen Daten der stationären Detektion gehen, im Unterschied zu den zuvor gezeigten Regelkreisen, nun auch fahrzeuggenerierte Daten in die Zustandsschätzung ein. Die Zustandsschätzung muss hierzu zunächst befähigt werden, weshalb deren Element in Bild 2.7 blau hinterlegt ist. Auch die Lichtsignalsteuerung selbst wird im Falle eines kooperativen Systems verändert und zwar dahingehend, dass Informationen ermittelt werden, welche für Fahrerassistenzsysteme genutzt werden können. Da die Informationen durch die Lichtsignalsteuerung berechnet werden, sind sie in Bild 2.7 mittels eines separaten Pfeils repräsentiert, der den Fahrerassistenzsystemen zugeführt wird, welche hier als Stellglied dienen. Diese Beeinflussung der Fahrzeuge, die zusätzlich zur konventionellen Signalisierung auf den Verkehrsfluss einwirkt, wird bei vollständiger Integration in den Regelkreis von der Lichtsignalsteuerung berücksichtigt.

Die in Bild 2.7 dargestellte vollständige Integration der Fahrzeuge in den Regelkreis stellt damit eine Maximallösung dar, wie sie nur bei wenigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben angewandt wird. So werden häufig bestehende Steuerungsverfahren eingesetzt, welche die Beeinflussung der Fahrzeuge nicht direkt berücksichtigen. Stattdessen werden a posteriori Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage zur Berechnung von Informationen zur Beeinflussung von Fahrzeugen genutzt. Auch wird häufig nur eine der Kommunikationsrichtungen untersucht, also beispielsweise werden fahrzeuggenerierte Daten nicht zur Verbesserung der Lichtsignalsteuerung genutzt, sondern ausschließlich eine Beeinflussung der Fahrzeuge vorgenommen. Der umgekehrte Weg, bei dem fahrzeuggenerierte Daten genutzt werden, aber keine Informationen an Fahrzeuge übermittelt werden, wird ebenfalls besprochen. In den Kapiteln 3.1 bis 3.3 wird der Stand der Technik und Wissenschaft unter diesen Gesichtspunkten analysiert und beschrieben. Dabei werden die jeweils gültigen Abwandlungen von Bild 2.7 zur Beschreibung und Abgrenzung der Funktionsweise der verschiedenen Ansätze genutzt.

2.3 Vernetzung von Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur

Die technische Grundlage kooperativer Lichtsignalsteuerung bildet der drahtlose Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur, weshalb die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich im Folgenden knapp dargestellt werden.

2.3.1 Drahtloskommunikation zur Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur

Die drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs und den Steuergeräten von Lichtsignalanlagen mittels Funkverbindung kann als erfolgreiches Beispiel für die Vernetzung von Fahrzeugen und Verkehrsinfrastruktur gesehen werden. Zur Priorisierung von Bussen und Straßenbahnen hat sich hierzu im deutschsprachigen Raum die Richtlinie VDV R09 durchgesetzt [VERBAND ÖFFENTLICHER VERKEHRSBETRIEBE, 1984]. Vom Fahrzeug zur Lichtsignalanlage übertragene Informationen wie die Meldepunktnummer oder die Liniennummer können dazu genutzt werden, Veränderungen der Freigabezeit oder Sonderphasen für den öffentlichen Verkehr anzufordern. Auch die Informationsübermittlung von der Lichtsignalanlage zum Fahrzeug wurde bereits vor über 30 Jahren erprobt. Mittels Infrarotkommunikation wurden Schaltzeitpunkte der Lichtsignalanlage an Fahrzeuge übertragen, um Geschwindigkeitshinweise im Kombiinstrument anzeigen zu können [ZIMDAHL, 1983].

Nach dem aktuellen Stand der Technik stehen weitaus leistungsfähigere Kommunikationsmittel zur Verfügung, die höhere Reichweiten und Datenübertragungsraten erlauben. Die Entwicklungen der Kommunikationstechnologie können als Treiber der intensiven Forschungen im Bereich der vernetzten Verkehrssysteme angesehen werden. Mit WLAN (Wireless Local Area Network) und Mobilfunkkommunikation stehen dabei zwei grundsätzlich unterschiedliche Technologien zur Verfügung.

WLAN baut auf den kabelgebunden LAN (Local Area Network) Standards auf und erlangte vor allem durch die Vernetzung von Computern, Smartphones und Tablets untereinander und mit dem Internet große Bedeutung. Gegenüber den LAN Standards unterscheidet sich WLAN hauptsächlich in der ersten Schicht des OSI (Open Systems Interconnection) Modells, also der physikalischen Schicht, da Funkwellen statt kabelgebundener Datenübertragung genutzt werden [SAUTER, 2015]. WLAN wird vom *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) unter der Bezeichnung 802.11 standardisiert und besteht mittlerweile in zahlreichen Weiterentwicklungsstufen, die sich unter anderem in ihrer Bandbreite und dem genutzten Frequenzband unterscheiden. Mit dem Standard 802.11p wurde für die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander sowie mit Verkehrsinfrastruktur ein eigener Substandard festgelegt. Dieser wird in Europa auch als ITS-G5, in den USA hingegen als Dedicated Short Range Communication (DSRC) oder Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) bezeichnet. Der 802.11p Standard gleicht weitgehend dem 802.11a Standard, wurde aber in der Bandbreite halbiert, womit auch der Datendurchsatz reduziert wird. Die Robustheit gegenüber

Schwankungen der Empfangsstärke soll hierdurch im Gegenzug erhöht werden [LIN ET AL., 2012]. Die Kommunikation soll noch bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 200 km/h ermöglicht werden und die Reichweite bis zu 1000 m betragen, während für den 802.11a Standard lediglich 30 m angegeben werden [POPESCU-ZELETIN ET AL., 2010]. Die WLAN Kommunikation kann zur direkten Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit Infrastruktureinrichtungen (engl.: Roadside Units, kurz: RSU) genutzt werden. Im Falle der Lichtsignalanlagen kann die RSU beispielsweise in Steuergeräte integriert oder mit diesen verbunden werden.

Insbesondere wenn keine sicherheitskritischen Funktionen umgesetzt werden und damit höhere Latenzzeiten akzeptiert werden können, kann die Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur auch über Mobilfunk erfolgen. Typischerweise erfolgt die Kommunikation hier vom Fahrzeug zu einem zentralen Server, welcher Informationen der Fahrzeuge verarbeitet und den Fahrzeugen Informationen über die Infrastruktur bereitstellen kann. Die nachfolgenden Erläuterungen zum Mobilfunk basieren, wie schon jene zur WLAN Technik, auf den Ausführungen von SAUTER [2015]. Das heute noch für Sprachtelefonie genutzte GSM (Global System for Mobile Communications) Netz war ursprünglich nicht für die Datenübertragung ausgelegt und weist daher entsprechend geringe Datenraten auf. Mit dem Einzug von mobilen Internetanwendungen wurde der GSM Standard zunächst um GPRS (General Packet Radio Service) und später um EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) erweitert, womit in der Praxis über zehnmal höhere Datenraten erreicht werden können. Die dritte Generation des Mobilfunks führt diesen Trend fort. Mit UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) und der späteren HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) Erweiterung konnten die Datenraten nochmals deutlich gesteigert werden. Die weiter steigenden Anforderungen an mobile Datenübertragung führten zur Entwicklung des Mobilfunkstandards der vierten Generation, der als Long Term Evolution (LTE) bezeichnet wird und die möglichen Datenraten gegenüber HSDPA nochmals annähernd verzehnfacht. In einem Visionspapier [5G INFRASTRUCTURE ASSOCIATION, 2015] für den Standard der fünften Generation werden das Internet der Dinge und Fahrzeuganwendungen explizit als Anwendungsdomänen genannt. Demnach sollen die Datenrate sowie die Anzahl möglicher Teilnehmer je Flächeneinheit gegenüber LTE vertausendfacht werden und die Latenzzeit auf 5 ms reduziert werden. Für Fahrzeug-zu-Fahrzeug Verbindungen wird sogar 1 ms als Zielwert genannt. Außerdem soll die Verbindung bei Geschwindigkeiten von bis zu 500 km/h möglich sein. Als Ziel für die kommerzielle Verfügbarkeit wird der Zeitraum 2020 bis 2025 genannt.

Bild 2.8 zeigt vereinfacht die beiden alternativen Kommunikationswege mittels Mobilfunk und einem zentralen Server auf der einen und der Nutzung von WLAN mit speziell ausgerüsteten Lichtsignalanlagen auf der anderen Seite.

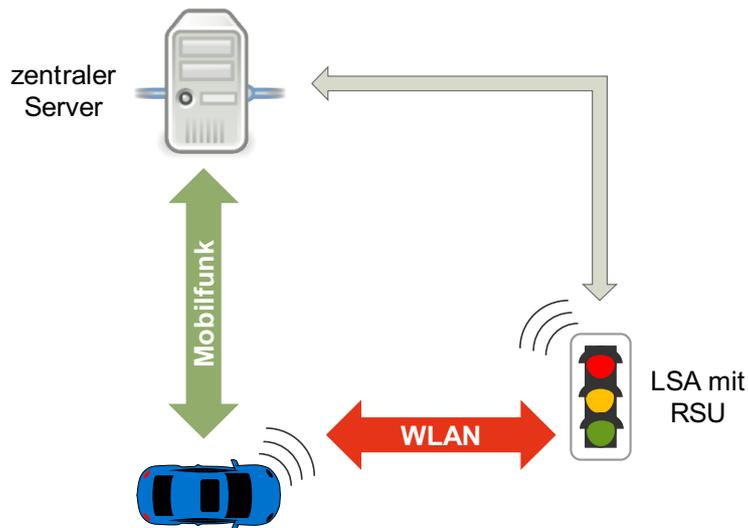


Bild 2.8 Vereinfachte Darstellung der Kommunikationswege zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage mittels Mobilfunk und WLAN

2.3.2 Ausgewählte Nachrichtentypen zur Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur

Für den Datenaustausch zwischen Fahrzeugen untereinander beziehungsweise zwischen Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur existieren verschiedene bereits standardisierte oder noch in der Standardisierung befindliche Nachrichtentypen, von denen einige ausgewählte hier vorgestellt werden. Mit Organisationen wie der Society of Automotive Engineers (SAE), dem European Telecommunications Standards Institute (ETSI), der International Organization for Standardization (ISO), dem Comité Européen de Normalisation (CEN) und Traveler Information Services Association (TISA) bestehen zahlreiche Institutionen, welche Standardisierungen von Nachrichtentypen vornehmen. Aus diesem Grund existieren auch national unterschiedliche Ausprägungen der einzelnen Nachrichtentypen. Es gibt allerdings Anstrengungen zur Harmonisierung, mit dem Ziel, international gültige Standards mit lokalen Ausprägungen zu erstellen. Die Standardisierung wird maßgeblich von den USA, Europa und Japan vorangetrieben, im Folgenden liegt der Fokus auf den europäischen Ausprägungen der Standards.

Die Cooperative Awareness Messages (CAM) enthalten Basisinformationen der versendenden Einheit, um den Empfängern über deren Status Bewusstsein (engl.: awareness) zu verschaffen [ETSI, 2014A]. Die Informationen werden in regelmäßigen Intervallen ausgesendet und werden daher auch als Herzschlagnachrichten bezeichnet. Die Art der Information kann sich je nach Typ des Senders unterscheiden. So können Fahrzeuge, Fußgänger, aber auch stationäre Infrastruktureinrichtungen CAMs versenden. Für Fahrzeuge sind neben der aktuellen Position beispielsweise Informationen wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und Fahrtrichtung vorgesehen. Darüber hinaus existieren spezielle Datencontainer für Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs oder Sondereinsatzfahrzeuge. Dieser Nachrichtentyp unterliegt der Harmonisierung mit der Basic Safety Message (BSM) der US-amerikanischen Standardisierung.

Decentralized Environmental Notification Message (DENM) werden im Unterschied zu CAM nur bei bestimmten auftretenden Ereignissen versendet, die Einfluss auf die Sicherheit und den Verkehrszustand haben [ETSI, 2014B]. Exemplarisch seien Bremsmanöver oder niedrige Reibwerte der Fahrbahn als Ereignisse genannt.

Neben diesen allgemeinen Nachrichtentypen gibt es weitere Definitionen, die speziell für signalisierte Knotenpunkte relevant sind. Hierzu zählen die Nachrichtentypen Signal Phase and Timing (SPAT), Map Data (MAP), Signal Request Message (SRM) und Signal Status Message (SSM). Diese Nachrichtentypen wurden zunächst von US-amerikanischer Seite beschrieben [SAE, 2015], werden aber mit entsprechenden lokalen Anpassungen für Europa übernommen [ETSI, 2016B]. Die SPAT Nachrichten enthalten beispielsweise Informationen zum aktuellen Signalzustand, dem frühesten und wahrscheinlichsten Zeitpunkt einer Freigabe und deren spätestes Ende. Um die einzelnen Signalgruppen den jeweiligen Zufahrten zuordnen zu können, ist ein weiterer Nachrichtentyp notwendig, der Informationen zur Geometrie des Knotenpunkts enthält. Hierzu dienen die MAP Nachrichten, welche mit den zuvor vom ETSI beschriebenen TOPO Nachrichten harmonisiert werden. Während SPAT und MAP dem Übertragen von Informationen von der Lichtsignalanlage zum Fahrzeug dienen, dienen SRM und SSM dazu, die Lichtsignalsteuerung gezielt zu beeinflussen [ETSI, 2016A]. Mittels SRM können beispielsweise Freigaben von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs oder von Sondereinsatzfahrzeugen angefordert werden und deren Umsetzung beziehungsweise Ablehnung bei konkurrierenden Anforderungen wird mit der SSM an die Fahrzeuge quittiert. Während die vorgenannten Nachrichtentypen auf die Übertragung mittels WLAN ausgelegt sind, existieren für den Datenaustausch über einen zentralen Server gesonderte Nachrichtenformate. Hierzu zählen beispielsweise die von der TISA beschriebenen Traffic Signal Information (TPEG-TSI) Nachrichten. Diese enthalten laut PU [2012] umfassendere Informationen zu künftigen Schaltzeitpunkten als SPAT Nachrichten.

Generell ist festzuhalten, dass die derzeit verfügbaren Nachrichtenformate besonders für den Broad- oder Multicast geeignet sind. Folglich werden Daten von einem Sender an mehrere Empfänger versandt, wobei sich die Informationen zwischen den einzelnen Empfängern nicht unterscheiden. Im Falle der SPAT Nachrichten ist damit zwar eine individuelle Anzeige von Empfehlungen im Fahrzeug möglich, es erhalten aber alle Fahrzeuge dieselben Informationen von der Lichtsignalanlage.

3. Stand der Wissenschaft und Technik zur Lichtsignalsteuerung in vernetzten Verkehrssystemen

Im Folgenden wird der Stand der Technik und Wissenschaft zur Lichtsignalsteuerung in vernetzten Verkehrssystemen beschrieben, unterteilt nach den genutzten Beeinflussungsrichtungen, wie sie in Bild 3.1 dargestellt sind.

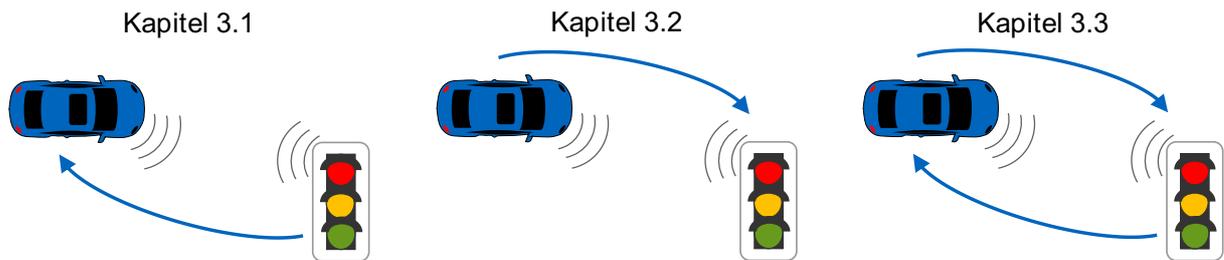


Bild 3.1 Strukturierung von Kapitel 3 anhand der genutzten Beeinflussungsrichtungen

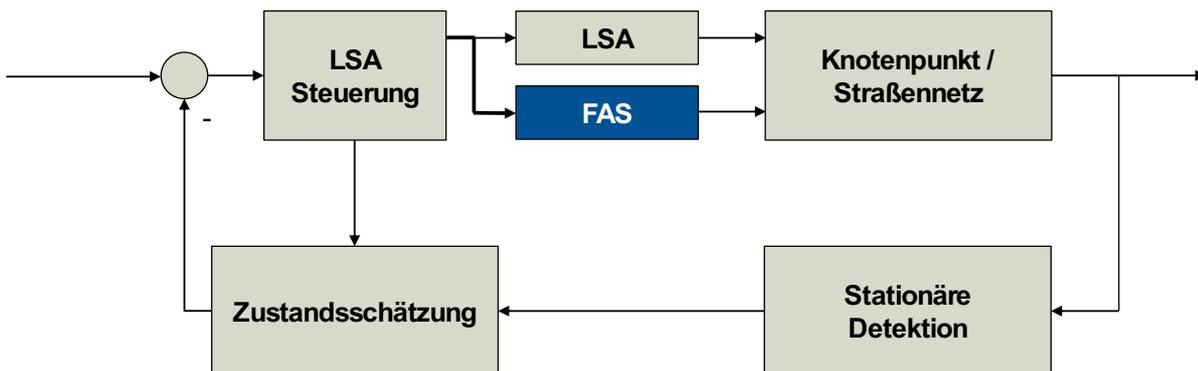
In Kapitel 3.1 werden Verfahren beschrieben, bei denen lediglich eine Beeinflussung der Fahrzeuge durch die Lichtsignalsteuerung vorgenommen wird. In Kapitel 3.2 werden Verfahren beschrieben, bei denen ausschließlich der umgekehrte Beeinflussungsweg gewählt wird, also fahrzeuggenerierte Daten zur Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung genutzt werden. In Kapitel 3.3 werden schließlich Verfahren beschrieben, die beide Beeinflussungswege kombinieren und das veränderte Fahrzeugverhalten in der Lichtsignalsteuerung berücksichtigen.

3.1 Beeinflussung vernetzter Fahrzeuge auf Grundlage der Lichtsignalsteuerung

Gerade dann, wenn die Beeinflussung der Fahrzeuge nicht unmittelbar in den Entwurf der Regelung eingeht, sondern a posteriori die Informationsweitergabe von Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage an ausgestattete Fahrzeuge ermöglicht werden soll, ist die Vorhersage künftiger Signalzustände eine der maßgeblichen Herausforderungen. Falsche oder ungenaue Hinweise können zum einen die Akzeptanz der Nutzer reduzieren und zum anderen negativen Einfluss auf den Verkehrsablauf am Knotenpunkt haben. Durch die intensive Forschung auf dem Gebiet der vernetzten Verkehrssysteme, wurden zahlreiche Versuche unternommen, dynamische Verfahren zur Lichtsignalsteuerung vorherzusagen. Hierbei können grundsätzlich Verfahren unterschieden werden, welche Systemwissen der Lichtsignalsteuerung einbeziehen und solche, die Systemwissen zu Gunsten einer leichteren Übertragbarkeit bewusst ignorieren. Derzeit hat sich noch kein einheitliches Maß durchgesetzt, mit dem die Genauigkeit der Vorhersage von Schaltzeitpunkten angegeben werden kann und häufig fehlen diese Angaben in der Literatur vollständig. Aus diesem Grund beschränken sich die Beschreibungen im Folgenden meist auf qualitative Aussagen zum jeweiligen Vorgehen.

3.1.1 Bestehende Lichtsignalsteuerungsverfahren und möglicher Einbezug von Systemwissen zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte

In diesem Abschnitt werden Ansätze beschrieben, bei denen Kenntnisse über das Lichtsignalsteuerungsverfahren und aktuelle Berechnungen der Steuerungsalgorithmen eingesetzt werden, um eine Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte zu ermöglichen. Die Beeinflussung der Fahrzeuge und deren Effekte werden dabei in der Regel nicht direkt von der Lichtsignalsteuerung berücksichtigt. Aus diesem Grund werden die Informationen, die von der Lichtsignalsteuerung an die Fahrerassistenzsysteme übertragen werden in Bild 3.2 nicht mit einem separaten Pfeil dargestellt, wie dies in Bild 2.7 der Fall war. Der Pfeil ist gegenüber den anderen Signalen jedoch fett hervorgehoben, um anzudeuten, dass die übertragenen Informationen über die aktuellen Schaltbefehle an die Lichtsignalanlage hinausgehen. So sind künftige Schaltzeitpunkte und gegebenenfalls weitere Informationen, wie beispielsweise die Rückstaulänge, enthalten. Da die maßgebliche Erweiterung gegenüber konventionellen Steuerungen im Einsatz von Fahrerassistenzsystemen besteht, ist lediglich dieses Element in Bild 3.2 blau hervorgehoben.



LSA: Lichtsignalanlage

FAS: Fahrerassistenzsystem

Bild 3.2 Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Beeinflussung von Fahrzeugen durch Nutzung von Systemwissen der Lichtsignalsteuerung mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau)

Im Folgenden werden bestehende Steuerungsverfahren aus Praxis und Forschung vorgestellt und, sofern verfügbar, werden Informationen über die Ausnutzung des Systemwissens für die Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte genannt. Da zahlreiche Lichtsignalsteuerungsverfahren existieren, ist es sinnvoll, diese zunächst zu kategorisieren. Dies kann nach verschiedenen Gesichtspunkten geschehen. Solche Kategorien bilden beispielsweise die Systemarchitektur, das verwendete Optimierungsverfahren oder die von den Verfahren genutzten Stellgrößen. FRIEDRICH [2002] und STEVANOVIC [2010] liefern derartige kategorisierte, überblicksartige Zusammenfassungen verschiedener Verfahren. Für die in diesem Abschnitt präsentierte Beschreibung bestehender Steuerungsverfahren sowie für die vorliegende Arbeit

insgesamt, sind drei Kategorien besonders relevant: der Steuerungsfokus, die Entscheidungsgrundlage sowie die Phaseneinteilung.

Nahezu alle kommerziell verfügbaren Steuerungsverfahren berücksichtigen sowohl die Knotenpunktebene als auch die Netzebene. So charakterisiert STEVANOVIC [2010] alle untersuchten Verfahren als zentral und lokal wirkend. Dennoch lässt sich häufig die Hauptstoßrichtung der Verfahren identifizieren. Wird beispielsweise eine Optimierung auf Knotenpunktebene durchgeführt, in welcher Informationen und Randbedingungen aus einer übergeordneten Netzebene berücksichtigt werden, so wird das Verfahren im Folgenden als knotenpunkt-basiert bezeichnet. Findet dagegen eine zentrale Entscheidung mit lokalen Anpassungen statt, so wird das Verfahren als netzbasiert eingeordnet. Jedoch ist eine Zuordnung nicht immer eindeutig möglich.

Eine weitere wichtige Kategorie stellt das Vorgehen zum Auffinden einer Steuerungsentscheidung dar, wobei in dieser Arbeit nach regelbasierten und modellbasierten Verfahren unterschieden wird. Es sei angemerkt, dass, wie BOLTZE ET AL. [2011] und LÜßMANN [2015] beschreiben, auch diese Kategorisierung nicht völlig trennscharf vorzunehmen ist, da auch modellbasierte Verfahren Regeln beinhalten. Umgekehrt basieren die für regelbasierte Verfahren aufgestellten Regeln auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und könnten daher auch als vereinfachtes Modell betrachtet werden. Bei regelbasierten Verfahren findet aber normalerweise keine Optimierung im mathematischen Sinn statt. Ein typisches regelbasiertes Verfahren zur Steuerung von Knotenpunkten ist das in den deutschen Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [FGSV, 2010B] und dem US-amerikanischen Traffic Signal Timing Manual (STM) [KOONCE ET AL., 2008] beschriebene Verfahren der Zeitlückensteuerung. Modellbasierte Verfahren nutzen dagegen mathematische Modelle, um den Verkehrsfluss und dessen Auswirkungen abzubilden. So können die Effekte alternativer, zukünftiger Steuereingriffe untersucht werden und darauf basierend eine Entscheidung getroffen werden. In der Regel geschieht diese Entscheidungsfindung durch Optimierung einer Zielfunktion. Für die vorliegende Arbeit ist dabei besonders interessant, dass modellbasierte Verfahren durch das vorausschauende Vorgehen häufig erweiterte Möglichkeiten zur Vorhersage zukünftiger Schaltzeitpunkte gegenüber regelbasierten, reaktiven Verfahren erlauben.

Eine dritte Kategorisierung kann im Hinblick auf die Flexibilität der Phaseneinteilung erfolgen. Bei einigen Steuerungsverfahren muss diese fest vorgegeben werden. Das heißt, dass die Signalgruppen zunächst in geeignete Phasen eingeteilt werden und die Entscheidung anschließend phasenbasiert erfolgt, gegebenenfalls sogar unter Einhaltung einer festen Phasenfolge. Andere Ansätze verfolgen dagegen das Ziel einer möglichst flexiblen Steuerung. So sind verschiedene Zusammenstellungen der unterschiedlichen Signalgruppen unter Berücksichtigung der Verträglichkeit der jeweiligen Verkehrsströme möglich.

Prinzipiell können Steuerungsverfahren nun innerhalb der drei Kategorien jeweils einem Typ zugeordnet werden, woraus sich theoretisch acht Kombinationsmöglichkeiten ergeben, welche in Bild 3.3 in einer dreidimensionalen Darstellung mit Nominalskalen dargestellt sind. Die Einteilung wird für die im Folgenden beschriebenen bestehenden Steuerungsverfahren vorgenommen. Eine freie Phaseneinteilung auf Netzebene ist zwar theoretisch denkbar, erscheint aber aufgrund der feingliedrigen Betrachtung der Signalisierung auf Netzebene nicht praxisrelevant. In der Literatur wurden folglich auch keine Beispiele gefunden, weshalb die beiden betreffenden Typen in Bild 3.3 ausgegraut dargestellt sind.

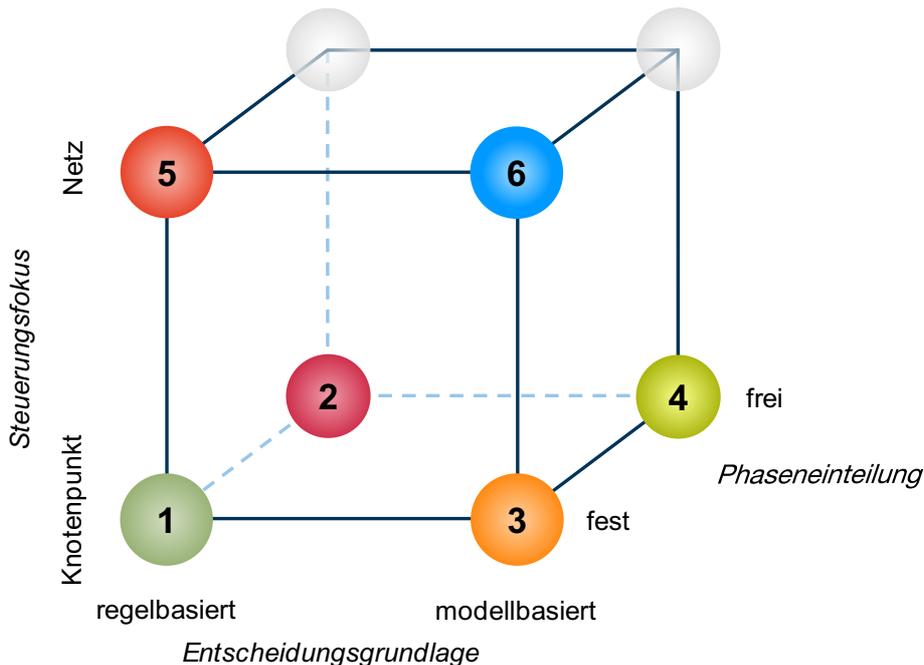


Bild 3.3 Kategorisierung von Steuerungsverfahren nach Entscheidungsgrundlage, Phaseneinteilung und Steuerungsfokus

Aufgrund der großen Anzahl bestehender Steuerungsverfahren ist es an dieser Stelle nicht möglich, die auf dem Markt befindlichen und in der Forschung beschriebenen Verfahren erschöpfend darzustellen. Stattdessen wird eine Auswahl getroffen, um Verfahren zu nennen, die für die vorliegende Arbeit oder im derzeitigen Marktumfeld besonders relevant erscheinen.

Regelbasierte Knotenpunktsteuerung mit fester Phaseneinteilung (Typ 1)

Die RiLSA [FGSV, 2010B] behandelt sowohl signalgruppenbasierte als auch phasenbasierte Knotenpunktsteuerungen. Die zuletzt genannten Steuerungen werden in diesem Abschnitt beschrieben. Die Darstellung stützt sich dabei auf die Beschreibungen der RiLSA, während auf herstellerspezifische Produkte nicht näher eingegangen wird, da sich hauptsächlich das Vorgehen zur Erstellung der Steuerungen voneinander unterscheidet, nicht aber die Grundprinzipien der resultierenden Steuerung.

Zunächst sind die einzelnen Signalgruppen zu geeigneten Phasen zusammenzufassen und je nach Phasenfolgen Phasenübergänge zu definieren. Zudem sind Mindestfreigabezeiten und gegebenenfalls Endzeitpunkte für die Freigabe der einzelnen Phasen festzulegen. Nach dem Abgleich der Detektorwerte mit den programmierten Regeln können Freigabezeit-anpassungen, Phasenforderung oder Phasentausch erfolgen. Zeitlücken und Staulänge sind typische Größen zur Bemessung der Freigabezeit. Bei der Zeitlückensteuerung wird, nach Ablauf der eingestellten Mindestfreigabezeit, anhand der für die derzeitige Freigabe relevanten Detektoren überprüft, wie groß die Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeu- gen ist. Überschreitet diese Zeitlücke einen eingestellten Schwellwert oder wird eine ein- gestellte maximale Freigabezeit oder späteste Umlaufsekunde erreicht, wird der Phasenüber- gang zur nächsten Phase eingeleitet. Die Schwellwerte für Zeitlücken liegen in der Regel zwi- schen 2 s und 5 s, woraus sich zusammen mit der Fahrzeuggeschwindigkeit der Abstand des Detektors zur Haltlinie ergibt. Bild 3.4 zeigt beispielhaft Flussdiagramm und Phasenfolgeplan einer zweiphasigen Zeitlückensteuerung.

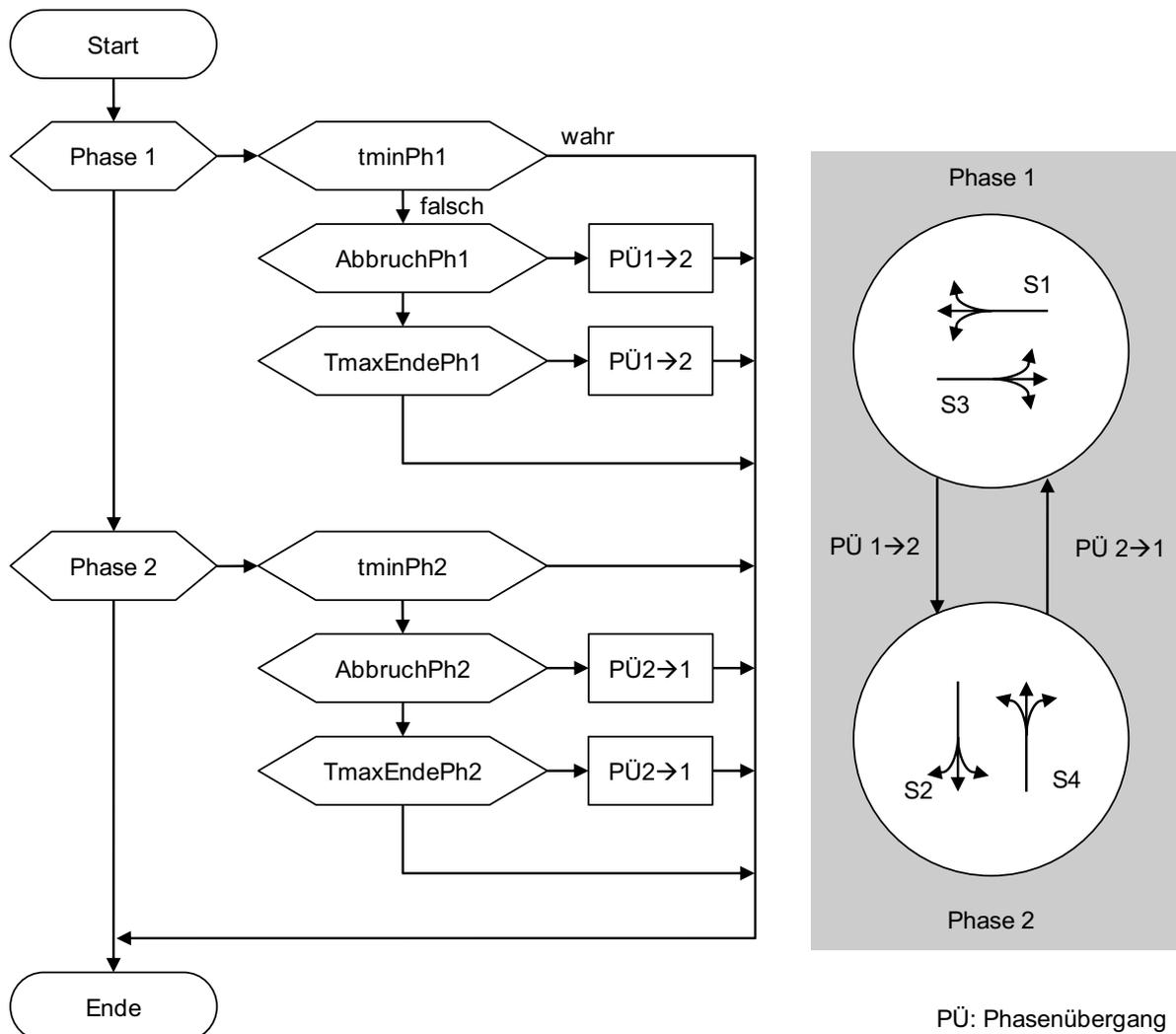


Bild 3.4 Flussdiagramm (links) und Phasenfolgeplan (rechts) einer zweiphasigen Zeitlückensteuerung

Die Bemessung mittels Staulänge wurde bereits in Kapitel 2.2.1 für das zweite Beispiel verkürzt beschrieben. Hierbei werden Zufahrten mit einem Staudetektor versehen, der zur Umsetzung einer regelbasierten Steuerung dient. Ist dieser Detektor für einen längeren Zeitraum belegt, wird die Freigabezeit verlängert. Typische Schwellwerte der Belegungszeit liegen zwischen 5 s und 15 s, wobei der Detektor außerhalb des üblicherweise auftretenden Rückstaus verbaut sein sollte.

Phasenanforderungen werden dann eingesetzt, wenn einzelne Phasen nur eine geringe Nachfrage aufweisen. Beispielfhaft können Fußgängerphasen genannt werden, die nur dann eine Freigabe erhalten, wenn zuvor der entsprechende Taster durch einen Fußgänger bedient wurde. Auch für wenig nachgefragte Phasen des motorisierten Verkehrs oder Sonderphasen für den öffentlichen Verkehr werden regelbasierte Phasenanforderungen genutzt.

Zur Priorisierung des öffentlichen Verkehrs wird außerdem häufig das Prinzip des Phasentauschs genutzt. Dabei wird die Phasenfolge so verändert, dass das anfordernde Fahrzeug des öffentlichen Verkehrs schneller bedient wird, indem die entsprechende Phase vorgezogen wird.

Eine pauschale Aussage zur Vorhersagbarkeit von regelbasierten Knotenpunktsteuerungen mit fester Phaseneinteilung ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Ausprägungen nicht möglich. Beispielsweise ist eine freilaufende Anlage mit veränderlicher Phasenfolge deutlich variabler, als eine Anlage, welche in einen koordinierten Streckenzug eingebunden ist und lediglich eine Freigabezeitanpassung zulässt. Auch die Art der Bemessung hat Einfluss auf die Vorhersagbarkeit. So wird eine Phase bei der Bemessung mit Zeitlücken kontinuierlich in ihrer Länge beeinflusst, während bei einer Bemessung mit Staulänge eine diskrete Veränderung der Freigabezeit vorgenommen wird, was zu einer weniger variablen und damit leichter vorhersagbaren Steuerung führt. Das Systemwissen der Steuerung kann dabei zur Verbesserung der Vorhersage herangezogen werden. Es ist aber festzuhalten, dass regelbasierte Verfahren im Allgemeinen reaktiv arbeiten, die Steuerungsentscheidungen also basierend auf einem sich bereits eingestellten Zustand getroffen werden. Da sich gemessene Zeitlücken oder Anforderungen unvorhersehbar ändern und in der Regel sekundlich abgefragt werden, ist das reaktive Verhalten regelbasierter Steuerungen einer Vorhersage von Schaltzeitpunkten abträglich.

Prinzipiell können die in diesem Abschnitt vorgestellten Steuerungsverfahren frei programmiert werden, beispielsweise durch die Erstellung eines Ablaufdiagramms, wie es in Bild 3.4 gezeigt ist. Alternativ können standardisierte regelbasierte Steuerungsverfahren eingesetzt werden, welche durch die Wahl von Parametern an den zu steuernden Knotenpunkt angepasst werden. Da die Erstellung einer Steuerung mit freier Phaseneinteilung komplexer ist, kommen standardisierte Verfahren vor allem bei den im nächsten Abschnitt vorgestellten Steuerungen zum Einsatz.

Regelbasierte Knotenpunktsteuerung mit freier Phaseneinteilung (Typ 2)

In diesem Abschnitt werden beispielhaft zwei Verfahren beschrieben, die zur Knotenpunktsteuerung eingesetzt werden, wobei Regeln die Entscheidungsgrundlage für Steuereingriffe bilden. Im Unterschied zu den im vorigen Abschnitt genannten Verfahren besteht hierbei allerdings keine feste Phaseneinteilung.

Die Ring-and-Barrier Methode wird von KOONCE ET AL. [2008] in den US-amerikanischen Richtlinien beschrieben. Strenggenommen stellt Ring-and-Barrier kein Steuerungsverfahren dar, sondern liefert einen Formalismus zur Planung von Knotenpunktsteuerungen und stellt hierzu das Standardvorgehen im nordamerikanischen Raum dar. Abweichend von der deutschsprachigen Definition bezeichnet eine Phase im STM eine der in Bild 3.5 von 1 bis 8 durchnummerierten Einheiten, womit die mit der Ring-and-Barrier Methode erzeugten regelbasierten Steuerungen eine flexible Phaseneinteilung nach der oben gegebenen Definition zulassen und damit, im Unterschied zu den im vorigen Abschnitt beschriebenen Steuerungen, Typ 2 in Bild 3.3 zuzuordnen sind. Die Phasen werden in einem Ring angeordnet, der kontinuierlich durchlaufen wird. Dieser Ring enthält in der Regel jeweils konfligierende Signalgruppen, welche entweder durch einfache Zwischenzeiten oder eine Barriere (engl.: barrier) getrennt werden und so nacheinander ablaufen können. Ein weiterer Ring, der gleichzeitig durchlaufen wird, enthält die jeweils kompatiblen Phasen. Eine Barriere muss von beiden Ringen zum gleichen Zeitpunkt durchlaufen werden, um Konflikte auszuschließen.

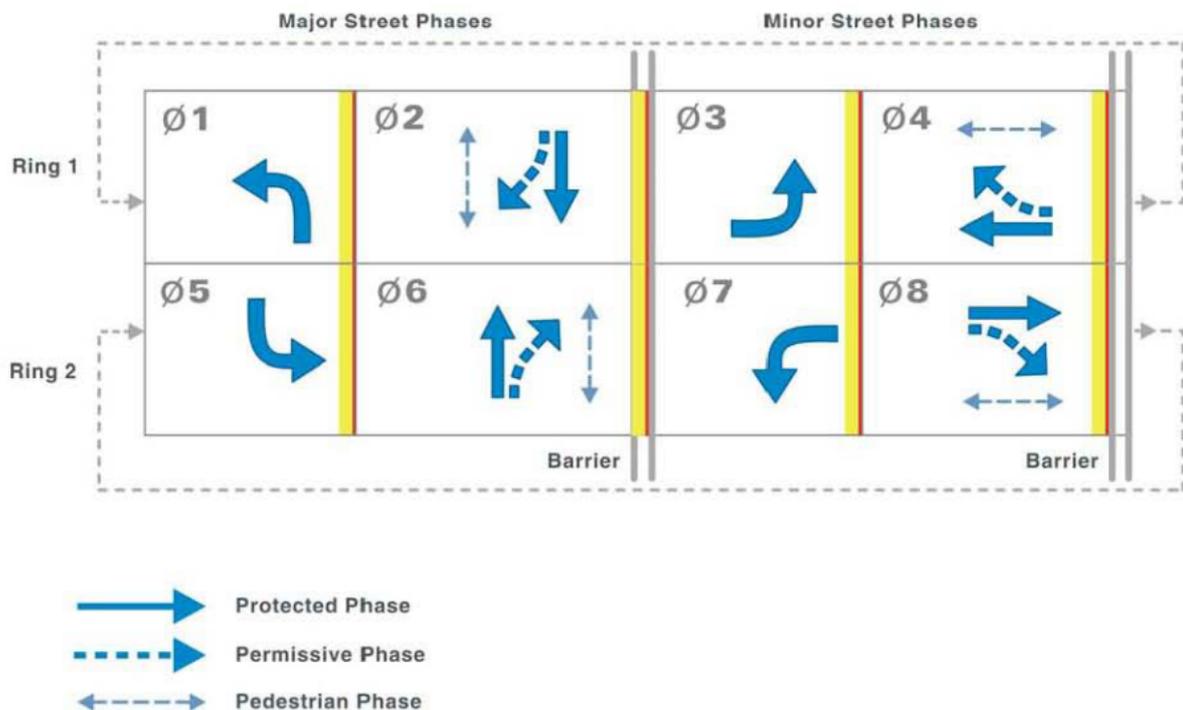


Bild 3.5 Gewöhnliches Ring-and-Barrier Diagramm [KOONCE ET AL., 2008]

Im STM sind außerdem Verfahren zur verkehrsabhängigen Steuerung unter Berücksichtigung des Ring-and-Barrier Formalismus gegeben. So können mittels Parameterwahl regelbasierte Steuerungen erstellt werden, die zum Beispiel in der oben beschriebenen Zeitlückensteuerung resultieren.

STEVANOVIC ET AL. [2013] untersuchen die Effekte der Beeinflussung von Fahrzeugen mittels Geschwindigkeitshinweisen unter Verwendung einer Ring-and-Barrier Steuerung im Rahmen einer Simulationsstudie. Die Untersuchung erfolgt sowohl mit einer Festzeitsteuerung als auch mit einer verkehrsabhängigen Steuerung. Die Autoren zeigen, dass die Geschwindigkeitshinweise die Wartezeit stark reduzieren können. Bei der gleichzeitigen Verwendung von verkehrsabhängiger Steuerung und Geschwindigkeitshinweisen kommt es allerdings zu Fehlinformationen aufgrund falscher Vorhersagen der Schaltzeitpunkte, wodurch die Performanz des Gesamtsystems zum Teil signifikant reduziert wird. Dieses Beispiel demonstriert die Wichtigkeit der Vorhersagbarkeit künftiger Schaltzeitpunkte für Geschwindigkeitshinweise.

Einen Feldtest zur Untersuchung eines online Vorhersageverfahrens für Ring-and-Barrier Steuerungen präsentieren BAUER ET AL. [2015]. Dabei sind Versorgungsdaten der Knotenpunkte notwendig, weshalb das Verfahren hier als solches mit Verwendung von Systemwissen klassifiziert wird. Das Vorhersageverfahren lässt sich prinzipiell auch auf andere regelbasierte Steuerungen anwenden. Bei Verwendung von freier Programmierbarkeit und proprietären Standards ist eine Übertragung auf viele Knotenpunkte aber mit hohem Aufwand verbunden. Durch die Verwendung des Ring-and-Barrier Formalismus ist das Vorhersageverfahren in den USA dagegen leichter auf eine Vielzahl von Knotenpunkten übertragbar. Die Algorithmik des Vorhersageverfahrens wird nicht näher beschrieben. Die Ergebnisse eines Testknotenpunkts zeigen aber, dass in mehr als 90 % der Fälle die verbleibende Zeit bis zur nächsten Freigabe mit einer Genauigkeit von ± 1 s vorhergesagt wird, bezogen auf den Zeitpunkt 30 s vor dem tatsächlichen Beginn der Freigabe.

VS-PLUS ist ein regelbasiertes Steuerungsverfahren für Knotenpunkte, welches über Rahmensignalpläne, die weiter unten beschrieben werden, auch in adaptive Netzsteuerungsverfahren eingebunden werden kann [VERKEHRS-SYSTEME AG, 2016A]. Stationäre Detektoren dienen beispielsweise der Bestimmung des Verkehrsaufkommens oder der Wartezeit eines Verkehrsstroms. Basierend auf derartigen Werten und voreingestellten Parametern wird für jeden Verkehrsstrom ein Prioritätswert ermittelt. Dieser ergibt sich aus einem festeingestellten dreistufigen Anteil, der in der Regel nach Fahrzeugtypen eingeteilt wird (Prioritätsklassen: Individualverkehr, öffentlicher Verkehr, Einsatzfahrzeuge) und einem dynamischen zweistufigen Anteil (Prioritätsstufen), der sich nach der Wartezeit eines Verkehrsstroms richtet. Erst in der zweiten Prioritätsstufe darf dabei vom Rahmensignalplan abgewichen werden. Nachfolgend werden nicht konfligierende Verkehrsströme in absteigender Priorität aufgelistet, die als

nächstes freigegeben werden sollen. Die zu diesem Signalbild unverträglichen Verkehrsströme werden in der Folge gesperrt, falls die Bedingungen für einen Eingriff erfüllt sind und der Phasenübergang auf Basis der hinterlegten Zwischenzeitenmatrix wird eingeleitet. Da VS-PLUS einzelne Verkehrsströme berücksichtigt und zur Steuerung einzelner Knotenpunkte eingesetzt wird, kann auch hier von einer freien Phaseneinteilung gesprochen werden. Die beschriebene Prozedur und damit die Bildung von Entscheidungen kann sekundlich erfolgen.

Sowohl die Verwendung von Daten vernetzter Fahrzeuge sowie die Vorhersage künftiger Phasen zur Informationsübermittlung an vernetzte Fahrzeuge wird in den Produktinformationen erwähnt [VERKEHRS-SYSTEME AG, 2016B]. So erlaubt das Modul VS-Stage Predict die Vorhersage des nächsten Phasenwechsels und es besteht die Möglichkeit, „die Verkehrsabhängigkeit gezielt zu Gunsten einer besseren Vorhersagequalität einzuschränken“ [VERKEHRS-SYSTEME AG, 2016C]. Im Forschungsprojekt simTD wurde die Übermittlung der Informationen von VS-PLUS zur Generierung von Geschwindigkeitshinweisen bereits untersucht [SCHIMANDL & MARGREITER, 2013]. Es bestand hierbei allerdings lediglich die Möglichkeit, Informationen zum prognostizierten Ende der aktuellen Freigabe- beziehungsweise Sperrzeit zu ermitteln. Informationen zu weiter in der Zukunft liegenden Signalzuständen lagen nicht vor. Dennoch wurde eine Reduktion der Anzahl der Halte sowie der mittleren Überquerungszeiten mit steigenden Ausstattungsdaten ermittelt.

Die beiden in dieser Kategorie vorgestellten Verfahren sind teilweise standardisiert, das heißt, dass unterschiedliche Steuerungen im Wesentlichen durch die Wahl von Parametern erstellt werden können. Es ist aber auch möglich, eine signalgruppenbasierte Steuerung frei zu programmieren, wie dies in der Beispielsammlung der RiLSA [FGSV, 2010A] beschrieben ist. Auf die freie Programmierung von regelbasierten Steuerungen mit freier Phaseneinteilung soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es sei aber erwähnt, dass eine standardisierte regelbasierte Steuerung gegenüber einer frei programmierbaren Steuerung unter praktischen Gesichtspunkten Vorteile bezüglich der Verwendung von Systemwissen zur Schaltzeitprognose aufweist. So können für den jeweiligen Standard Vorhersageverfahren entwickelt werden, die auf eine Vielzahl von Knotenpunkten übertragbar sind, da Parameter wie Mindestfreigabezeiten oder logische Bedingungen standardisiert ausgelesen werden können. Bei frei programmierten Steuerungen erscheint es hingegen schwieriger, das Systemwissen zu extrahieren, da sich die Programmstruktur von Knotenpunkt zu Knotenpunkt stark unterscheiden kann und somit das Vorhersageverfahren spezifisch für einzelne Knotenpunkte angepasst werden muss und nicht skalierbar ist.

Modellbasierte Knotenpunktsteuerung mit fester Phaseneinteilung (Typ 3)

Modellbasierte Steuerungsverfahren zielen darauf ab, den künftigen Verkehrszustand vorherzusagen und basierend auf dieser Vorhersage optimale Steuereingriffe vorzunehmen. Häufig ist dabei die Zeitspanne der Vorhersage länger als diejenige, für welche die Steuereingriffe tatsächlich vorgenommen werden. Zum nächsten Zeitschritt wiederholt sich dieser Vorgang

für die nun um einen Zeitschritt versetzte Zeitspanne. Dieses Vorgehen wird als rollender Zeithorizont bezeichnet und ist Bild 3.6 illustriert. Das Prinzip kann sowohl auf Netzebene als auch auf Knotenpunktebene eingesetzt werden, wird aber in expliziter Form vor allem auf Knotenpunktebene genutzt. Alle in diesem Abschnitt erwähnten Verfahren basieren auf dem rollenden Zeithorizont wie auch das in Kapitel 4 vorgestellte Verfahren, weshalb eine genauere Beschreibung der Methode weiter unten erfolgt.

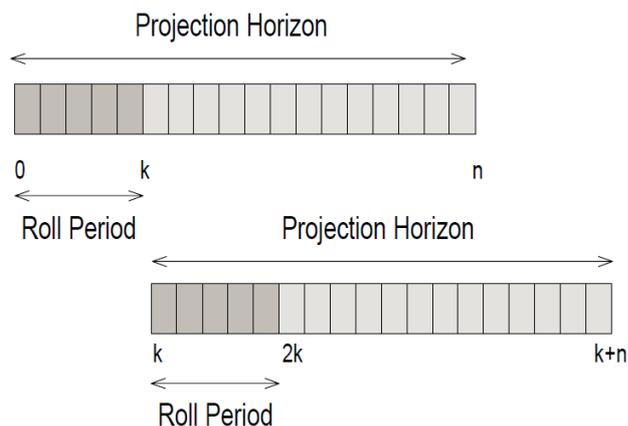


Bild 3.6 Prinzip des rollenden Zeithorizonts [GARTNER ET AL., 2001]

Zu den bestehenden kommerziellen Verfahren zählen PROLYN [HENRY ET AL., 1984], UTOPIA/SPOT [MAURO & DI TARANTO, 1989], EPICS [MERTZ, 2001], RHODES [MIRCHANDANI & HEAD, 2001] und OPAC ab der dritten Version [GARTNER ET AL., 2001]. RHODES und OPAC wurden bisher vorrangig zu Forschungszwecken in den USA implementiert, während EPICS und UTOPIA/SPOT die größte kommerzielle Verbreitung aufweisen. Wiederum gilt, dass diese Verfahren sich zwar auf die Steuerung am Knotenpunkt konzentrieren, aber auch eine Netzebene beinhalten oder in eine solche eingebettet werden können. Wie VAN KATWIJK [2008] schreibt, seien die Verfahren rechenintensiv, weshalb die Optimierung nur für einen relativ kurzen Zeithorizont durchgeführt werden könne, um einen Echtzeitbetrieb zu ermöglichen. Die übergeordnete Netzebene diene der Erweiterung des Horizonts der einzelnen Knotenpunkte. So erweitere das makroskopische Modell von UTOPIA den Horizont der auf Knotenpunktebene agierenden SPOT Einheiten. Bei RHODES komme das REALBAND Verfahren zum Einsatz, um Fahrzeugpuls durch das Netz zu führen. Die von REALBAND ermittelten Steuereingriffe würden als harte Nebenbedingung für die Optimierung durch RHODES eingesetzt [VAN KATWIJK, 2008]. EPICS kann beispielsweise mit dem unten beschriebenen Verfahren BALANCE [FRIEDRICH, 1999] kombiniert werden und erhält von dieser Netzebene Rahmensignalpläne, um die Koordinierung von Lichtsignalanlagen in Netzen zu ermöglichen. VAN KATWIJK [2008] beschreibt weiterhin, inwiefern sich die Steuereingriffe der Verfahren unterscheiden. So finde bei OPAC lediglich eine Steuerentscheidung über Verlängerung oder Abbruch der aktuellen Phase statt, womit das Verfahren an eine feste Phasenfolge gebunden ist. Bei RHODES sei zwar eine Phasenfolge vorgegeben, das Überspringen von Phasen werde aber ermöglicht. Ähnlich ist das Vorgehen bei SPOT. Zunächst wird ebenfalls von einer festen

Phasenfolge ausgegangen und die als obligatorisch ausgewählten Phasen werden stets aktiviert. Optionale Phasen hingegen werden nur bei Bedarf in die Phasenfolge aufgenommen [CANEPARI, O. J.]. Im Falle von EPICS wird zunächst eine Groboptimierung mit einer Auflösung von 5 s durchgeführt, bei der Phasenfolge, Grünzeitaufteilung und Versatzzeiten bestimmt werden. In der anschließenden Feinoptimierung findet eine Erhöhung der Auflösung auf 1 s statt, bei der lediglich die Freigabezeiten angepasst werden [MERTZ, 2001]. EPICS wurde speziell zur modellbasierten Priorisierung von ÖPNV-Fahrzeugen entwickelt, weshalb die Ankunft von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs im Rahmen der Optimierung berücksichtigt wird.

Mit UTOPIA/SPOT wird das am weitesten verbreitete Verfahren dieser Kategorie im Folgenden genauer vorgestellt. Während UTOPIA das übergeordnete Netzsteuerungsverfahren darstellt, wirkt die SPOT Einheit auf Knotenpunktebene. SPOT kann in den lokalen Beobachter (engl.: local observer) und die lokale Steuerung (engl.: local control) unterteilt werden. Basierend auf dem aktuellen Signalzustand und den Messwerten von Detektoren, die im Beginn der Zufahrt verbaut sind, schätzt der lokale Beobachter in Zeitschritten von 3 s den Verkehrszustand mit Hilfe eines mikroskopischen Verkehrsmodells. Der Zustandsvektor enthält die Anzahl der abzufertigenden Fahrzeuge je 3 s Zeitscheibe geordnet nach deren geschätzter Ankunftszeit an der Haltlinie. Ebenfalls geschätzt werden Abbiegeraten und Sättigungsverkehrsstärken. Diese Größen weisen gegenüber dem Verkehrszustand eine langsamere Dynamik auf. Im Rahmen der lokalen Regelung erfolgt, basierend auf den ermittelten Größen des Beobachters, eine Optimierung der Steuerungsentscheidungen für die kommenden 120 s. In der ursprünglichen Umsetzung von SPOT geschieht dies alle 6 s, entsprechend werden nach dem Prinzip des rollenden Zeithorizonts lediglich die ersten 6 s der berechneten Steuerung tatsächlich umgesetzt, wonach die Berechnung erneut beginnt. Durch inzwischen höhere Rechnerleistung, ist dieses Intervall auf 3 s reduziert worden [CANEPARI, O. J.]. Die Optimierung berücksichtigt beispielsweise die Wartezeit der Fahrzeuge, die Anzahl der Halte und die maximale Rückstaulänge. Um die für Steuergeräte üblichen sekundengenauen Eingriffe zu ermöglichen, ist der Optimierung eine weitere Komponente nachgeschaltet. Erst hierdurch werden beispielsweise Phasendauern und Zwischenzeiten möglich, welche nicht einem Vielfachen von 3 s entsprechen. Außerdem kann durch diese Komponente das genaue Signalbild einer Phase festgelegt werden, wenn ausgewählte Signalgruppen als Alternativmöglichkeiten eingestellt werden [CANEPARI, O. J.]. Da die Flexibilität hinsichtlich der Signalgruppenauswahl nicht Teil des Optimierungsprozesses ist, wird SPOT, wie auch die anderen zuvor beschriebenen Verfahren, als solches mit fester Phaseinteilung kategorisiert.

Wie MAURO [1991] schreibt, kann die SPOT Einheit auf Knotenpunktebene allein nicht für Optimalität auf Netzebene garantieren. Daher werden auch die benachbarten Knotenpunkte im Rahmen der lokalen Optimierung berücksichtigt sowie eine übergeordnete Netzebene eingeführt. Im Rahmen der lokalen Optimierung gehen dabei nach dem Prinzip der starken wechselseitigen Beeinflussung (engl.: strong interaction) nicht nur die Fahrzeuge ein, die sich in den Zufahrten des betrachteten Knotenpunkts befinden, sondern auch diejenigen, die von

stromaufwärts gelegenen Knotenpunkten zu erwarten sind. Weiterhin werden negative Auswirkungen auf die stromabwärts gelegenen Knotenpunkte in der Kostenfunktion berücksichtigt, die durch das Entsenden von Fahrzeugen vom betrachteten Knotenpunkt auftreten können. Auf Netzebene kann UTOPIA ebenfalls in Beobachter und Steuerung aufgeteilt werden. Das Verkehrsmodell ist in diesem Fall makroskopisch und umfasst mehrere mit SPOT ausgerüstete Knotenpunkte. Die zentrale Ebene führt keine direkten Eingriffe auf lokaler Ebene aus, sondern gibt lediglich Randbedingungen und Gewichte für die lokale Optimierung vor. Der Zeithorizont für die Optimierung beträgt auf Netzebene 30 min mit diskreten Zeitschritten von 3 min, als Optimierungsgröße wird die im Netz verbrachte Zeit der Fahrzeuge verwendet (engl.: total time spent). Eines der von der Netzebene für die lokale Optimierung vorgegebenen Gewichte stellen die sogenannten „cost-to-go“ dar, welche die endliche Dauer des Steuerhorizonts kompensieren sollen. Bestraft wird hierbei die notwendige Dauer zur Rückkehr von der auf lokaler Ebene ermittelten optimalen Steuerung zu der auf Netzebene ermittelten Koordinierung.

Da die Verfahren mit rollendem Zeithorizont systemimmanent eine Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte enthalten, bietet es sich an, diese intrinsische Prognose an vernetzte Fahrzeuge zu übermitteln, um Geschwindigkeitshinweise zu erzeugen. Obgleich dies nicht in der Literatur beschrieben ist, ist es aufgrund des rollenden Zeithorizonts bei den hier vorgestellten Verfahren darüber hinaus denkbar, die Abweichung von vorausgegangen Prognosen im Rahmen der Zielfunktion zu bestrafen. Hierdurch könnten Vorhersagen und damit Geschwindigkeitshinweise stabilisiert werden, was für das in Kapitel 4 beschriebene Verfahren bereits untersucht wurde [KATHS, 2016]. Von den in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren lässt sich in der Literatur lediglich eine Untersuchung finden, bei der auf Systemwissen von UTOPIA/SPOT zur Ermittlung von Geschwindigkeitshinweisen zurückgegriffen wird [BOTTERO ET AL., 2015]. Dabei werden sowohl mit UTOPIA/SPOT als auch mit anderen Steuerungsverfahren ausgerüstete Knotenpunkte untersucht. Für Knotenpunkte, die nicht mit SPOT ausgerüstet sind, werden je nach verwendetem Steuerungsverfahren unterschiedliche Vorhersageverfahren angewandt. Die Autoren nehmen eine Vorhersage dann als korrekt an, wenn ein Fehler von ± 1 s vorliegt. Die Ergebnisse variieren von 70 % bei voll verkehrsabhängiger Steuerung bis zu 98 % korrekter Vorhersagen bei zeitabhängiger Auswahl von Signalplänen.

Modellbasierte Knotenpunktsteuerung mit freier Phaseneinteilung (Typ 4)

Während die zuvor beschriebenen Verfahren mit fester Phaseneinteilung als kommerzielle Produkte verfügbar sind, werden im Folgenden zunächst zwei Steuerungsansätze beschrieben, die im Rahmen von Forschungsprojekten entstanden sind. Beide Verfahren weisen einen dezentralen Charakter auf und zielen auf größtmögliche Flexibilität der Steuerung ab, wie auch das in Kapitel 4 vorgestellte Verfahren. Hierzu wird eine freie Phaseneinteilung angestrebt. Anschließend wird mit InSync ein kommerziell verfügbares Verfahren beschrieben,

welches modellbasiert Steuerungsentscheidungen trifft und dabei eine freie Phaseneinteilung ermöglicht.

VAN KATWIJK [2008] beschreibt ein Steuerungsverfahren mit rollendem Zeithorizont, bei welchem die Neuberechnung der optimalen Steuereingriffe auf sekundlicher Basis erfolgt. Der Autor beklagt, dass regelbasierte Verfahren nach dem Stand der Technik bereits signalgruppenbasiert agierten, während die kommerziell verfügbaren modellbasierten Verfahren auf festgelegten Phaseneinteilungen beruhten. Bei dem vorgestellten Verfahren werden daher Signalgruppen als kleinste zu steuernde Einheit aufgefasst. Hierzu wird ein niederländischer Formalismus genutzt, der als Pendant zur amerikanischen Ring-and-Barrier Methode angesehen werden kann. Signalgruppen ohne gegenseitigen Konflikt werden dabei in Blöcke eingeteilt und können gleichzeitig freigegeben werden. Die Reihenfolge der Blöcke bestimmt die bevorzugte Reihenfolge der Signalisierung und wird so gewählt, dass die Verlustzeit durch Zwischenzeiten minimal ist. Die tatsächliche Freigabezeit der Signalgruppen wird anschließend in Abhängigkeit der Verkehrssituation bestimmt und der nächste Block wird aktiv, wenn alle Signalgruppen des vorherigen Blocks bereits freigegeben wurden oder deren Freigabe übersprungen wird. Die Freigabe der Signalgruppen des aktiven Blocks kann erst dann erfolgen, wenn die konfligierenden Signalgruppen des vorherigen Blocks gesperrt sind und die notwendige Zwischenzeit verstrichen ist. Die Freigabezeit der Signalgruppe eines Blockes kann also in den nachfolgenden Block hineinreichen. Bild 3.7 zeigt, gemäß den Abbildungen von VAN KATWIJK [2008], beispielhaft einen Knotenpunkt, das zugehörige Blockschema sowie mögliche Signalzeiten. Zum Vergleich sind auch die Phaseneinteilungen (engl.: stages) angegeben. Basierend auf diesem Blockschema stellt VAN KATWIJK [2008] einen Algorithmus vor, der signalgruppenbasiert ist und dennoch gegenüber einem phasenbasierten Ansatz geringere Rechenintensität aufweist. Als Nebenbedingung der Optimierung werden Unter- und Obergrenzen für Freigabezeiten und Sperrzeiten, in vorigen Zeitschritten getroffene Entscheidungen, die Dilemmazone und maximale Rückstaulängen berücksichtigt. Außerdem kann aus Gründen der Verkehrssicherheit eine Beschränkung der möglichen Blockreihenfolgen sowie des Blockabbruchs trotz vorhandener Nachfrage vorgenommen werden. Zur Vermeidung sicherheitskritischer Situationen, bei denen sich ein Fahrer in der Dilemmazone befindet, also bei Ende der Freigabezeit weder ein Stillstand vor der Haltlinie noch ein Überfahren vor dem Beginn der Sperrzeit möglich ist, wird die Zwischenzeit nötigenfalls verlängert. Um eine Optimierung in Echtzeit bei sekundengenaue Auflösung und bei gleichzeitig ausreichend langem Zeithorizont zu ermöglichen, werden, im Gegensatz zu den sonst üblichen konstanten Intervallen, die Optimierungsschritte über den Zeithorizont länger.

CARRIÈRE [2011] nutzt den Steuerungsalgorithmus von VAN KATWIJK [2008], um Schaltzeitpunkte vorherzusagen und Geschwindigkeitshinweise für Fahrzeuge zu in der Mikrosimulation zu generieren und stellt eine Reduktion der Kohlenstoffdioxidemissionen um 4,7 % fest.

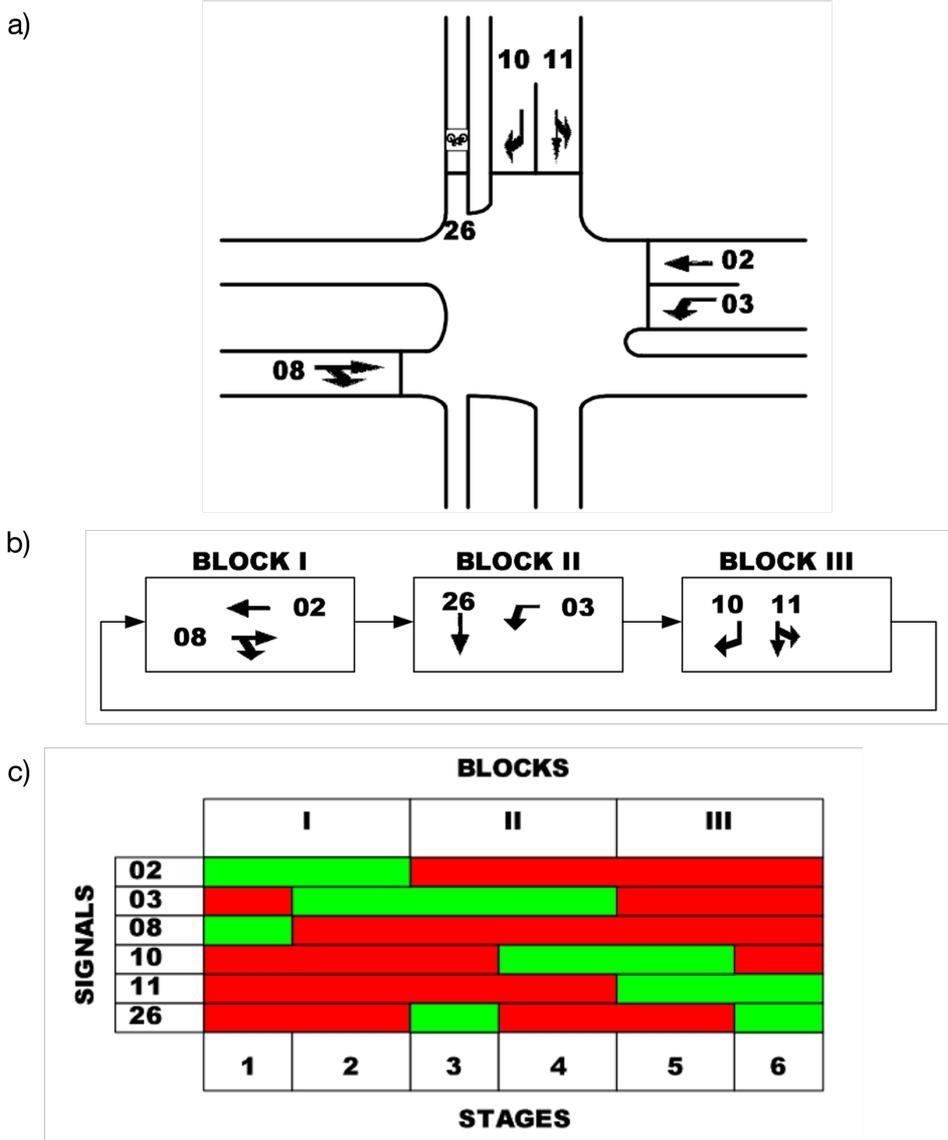


Bild 3.7 a) Beispielknotenpunkt mit b) zugehörigem Blockschema und c) einer möglichen Signalfolge nach [VAN KATWIJK, 2008]

LÄMMER [2016], [2007] stellt ein dezentrales Steuerungsverfahren vor, welches auf lokaler Ebene flexible und vorausschauende Steuereingriffe im Sinne einer Selbst-Steuerung vornehmen soll. Mittels eines Modells werden Wartezeit und Anzahl der Halte geschätzt und deren gewichtete Summe über einen Zeitraum von zwei Minuten minimiert. Dabei sollen möglichst wenig planerische Randbedingungen die Flexibilität der Steuerung beeinflussen. Aus diesem Grund können verträgliche Signalgruppen beliebig kombiniert werden und lediglich Mindestgrün-, Mindestrot- und Zwischenzeiten schränken die Steuerungsentscheidung ein. Eine maximale Sperrzeit wird zunächst nicht vorgegeben, stattdessen wird die Gewichtung wartender Fahrzeuge exponentiell erhöht, sodass Wartezeiten für wenig nachgefragte Nebenströme beschränkt bleiben. Eine Koordination von Lichtsignalanlagen wird nicht explizit angestrebt, sondern soll sich selbstständig ergeben, wenn dies dem Verkehrsablauf zuträglich ist. Es wird

also auf eine Verknüpfung mit einer übergeordneten Netzsteuerung verzichtet. In einem Feldversuch in Dresden zeigen sich deutliche Reduzierungen der Wartezeit für alle betrachteten Verkehrsmodi (MIV, ÖV, Fußgänger, Radfahrer) gegenüber der regelbasierten Referenzsteuerung VS-PLUS. Zur rechtzeitigen Erkennung von Fahrzeugen wurden für den Feldversuch zusätzliche Detektoren in einer Entfernung von etwa 250 m zur Haltlinie verbaut.

Um ein Aufschaukeln von Warteschlangen durch den begrenzten Zeithorizont der Optimierung zu vermeiden, wird eine übergeordnete Stabilisierungsebene eingeführt [LÄMMER & HELBING, 2010]. Diese übergeordnete Ebene gibt Randbedingungen für die lokale Optimierung vor, welche Instabilitäten vermeiden sollen. Als instabil wird dabei ein nicht beschränkter Rückstau angesehen, der durch eine geeignete Festzeitsteuerung beschränkt wäre. Die Stabilisierungsebene geht nach drei Regeln vor. Erstens, wenn ein kritischer Verkehrszustand für einen Verkehrsstrom identifiziert wurde, wird dieser sobald als möglich bedient. Zweitens, liegen mehrere kritische Verkehrsströme vor, werden sie in der Reihenfolge des Auftretens der Kritikalität bedient. Drittens, ein Verkehrsstrom wird dann nicht mehr als kritisch angesehen, wenn die Freigabezeit verstrichen ist, die dem Verkehrsstrom im Rahmen einer Festzeitsteuerung zugeteilt worden wäre oder wenn der Rückstau vollständig abgebaut ist. Liegt kein kritischer Verkehrsstrom vor, ergibt sich kein Einfluss auf die Optimierung. Ein Verkehrsstrom wird dann als kritisch angesehen, wenn die zu bedienenden Fahrzeuge oder die Zeitspanne seit der letzten Freigabe eine Schwellwertfunktion überschreiten. Durch den linearen Verlauf dieser Funktion sorgt das Verfahren bei Vorhandensein vieler Fahrzeuge für eine schnellstmögliche Freigabe und bei Abwesenheit von Fahrzeugen für eine Freigabe nach einer festgelegten maximalen Sperrzeit.

Das Verfahren der Selbst-Steuerung von LÄMMER [2016] wurde bisher nicht dazu verwendet, Geschwindigkeitshinweise für Fahrzeuge zu ermitteln. Wie bei den im vorigen Abschnitt genannten Verfahren mit rollendem Zeithorizont ist aber eine systemimmanente Vorhersage der Schaltzeitpunkte vorhanden, die prinzipiell für die Berechnung von Geschwindigkeitshinweisen geeignet ist. So beschreibt LÄMMER [2016] im Rahmen eines Ausblicks die Möglichkeit, einen künftigen Signalisierungszustand zu fixieren, falls ein Fahrzeug einen entsprechenden Hinweis erhalten hat.

InSync ist ein adaptives Steuerungsverfahren, das in jüngster Zeit verstärkt in US-amerikanischen Städten eingesetzt wird. Als natives Detektionssystem sind Videokameras vorgesehen, welche sekundlich zufahrtsfeine Werte zu Rückstaulänge, Belegungsgrad der Detektionszone und der Wartezeit liefern [CHANDRA & GREGORY, 2012]. InSync nutzt, im Gegensatz zu vielen anderen Steuerungsverfahren, die Daten von Videokameras also nicht nur zur Emulation von Schleifendetektoren, siehe hierzu Bild 3.8. Alternativ zur Videodetektion können aber auch Schleifendetektoren genutzt werden, um die benötigten Daten zu schätzen. Basierend auf diesen Informationen findet eine lokale wie auch eine globale Optimierung statt.



Bild 3.8 Nutzung von Videodaten zur Bestimmung von Rückstaulängen [RHYTHM ENGINEERING, 2016]

Im Rahmen der lokalen Optimierung werden auf Knotenpunktebene Grünzeiten, Phaseneinteilung und Phasenfolge mit dem Ziel bestimmt, den Abfluss am Knotenpunkt zu maximieren. Für die einzelnen Zufahrten ergeben sich je nach Rückstaulänge und Wartezeit Dringlichkeitslevels, diese werden in absteigender Reihenfolge bedient. Höchste Dringlichkeit hat dabei stets die Zufahrt, welche von der globalen Optimierung zum Erzielen einer Koordination angefordert wird. So werden durch die globale Optimierung Versatzzeiten und Bandbreiten der Koordination berechnet, wobei Bandbreite und Häufigkeit der Koordination von der aktuellen Verkehrsnachfrage abhängig sind. Auf eine feste Umlaufzeit wird bei InSync verzichtet. Da bei InSync die Entscheidungsfindung lokal unter Berücksichtigung der netzweiten Vorgaben erfolgt und an lokaler Stelle eine freie Phaseneinteilung stattfindet, wird dieses Verfahren Typ 4 in Bild 3.3 zugeordnet. Zur Modellierung des Verkehrsflusses finden sich keine genaueren Beschreibungen, das Verfahren wird aber vom Unternehmen selbst und von STEVANOVIC [2010] als modellbasiert beschrieben.

Da Rückstaulängen durch das Verfahren gemessen oder geschätzt werden und durch die globale Optimierung auch der Grünzeitbeginn des Hauptstroms im Voraus bekannt ist, wäre der Einsatz von Systemwissen zur Beeinflussung vernetzter Fahrzeuge denkbar. In der Literatur gibt es allerdings keine Hinweise auf entsprechende Untersuchungen.

Regelbasierte Netzsteuerung mit fester Phaseneinteilung (Typ 5)

SCATS ist ein noch immer weit verbreitetes regelbasiertes Netzsteuerungsverfahren, das bereits Mitte der 1970er Jahre in Sydney getestet wurde [SIMS & DOBINSON, 1980]. Die Detektion von Fahrzeugen erfolgt mittels Schleifendetektoren, die nah an der Haltlinie verbaut werden. SIMS & DOBINSON [1980] schreiben, dass die Detektoren möglichst nah am Knotenpunkt sein müssen, um eine hohe Korrelation zwischen Detektormesswerten und Schaltzeitpunkten zu garantieren. Softwareseitig werden bei SCATS ein bis zehn Knotenpunkte zu einem Subsystem zusammengefasst, während hardwareseitig eine Zusammenfassung von bis zu 200 Steuergeräten zu einem „Regional Computer“ vorgesehen ist. Die Subsysteme werden so

gewählt, dass sie sinnvolle verkehrstechnische Einheiten bilden und beinhalten stets einen kritischen Knotenpunkt. Auf dieser strategischen Ebene werden Phasenfolge, Phasendauer, Versatzzeit und Umlaufzeit bestimmt [STEVANOVIC, 2010]. Auf taktischer Ebene, also am Knotenpunkt selbst, können Phasen vorzeitig beendet oder übersprungen werden, wenn die lokale Detektion große Zeitlücken beziehungsweise fehlende Anforderung meldet. Bei entsprechendem Bedarf können die Subsysteme aber auch zu größeren Systemen „verheiratet“ werden. In diesem Fall erhalten alle Subsysteme die Umlaufzeit des enthaltenen Subsystems mit der längsten Umlaufzeit. Die gewählten Umlaufzeiten können laut STEVANOVIC [2010] zwischen 20 s und 240 s liegen, wobei zwischen aufeinanderfolgenden Umläufen bis zu 21 s Differenz liegen können. Eine Veränderung der Umlaufzeit wird im „Regional Computer“ dann angestoßen, wenn die Detektordaten des kritischen Knotenpunkts eines Subsystems dies indizieren. Die Steuereingriffe von SCATS basieren nicht auf einem Verkehrsflussmodell, sondern auf einem Satz von Regeln. Daher und aufgrund der Fokussierung auf die Netzebene wird das Verfahren dem Typ 5 in Bild 3.3 zugeordnet.

Durch die erwähnten regelbasierten Anpassungen der Umlaufzeit oder das Auslassen von Phasen kann die Signalisierung von Umlauf zu Umlauf große Abweichungen aufweisen. Aus diesen Gründen sowie durch das reaktive Verhalten von SCATS erscheint die Verwendung von Systemwissen zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte schwierig. Die haltliniennahen Detektoren dürften eine Vorhersage weiter erschweren. In einem Bericht für Westaustralien bezweifeln WEERATUNGA & SOMERS [2015] daher auch die Eignung von SCATS für den Einsatz in vernetzten Verkehrssystemen ohne entsprechende Anpassungen. Es lassen sich dementsprechend auch keine Hinweise auf einen Einsatz von SCATS in vernetzten Verkehrssystemen in der Literatur finden. KOUKOU MIDIS ET AL. [2011] präsentieren allerdings ein Vorhersageverfahren ohne Einbezug von Systemwissen, welches in Verbindung mit SCATS getestet wurde und in Abschnitt 3.1.2 genauer vorgestellt wird.

Mit SCATS wurde ein bekanntes Verfahren zur Netzsteuerung vorgestellt, das auf Regeln basiert. Dieser Kategorie könnten auch einfachere Netzsteuerungsverfahren zugeordnet werden, bei denen zeit- oder verkehrsabhängig offline berechnete Signalprogramme ausgewählt werden. Hier sei die bereits in Kapitel 2.2 erwähnte Steuerung genannt, bei der zeitbasiert eine Veränderung der Koordinierungsrichtung erzielt wird. Beispielsweise kann so zur morgendlichen Spitzenstunde eine Koordinierung in Richtung Stadtzentrum, zur abendlichen Spitzenstunde aus dem Stadtzentrum heraus und zur Nebenzeit eine Verringerung der Umlaufzeiten erfolgen. Da diese Signalprogramme in der Regel für längere Zeiten unverändert bleiben, können sie Zusatzinformationen zur Berechnung von Geschwindigkeitshinweisen liefern. Allerdings ist zu beachten, dass derartige einfache Netzsteuerungen mit lokalen Steuerungsverfahren verknüpft werden können, womit die Freiheitsgrade der lokalen Steuerung maßgebend für die Vorhersagbarkeit sind. Eine allgemeingültige Aussage zur Gruppe dieser Steuerungsverfahren bezüglich ihrer Vorhersagbarkeit lässt sich damit nicht treffen.

Modellbasierte Netzsteuerung mit fester Phaseneinteilung (Typ 6)

SCOOT ist ein adaptives Steuerungsverfahren und stellt eine Weiterentwicklung des offline Verfahrens TRANSYT [ROBERTSON, 1969] dar, welches zur Planung von Koordinierungen in Netzen genutzt werden kann. TRANSYT und SCOOT zielen darauf ab, Rückstaulänge und Anzahl der Halte zu reduzieren, es kann eine relative Gewichtung dieser beiden Kennwerte in einem „Performance Index“ (PI) vorgenommen werden [ROBERTSON, 1986]. Die Optimierung basiert auf „Cyclic Flow Profiles“ (CFP), welche den durchschnittlichen Verkehrsfluss an einem Querschnitt während eines Umlaufs angeben. Die Werte werden dabei für diskrete Zeitschritte angegeben. Im Falle des online Verfahrens SCOOT werden die CFP durch Detektormesswerte und ein Pulkauflösungsmodell ermittelt. Die Detektoren sind dazu in größerer Distanz zur Haltlinie oder im Abfluss des flussaufwärts gelegenen Knotenpunkts positioniert. Auf Grundlage dieser Messungen werden aktuelle Rückstaulängen geschätzt, welche als Eingangsgröße für die Optimierung dienen. Um die Unsicherheit langer Vorhersagen und Störungen durch Umschaltvorgänge zwischen unterschiedlichen Signalplänen zu vermeiden, werden lediglich inkrementelle Änderungen des aktuellen Signalplans vorgenommen. Veränderlich sind Grünzeitaufteilung, Umlaufzeit und Versatzzeit, während Phaseneinteilung und -folge unverändert bleiben. Aufgrund dieser Steuereingriffe, die vor allem auf eine Koordinierung der Lichtsignalanlagen in Netzen abzielen, wird SCOOT dem Typ 6 in Bild 3.3 zugeordnet. Vor einem Phasenübergang wird anhand der berechneten Veränderung des PI entschieden, ob der geplante Zeitpunkt des Phasenübergangs um bis zu 4 s vorgezogen oder verzögert werden soll. Ähnlich wird mit der Versatzzeit verfahren, welche ebenfalls in beide Richtungen um 4 s verändert werden kann. Während die vorgenannten Änderungen sofort wirksam werden, wird eine Veränderung der Umlaufzeit lediglich in Abständen von 2,5 min bis 5 min überprüft und gegebenenfalls in Schritten von 4 s, 8 s oder 16 s angepasst [STEVANOVIC, 2010].

Die Änderungen, die SCOOT vornimmt, sind inkrementeller Art, um disruptive Veränderungen im Verkehrsablauf zu vermeiden, wie sie bei starken Veränderungen der Signalprogramme auftreten können. Dieses Verhalten erscheint zunächst vorteilhaft zur Vorhersage von Schaltzeitpunkten. Gleichzeitig erschwert die Beschränkung auf inkrementelle Änderungen aber eine flexible Reaktion auf mikroskopische Ereignisse, wie beispielsweise die Ankunft eines Fahrzeugs des öffentlichen Verkehrs. Aus diesem Grund wurde SCOOT um die aktive Priorisierung von ÖPNV Fahrzeugen erweitert [TRL, 2016A; TRL, 2016B]. Hierzu wird eine Detektion des Fahrzeugs 10 s bis 15 s vor der Haltlinie empfohlen, welche eine Grünzeitverlängerung, eine Verkürzung anderer Phasen oder auch einen Phasentausch zur Folge haben kann. Derartige Steuereingriffe, die über die inkrementellen Änderungen hinausgehen, erschweren die Vorhersage maßgeblich. Nichtsdestotrotz können die Informationen, die aus dem SCOOT System gewonnen werden, zur Vorhersage von Schaltzeitpunkten genutzt werden. Bereits 1986 gibt ROBERTSON [1986] als Ausblick an, dass elektronische Systeme, die personalisiert Informationen im Fahrzeug anzeigen, den Verkehrsablauf über die Möglichkeiten der Lichtsignalsteuerung hinaus positiv beeinflussen können. Mit dem System GLASGLOSA wurde die

Anzeige von Geschwindigkeitshinweisen in Verbindung mit SCOOT inzwischen in Glasgow getestet [GRAYSTON ET AL., 2016]. Die Autoren beschreiben eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugendgeräten und der SCOOT-Zentrale mittels Mobilfunk. Als Nachrichtenformate kommen MAP für die Topologie und SPAT für die Schaltzeitpunkte zum Einsatz. Auf die Vorhersagegenauigkeit wird nicht näher eingegangen. Allerdings geben die Autoren zu bedenken, dass kurzfristige Entscheidungen des SCOOT Systems sicherheitskritische Situationen durch fehlerhafte Hinweise hervorrufen können. Konkret werden um bis zu vier Sekunden verzögerte Sperrzeiten, verlängerte Zwischenzeiten und Anforderungsphasen genannt.

Verschiedene Netzsteuerungsverfahren, welche einem hierarchischen Aufbau folgen, lassen sich zu einer Gruppe zusammenfassen. Dabei werden auf Netzebene Rahmsignalpläne ermittelt, welche als Vorgaben auf Knotenpunktebene dienen, innerhalb derer die Freigabezeiten lokal angepasst werden können. Kommerzielle hierarchische Steuerungsverfahren sind MOTION [BUSCH & KRUSE, 2001] und BALANCE [FRIEDRICH, 1999]. Auf Netzebene wird bei diesen Verfahren in ihren ursprünglichen Versionen in Intervallen von 5 min bis 15 min eine Optimierung durchgeführt, welche Rahmsignalpläne zum Ergebnis hat. Inzwischen können diese Intervalle bei MOTION auf 3 min verkürzt werden. Ziel der Rahmsignalpläne ist es, eine Koordinierung auf Netzebene zu erreichen. Hierzu können Umlaufzeit, Freigabezeitanteile, Phasenfolgen und Versatzzeiten angepasst werden. Ein Verkehrsflussmodell wird dazu genutzt, den Einfluss dieser Entscheidungsvariablen auf Kenngrößen wie Wartezeit oder Anzahl der Halte festzustellen und eine entsprechende Kostenfunktion zu minimieren. Führen die neu ermittelten Signalprogramme zu einer ausreichend großen Differenz in der Kostenfunktion gegenüber dem aktuellen Programm, so werden diese zu den jeweiligen Knotenpunkten übertragen. Ein solcher Schwellwert wird gewählt, um häufiges Umschalten zwischen den Programmen und damit einhergehende Störungen des Verkehrsflusses zu vermeiden. Die Rahmsignalpläne geben am Knotenpunkt für jede Phase einen Bereich „min tg“ an, zu dem die Freigabe garantiert ist. Außerdem werden der früheste Beginn sowie das späteste Ende der Phase nach der „Pufferzeit“ angegeben. Bild 3.9 zeigt hierzu ein Beispiel mit zwei Phasen. Die genaue Dauer einer Phase wird daraufhin auf Sekundenbasis innerhalb dieses Rahmens von der lokalen Steuerung ausgeprägt. Dies kann regelbasiert beispielsweise mittels Zeitlückensteuerung oder modellbasiert etwa mit dem oben unter Typ 3 genannten Verfahren EPICS geschehen. Hierdurch sollen die Vorteile einer Koordinierung auf Netzbasis mit der Reaktionsmöglichkeit einer lokalen Steuerung auf mikroskopische Ereignisse, wie beispielsweise Schwankungen in der Verkehrsnachfrage oder die Ankunft eines ÖPNV-Fahrzeugs, vereint werden. Hierdurch können auch Abweichungen vom Rahmsignalplan auftreten, beispielsweise, wenn eine Sonderphase für den öffentlichen Verkehr eingeschoben wird.

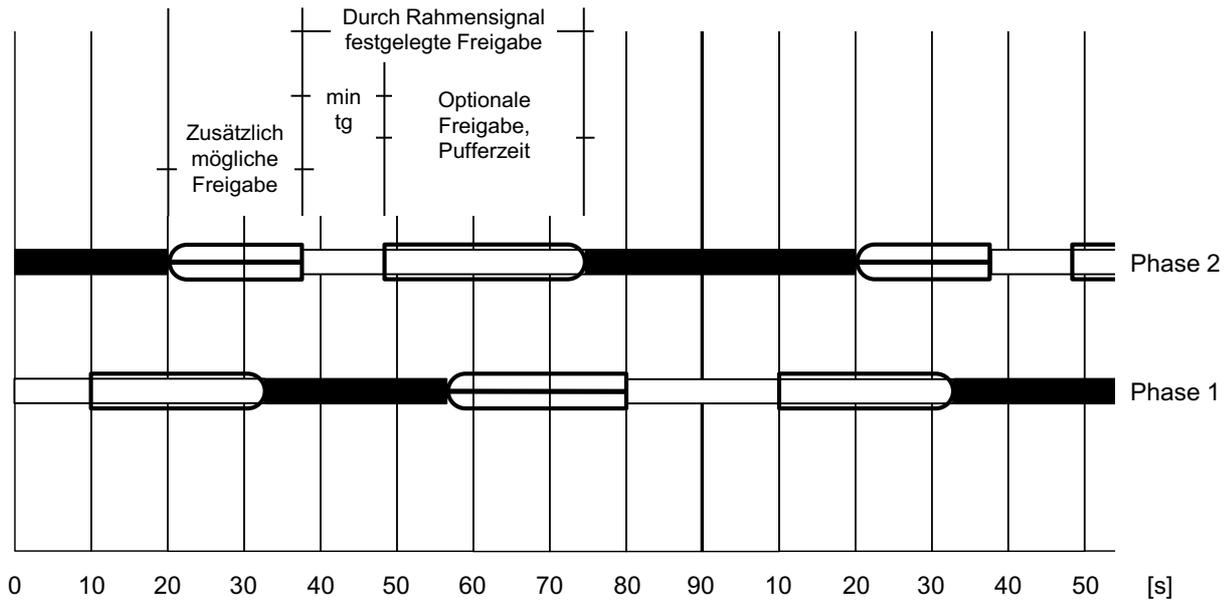


Bild 3.9 Festlegung der Freigabe- und Pufferzeiten [FRIEDRICH, 1999]

Hierarchische Systeme erscheinen zunächst gut geeignet, um künftige Freigabezeiten zu ermitteln, da deren mögliche Zeitbereiche durch die Rahmensignalpläne für einen Zeitraum von mehreren Minuten vorgegeben sind. Es ist aber unklar, welcher der Freigabezeitbereiche am geeignetsten für die Ermittlung der Geschwindigkeitshinweise ist. Wird etwa die sichere Freigabezeit zur Berechnung der Geschwindigkeitshinweise verwendet, tatsächlich aber die in Bild 3.9 dargestellte „zusätzlich mögliche Freigabe“ ausgenutzt, würde ein Teil der Freigabezeit aufgrund falscher Hinweise ungenutzt verstreichen. Wird umgekehrt jedoch die maximal mögliche Freigabezeit zur Ermittlung des Geschwindigkeitshinweises genutzt, können Fahrzeuge die Haltlinie zur Sperrzeit erreichen, obgleich der Geschwindigkeitshinweis ein Erreichen zur Freigabezeit suggeriert. Neben vermeidbaren Haltevorgängen können auch negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und Nutzerakzeptanz die Folge sein. Auf einer Landstraße wurde die Verwendung von Rahmensignalplänen zur Berechnung von Geschwindigkeitshinweisen für Fahrzeuge untersucht [DINKEL ET AL., 2013], allerdings wird das genaue Vorgehen zur Ermittlung der Geschwindigkeitshinweise von den Autoren nicht beschrieben. Rahmensignalpläne können also als Systemwissen zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte genutzt werden. Es ist jedoch abzuwägen, welcher Freigabezeitbereich für die Berechnung herangezogen wird. Außerdem ist die Vorhersagequalität stark von der Anpassungsmöglichkeit durch die lokale Steuerung abhängig.

ImFlow ist ein Steuerungsverfahren, welches speziell darauf ausgerichtet ist, die Signalsteuerung im Sinne politisch motivierter Strategien zu optimieren [PEEK TRAFFIC BV, 2012]. So lassen sich beispielsweise die Gewichtungen für Anzahl der Halte, Fußgängerwartezeiten oder Linien des öffentlichen Verkehrs einstellen. Mit Hilfe von Detektormesswerten und einem Verkehrsflussmodell werden auf Netzebene optimierte Signalpläne erstellt, die die eingege-

benen Randbedingungen und Gewichtungen berücksichtigen. Die optimierten Signalpläne legen Folge und Dauer von Phasen fest. Auf lokaler Ebene wird anhand von Regeln entschieden, welche Signalgruppen in der von der Netzebene vorgegebenen Phase freigegeben werden. Die Signalgruppen werden hierzu in drei Prioritätslevel unterteilt, wobei die Signalgruppen des zweiten Levels nur dann freigegeben werden, wenn keine Nachfrage für konfligierende Signalgruppen des ersten Levels besteht. Signalgruppen des dritten Levels werden analog dazu nur dann freigegeben, wenn weder für das erste noch das zweite Level eine Nachfrage erkannt wurde. Aufgrund des kombinierten Vorgehens auf Knotenpunkt- und Netzebene mit regelbasierter beziehungsweise modellbasierter Entscheidung ist eine eindeutige Zuordnung von ImFlow zu den in Bild 3.3 gezeigten Typen schwierig. Da die mathematische Optimierung auf Netzebene stattfindet und dies phasenbasiert geschieht, wird ImFlow dem Typ 6 aus Bild 3.3 zugeordnet. Neben Detektoren für ÖPNV-Fahrzeuge und Fußgängertastern kommen Detektoren zu Beginn der Zufahrt und an der Haltlinie zum Einsatz. ImFlow ist darüber hinaus darauf ausgelegt, Informationen vernetzter Fahrzeuge zu verarbeiten. So können Quelle-Ziel-Beziehungen, Reisezeiten und unterschiedliche Prioritätslevel der Fahrzeuge berücksichtigt werden, um die Signalsteuerung anzupassen. Außerdem werden Informationen über künftige Schaltzeitpunkte von ImFlow an das Steuergerät übertragen. Diese Informationen können für Restzeitanzeigen für Fußgänger und Radfahrer, infrastrukturseitige Geschwindigkeitshinweise oder auch für fahrzeuggebundene Anzeigen verwendet werden.

Die Übertragung der von ImFlow zur Verfügung gestellten Schaltzeitpunkte an vernetzte Fahrzeuge wurde im Projekt eCoMove untersucht [BRESSER ET AL., 2013]. Aufgrund der dynamischen Steuerung und der damit einhergehenden Ungenauigkeit der Prognose wurde der Vorhersagehorizont auf 15 s bis 30 s beschränkt. Die Autoren beschreiben auch die Möglichkeit, die von ImFlow geschätzten Rückstauwerte in die Berechnung des Geschwindigkeitshinweises einzubeziehen. Im Projekt wurde aber ein alternativer Rückstaulängenschätzer verwendet. Auch eine Berücksichtigung unterschiedlicher Prioritätslevel einzelner vernetzter Fahrzeuge wurde im Projekt eCoMove in Kombination mit ImFlow untersucht. Genauso wurden derartige Untersuchungen in den Projekten FREILOT und COMPASS4D vorgenommen, wobei die Priorisierung von Einsatzfahrzeugen, ÖPNV-Fahrzeugen und Lkw untersucht wurde [VAN VLIET & TURKSMA, 2013]. Die Möglichkeiten des Einsatzes von Systemwissen des Verfahrens ImFlow zur Vorhersage der Schaltzeitpunkte lassen sich insgesamt nur schwer bewerten. Zwar wird die Möglichkeit des Einsatzes in vernetzten Verkehrssystemen häufig genannt, eine genaue Beschreibung der verwendeten Algorithmik ist in der Literatur aber nicht zu finden.

Bewertung der bestehenden Lichtsignalsteuerungsverfahren

Tab. 3.1 zeigt eine subjektive Bewertung der bestehenden Lichtsignalsteuerungsverfahren hinsichtlich der Flexibilität der resultierenden Steuerung und der Möglichkeit zur Nutzung von Systemwissen zur Vorhersagbarkeit von Schaltzeitpunkten. Hierzu sind alle zuvor genannten Steuerungsverfahren aufgeführt und dem jeweiligen Typ nach Bild 3.3 zugeordnet. In der

zweiten Spalte wird der Versuch unternommen, die Flexibilität der Verfahren zu bewerten, obwohl diese natürlich von der konkreten Implementierung und den am Knotenpunkt oder im Netz vorherrschenden Randbedingungen abhängig ist. So kann sich eine regelbasierte Steuerung mit fester Phaseneinteilung mit entsprechendem Aufwand, also bei Definition zahlreicher Phasen und Phasenübergänge, der Flexibilität einer signalgruppenbasierten Steuerung annähern. In der nächsten Spalte wird die prinzipielle Eignung der Verwendung von Systemwissen zur Vorhersage von Schaltzeitpunkten bewertet, welche auf der Analyse der Funktionsweise der einzelnen Verfahren beruht. In der letzten Spalte wird schließlich angegeben, ob in der Literatur ein Test bezüglich der Verwendung von Systemwissen zur Vorhersage von Schaltzeitpunkten für das jeweilige Verfahren gefunden werden konnte.

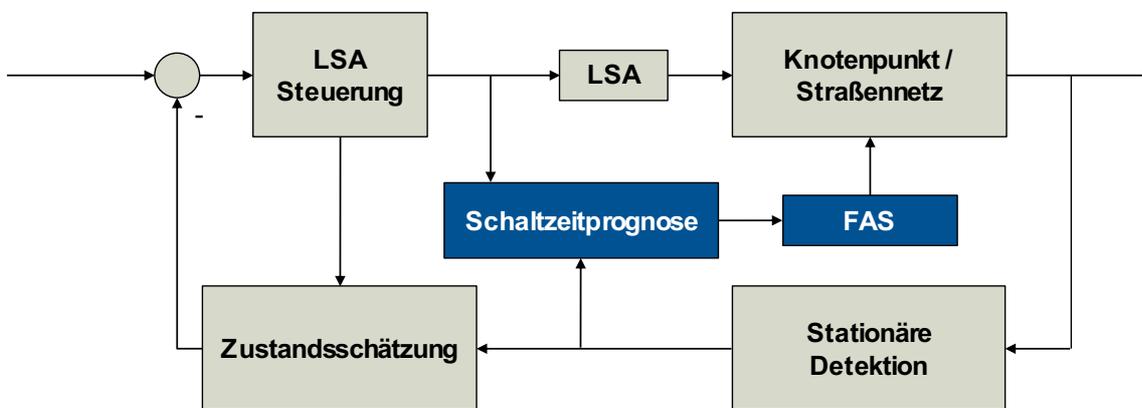
Bei der vergleichenden Betrachtung fällt auf, dass die modellbasierten Verfahren aufgrund der vorausschauenden Funktionsweise und der damit häufig einhergehenden größeren Entfernung von Detektoren zur Haltlinie eine bessere Eignung zur Nutzung von Systemwissen aufweisen. Zwar untersucht CARRIÈRE [2011] eine Eignung für die besonders flexibel agierenden, signalgruppenbasierten Steuerungsverfahren vom Typ 4. Allerdings weist er daraufhin, dass die starke Interaktion zwischen Geschwindigkeitshinweisen und Signalsteuerung sowie die Beeinflussung nachfolgender Fahrzeuge problematisch ist und nicht im Gesamtsystem berücksichtigt wird. Eine Untersuchung der Eignung des Einsatzes von Systemwissen wird in Kapitel 5 für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren, welches ebenfalls Typ 4 zuzuordnen ist, vorgenommen und es werden auch die von CARRIÈRE [2011] genannten Probleme adressiert.

Typ	Flexibilität	Eignung Systemwissen	Systemwissen getestet	
Frei programmierte, regel- und phasenbasierte Steuerung	1	o	-	x
Ring-and-Barrier	2	+	o	✓
VS-PLUS	2	+	o	✓
PRODYN	3	+	+	x
EPICS	3	+	+	x
OPAC	3	o	+	x
RHODES	3	+	+	x
UTOPIA/SPOT	3	+	+	✓
Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive [van Katwijk]	4	++	+	(✓)
Selbst-Steuerung [Lämmer]	4	++	+	x
InSync	4	++	+	x
SCATS	5	+	-	x
Regelbasierte Signalprogrammauswahl	5	o	+	✓
SCOOT	6	+	+	✓
MOTION	6	+	+	(✓)
BALANCE	6	+	+	(✓)
ImFlow	6	+	+	✓

Tab. 3.1 Bewertung unterschiedlicher Lichtsignalsteuerungsverfahren hinsichtlich Flexibilität und Vorhersagbarkeit von Schaltzeitpunkten unter Nutzung von Systemwissen

3.1.2 Prädiktionsverfahren zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte ohne Einbezug von Systemwissen

Im Unterschied zu den im vorigen Abschnitt beschriebenen Verfahren, bestehen auch Ansätze zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte, die Systemwissen bewusst vernachlässigen. Dies geschieht, um eine generelle Anwendbarkeit auf eine Vielzahl von Steuerungsverfahren zu ermöglichen und damit eine großflächigere Verfügbarkeit von prognostizierten Schaltzeitpunkten zu erreichen. In Bild 3.10 ist die Unabhängigkeit vom eingesetzten Steuerungsverfahren dadurch angedeutet, dass lediglich Daten der Signalisierung sowie Detektordaten in die Schaltzeitprognose einfließen. Diese umfassen neben den aktuellen Informationen auch historische Daten. Wie schon bei den Vorhersageverfahren mit Systemwissen, wird die Beeinflussung der Fahrzeuge nicht unmittelbar im Rahmen der Lichtsignalsteuerung berücksichtigt.



LSA: Lichtsignalanlage

FAS: Fahrerassistenzsystem

Bild 3.10 Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Beeinflussung von Fahrzeugen ohne Nutzung von Systemwissen der Lichtsignalsteuerung mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau)

Nachfolgend sind einige dieser Verfahren zur Schaltzeitprognose vorgestellt, deren Eingangsgrößen sich maßgeblich unterscheiden. Während einige Verfahren lediglich historische Daten einsetzen, nutzen andere Verfahren zusätzlich aktuelle Detektordaten und Schaltzustände. Eine dritte Kategorie von Verfahren verzichtet vollständig auf derartige, beispielsweise von einem Verkehrsrechner zu beziehende, Daten.

Ein Vorgehen, das der ersten Kategorie zuzuordnen ist, also lediglich auf historische Daten zurückgreift, wird von PROTSCHKY ET AL. [2014] beschrieben. Häufigkeitsverteilungen von Freigabezeiten unter Berücksichtigung der Umlaufzeit werden aus den historischen Datensätzen ermittelt und mittels eines Kalman Filters werden künftige Schaltzeitpunkte vorhergesagt. Die Autoren legen einen Vertrauensbereich von 95 % fest und verwerfen Vorhersagen, welche ein geringeres Niveau aufweisen. In einem Feldtest in München wurde bei den ausgewählten Knotenpunkten eine Verfügbarkeit der vorhergesagten Freigabezeiten von 71 % bei dem gewählten Vertrauensbereich erreicht.

Auch Markov-Ketten können als Instrument zur Ermittlung von Vorhersagen künftiger Schaltzeitpunkte genutzt werden. Zur Anwendung der Markov-Ketten muss die Lichtsignalsteuerung als stochastischer Prozess formuliert werden, der die elementare Markov-Eigenschaft erfüllt. Diese besagt, dass „die Wahrscheinlichkeit von einem Systemzustand in den nächsten zu wechseln, nur vom letzten Zustand abhängt“ [MENIG ET AL., 2008]. MENIG ET AL. [2008] demonstrieren ein Vorhersageverfahren basierend auf Markov-Ketten am Beispiel eines verkehrsabhängig gesteuerten Knotenpunkts mit fester Umlaufzeit. Auch das von BOTTERO ET AL. [2015] beschriebene Verfahren zur Vorhersage von voll verkehrsabhängigen Steuerungen nutzt Markov-Ketten und basiert auf demjenigen von DE SOUZA DUTRA [2009]. Es umfasst einen Lernprozess basierend auf historischen Daten und kann mit Hilfe aktueller Signalisierungszustände und Detektordaten Wahrscheinlichkeiten von Phasenübergängen vorhersagen, weshalb es der zweiten Kategorie zuzuordnen ist. WEISHEIT & HOYER [2014] nennen als Einschränkung für den Einsatz von Vorhersageverfahren, die auf Markov-Ketten basieren, die Notwendigkeit kurzer Latenzzeiten im Bereich weniger Sekunden bei der Übermittlung der Informationen von Signalzuständen und Detektordaten an den Vorhersagealgorithmus.

Support Vector Machines werden bei dem von WEISHEIT & HOYER [2014] beschriebenen Vorgehen genutzt, um Vorhersagen über künftige Schaltzeitpunkte liefern zu können. Wie bei den oben genannten Verfahren, liefert ein Datensatz mit historischen Werten die Grundlage zum Training dieses Algorithmus. Die Support Vector Machines dienen dazu, eine Klassifizierung von Systemzuständen vorzunehmen. Als Eingangsdaten dienen dabei Detektordaten, während die Schaltzeitpunkte Zielvariablen darstellen. Eine Zuordnung von Detektoren zu einzelnen Signalgebern ist nicht notwendig, sondern wird automatisiert durch die Support Vector Machines ermittelt, was zur Übertragbarkeit des Verfahrens beiträgt. Auch können Daten mit größeren Latenzzeiten verarbeitet werden, für den Fall, dass lediglich Detektordaten des letzten Umlaufs vorliegen. Das beschriebene Verfahren wurde im Rahmen des Forschungsprojekts UR:BAN in den Städten Kassel und Düsseldorf getestet. An einem Knotenpunkt der Stadt Düsseldorf wird für einen Signalgeber eine korrekte Vorhersage des Endes der Freigabezeit von 86 % erzielt. Dabei wurde der Signalgeber ausgewählt, der die größte Varianz der Schaltzeitpunkte aufweist. Unter Verwendung von Detektordaten des aktuellen Umlaufs erhöht sich der Anteil korrekter Vorhersagen auf 97 %. Am untersuchten Knotenpunkt kommen zeitabhängig drei verschiedene Signalprogramme mit fester Umlaufzeit zum Einsatz und abhängig von der Detektorbelegung werden Freigabezeitanteile angepasst.

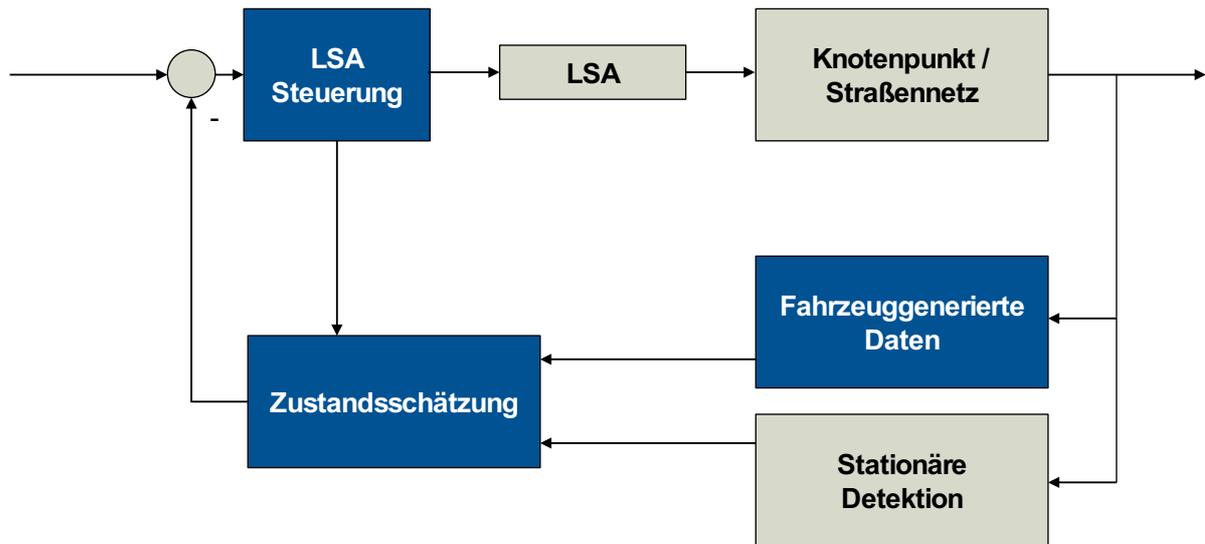
Die zuvor genannten Ansätze zur Vorhersage von Freigabezeiten nutzen zwar kein Systemwissen des Steuerungsverfahrens, jedoch sind stets Detektordaten beziehungsweise Daten der Schaltzeitpunkte vom Systembetreiber von Nöten. Eine Alternative, die auf Crowdsourcing basiert und damit der dritten Kategorie zuzuordnen ist, präsentieren KOUKOUIMIDIS ET AL. [2011]. Hinter der Windschutzscheibe montierte Smartphones erfassen dabei mittels der integrierten Kamera aktuelle Signalzustände und generieren so eine Datenbank von

Schaltzeitpunkten. Diese Datenbanken werden zwischen den einzelnen Smartphonennutzern über WLAN-Verbindungen ausgetauscht. Den Autoren gelingt es damit, eine Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte für Lichtsignalanlagen mit zeitabhängiger Signalprogrammwahl und für solche mit dem SCATS System zu erzielen. Der Anteil korrekter Detektionen von Signalgebern wird mit bis zu 92,2 % angegeben. Bei zeitabhängiger Signalprogrammwahl wird ein mittlerer absoluter Vorhersagefehler von 0,66 s erzielt, während bei Verwendung von SCATS ein Fehler von 2,45 s ermittelt wird. Wie auch bei WEISHEIT & HOYER [2014] kommt die Methode der Support Vector Machines zum Einsatz.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung von Schaltzeitpunkten unter Verzicht auf Daten historischer Schaltzeitpunkte oder Detektordaten stellen AXER & FRIEDRICH [2016] vor. Floating Vehicle Daten (FVD), wie sie beispielsweise von Anbietern von Navigationssystemen bezogen werden können, werden bei dem vorgestellten Verfahren genutzt, um historische Schaltzeitpunkte zu ermitteln. Hierzu werden FVD eines längeren Zeitraums genutzt, um auch bei niedriger Durchdringungsrates eine ausreichende Anzahl an Überfahrten beziehungsweise Haltevorgängen an Knotenpunkten zu erhalten. Anschließend wird zunächst die Umlaufzeit geschätzt und darauf aufbauend werden Freigabe- und Sperrzeiten ermittelt. Die Zeitpunkte der Überfahrten an Knotenpunkten werden mit Hilfe des Modulo-Operators in Umläufe übersetzt. Dies geschieht für verschiedene Umlaufzeiten und anhand der sich ergebenden Muster der Trajektorien wird die wahrscheinlichste Umlaufzeit ausgewählt. Das Vorgehen wird für verschiedene Zeitscheiben des Tages wiederholt, um unterschiedliche Verkehrsnachfrage-situationen und unterschiedliche Signalprogramme der verschiedenen Tageszeiten zu berücksichtigen.

3.2 Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung durch vernetzte Fahrzeuge

In diesem Abschnitt werden Verfahren beschrieben, welche die Lichtsignalsteuerung mit Hilfe der Daten vernetzter Fahrzeuge anpassen. Damit wird im Vergleich zum vorigen Abschnitt der entgegengesetzte Beeinflussungsweg genutzt. Wie in Bild 3.11 gezeigt, gehen hierzu neben den Daten der stationären Detektion auch fahrzeuggenerierte Daten in die Zustandsschätzung ein. Die Zustandsschätzung sowie die Lichtsignalsteuerung selbst müssen zur Verwendung dieser Daten angepasst werden, weshalb sie in der Darstellung blau hervorgehoben sind.



LSA: Lichtsignalanlage

FAS: Fahrerassistenzsystem

Bild 3.11 Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Beeinflussung der Steuerung durch Nutzung von fahrzeuggenerierten Daten mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau)

Bei der verlustzeitbasierten Steuerung [OERTEL, 2014] werden die Geschwindigkeitsdaten von Fahrzeugen dazu genutzt, deren durch die Lichtsignalanlage verursachte Verlustzeit abzuschätzen. Hierzu wird der derzeitige Geschwindigkeitswert mit einer Maximalgeschwindigkeit, beispielsweise der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, verglichen. Die resultierende Steuerung ist eine regelbasierte Steuerung, welche dann einen Phasenübergang einleitet, wenn alle Fahrzeuge, die eine Verlustzeit durch die Signalsteuerung erfahren haben, in der aktuellen Phase abgeflissen sind. Ein Phasenübergang wird dabei nicht vor Ablauf der Mindestfreigabezeit, spätestens aber nach einer maximalen Freigabezeit eingeleitet. Unter Ausnutzung der Daten vernetzter Fahrzeuge ergeben sich so Vorteile gegenüber der regelbasierten Zeitlückensteuerung mittels konventioneller Detektion. In Feldtests wurde das Verfahren auch mit Hilfe konventioneller Detektoren untersucht [OERTEL ET AL., 2017], welche im Zufluss zur Lichtsignalanlage und kurz hinter der Haltlinie verbaut wurden. Durch einen Vergleich der Zählwerte der beiden Detektoren, können so Verlustzeiten ermittelt werden, ohne auf die Informationen vernetzter Fahrzeuge zurückzugreifen. Gegenüber der im Bestand verwendeten Zeitlückensteuerung zeigen sich kürzere Phasendauern und eine verbesserte Verkehrseffizienz in Bezug auf die Anzahl der Halte.

Im Rahmen des Projektes simTD wurde die Verwendung der Daten vernetzter Fahrzeuge für die Netzsteuerung BALANCE im Rahmen einer Simulationsstudie untersucht. Hierzu generiert das mikroskopische Verkehrsflussmodell DRIVERS eine konsistente Verkehrsnachfrage im Netz, welche auf Detektorwerten basiert und über die Daten vernetzter Fahrzeuge justiert wird [BAUR ET AL., 2013]. Die von DRIVERS generierte Verkehrsnachfrage wird wiederum von BALANCE für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung verwendet. Bei diesem Vorgehen

wird festgestellt, dass sehr geringe Ausstattungsraten von 5 % aufgrund des geringen Stichprobenumfangs sogar einen negativen Effekt auf die Netzsteuerung haben können, während höhere Ausstattungsraten eine Reduktion der Anzahl der Halte sowie der Verlustzeiten zeigen [SCHIMANDL & MARGREITER, 2013]. In einem weiteren Anwendungsfall wird im Rahmen von simTD die Beeinflussung der lokalen Steuerung untersucht. Neben der Netzsteuerung BALANCE wird dazu auch das lokale Steuerungsverfahren VS-PLUS dahingehend erweitert, dass Informationen vernetzter Fahrzeuge zusätzlich zu denjenigen stationärer Detektoren genutzt werden können. Dabei zeigte sich eine signifikante Verbesserung der Überfahrzeiten sowie der Anzahl der Halte mit steigender Ausstattungsrate.

HE ET AL. [2012] präsentieren das Verfahren Platoon-based Arterial Multi-modal Signal Control with Online Data (PAMSCOD), welches der Optimierung von Signalplänen auf Streckenzügen dient. Dabei wird die Möglichkeit des Informationsaustauschs zwischen Verkehrsteilnehmern verschiedener Verkehrsmodi und der Infrastruktur angenommen. Die Verkehrsteilnehmer übermitteln Informationen über Verkehrsmodus, Position, Geschwindigkeit und die benötigte Phase der Lichtsignalanlage. Die einzelnen Anfragen werden je nach Phase und Prioritätslevel zu Fahrzeugpuls zusammengefasst. Das Optimierungsproblem wird als Mixed Integer Linear Program (MILP) formuliert und mit Hilfe von CPLEX gelöst, wie es auch bei dem in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren der Fall ist. Als Ergebnis wird eine Anpassung der Freigabezeiten ohne Berücksichtigung fester Umlaufzeiten oder Versatzzeiten ermittelt, welches dennoch eine Koordinierung entlang des betrachteten Streckenzugs zur Folge haben soll. Mit Hilfe einer linearen Regression werden Parameter wie Pulkgröße, Rückstaulänge oder die Pulkankunftszeit für Ausstattungsraten von weniger als 100 % ermittelt. Zur Reduzierung der Rechenzeit werden zum einen Fahrzeugpuls anstelle von Einzelfahrzeugen betrachtet, zum anderen werden jeweils nur zwei Knotenpunkte im Rahmen der Optimierung gemeinsam betrachtet. Nach dem Prinzip des rollenden Zeithorizonts werden alle 30 s die Signalpläne für die nächsten vier Umläufe erzeugt. Ab einer Ausstattungsrate von 40 % geben die Autoren eine Steigerung der Leistungsfähigkeit gegenüber einer offline mit Hilfe von Synchro erstellen Koordinierung mit lokaler verkehrsabhängiger Steuerung an. In Simulationen werden Reduktionen der durchschnittlichen Verlustzeit von bis zu 30 % ermittelt bei nur geringer Erhöhung der Verlustzeit von Bussen um 3 %.

Multi-Modal Intelligent Transportation Signal System (MMITSS) ist ein Steuerungsverfahren, das im Rahmen einer Förderung des US-amerikanischen Department of Transportation entwickelt wird. Der Fokus der Entwicklung liegt auf der Berücksichtigung verschiedener Verkehrsmodi (Pkw, Lkw, öffentlicher Verkehr, Radfahrer und Einsatzfahrzeuge) [RAKHA ET AL., 2016]. Verschiedene Applikationen nutzen die Vernetzung von Verkehrsteilnehmern und Infrastruktur, um die Signalsteuerung zu beeinflussen. Die Applikation Intelligent Traffic Signal System (I-SIG) soll den Verkehrsfluss maximieren und nutzt hierzu Informationen vernetzter Fahrzeuge. Die Applikationen Transit Signal Priority (TSP), Freight Signal Priority (FSP) und

Emergency Vehicle Priority (PRE-EMPT) zielen auf die Priorisierung von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs, von Lkw beziehungsweise von Einsatzfahrzeugen ab. Zudem soll, mit Hilfe spezieller Geräte, körperlich beeinträchtigten oder sehbehinderten Fußgängern die Anforderung des Fußgängersignals erleichtert werden. In Feldtests wurde eine Reduktion der Reisezeiten von ausgestatteten Lkw durch die Verwendung von FSP um bis zu 20,9 % auf einem etwa drei Kilometer langen Streckenzug festgestellt. Für I-SIG konnten zwar keine statistisch signifikanten Reduktionen der Verlustzeiten festgestellt werden, die Variabilität der Reisezeiten sank aber stark ab.

3.2.1 Verfahren zur Schätzung der Rückstaulänge

Während der Großteil der zuvor genannten Verfahren speziell auf die Verwendung von Fahrzeugdaten zugeschnitten ist, gibt es bereits eine längere Historie zur Entwicklung von Verfahren zur Ermittlung des Rückstaus. Dies liegt darin begründet, dass der Rückstau als Regelgröße aufgefasst werden kann und damit als Eingangsparameter für Signalsteuerungsverfahren genutzt werden kann, wie es in Beispiel 2 in Kapitel 2.2.1 beschrieben wurde. Die üblicherweise verwendeten Schleifendetektoren zur Bemessung des Rückstaus liefern in diesem Fall keinen kontinuierlichen Rückstauwert, sondern zeigen lediglich an, ob der Rückstau länger oder kürzer als die Distanz des Detektors zur Haltlinie ist. Schätzverfahren können dazu genutzt werden, kontinuierliche Rückstauwerte zu ermitteln. Zwei Gründe führen dazu, dass derartige Verfahren zur Rückstauschätzung im Umfeld vernetzter Verkehrssysteme verstärkt erforscht werden. Zum einen können die Daten vernetzter Fahrzeuge zusätzlich zu den Daten konventioneller Detektion genutzt werden, um die Rückstaulänge zu schätzen. Diese Daten können den Informationsgehalt der Daten konventioneller Detektion deutlich übersteigen, da sie neben kontinuierlichen Positions- und Geschwindigkeitsdaten auch Informationen benachbarter Fahrzeuge enthalten können. Deren Erfassung kann durch die für Fahrerassistenzsysteme notwendige Umfeldsensorik erfolgen. Zum anderen kann die Rückstaulänge, beziehungsweise der Zeitbedarf der rückgestauten Fahrzeuge, bei der Berechnung der optimalen Annäherungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Ziel ist hierbei die Erhöhung der Genauigkeit von Geschwindigkeitshinweisen. Da die ermittelte Rückstaulänge sowohl der Beeinflussung vernetzter Fahrzeuge als auch der Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung dienen kann, könnte dieses Unterkapitel auch Kapitel 3.1 zugeordnet werden. Die meisten der unten genannten Beispiele beziehen sich aber auf die Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung.

MÜCK [2002] beschreibt ein Verfahren zur Schätzung des Rückstaus, das unabhängig von der Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur entwickelt wurde. Detektoren in der Nähe der Haltlinie (Abstand 10 m bis 50 m) werden zur Schätzung des Rückstaus genutzt. Die Zeit vom Beginn der Sperrzeit bis zur dauerhaften Belegung wird als Füllzeit bezeichnet und stellt die Hauptkenngröße zur Berechnung der Rückstaulänge dar. Unterschreitet die Füllzeit einen zuvor eingestellten Schwellwert, wird eine Überstauung für die betreffende Zufahrt angenommen. Dies liegt in der Annahme begründet, dass Fahrzeuge, die während der Freigabezeit

nicht abfließen können, zu einer schnellen dauerhaften Belegung des Detektors führen. Eine kurze Füllzeit führt dann zu einem Anheben des geschätzten Rückstauwertes mit einer Glättung über vorige Umläufe.

PRIEMER & FRIEDRICH [2008] beschreiben ein Verfahren, bei dem die Daten vernetzter Fahrzeuge zur Verbesserung der Rückstaulängenschätzung herangezogen werden. Das Verfahren basiert auf demjenigen von MÜCK [2002], erlaubt aber darüber hinaus die Berücksichtigung ausgestatteter Fahrzeuge als sogenannte virtuelle Detektoren. Den entwickelten Rückstauschätzer nutzen die Autoren für ein dezentrales Steuerungsverfahren, bei dem nach dem Prinzip des rollenden Zeithorizonts eine Minimierung der Gesamtrückstaulänge am Knotenpunkt angestrebt wird [PRIEMER & FRIEDRICH, 2009]. Da der Rückstaulängenschätzer eine Verwendung von konventioneller Detektion wie auch fahrzeuggenerierten Daten erlaubt, können auch nicht ausgestattete Fahrzeuge von der Steuerung berücksichtigt werden. Das Verfahren verzichtet dabei auf festgelegte Umlauf- oder Versatzeiten. Ab einer Ausstattungsrate von 20 % werden Verbesserungen gegenüber der mit TRANSYT erstellten Vergleichssteuerung festgestellt.

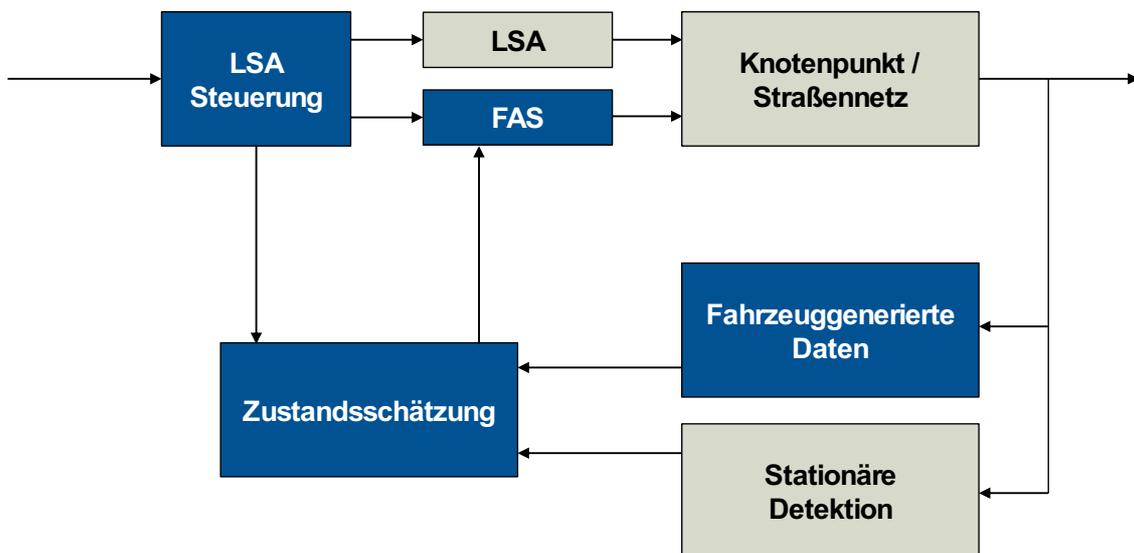
Ein weiteres Verfahren, welches die Kombination der Daten vernetzter Fahrzeuge und stationärer Detektoren erlaubt wird von SÁNTA [2015] beschrieben und von LÜßMANN [2015] zur Verbesserung von Geschwindigkeitshinweisen verwendet. Eine multiple lineare Regression wird genutzt, um fahrstreifengenaue Schätzungen der Rückstaulänge zu erhalten. Die beiden zuletzt genannten Verfahren sind insbesondere für geringe Ausstattungsraten ausgelegt und für die Verwendung von haltliniennahen Detektoren geeignet.

Das bereits vorgestellte Steuerungsverfahren UTOPIA [MAURO & DI TARANTO, 1989] kann beispielhaft für ein Verfahren genannt werden, bei dem die geschätzten Rückstauwerte unmittelbar in die Optimierung der Schaltzeitpunkte eingehen. Mit Hilfe eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells werden Rückstauwerte ermittelt, welche in der Kostenfunktion der Optimierung berücksichtigt werden. Ein Verfahren, das die Kombination der Daten vernetzter Fahrzeuge und haltlinienferner Detektoren, wie sie von UTOPIA verwendet werden, erlaubt, wird von POLITI ET AL. [2016] beschrieben. Die Autoren nutzen ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell, welches auf dem Fahrzeugfolgmodell von GIPPS [1981] beruht, um die Daten zu fusionieren und den aktuellen Rückstau abzuschätzen. Die umgekehrte Beeinflussungsrichtung, nämlich die Verwendung der systemeigenen Rückstaulängenschätzung von UTOPIA zur Verbesserung von Geschwindigkeitshinweisen, wurde dagegen bisher nicht beschrieben.

3.3 Gleichzeitige Beeinflussung von vernetzten Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen

In diesem Kapitel werden Ansätze vorgestellt, welche die in den beiden vorherigen Kapiteln separat betrachteten Beeinflussungswege gleichzeitig berücksichtigen und damit die Lichtsignalsteuerung und die Geschwindigkeitsbeeinflussung der Fahrzeuge in den Regelkreis integrieren. Die Verwendung der Daten vernetzter Fahrzeuge zur Anpassung der Lichtsignalsteuerung erschwert deren Vorhersagbarkeit dabei tendenziell weiter, da die feingliedrigeren Daten für flexiblere Steuerungsentscheidungen genutzt werden können.

Die Integration der Beeinflussung der Fahrzeuge in den Regelkreis, wie er in Bild 3.12 gezeigt ist, kann dadurch erreicht werden, dass die Fahrzeuggeschwindigkeiten explizit oder implizit, zum Beispiel in Form der Ankunftszeiten an der Haltlinie, als Stellgröße aufgefasst werden. Es wurden verschiedene Verfahren entwickelt, bei denen die möglichen Geschwindigkeitsreduktionen bei der Berechnung von Versatzzeiten berücksichtigt werden. Um aber Rückkopplungseffekte durch die Beeinflussung der Fahrzeuge auf die Lichtsignalsteuerung zu vermeiden, wird diese Anpassung lediglich offline oder online in größeren Zeitintervallen vorgenommen. In Bezug auf die Lichtsignalanlagen liegt damit, im Gegensatz zu der in Bild 2.7 gezeigten Maximallösung, eine Steuerung und keine Regelung vor.



LSA: Lichtsignalanlage

FAS: Fahrerassistenzsystem

Bild 3.12 Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Berücksichtigung der Beeinflussung von Fahrzeugen im Rahmen der Lichtsignalsteuerung mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau)

Dennoch kann eine Zustandsschätzung unter Einbezug stationärer Detektion und fahrzeuggenerierter Daten vorgenommen werden, beispielsweise um den aktuellen Rückstau zu schätzen und damit die Geschwindigkeitshinweise zu verbessern. In diesem Fall ergibt sich

für die Einstellung der Fahrzeuggeschwindigkeiten eine Regelung. Entsprechende Verfahren, die diesem Prinzip gehorchen, werden nachfolgend vorgestellt.

Im Projekt KOLINE wurde eine gemeinsame Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Progressionsgeschwindigkeit angestrebt [BLEY ET AL., 2011]. Mit Hilfe von fahrzeuggenerierten Daten und Detektordaten wird der Verkehrszustand geschätzt und es erfolgt eine modellbasierte Optimierung der Signalprogramme mehrerer Knotenpunkte. Es kommt das Cell Transmission Model [DAGANZO, 1994] zum Einsatz und es werden, im Unterschied zu konventionellen Verfahren, neben den Versatzzeiten auch unterschiedliche Progressionsgeschwindigkeiten berücksichtigt. Die so optimierten Signalprogramme laufen anschließend für 15 min in Festzeit und entsprechend können Schaltzeitpunkte mit großer Genauigkeit an die Fahrzeuge übermittelt werden.

DE NUNZIO [2015] präsentiert ein weiteres Verfahren zur Optimierung von Versatzzeiten, welches eine gleichzeitige Berücksichtigung der Beeinflussung von Fahrzeuggeschwindigkeiten ermöglicht. Die Optimierung wird eingesetzt, um eine Maximierung der Grünbänder zu erreichen, wozu die Progressionsgeschwindigkeit der Fahrzeuge auf Streckenzügen sowie die Versatzzeiten als Entscheidungsvariablen dienen. Es wird eine feste Umlaufzeit angenommen, die für alle betrachteten Knotenpunkte gleich ist. Auch die Grünzeitaufteilung wird als unveränderlich und bekannt angenommen und ist nicht Gegenstand der Optimierung. Gegenüber Verfahren, welche lediglich die Versatzzeiten als Entscheidungsvariablen der Optimierung berücksichtigen, wird eine Reduktion des Energieverbrauchs festgestellt, ohne dass ein negativer Einfluss auf die erzielten Reisezeiten beobachtet wird.

LÜBMANN [2015] stellt ebenfalls ein Verfahren zur netzweiten Koordinierung von Lichtsignalanlagen vor, bei dem Versatzzeiten und Progressionsgeschwindigkeiten optimiert werden. Um zuverlässige Geschwindigkeitshinweise für vernetzte Fahrzeuge berechnen zu können, wird, wie bei den beiden zuvor beschriebenen Verfahren, auf eine lokale Anpassung der Steuerung verzichtet. Zur Optimierung wird ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell eingesetzt, um Emissionen direkt in der Kostenfunktion berücksichtigen zu können. Im Rahmen von Simulationsstudien wird eine Reduktion der Kohlenstoffdioxidemissionen um bis zu 5,9 % nachgewiesen. Neben den bekannten Schaltzeitpunkten der Lichtsignalanlagen wird auch die geschätzte Rückstaulänge [SÁNTA, 2015] zur Berechnung der Hinweise an die Fahrzeuge genutzt. Diese Hinweise enthalten damit nicht nur die zuvor berechnete Progressionsgeschwindigkeit auf dem jeweiligen Streckenzug, sondern berücksichtigen auch den aktuell vorherrschenden Rückstau, wie dies in Bild 3.12 dargestellt ist. Durch die Rückstaulängenschätzung können somit auch einbiegende und nicht ausgestattete Fahrzeuge bei der Berechnung der Geschwindigkeitshinweise berücksichtigt werden. Als weitere Besonderheit ist die fahrstreifenfeine Rückstauschätzung zu nennen, womit die Hinweise an die Fahrzeuge nicht nur ein Zeitfenster zum optimalen Erreichen der Haltlinie beinhalten, sondern auch eine Fahrstreifenempfehlung.

Die drei zuletzt genannten Verfahren berücksichtigen zwar eine gleichzeitige Beeinflussung von Fahrzeuggeschwindigkeiten und Signalzeiten im Rahmen der Optimierung, doch geschieht dies lediglich auf Netzebene unter Ausschluss lokaler Anpassung der Signalsteuerung. Eine Reaktion auf kurzfristig schwankende Verkehrsnachfrage oder die Priorisierung öffentlicher Verkehrsmittel ist daher nicht möglich.

Der Konflikt zwischen der Prognostizierbarkeit der Steuerung und der Berücksichtigung der Beeinflussungsmöglichkeit der Fahrzeuge in der adaptiven Lichtsignalsteuerung wird bei den zuvor genannten Verfahren also durch eine absichtliche Verringerung der Dynamik der Signalisierung aufgelöst. So können Geschwindigkeitshinweise für Fahrzeuge generiert und die Steuerung dennoch für den Einsatz mit vernetzten Fahrzeugen ausgelegt werden. Um diese Verringerung der Flexibilität der Steuerung zu vermeiden, kann jedoch auch das zuvor als Maximallösung bezeichnete Vorgehen verfolgt werden, welches in Bild 2.7 dargestellt ist. Dies ist bei den beiden im Folgenden erläuterten Verfahren und bei dem in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren der Fall.

So erlauben die beiden von MENIG [2012] beschriebenen Verfahren eine gleichzeitige Optimierung von Fahrzeuggeschwindigkeiten und Lichtsignalsteuerung auf kürzerer Zeitbasis. Es werden jeweils Mindestgrünzeiten und Zwischenzeiten als Nebenbedingung der Optimierung berücksichtigt und das Prinzip des rollenden Zeithorizonts angewandt. Neben dem aktuellen Signalzustand stehen als Eingangsgrößen Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten zur Verfügung. Zunächst wird eine mikroskopische Optimierung beschrieben, bei der die sich ergebende Steuerung die Zeitpunkte des Passierens der Haltlinie der einzelnen betrachteten Fahrzeuge enthält. Diese Zeitpunkte werden als Passierzeiten bezeichnet. Als Ziel der Optimierung wird die Maximierung der minimalen Geschwindigkeiten festgelegt. Durch Zusammenfassen der Fahrzeuge verschiedener Verkehrsströme werden aus diesem Ergebnis Phasenfolge und Schaltzeitpunkte berechnet. Die Passierzeiten werden, unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen zu minimalen und maximalen Fahrzeuggeschwindigkeiten sowie Zeitlücken zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen, berechnet. Aufgrund der Rechenintensität bei der gleichzeitigen Betrachtung vieler Einzelfahrzeuge wird neben der mikroskopischen als Alternative auch eine makroskopische Optimierung vorgeschlagen. Bei dieser wird der Verkehrsfluss, der ohne Beeinflussung durch die Lichtsignalsteuerung auftreten würde, durch die Steuereingriffe so abgeändert, dass der Fluss während der Sperrzeit gleich null ist. Die entstehende Differenz wird anschließend dem Verkehrsfluss zu Beginn der Freigabezeit aufgeschlagen. Optimierungsziel ist bei der makroskopischen Optimierung die Minimierung der auftretenden Verlustzeiten. Die sich ergebende Steuerung beinhaltet den optimierten Beginn sowie das Ende der Phasen. Es wird eine Erweiterung der makroskopischen Steuerung auf beliebige Phasenfolgen beschrieben, jedoch darf ein bestimmter Verkehrsstrom nicht in zwei Phasen bedient werden. Dies muss entsprechend bei der Einteilung von Signalgruppen in Phasen berücksichtigt werden. Die beiden Verfahren werden in Simulationsstudien jedoch lediglich mit zwei unverträglichen Verkehrsströmen untersucht, sodass die

Signalgruppen ohne Einschränkung der Flexibilität der Steuerung in zwei Phasen zusammengefasst werden können. Eine mögliche Veränderung der Phaseneinteilung und -folge wird so nicht untersucht. In der Simulation werden deutliche Reduktionen der Anzahl der Halte und der Verlustzeiten gegenüber einer Festzeitsteuerung nachgewiesen, wobei sich die Effekte tendenziell mit steigender Ausstattungsrate verstärken.

Auch bei dem von ERDMANN [2013] beschriebenen AGLOSA Verfahren werden Einzelfahrzeuge betrachtet und es erfolgt eine gleichzeitige Optimierung der Schaltzeitpunkte und der Fahrzeuggeschwindigkeiten nach dem Prinzip der dynamischen Programmierung. Die ausgestatteten Fahrzeuge übermitteln ihre Kennung, Position und Geschwindigkeit an das Signalsteuerungssystem. Daraufhin erfolgt die Berechnung optimaler Schaltzeitpunkte, wobei das Ziel der Optimierung die Minimierung des kombinierten Zeitverlustes aller Fahrzeuge ist. Die Fahrzeuge erhalten nach Abschluss der Optimierung einen Hinweis über die ihnen zugeteilte Freigabezeit der Lichtsignalanlage. Die daraus abgeleiteten Geschwindigkeitshinweise berücksichtigen eine Untergrenze sowie das Beschleunigungs- und Abbremsvermögen der Fahrzeuge. Ein gegebenenfalls auftretender Rückstau an der Lichtsignalanlage wird im Rahmen der Geschwindigkeitshinweise nicht berücksichtigt. Auf Seiten der Steuerung können Mindestgrünzeiten und Zwischenzeiten als Nebenbedingungen formuliert werden. Wiederum wird die Möglichkeit der Betrachtung von mehr als zwei Phasen beschrieben und die Erläuterungen deuten darauf hin, dass zwar die Dauer und Folge der Phasen, nicht aber deren Einteilung Gegenstand der Optimierung ist. Stehen keine fahrzeuggenerierten Daten, sondern ausschließlich stationäre, konventionelle Detektoren zur Verfügung, können die für AGLOSA nötigen Bewegungsdaten mittels eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells abgeschätzt werden [ERDMANN ET AL., 2015]. Die Simulation an einem realen Knotenpunkt mit mehr als zwei Phasen zeigt eine Reduktion der Verlustzeiten gegenüber der verkehrsabhängigen Bestandssteuerung, auch bei ausschließlicher Verwendung konventioneller Detektionstechnologie. Dieses Vorgehen wurde bereits in Feldversuchen untersucht und zeigte positive Wirkungen bezüglich der Verlustzeit der Fahrzeuge gegenüber der regelbasierten Bestandssteuerung [OERTEL ET AL., 2017].

3.4 Zwischenfazit zur Ausgangssituation

In Kapitel 3.1 wurden Möglichkeiten zusammengefasst, die die Beeinflussung von Fahrzeuggeschwindigkeiten aufgrund von Informationen über zukünftige Schaltzeitpunkte erlauben. Die notwendigen Vorhersagen können dabei mittels Zugriff auf Informationen der Steueralgorithmien oder durch externe Vorhersageverfahren ermittelt werden. Die vielfältigen bestehenden Steuerungsverfahren wurden in Bezug auf ihren Steuerungsfokus, die Entscheidungsgrundlage und die Phaseneinteilung gemäß Bild 3.3 kategorisiert und anschließend beschrieben. Aufgrund des reaktiven Charakters von regelbasierten Steuerungs-

verfahren und der häufig auf sekundlicher Basis getroffenen Entscheidungen wird eine Vorhersage der Schaltzeitpunkte bei diesen Verfahren erschwert. Nichtsdestotrotz bestehen, insbesondere für standardisierte Verfahren, Möglichkeiten zur Nutzung von Systemwissen. Auch Verfahren ohne Systemwissen wurden für die Vorhersage regelbasierter Steuerungen konzipiert. Dagegen weisen modellbasierte Verfahren, aufgrund des vorausschauenden, proaktiven Charakters, Vorzüge bei der Vorhersage von Schaltzeitpunkten unter Verwendung von Systemwissen auf. Wegen der bei einigen Verfahren erzielten hohen Flexibilität der Signalisierung erscheint eine Vorhersage dieser Verfahren ohne den Einsatz von Systemwissen jedoch schwierig. In der Literatur konnten daher auch keine Beispiele für die Verwendung von Vorhersageverfahren ohne Einsatz von Systemwissen in Kombination mit modellbasierten Steuerungsverfahren gefunden werden. Weiterhin zeigte sich im Rahmen der Recherche, dass einige der jüngsten Entwicklungen der modellbasierten, knotenpunktorientierten Steuerungen bereits eine flexible Phaseneinteilung erlauben, jedoch wird in der Literatur für keines dieser Verfahren eine Integration der Fahrzeugbeeinflussung in die Lichtsignalsteuerung beschrieben.

Bestehende Ansätze zur Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung durch die Informationen vernetzter Fahrzeuge wurden in Kapitel 3.2 beschrieben. Aus der Literatur geht dabei hervor, dass die erweiterte Datenlage zu verbesserten Steuereingriffen gegenüber Verfahren mit konventioneller Detektion genutzt werden kann. Dabei können bestehende Verfahren von neuartigen Datenquellen profitieren, es werden aber auch Neuentwicklungen beschrieben, die speziell auf die Verwendung fahrzeuggenerierter Daten zugeschnitten sind. Neben Geschwindigkeits- und Positionsdaten werden auch Daten zum Fahrzeugtyp in die Bildung von Steuerentscheidungen einbezogen, um Bevorrechtigungen für Fahrzeuge bestimmter Klassen gemäß verkehrspolitischer Vorgaben zu erreichen. Die Daten vernetzter Fahrzeuge können darüber hinaus auch für eine verbesserte Schätzung der Rückstaulänge eingesetzt werden. Die dadurch verbesserte Zustandsschätzung kann zur Beeinflussung der Lichtsignalsteuerung genutzt werden. Umgekehrt ist es aber auch vorteilhaft, die mittels vernetzter Fahrzeuge oder konventioneller Detektion geschätzte Rückstaulänge zur Erhöhung der Genauigkeit von Geschwindigkeitshinweisen zu nutzen.

Erst mit der gleichzeitigen Beeinflussung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugen kann das Potential vernetzter Verkehrssysteme voll ausgeschöpft werden. Verfahren, die dies anstreben, wurden in Kapitel 3.3 beschrieben. Dabei lassen sich zwei Hauptvorgehensweisen in der Literatur erkennen. Zum einen die Optimierung der Lichtsignalsteuerung in größeren Zeitabständen unter Berücksichtigung variabler Progressionsgeschwindigkeiten. Hierbei werden lokale Beeinflussungen der Steuerung in der Regel ausgeschlossen, womit zuverlässige Geschwindigkeitshinweise für Fahrzeuge möglich werden. Zum anderen werden zwei Verfahren in der Literatur beschrieben, bei denen Fahrzeuggeschwindigkeit und Schaltzeitpunkte mit hoher Dynamik gemeinsam optimiert werden. So sollen flexible Anpassungen der Schaltzeitpunkte unter Berücksichtigung der Fahrzeuggeschwindigkeit als Stellgröße möglich sein.

Daraus folgt, gegenüber der Vorhersage von Schaltzeitpunkten bestehender Verfahren zur Lichtsignalsteuerung, eine Veränderung des Informationsflusses von der Lichtsignalanlage zum Fahrzeug. Während die vorhergesagten Schaltzeitpunkte bestehender Verfahren ohne funktionale Einschränkung als Multi- oder Broadcast in gleicher Form an alle umgebenden Fahrzeuge versendet werden können, erfordert die gleichzeitige Beeinflussung von Fahrzeuggeschwindigkeiten und Schaltzeitpunkten eine individuelle Information der einzelnen Fahrzeuge. Dieser Unicast ist mit den aktuell standardisierten Nachrichtentypen SPAT und TPEG-TSI allerdings nicht oder nur eingeschränkt möglich, da lediglich Informationen zu Schaltzeitpunkten vorgesehen sind und keine konkreten Geschwindigkeitshinweise.

Um die zu Beginn der Arbeit aufgestellten Forschungsfragen beantworten zu können, wurde das im nachfolgenden Kapitel beschriebene Steuerungsverfahren entwickelt. Dieses greift ausgewählte, insbesondere in Bezug auf das Potential der kooperativen Lichtsignalsteuerung vorteilhafte, Eigenschaften der zuvor beschriebenen bestehenden Verfahren auf. So zeigte sich, dass knotenpunktbasierte Verfahren mit rollendem Zeithorizont den besten Kompromiss zwischen Vorhersagbarkeit und Flexibilität von Schaltzeitpunkten bieten. Mit der modellprädiktiven Regelung wird ein dementsprechender Ansatz für das entwickelte Verfahren gewählt, wobei zum Erreichen möglichst flexibler Steuerungsentscheidungen ein signalgruppenbasierter Ansatz verfolgt wird. Weiterhin zeigte die Literaturrecherche, dass eine vollständige Ausnutzung des Potentials der kooperativen Lichtsignalsteuerung nur unter Berücksichtigung von Geschwindigkeitshinweisen bei der Ermittlung von Steuerungsentscheidungen der Lichtsignalanlage möglich ist. Um auch eine kurzfristige Reaktion auf lokale Schwankungen zu ermöglichen, wird daher das Prinzip der gleichzeitigen Optimierung von Schaltzeitpunkten und Fahrzeuggeschwindigkeiten im Rahmen des Reglerentwurfs aufgegriffen. Die Literaturrecherche ergab auch, dass die Präzision von Geschwindigkeitshinweisen durch die Berücksichtigung von gegebenenfalls vorhandenem Rückstau gesteigert werden kann, weshalb diese Berücksichtigung als weitere Anforderung für das neu entwickelte Verfahren festgelegt wird.

4. Entwicklung eines Verfahrens zur kooperativen Lichtsignalsteuerung

In diesem Kapitel wird ein neuartiges Verfahren zur gleichzeitigen Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeuggeschwindigkeiten vorgestellt. Dadurch soll eine größtmögliche Ausschöpfung des Potentials der kooperativen Lichtsignalsteuerung erreicht werden. Daneben wird eine hohe Flexibilität der Steuerung angestrebt, weshalb auf die Festlegung von Umlaufzeiten, Versatzzeiten und eine feste Phaseneinteilung verzichtet wird. Stattdessen wird die freie Kombination verträglicher Signalgruppen ermöglicht und es werden lediglich Mindestfreigabezeiten und Zwischenzeiten als harte Nebenbedingungen der Steuerung eingeführt. Um eine proaktive Steuerung mit individueller Beeinflussung von Fahrzeugen zu ermöglichen, wird ein modellbasiertes Verfahren mit einem mikroskopischen Verkehrsflussmodell entwickelt. Auch nicht vernetzte Fahrzeuge werden durch dieses Verkehrsflussmodell berücksichtigt und eine Priorisierungsmöglichkeit für einzelne Fahrzeuge realisiert. Aufgrund der genannten Eigenschaften und einer knotenpunktbasierten Betrachtung ist das entwickelte Verfahren Typ 4 in Bild 3.3 zuzuordnen. Zusammengefasst werden folgende Elemente vereint:

- flexible, signalgruppenbasierte Signalisierung,
- gleichzeitige Optimierung von Schaltzeitpunkten und Annäherungsgeschwindigkeiten ausgestatteter Fahrzeuge auch unter Berücksichtigung des Rückstaus,
- Berücksichtigung unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren zur Priorisierung von Einzelfahrzeugen und
- systemimmanente Möglichkeit zur Vorhersage künftiger Schaltzeitpunkte.

Da eine größtmögliche Flexibilität der Steuerung unter Berücksichtigung der Anpassungsmöglichkeit der Annäherungsgeschwindigkeiten und damit eine Vorhersagbarkeit der Steuerung angestrebt wird, wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren im Folgenden mit dem Akronym preXible (engl.: predictive + flexible) bezeichnet.

Die Entwicklung von preXible orientiert sich an Methoden der Systemtheorie. Der Reglerentwurf basiert auf den von LUNZE [2010] beschriebenen Schritten:

1. Formulierung der Regelungsaufgabe:

Ziel der Regelung ist es, das System „signalisierter Knotenpunkt“ so zu beeinflussen, dass möglichst wenige signalbedingte Haltevorgänge erfolgen. Gleichzeitig soll die signalbedingte Verlustzeit von Fahrzeugen reduziert und die Kapazität des Knotenpunkts gesteigert werden. Dieses Ziel soll durch die Formulierung einer geeigneten Kostenfunktion erreicht werden. Ausgehend vom einzelnen Knotenpunkt sollen auch mehrere signalisierte Knotenpunkte in Straßennetzen geregelt werden. Die Regelung soll sich am System-

optimum orientieren, welches nicht zwangsläufig das optimale Verhalten für alle Nutzer zur Folge hat.

2. Auswahl der Regelgröße:

Als maßgebliche Regelgröße dient nicht unmittelbar die Anzahl der Halte, da Haltevorgänge aufgrund des unstetigen Verhaltens nur schwer mess- und modellierbar sind. Stattdessen dienen die Informationen stationärer Detektoren sowie fahrzeuggenerierte Daten dazu, die Positionen und Geschwindigkeiten der Einzelfahrzeuge mittels eines Verkehrsflussmodells zu schätzen. Um das Ziel der Regelung, die Reduktion der Anzahl der Halte, zu erreichen, werden Fahrzeuggeschwindigkeiten als maßgebliche Regelgröße ausgewählt. Dabei sollen Fahrzeuggeschwindigkeiten unterhalb einer einstellbaren Grenzggeschwindigkeit vermieden werden. Da ein dauerhaft stehendes Fahrzeug auf diese Weise ebenfalls zu einer großen Regelabweichung führt, werden auch die signalbedingten Verlustzeiten reduziert.

3. Auswahl der Stellgröße:

Neben den diskreten Stellgrößen der Signalzustände der einzelnen Signalgruppen dienen die Reduktionen von Fahrzeuggeschwindigkeiten oberhalb eines einstellbaren Schwellwerts als Stellgrößen zur Beeinflussung des Systemverhaltens. Da gleichzeitig mehrere Signalgruppen und Fahrzeuge betrachtet werden, liegt eine Mehrgrößenregelung vor.

4. Modellierung der Regelstrecke:

Der Verkehrsfluss wird mikroskopisch modelliert, um die Geschwindigkeiten einzelner Fahrzeuge berücksichtigen zu können. Signalgruppen werden als Elemente modelliert, welche den Verkehrsfluss in einzelnen Zufahrten sperren oder freigeben. Die mathematische Modellierung, auf welche ausführlich in Kapitel 4.2 eingegangen wird, erfolgt durch die Erweiterung des Optimierungsproblems um eine Vielzahl von Nebenbedingungen.

5. Reglerentwurf:

Beim Reglerentwurf sind zwei Anforderungen besonders zu berücksichtigen: die große Anzahl der Stellgrößen sowie die Vielzahl von Nebenbedingungen, die bei deren Ermittlung zu beachten ist. Da sich modellprädiktive Regelungen besonders gut für Mehrgrößenregelungen und die explizite Berücksichtigung von Nebenbedingungen eignen, wird ein Regler dieses Typs entworfen. Da das Modell bei diesem Ansatz unmittelbar in der Regelstrecke enthalten ist, besteht eine enge Verknüpfung zwischen dem Reglerentwurf und der Modellierung der Regelstrecke. Die Grundlagen der modellprädiktiven Regelung werden in Kapitel 4.1 erläutert.

6. Analyse des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises:

Nach dem Entwurf des Reglers ist zu überprüfen, inwiefern dieser die zuvor aufgestellten Güteforderungen erfüllt. Hierzu werden in Kapitel 4.7 zunächst theoretische Überlegungen angestellt, auf die die in Kapitel 5 vorgestellte Simulationsstudie folgt.

7. Realisierung des Reglers:

Das beschriebene Verfahren ist theoretischer Natur und bedarf Anpassungen für einen Betrieb in der Praxis. Wie eingangs erwähnt, wird preXible unabhängig von technischen Einschränkungen entwickelt, um das Optimierungspotential des Systems „signalisierter Knotenpunkt“ darzustellen. Eine Realisierung des Reglers im Feld wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht angestrebt. Jedoch wird in Kapitel 6 beschrieben, welche Anpassungen hierzu notwendig wären.

Bild 4.1 zeigt die Funktionsweise von preXible sowie die verwendeten Ein- und Ausgangsgrößen. Daten von stationärer Detektion genauso wie fahrzeuggenerierte Daten werden verwendet, um das Gesamtsystem „signalisierter Knotenpunkt“ optimal zu regeln. Ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell dient dazu, die Datenquellen zusammenzuführen und den Verkehrszustand zu schätzen und vorherzusagen. Durch geeignete Formulierung des Modells und die Kombination mit einer Optimierung wird das Konzept der modellbasierten prädiktiven Regelung umgesetzt, welches als Ergebnis optimierte Schaltzeitpunkte und Annäherungsgeschwindigkeiten für die betrachteten Fahrzeuge liefert. Die Berechnungsergebnisse werden im Rahmen der Simulation an die Fahrzeuge beziehungsweise die Lichtsignalanlage übermittelt und dort umgesetzt.

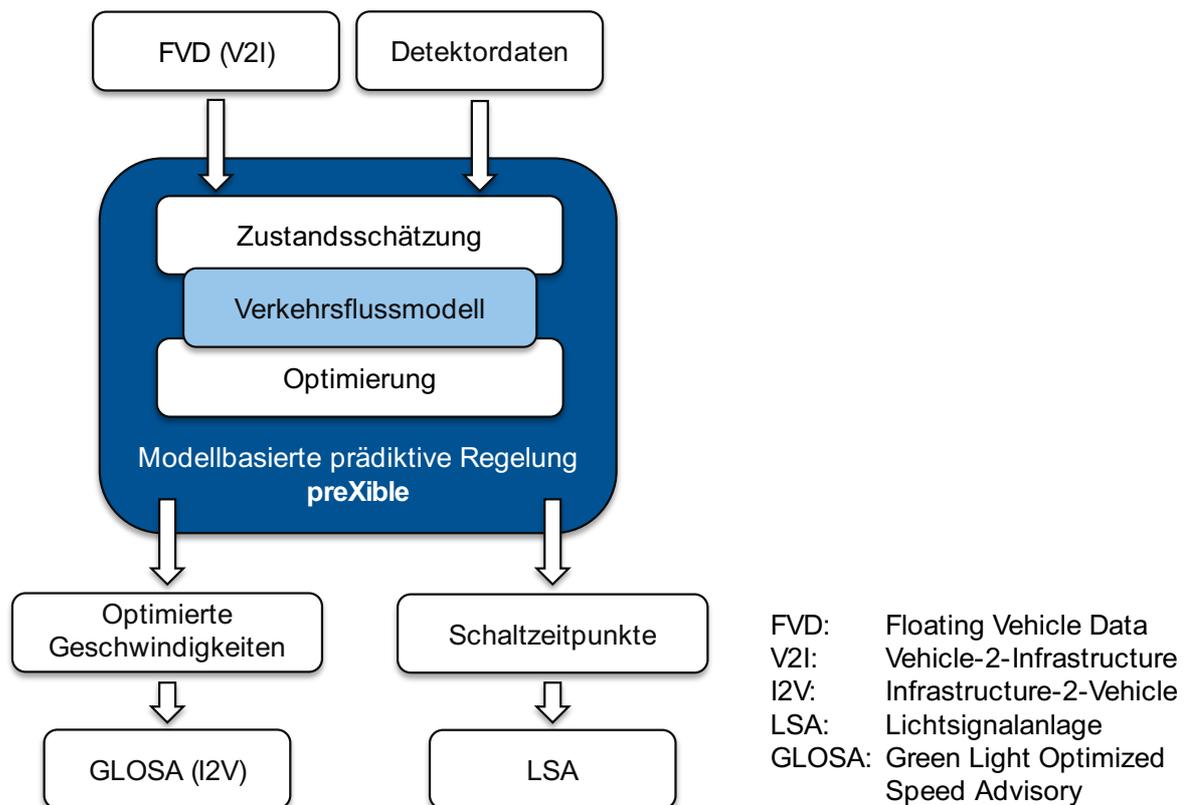


Bild 4.1 Übersicht über die Funktionsweise sowie Ein- und Ausgangsdaten von preXible

Im Folgenden wird zunächst die für preXible verwendete Methodik der modellbasierten prädiktiven Regelung beschrieben und kurz auf die verwendete Optimierungstechnik eingegangen. Anschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung der entwickelten Modellierung des Verkehrsablaufs, die von einer Optimierung am Knotenpunkt ausgeht. Daraufhin werden die Erweiterungen beschrieben, die für eine Verwendung in Netzen erfolgen. Abschließend wird die Funktionsweise und theoretische Leistungsfähigkeit von preXible untersucht.

4.1 Modellbasierte prädiktive Regelung

Mit der modellbasierten prädiktiven Regelung wird für preXible ein Ansatz gewählt, der auf dem Prinzip des rollenden Zeithorizonts beruht. Dieses Prinzip wird häufig mit Hilfe einer Analogie zum Führen eines Fahrzeugs erläutert, wie in Bild 4.2 gezeigt. Der Fahrer kennt zum Zeitpunkt k für einen beschränkten Zeitraum seine gewünschte Trajektorie und bestimmt, auf Grundlage eines mentalen Modells des Fahrzeugs, notwendige Betätigungen von Gas, Bremse und Lenkrad für den Zeitraum N_c im Voraus. Tatsächlich umgesetzt werden die Entscheidungen vom Fahrer allerdings nur für einen kurzen Zeitraum. Der Vorhersage- und Entscheidungsprozess des Fahrers beginnt daraufhin unter Berücksichtigung von neu wahrgenommenen Informationen erneut, wodurch ein rollender Zeithorizont entsteht. Während die einfache Vorhersage und Umsetzung der Steuerungsentscheidungen einer Steuerung entspräche, wird durch die kontinuierliche Vorhersage und Verarbeitung neuer Informationen ein geschlossener Regelkreis gebildet. Klassische rückführende Regler, wie beispielsweise PID Regler, ermitteln die Stellgrößen reaktiv, also basierend auf bereits geschehenen Abweichungen von der Referenztrajektorie. Übertragen auf die Analogie des Fahrzeugführens würde dies bedeuten, dass der Fahrer lediglich Informationen aus dem Rückspiegel verarbeitet, wie es in Bild 4.2 gestrichelt dargestellt ist.

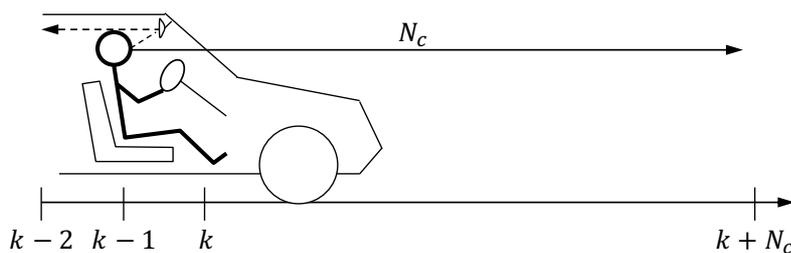


Bild 4.2 Analogie von Fahrzeugführung und Regelungsstrategien nach CAMACHO & BORDONS [2004]

Das beschriebene Prinzip, bei dem mit Hilfe eines Modells das Verhalten eines Systems oder Prozesses vorhergesagt und optimierte Steuerungsentscheidungen auf Basis dieser Vorhersage ermittelt werden, ist zunächst generisch. Wie am obigen Beispiel gezeigt, kann das Vorgehen menschliches Handeln bestimmen, es kommt aber auch bei einigen der in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren zur Lichtsignalsteuerung zum Einsatz. Wie BURGER ET AL. [2013] bemerken, kommt das Prinzip beispielsweise auch bei SCOOT [ROBERTSON, 1986] zum Tragen, obgleich MPC nicht explizit genutzt wird.

Für die Verwendung von MPC hat sich eine breite theoretische Basis entwickelt, wie sie beispielsweise von CAMACHO & BORDONS [2004] ausführlich beschrieben wird. Auf der dort gegebenen Beschreibung baut die nachfolgende zusammenfassende Darstellung auf, die in Bild 4.3 inklusive der verwendeten Formelzeichen illustriert ist:

- MPC nutzt ein mathematisches Modell, um den Systemzustand x über eine Reihe von Zeitschritten vorherzusagen (Vorhersagehorizont N_p).
- Für eine festgelegte Anzahl von Zeitschritten wird eine Sequenz optimaler Stellgrößen u berechnet, indem eine Zielfunktion minimiert wird (Steuerhorizont $N_c \leq N_p$).
- Nur die erste Stellgröße der Sequenz u wird zum Zeitschritt k umgesetzt und durch erneute Berechnung zum Zeitschritt $k + 1$ kommt das Prinzip des rollenden Zeithorizonts zum Tragen. Während des Zeitschritts k bleibt der Steuereingriff konstant.
- Nebenbedingungen, wie beispielsweise eine Beschränkung der Stellgrößen, können im Rahmen der Optimierung direkt berücksichtigt werden.
- Stell- und Zustandsgrößen können auf ganzzahlige Werte beschränkt werden, beispielsweise, um Schalter abzubilden. In Kombination mit kontinuierlichen Größen können so Regelungen für hybride Systeme entworfen werden.
- Eine Mehrgrößenregelung kann vergleichsweise einfach umgesetzt werden, um Systeme zu regeln, bei denen mehrere Regelgrößen und Stellgrößen untereinander verknüpft sind.

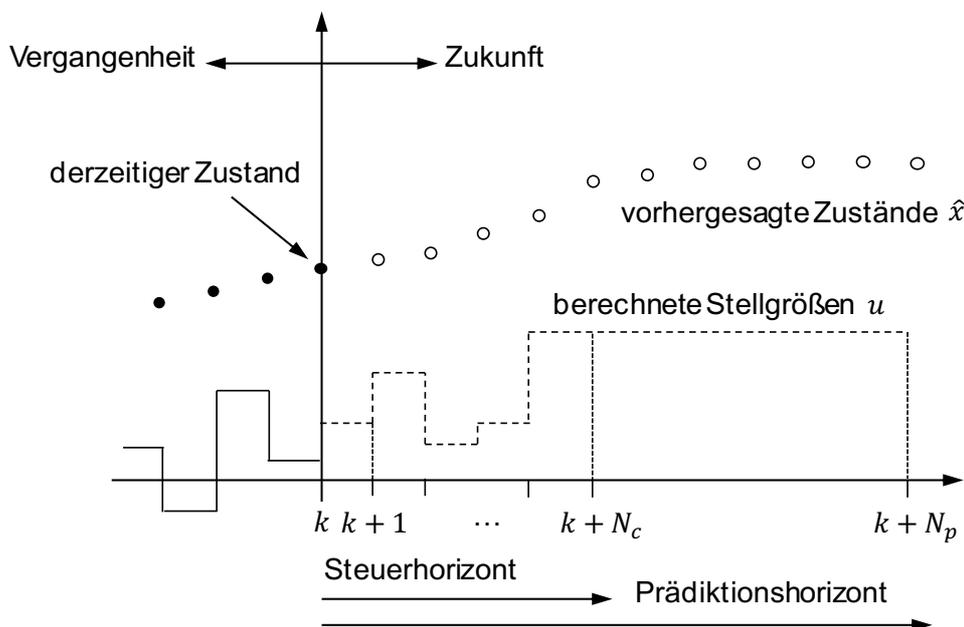


Bild 4.3 Grafischer Überblick über die Funktionsweise von MPC sowie die verwendeten Formelzeichen nach BURGER ET AL. [2013]

Zur Bestimmung der Sequenz der optimalen Stellgrößen muss eine Zielfunktion aufgestellt werden, welche die Steuereingriffe und die Systemzustände mit Gewichtungen verknüpft.

Diese Verknüpfung soll einen zu minimierenden, skalaren Kostenwert ergeben. Da es sich bei den Steuereingriffen und Systemzuständen jeweils um Vektoren handelt, bietet sich die Verwendung von Vektornormen an. Fasst man die Stell- und Zustandsgrößen zu einem Vektor $\eta = [x \quad u]^T$ zusammen ergibt sich die Zielfunktion:

$$\text{minimiere } J = \|\eta\|_Q^p \quad (4.1)$$

J : Kosten

$\eta_{(n,1)}$: Entscheidungsvariablen

p : Norm

$Q_{(n,n)}$: Gewichtungsmatrix

Häufig werden quadratische Kostenfunktionen aufgrund energetischer Betrachtungen bevorzugt, welche sich aus der Verwendung der 2-Norm ergeben:

$$J = \|\eta\|_Q^2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \eta_i^2 Q_{ii}} \quad (4.2)$$

Weitere im Rahmen von MPC verwendete Normen sind die 1-Norm aus Gleichung (4.3) sowie die ∞ -Norm aus Gleichung (4.4) :

$$J = \|\eta\|_Q^1 = \sum_{i=1}^n |\eta_i| Q_{ii} \quad (4.3)$$

$$J = \|\eta\|_Q^\infty = \max_{i=1 \dots n} |\eta_i| Q_{ii} \quad (4.4)$$

Bei Verwendung der ∞ -Norm wird lediglich die größte Abweichung vom Sollwert berücksichtigt, während das restliche Verhalten nicht direkt berücksichtigt wird [CAMACHO & BORDONS, 2004]. Weiterhin lässt sich Gleichung (4.2) in die Standardform der quadratischen Optimierung überführen, wie sie in Gleichung (4.5) gegeben ist. Dagegen lassen sich Gleichungen (4.3) und (4.4) als lineare Optimierungsprobleme formulieren, deren Standardform in Gleichung (4.7) gegeben ist. Dies ist insofern vorteilhaft, als dass sich lineare Optimierungsprobleme prinzipiell schneller lösen lassen als quadratische. Unterliegen die Entscheidungsvariablen Nebenbedingungen und sind ausgewählte Entscheidungsvariablen auf ganzzahlige Werte beschränkt, so ergibt sich ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem (engl.: Mixed Integer Programming, kurz: MIP). Für den quadratischen Fall (engl.: Mixed Integer Quadratic Programming, kurz: MIQP) ergibt sich:

$$\text{minimiere } J = \frac{1}{2} \eta^T H \eta + f^T \eta \quad (4.5)$$

u.d.N.

$$M \eta \leq g \quad (4.6)$$

$\eta_{(n,1)}$: Entscheidungsvariablen mit $\eta_j \in \mathbb{Z}$, $j = 1 \dots n$

$H_{(n,n)}$: quadratische Gewichtungsmatrix

$f_{(n,1)}$: linearer Gewichtungsvektor

$M_{(m,n)}$: Nebenbedingungsmatrix für Ungleichungen

$g_{(m,1)}$: Nebenbedingungsvektor für Ungleichungen

Sind die Einträge der quadratischen Gewichtungsmatrix H null, ergibt sich ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (engl.: Mixed Integer Linear Programming, kurz: MILP):

$$\text{minimiere } J = f^T \eta \quad (4.7)$$

Mittels der in H beziehungsweise f vorgenommenen Gewichtungen werden die Entscheidungsvariablen, welche die gesuchte Sequenz der optimalen Stellgrößen beinhaltet, derart ermittelt, dass die sich ergebenden Kosten J minimal sind. Dies geschieht unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen der Form von Ungleichung (4.6) sowie der Beschränkung auf ganzzahlige Werte für ausgewählte Entscheidungsvariablen. Zusätzlich zu Ungleichheitsbedingungen der Form (4.6) sind auch solche mit umgekehrtem Vorzeichen sowie Gleichheitsnebenbedingungen möglich:

$$R\eta \geq l \quad (4.8)$$

$$E\eta = d \quad (4.9)$$

$R_{(m,n)}$: Nebenbedingungsmatrix für Ungleichungen

$l_{(m,1)}$: Nebenbedingungsvektor für Ungleichungen

$E_{(m,n)}$: Nebenbedingungsmatrix für Gleichungen

$d_{(m,1)}$: Nebenbedingungsvektor für Gleichungen

Zur Lösung des Optimierungsproblems können Nebenbedingungen der Form (4.8) und (4.9) in Ungleichungen der Form (4.6) überführt werden. Der Verständlichkeit halber werden im Folgenden jedoch alle drei Formulierungen genutzt.

Ist das Modell in Zustandsraumdarstellung formuliert, so kann es durch Substitution direkt in den Gewichtungsmatrizen berücksichtigt werden, wie dies beispielsweise von WANG [2009] beschrieben und für die Lichtsignalsteuerung vom Autor der vorliegenden Arbeit in einer früheren Veröffentlichung angewandt wird [KATHS, 2014]. Um die mit der Formulierung des Modells in Zustandsraumdarstellung einhergehenden Einschränkungen zu vermeiden, ist es alternativ auch möglich, das Systemverhalten durch die Nebenbedingungen abzubilden, wie es in Abschnitt 4.2 genauer erläutert wird.

Durch die Möglichkeit, Nebenbedingungen und ganzzahlige Variablen einzuführen, ist es auch möglich, logisches Systemverhalten abzubilden. BEMPORAD & MORARI [1999] liefern hierzu eine Grundstruktur, die es erlaubt, gemischte logisch-dynamische (engl.: mixed logical dynamical, kurz: MLD) Systeme abzubilden. Hierzu wird der Vektor der Entscheidungsvariablen

um Hilfsvariablen erweitert, wie das folgende Beispiel [BEMPORAD & MORARI, 1999] zeigt. Ein fiktives zu regelndes System weise in Abhängigkeit des Wertes der Zustandsvariablen, eine unterschiedliche Dynamik auf.

$$x(k+1) = \begin{cases} 0,8x(k) + u(k) & \text{wenn } x(k) \geq 0 \\ -0,8x(k) + u(k) & \text{wenn } x(k) < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

x : Zustandsvariable mit $x \in [-10,10]$ u : Stellgröße mit $u \in [-1,1]$

k : diskreter Zeitschritt

Die Bedingung aus (4.10) kann nun mit der binären Hilfsvariablen $\delta(k) \in \{0,1\}$ verknüpft werden, sodass $\delta(k) = 1$ nur dann gilt, wenn $x(k) \geq 0$. Damit lassen sich die beiden Gleichungen aus (4.10) wie folgt in einer Gleichung darstellen:

$$x(k+1) = 1,6\delta(k)x(k) - 0,8x(k) + u(k) \quad (4.11)$$

Um nun die Multiplikation der beiden Entscheidungsvariablen aufzulösen, wird eine kontinuierliche Hilfsvariable $z(k) = \delta(k)x(k)$ eingeführt, womit sich aus (4.11) die folgende Gleichung ergibt:

$$x(k+1) = 1,6z(k) - 0,8x(k) + u(k) \quad (4.12)$$

Der Mehrwert, den die Arbeit von BEMPORAD & MORARI [1999] liefert, liegt nicht in dieser Umformung, sondern darin, dass Regeln formuliert werden, wie logische Verknüpfungen in lineare Ungleichungen, also Nebenbedingungen der Form (4.6), überführt werden können. Zu diesen logischen Verknüpfungen zählen beispielsweise die oben genannte „dann und nur dann, wenn“ Verknüpfung oder die Multiplikation mit der binären Variablen. So müssen die folgenden Nebenbedingungen erfüllt werden, damit Gleichung (4.12) das Systemverhalten aus (4.10) korrekt beschreibt:

$$-s\delta(k) \leq x(k) - s \quad (4.13)$$

$$-(S + \varepsilon)\delta(k) \leq -x(k) - \varepsilon \quad (4.14)$$

$$z \leq S\delta(k) \quad (4.15)$$

$$z \geq s\delta(k) \quad (4.16)$$

$$z \leq x(k) - s(1 - \delta(k)) \quad (4.17)$$

$$z \geq x(k) - S(1 - \delta(k)) \quad (4.18)$$

S : obere Schranke d. Zustandsvariablen, hier: 10 δ : binäre Hilfsvariable

s : untere Schranke d. Zustandsvariablen, hier: -10 z : kontinuierliche Hilfsvariable

ε : kleiner, positiver, skalarer Wert

Mit MPC besteht eine leistungsfähige Möglichkeit zur Regelung komplexer Systeme, einschließlich hybrider Systeme und Mehrgrößensysteme. Die oben genannten Vorteile und Eigenschaften gehen aber mit zwei hauptsächlichen Nachteilen einher, welche in der notwendigen Kenntnis eines Modells des zu regelnden Systems sowie dem hohen Rechenaufwand bestehen. Dieser entsteht aus der Neuberechnung der Stellgrößen zu jedem Zeitschritt, welche durch die Minimierung einer Kostenfunktion erfolgt, wobei der Rechenaufwand durch die Formulierung von Randbedingungen und die Verwendung ganzzahliger Entscheidungsvariablen weiter steigt. Die ersten MPC Anwendungen haben ihren Ursprung in der Regelung petrochemischer Prozesse und wurden in den 1970er Jahren entwickelt. Hierbei kommen in der Regel Abtastzeiten von 10 s bis 5 min zum Einsatz. Es handelt sich also um relativ träge Prozesse [DITTMAR & PFEIFFER, 2006]. Wie die Autoren schreiben, entwickelte sich nach den ersten industriellen Anwendungen auch akademisches Interesse und die Anwendung in anderen Domänen, zu denen auch das Verkehrsmanagement zählt, begann. Durch die Entwicklungen im Bereich der Rechenleistung und verschiedene MPC Varianten, deren Ziel die Reduktion des Rechenaufwands ist, wird MPC inzwischen auch für Systeme mit höherer Dynamik eingesetzt. BURGER ET AL. [2013] geben einen Überblick über modellbasierte Regelungsverfahren im Verkehrsmanagement und nennen neben dem hohen Rechenaufwand auch die häufig sehr komplexe Implementierung als praktischen Nachteil von MPC.

Die in diesem Abschnitt erläuterten Eigenschaften von MPC zeigen die Eignung dieser Methodik zur Entwicklung des Reglers gemäß der formulierten Regelungsaufgabe. So führt die Möglichkeit der Umsetzung einer Mehrgrößenregelung dazu, dass die stark miteinander verkoppelten Signalisierungszustände einzelner Signalgruppen sowie Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten gemeinsam betrachtet werden können. Weiterhin wird durch die Formulierung von Nebenbedingungen eine Berücksichtigung von gesetzlichen Forderungen, beispielsweise nach Mindestfreigabezeit und Zwischenzeit, ermöglicht. Außerdem lässt sich eine Untergrenze für die Geschwindigkeitshinweise festlegen, um die Akzeptanz von Fahrern zu berücksichtigen. Auch ist es durch die Vorgabe von Gewichtungen in der Kostenfunktion möglich, Prioritätslevel für einzelne Fahrzeuge vorzugeben und damit die Lichtsignalsteuerung zur Umsetzung verkehrspolitischer Ziele zu nutzen. Bild 4.4 verdeutlicht die Verwendung von Nebenbedingungen und Kostenfunktion anhand des Regelkreises der modellprädiktiven Regelung.

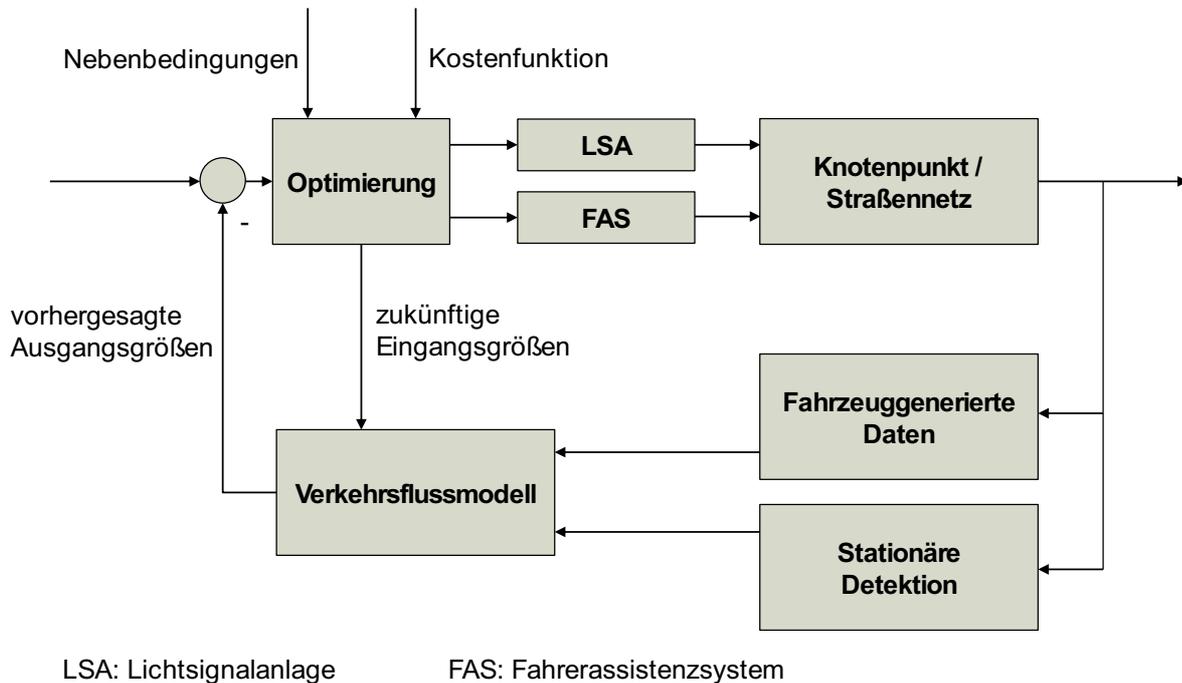


Bild 4.4 Regelkreis der modellbasierten prädiktiven Regelung am Beispiel der kooperativen Lichtsignalsteuerung

Weiterhin ist die Möglichkeit, hybride Systeme regeln zu können, für die Entwicklung von preXible unabdingbar. So stehen mit den Lichtsignalen binäre Stellgrößen (Freigabe oder Sperrung) zur Verfügung, während die Fahrzeuggeschwindigkeiten als kontinuierliche Variablen betrachtet werden. MLD Formulierungen werden für die Entwicklung von preXible genutzt, um logische Verknüpfungen abbilden zu können. Da das Verfahren preXible losgelöst von technischen Restriktionen entwickelt wird, spielt der Rechenaufwand eine untergeordnete Rolle. Es sei an dieser Stelle allerdings angemerkt, dass eine Echtzeitfähigkeit nicht durchgehend gewährleistet ist.

4.1.1 Optimierung

Die Begriffe Optimierung und Verbesserung werden im allgemeinen Sprachgebrauch häufig synonym verwendet. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Optimierung dagegen im mathematischen Sinne verwendet. Er beschreibt also stets die Minimierung einer Kostenfunktion beziehungsweise die Maximierung einer Nutzenfunktion. Da ein Maximierungsproblem über Vorzeichenwechsel in ein Minimierungsproblem überführt werden kann, wurde zuvor und wird im Folgenden lediglich der Begriff Minimierung verwendet.

Die in Kapitel 2 beschriebenen modellbasierten Verfahren nutzen in der Regel ein Optimierungsverfahren, um mit dessen Hilfe einzelne oder eine Kombination mehrerer Verkehrswirkungen wie die Anzahl der Halte oder die Wartezeit zu minimieren. So unterschiedlich, wie die

Herangehensweise der zahlreichen modellbasierten Verfahren zur Lichtsignalsteuerung hinsichtlich der gewählten Modellierung, der Systemarchitektur oder der beeinflussten Stellgrößen ist, so groß ist auch die Auswahl an Optimierungsverfahren, die für die Lichtsignalsteuerung verwendet werden können. Das Verfahren der Optimierung ist zwar nicht Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit, dennoch soll mit den folgenden Ausführungen eine kontextuelle Einordnung der verwendeten Methode ermöglicht werden. Die Beschreibung orientiert sich an den zuvor beschriebenen Anforderungen, die sich durch die Funktionsweise von preXible ergeben.

BRAUN [2008] teilt die Optimierungsverfahren in mathematische und heuristische Verfahren ein. Bei den heuristischen Verfahren kommen Erfahrungswerte und Expertenwissen zum Einsatz, wobei das Auffinden des globalen Optimums in der Regel nicht garantiert werden kann. Viele heuristische Verfahren beruhen auf Naturphänomenen, wie auch der von BRAUN [2008] eingesetzte genetische Algorithmus, der zur Auswahl von Signalplänen für das Steuerungsverfahren BALANCE [FRIEDRICH, 1999] dient. Beim genetischen Algorithmus werden evolutionäre Vorgänge wie Selektion, Reproduktion, Rekombination und Mutation nachgeahmt. Für die unterschiedlichen Lösungen, die als Individuen bezeichnet werden, wird ein Fitnesswert ermittelt. In einem iterativen Vorgehen wird das Individuum mit dem besten Fitnesswert ausgewählt. Durch dieses Bewertungsvorgehen ist zwar eine Kostenfunktion notwendig, jedoch keine geschlossene mathematische Formulierung des Optimierungsproblems. So können „alle Formen von Bewertungsmodellen eingesetzt werden“ [BRAUN, 2008].

Als mathematische Verfahren werden dagegen Verfahren bezeichnet, welche einen Optimalitätsnachweis der Lösung erlauben. Hierzu zählen beispielsweise analytische Verfahren, bei denen Minima mit Hilfe von Ableitungen gefunden werden. Sind allerdings Nebenbedingungen vorhanden, so sind analytische Verfahren wie das Gradientenverfahren nicht einsetzbar. Zur Lösung linearer Zielfunktionen unter Berücksichtigung von Randbedingungen wurde daher das Simplex-Verfahren entwickelt, welches beispielsweise von KALLRATH [2013] beschrieben wird. Ausgehend von einer Anfangslösung werden Basisvariablen bestimmt, deren Werte größer als null sind. Die restlichen Variablen nehmen den Wert null an und werden Nichtbasisvariablen genannt. Anschließend wird untersucht, wie sich die Erhöhung von Nichtbasisvariablen auf den Wert der Zielfunktion auswirkt. Bei einer Verbesserung der Zielfunktion, wird die entsprechende Nichtbasisvariable in die Basis aufgenommen. Eine Basisvariable wird im Gegenzug zu einer Nichtbasisvariablen und das Gleichungssystem entsprechend umgeformt. Dieses Vorgehen wird iteriert, bis keine Verbesserung der Zielfunktion durch die Aufnahme von Basisvariablen mehr möglich ist. Als Ergebnis erhält man so das Optimum der Zielfunktion unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen. Beschränken die Nebenbedingungen die Zielfunktion nicht oder ist das Gleichungssystem unlösbar, wird dies durch den Algorithmus ebenfalls ermittelt. Damit handelt es sich beim Simplex-Verfahren um ein mathematisches Verfahren, obgleich die Reihenfolge der Auswahl der Nichtbasisvariablen zur Aufnahme in die Basis heuristisch vorgenommen wird.

Zwar können mit Hilfe des Simplex-Verfahrens Nebenbedingungen berücksichtigt werden, eine ganzzahlige oder gemischt-ganzzahlige Optimierung ist aber nicht direkt umsetzbar. Da die gemischt-ganzzahlige Optimierung einen eigenen Forschungsbereich der Mathematik darstellt, besteht eine große Auswahl an weiterführender Literatur zum Thema. Eine praxisorientierte Einführung in gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung, die als Grundlage für die folgende zusammenfassende Darstellung dient, liefert KALLRATH [2013]. Zu den mathematisch exakten Verfahren zählen die Verfahren der Enumeration. Bei der vollständigen Enumeration werden alle Kombinationen zulässiger, ganzzahliger Variablen untersucht. Im gemischt-ganzzahligen Fall wird nach Fixierung der ganzzahligen Variablen eine Optimierung der kontinuierlichen Variablen, beispielsweise mit dem zuvor genannten Simplex-Verfahren, durchgeführt. Da die vollständige Enumeration bei vielen ganzzahligen Variablen mit großem Rechenaufwand verbunden ist, können alternativ begrenzte Enumerationsverfahren angewandt werden. Zu diesen zählt das Branch-and-Bound-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird das ursprüngliche Optimierungsproblem in mehrere Unterprobleme verzweigt (engl.: branch), bei welchen die Ganzzahlbedingungen relaxiert werden. Diese Unterprobleme werden ebenfalls mit Hilfe des Simplex-Verfahrens gelöst. Durch die Lösung der Unterprobleme, die auch Knoten genannt werden, werden Schranken (engl.: bounds) ermittelt, wobei die untere Schranke die optimalen Kosten ohne Berücksichtigung der Forderung nach Ganzzahlen bildet. Die obere Schranke stellt die zur aktuellen Laufzeit gefundene beste ganzzahlige Lösung dar. Die Differenz zwischen diesen beiden Lösungen wird als Ganzzahligkeitslücke bezeichnet. Die Kenntnisse dieser Schranken helfen dabei, bestimmte Verzweigungen nicht weiterzuverfolgen, indem der Suchbaum an geeigneten Stellen abgeschnitten wird (engl.: pruning). Auch beim Branch-and-Bound-Verfahren kommen Heuristiken zum Einsatz, beispielsweise bei der Auswahl des als nächstes zu untersuchenden Knotens.

Wie zuvor beschrieben, ist zur Formulierung des Optimierungsproblems für das Steuerungsverfahren preXible nicht nur die Berücksichtigung von Nebenbedingungen entscheidend, sondern auch die Beschränkung auf ganzzahlige Werte für ausgewählte Entscheidungsvariablen. Da derartige gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme für viele Anwendungen relevant sind, bestehen zahlreiche kommerzielle und frei verfügbare Softwarelösungen. Zur Lösung des Optimierungsproblems wurde für preXible die kommerziell verfügbare Software CPLEX der Firma IBM ausgewählt. Diese bietet die Möglichkeit zur Lösung von linearen und quadratischen gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblemen. Die Software vereint unter anderem die oben genannten Verfahren Simplex und Branch-and-Bound sowie verschiedene Heuristiken [KLOTZ & NEWMAN, 2013]. CPLEX stellt Schnittstellen für verschiedene Programmiersprachen zur Verfügung, sodass das gemäß Gleichungen (4.5) bis (4.9) formulierte Optimierungsproblem dem Lösungsalgorithmus übergeben werden kann. Als Berechnungsergebnis werden die Entscheidungsvariablen η sowie die Kosten J zurückgegeben.

4.2 Modellierung des Verkehrsflusses zur prädiktiven Regelung von Knotenpunkten

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Grundlagen der modellprädiktiven Regelung wird nun die für preXible entwickelte Modellierung des Verkehrsflusses beschrieben. Die durch die Optimierung zu ermittelnden Entscheidungsvariablen enthalten für jeden Zeitschritt des Steuerhorizonts die Zustandsvariablen, die Stellgrößen und Hilfsvariablen für logische Verknüpfungen. Diese Variablen werden für jedes einzelne betrachtete Fahrzeug bestimmt, die Modellierung durch preXible ist also mikroskopisch. BURGER ET AL. [2013] merken an, dass mikroskopische Modellierung zwar das Verhalten von Einzelfahrzeugen abbilden kann, in der Regel jedoch zu größeren Rechenzeiten führt als eine makroskopische Modellierung. Da der Rechenaufwand bei der Entwicklung von preXible nicht im Vordergrund steht, sondern stattdessen die gleichzeitige Optimierung von Signalisierung und Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten angestrebt wird, wird eine mikroskopische Modellierung vorgenommen. Bild 4.5 illustriert die maßgeblichen Entscheidungsvariablen von preXible anhand einer Zufahrt mit zwei Fahrzeugen bei einer Berücksichtigung von maximal N Fahrzeugen.

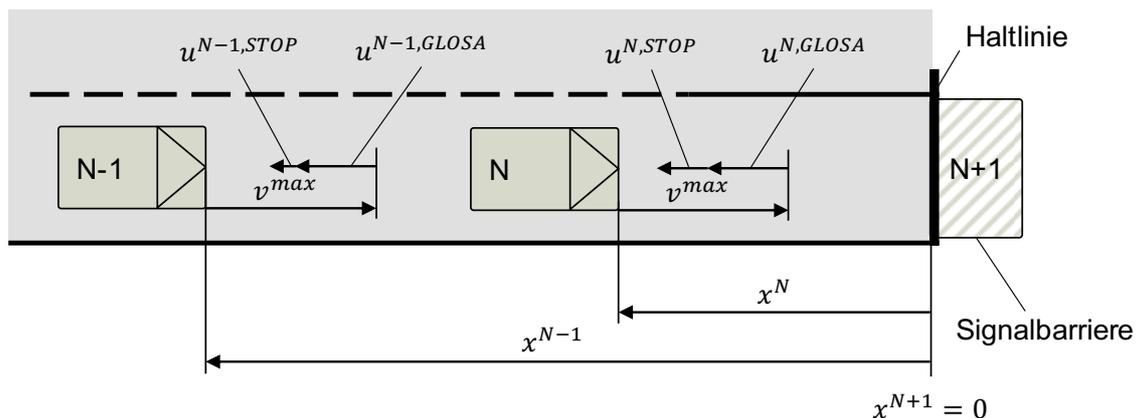


Bild 4.5 Entscheidungsvariablen von preXible für zwei von maximal N Fahrzeugen in einer rot signalisierten Zufahrt

Die Variable x^n beschreibt den Abstand des n -ten Fahrzeugs von der Haltlinie, wobei $n \in \mathbb{N} \mid 1 \leq n \leq N$ gilt. Der Signalgeber der Zufahrt wird wie ein zusätzliches Fahrzeug an der Stelle $N + 1$ modelliert, welches sich bei rotem Signal wie in Bild 4.5 mit $x^{N+1} = 0$ auf der Haltlinie befindet und somit die Zufahrt sperrt. Bei grünem Signal nimmt die Variable x^{N+1} einen betragsmäßig großen negativen Wert an, womit die Zufahrt freigegeben ist. Dieses Element, das der Abbildung des Signalgebers dient, wird im Folgenden als Signalbarriere bezeichnet. Da Signalisierung und Geschwindigkeitshinweise gemeinsam optimiert werden sollen, stellen bei preXible die Geschwindigkeitsreduktionen der Fahrzeuge ebenfalls Entscheidungsvariablen dar. Um den Wertebereich der Geschwindigkeitshinweise beschränken zu können und gegenüber einer darüberhinausgehenden Geschwindigkeitsreduktion weniger

stark zu bestrafen, wird die Geschwindigkeitsreduktion eines Fahrzeugs in zwei Anteile aufgeteilt. So beschreibt $u^{n,GLOSA}$ die erwünschte Geschwindigkeitsreduktion des n -ten Fahrzeugs durch einen Geschwindigkeitshinweis, während $u^{n,STOP}$ eine unerwünschte, weitergehende Reduktion beispielsweise durch ein rotes Signal oder ein stromabwärts befindliches Fahrzeug beschreibt. Bild 4.5 zeigt mit den beiden Anteilen der Geschwindigkeitsreduktion die Stellgrößen und zusätzlich die Maximalgeschwindigkeit als voreingestellten Parameter.

Die in den vorigen Erläuterungen bereits verwendete Notation der Variablen mit hochgestellter Angabe der Position und der hochgestellten Erläuterung zum Hauptsymbol wird im Folgenden weiterhin verwendet. Bei zeitveränderlichen Variablen wird zusätzlich tiefgestellt der Prädiktionsschritt sowie der aktuell betrachtete Zeitschritt getrennt durch einen senkrechten Strich angegeben. Zählvariablen werden dabei mit dem Kleinbuchstaben der jeweiligen Obergrenze angegeben, beispielsweise n_c als einzelne Prädiktionsschritte des Steuerhorizonts N_c . Aufgrund der häufigen Verwendung von Schleifen bei der Implementierung von preXible wird im Folgenden die untenstehende kompakte Notation verwendet:

$$\{1; \dots; N\} = \{n \in \mathbb{N} \mid 1 \leq n \leq N\} \quad (4.19)$$

Bild 4.6 verdeutlicht die verwendete Notation. Sind die angegebenen Zusammenhänge für alle Fahrzeuge $n \in \{1; \dots; N\}$ identisch, so entfällt die Angabe der Position der Übersicht halber an geeigneten Stellen.

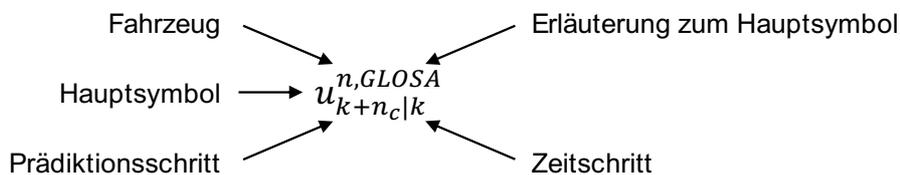


Bild 4.6 Erläuterung zur Notation der verwendeten Variablen

Vom Autor dieser Arbeit wurde eine zu preXible verwandte Steuerung in Zustandsraumdarstellung [KATHS, 2014] beschrieben. Die Nebenbedingungen enthalten in diesem Fall lediglich Beschränkungen beispielsweise der Amplitude oder der Veränderungsrate der Stellgrößen, nicht jedoch das Verhalten der Regelstrecke selbst. Um die aus der Verwendung der Zustandsraumdarstellung resultierenden Einschränkungen zu vermeiden, erfolgt die Modellierung in dieser Arbeit aber ausschließlich durch die Formulierung von Nebenbedingungen. Die durch die Gleichungen (4.5) beziehungsweise (4.7) gegebenen Kostenfunktionen erlauben ohne Nebenbedingungen zunächst die beliebige Veränderung aller Entscheidungsvariablen und erst durch die Formulierung von Nebenbedingungen wird das Modellverhalten erwirkt. Im Folgenden wird die mikroskopische Modellierung des Verkehrsflusses zur modellprädiktiven Regelung von Knotenpunkten beschrieben, wozu die mathematischen Formulierungen der relevanten Nebenbedingungen präsentiert werden.

Bewegung der Einzelfahrzeuge

Die folgende Gleichheitsnebenbedingung beschreibt den Abstand der Fahrzeuge zur Haltlinie in aufeinanderfolgenden Zeitschritten. Für den ersten Schritt wird bei vernetzten Fahrzeugen der aktuelle Messwert der Position herangezogen, für nicht vernetzte Fahrzeuge wird der Abstand verwendet, der mit Hilfe des Modells zum letzten Zeitschritt ermittelt wurde:

$$x_{k+n_c|k} = \begin{cases} x_{k|k-1} - (v^{max} - u_{k+n_c|k}^{GLOSA} - u_{k+n_c|k}^{STOP}) \cdot \Delta t & , \text{wenn } n_c = 1 \\ x_{k+n_c-1|k} - (v^{max} - u_{k+n_c|k}^{GLOSA} - u_{k+n_c|k}^{STOP}) \cdot \Delta t & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.20)$$

Dies gilt für alle $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$.

Der Abstand zur Haltlinie entspricht damit dem Abstand zur Haltlinie im vorausgegangen Zeitschritt, abzüglich der in diesem Zeitschritt zurückgelegten Strecke. Diese ergibt sich aus der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit abzüglich der Geschwindigkeitsreduktionen durch Geschwindigkeitshinweise und sonstige Reduktionen multipliziert mit der Länge des Zeitschritts Δt . Typischerweise sollte für die Maximalgeschwindigkeit die zulässige Höchstgeschwindigkeit eingestellt werden. Auch wenn im realen System oder der Simulation überhöhte Geschwindigkeiten auftreten, ist es sinnvoll, diese nicht im Modell der Regelung zu berücksichtigen. So wird, insbesondere bei aufeinanderfolgenden Knotenpunkten, eine Belohnung überhöhter Geschwindigkeit vermieden. Dies geschieht in Anlehnung an die Planung statischer Koordinierungen, bei der Progressionsgeschwindigkeiten oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nicht zugrunde gelegt werden sollten. Für nicht vernetzte Fahrzeuge kann zudem ein niedrigerer Wert $v^{max, nov2X}$ genutzt werden, um bei der Bestimmung von Freigabezeitbeginn und -ende auch langsamere Fahrzeuge berücksichtigen zu können.

Position der Signalbarriere

Wie zuvor beschrieben, wird der Signalgeber wie ein Fahrzeug modelliert, welches sich bei rotem Signal auf der Haltlinie und bei grünem Signal weit stromabwärts befindet. Hierzu wird das Steuersignal auf ein binäres Signal beschränkt:

$$0 \leq u_{k+n_c|k}^{LSA} \leq 1 \quad , u_{k+n_c|k}^{LSA} \in \mathbb{N} \quad (4.21)$$

$u_{k+n_c|k}^{LSA} = 0$ entspricht einem grünen Signal, während $u_{k+n_c|k}^{LSA} = 1$ einem roten Signal entspricht. Die Bewegungsgleichung für die Signalbarriere mit S als oberer Schranke lautet:

$$x_{k+n_c|k}^{N+1} = S \cdot u_{k+n_c|k}^{LSA} - S \quad (4.22)$$

Minimalabstand zwischen zwei Fahrzeugen

Um den minimalen Abstand d^{min} zwischen zwei Fahrzeugen zu beschränken, wird folgende Ungleichheitsbedingung eingeführt:

$$x_{k+n_c|k}^n \geq x_{k+n_c|k}^{n+1} + d^{min} \quad , n \in \{1; \dots; N-1\} \quad (4.23)$$

Durch diese Nebenbedingung wird das Überholen von Fahrzeugen in der Zufahrt zur Lichtsignalanlage nicht modelliert und eventuell auftretende Überholvorgänge werden somit nicht durch das Modell vorhergesagt.

Minimalabstand von Fahrzeugen zum Signalgeber

Ähnlich wie der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen, wird der Abstand zum Signalgeber d^{LSA} beschränkt. Gegenüber dem Minimalabstand zwischen zwei Fahrzeugen ist jedoch zusätzlich zu beachten, dass der Abstand zum Signalgeber nur dann einzuhalten ist, wenn das betrachtete Fahrzeug die Haltlinie noch nicht überfahren hat. Würde diese logische Bedingung nicht eingeführt, wäre ein Zurückschalten von grün nach rot während des Steuerhorizonts nicht möglich, falls ein Fahrzeug das grüne Signal im Intervall des Steuerhorizonts überfährt.

$$x_{k+n_c|k} \geq \begin{cases} x_{k+n_c|k}^{N+1} + d^{LSA} & , \text{wenn } x_{k+n_c|k} > 0 \\ x_{k+n_c|k}^{N+1} + d^{LSA} - S & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.24)$$

Zur Formulierung dieser logischen Bedingung werden die in Kapitel 4.1 eingeführten Techniken von BEMPORAD & MORARI [1999] genutzt. Die obenstehende Ungleichung (4.24) wird hierzu zunächst um die Hilfsvariable aux^{HL} ergänzt und wie folgt umformuliert:

$$x_{k+n_c|k} \geq x_{k+n_c|k}^{N+1} + d^{LSA} - S \cdot (1 - aux^{n,HL}) \quad (4.25)$$

Dabei wird aux^{HL} analog zu (4.21) als binäre Variable festgelegt. Die Hilfsvariable aux^{HL} nimmt den Wert 0 an, wenn das betrachtete Fahrzeug die Haltlinie überfahren hat, das heißt, der Abstand zur Haltlinie negativ ist. Dies wird durch folgende Nebenbedingungen erzielt:

$$x_{k+n_c|k} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{HL} \leq 0 \quad , aux_{k+n_c|k}^{HL} \in \{0; 1\} \quad (4.26)$$

$$x_{k+n_c|k} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{HL} \geq -S \quad , aux_{k+n_c|k}^{HL} \in \{0; 1\} \quad (4.27)$$

Insbesondere bei nicht vernetzten Fahrzeugen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Positionen der Fahrzeuge genau bekannt sind. Aufgrund der in (4.25) eingeführten Nebenbedingungen könnte die Freigabezeit sofort beendet werden, wenn ein Fahrzeug die Haltlinie überfahren hat, selbst wenn der Abstand zur Haltlinie nur sehr klein ist. Befindet sich das Fahrzeug entgegen der Modellannahme jedoch kurz vor der Haltlinie, so sorgt der Beginn der Sperrzeit unter Umständen dafür, dass das Fahrzeug ungewollt anhält. Um derartige Situationen zu vermeiden, wird eine zusätzliche Nebenbedingung eingeführt, die einen Mindestabstand der Fahrzeuge zur Signalbarriere hinter der Haltlinie fordert:

$$x_{k+n_c|k} + x_{k+n_c|k}^{N+1} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{HL} \leq -d^{LSA,nachHL} \quad , aux_{k+n_c|k}^{HL} \in \{0; 1\} \quad (4.28)$$

Minimale Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen

Der oben beschriebene Minimalabstand zwischen zwei Fahrzeugen beschreibt lediglich denjenigen Abstand, der bei Stillstand der Fahrzeuge eingehalten werden muss. Ein wichtiges

Charakteristikum des Fahrzeugfolgeverhaltens ist allerdings die Vergrößerung dieses Abstands mit zunehmender Geschwindigkeit. Aus diesem Grund wird eine weitere Nebenbedingung eingeführt, die dafür sorgt, dass eine minimale Zeitlücke z^{min} nicht unterschritten wird. Dies geschieht vereinfacht, indem der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen mindestens so groß sein muss, wie das Produkt aus minimaler Zeitlücke und aktueller Fahrzeuggeschwindigkeit. Die zusätzlichen Terme, die die Hilfsvariable $aux_{k+n_c|k}^{HL}$ und die obere Schranke S beinhalten, dienen dazu, dass die Nebenbedingung nur für Fahrzeuge vor der Haltlinie eingehalten werden muss:

$$x_{k+n_c|k}^n - x_{k+n_c|k}^{n+1} + S \geq z^{min} (v^{max} - u_{k+n_c|k}^{GLOSA} - u_{k+n_c|k}^{STOP}) + S \cdot aux_{k+n_c|k}^{HL} \quad (4.29)$$

Diese Nebenbedingung gilt für alle Fahrzeuge, außer demjenigen, welches sich als nächstes zur Haltlinie befindet, also für alle $n \in \{1; \dots; N - 1\}$.

Berücksichtigung einer Reaktionszeit beim Anfahrvorgang

Um die Reaktionszeit von Fahrern beim Anfahrvorgang zu berücksichtigen, wird eine zeitliche Verzögerung der Beschleunigung angestrebt. So beschleunigen Fahrzeuge zu Beginn der Freigabezeit nicht gleichzeitig, wie dies bei einem Zug mit starr verbundenen Waggons der Fall wäre, sondern zeitlich versetzt. Dieses Verhalten hat großen Einfluss auf die zum Abbau eines bestehenden Rückstaus notwendige Freigabezeit. Die Abbildung im Modell erfolgt, indem der Abstand zum Vorderfahrzeug analog zu Ungleichung (4.23) beschränkt wird. In diesem Fall ist aber der Abstand zum vorherigen Zeitschritt maßgebend, sodass sich eine verzögerte Beschleunigung nachfolgender Fahrzeuge ergibt. Zu Beginn des Zeithorizonts, also für $n_c = 1$, wird jeweils der zum letzten Zeitschritt berechnete Wert eingesetzt:

$$x_{k+n_c|k}^n \geq \begin{cases} x_{k|k-1}^{n+1} + d^{min} & , \text{wenn } n_c = 1 \\ x_{k+n_c-1|k}^{n+1} + d^{min} & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.30)$$

Für die Zählvariablen gilt jeweils: $n \in \{1; \dots; N - 1\}$, $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$.

Nach demselben Prinzip wird, aufbauend auf Ungleichung (4.31), auch die verspätete Reaktion auf den Signalgeber selbst modelliert:

$$x_{k+n_c|k}^n \geq \begin{cases} x_{k|k-1}^{N+1} + d^{LSA} - S \cdot (1 - aux_{k|k-1}^{n,HL}) & , \text{wenn } n_c = 1 \\ x_{k+n_c-1|k}^{N+1} + d^{LSA} - S \cdot (1 - aux_{k+n_c-1|k}^{n,HL}) & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.31)$$

Es gilt jeweils $n \in \{1; \dots; N\}$, $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$.

Beschränkung der Geschwindigkeitsreduktion

Eine Geschwindigkeitsreduktion über die Maximalgeschwindigkeit hinaus ist nicht sinnvoll, da dies zu einer Rückwärtsbewegung der Fahrzeuge führen würde. Die Nebenbedingung, die dies verhindert, lautet:

$$u_{k+n_c|k}^{GLOSA} + u_{k+n_c|k}^{STOP} \leq v^{max} \quad (4.32)$$

Daneben darf keiner der beiden Anteile der Geschwindigkeitsreduktion negativ sein, da sich ansonsten eine Fahrzeuggeschwindigkeit oberhalb der maximalen Geschwindigkeit ergeben könnte:

$$u_{k+n_c|k}^{GLOSA} \geq 0 \quad (4.33)$$

$$u_{k+n_c|k}^{STOP} \geq 0 \quad (4.34)$$

Wie bereits bei der fehlenden Abbildung von Überholvorgängen bedeutet dies lediglich, dass Geschwindigkeiten oberhalb von v^{max} nicht vom Modell berücksichtigt werden, aber durchaus in realen Umgebungen und der Simulation auftreten können.

Zur Berücksichtigung der Akzeptanz von Geschwindigkeitshinweisen durch Fahrer wird eine untere Grenze für die empfohlene Geschwindigkeit, also eine Obergrenze für u^{GLOSA} , festgelegt. Dies erfolgt abhängig von v^{max} durch Wahl des Parameters r^{GLOSA} :

$$u_{k+n_c|k}^{GLOSA} \leq (1 - r^{GLOSA}) \cdot v^{max} \quad , r^{GLOSA} \in [0,1] \quad (4.35)$$

Beschränkung der Beschleunigung

Neben der Beschränkung der Geschwindigkeitsreduktion selbst, wird auch deren Änderungsrate beschränkt. Damit wird sowohl das positive als auch das negative Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge begrenzt. Für positive Beschleunigungswerte werden hierzu die beiden Geschwindigkeitsreduktionsanteile gemeinsam berücksichtigt und mit dem Parameter a^{max} beschränkt. Analog zur Bewegungsgleichung der Fahrzeuge werden für den ersten Prädiktionsschritt die aktuellen Geschwindigkeitswerte von vernetzten Fahrzeugen beziehungsweise die im letzten Zeitschritt mit Hilfe des Modells ermittelten Geschwindigkeiten genutzt:

$$a^{max} \cdot \Delta t \geq \begin{cases} (u_{k|k-1}^{GLOSA} + u_{k|k-1}^{STOP}) - (u_{k+n_c|k}^{GLOSA} + u_{k+n_c|k}^{STOP}) & , \text{wenn } n_c = 1 \\ ((u_{k+n_c-1|k}^{GLOSA} + u_{k+n_c-1|k}^{STOP}) - (u_{k+n_c|k}^{GLOSA} + u_{k+n_c|k}^{STOP})) & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.36)$$

Es gilt jeweils $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$, $a^{max} \geq 0$.

Wie bei der maximalen Geschwindigkeit, kann auch für die maximale Beschleunigung ein eigener Parameter $a^{max, nov2X}$ für nicht vernetzte Fahrzeuge eingestellt werden.

Entsprechend Ungleichung (4.36) wird auch die Gesamtverzögerung b^{max} der Fahrzeuge beschränkt. Um Konflikte bei der Optimierung zu vermeiden, wird ein sehr hoher Wert verwendet. Zusätzlich wird separat die Verzögerung durch Geschwindigkeitshinweise begrenzt, um über die Wahl des Parameters $b^{GLOSA, max}$ die Akzeptanz von Fahrzeugführern zu berücksichtigen. Auch für diese Nebenbedingung werden zu Beginn des Prädiktionshorizonts aktuelle Mess- oder Schätzwerte genutzt:

$$b^{GLOSA,max} \cdot \Delta t \leq \begin{cases} u_{k|k-1}^{GLOSA} - u_{k+n_c|k}^{GLOSA} & , \text{wenn } n_c = 1 \\ u_{k+n_c-1|k}^{GLOSA} - u_{k+n_c|k}^{GLOSA} & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.37)$$

Es gilt jeweils $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$, $b^{GLOSA,max} \leq 0$.

Vermeidung unerwünschter Geschwindigkeitsreduktionen

Trotz der in Kapitel 4.4 beschriebenen starken Bestrafung von Geschwindigkeitsreduktionen, welche über Geschwindigkeitshinweise hinausgehen, können große Geschwindigkeitsreduktionen, bis hin zum Haltevorgang, in bestimmten Situationen im mathematischen Sinne optimal sein. Beispielsweise kann ein Fahrzeug zur Sperrzeit in deutlichem Abstand zur Haltlinie zum Halt kommen, vor Freigabebeginn beschleunigen und sodann die Haltlinie zur beginnenden Freigabezeit mit voller Geschwindigkeit überfahren. Dieser Effekt wird von SORGATZ ET AL. [2016] als Pole-Start bezeichnet und gezielt zur Erhöhung der Abflussrate am Knotenpunkt eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit soll derartiges Fahrzeugverhalten allerdings unterbunden werden, wozu die in diesem Abschnitt beschriebenen Nebenbedingungen dienen. Hierzu wird die Verzögerung durch den Anteil u^{STOP} beschränkt, wenn der Abstand zum nächsten Fahrzeug oder der Signalbarriere größer als der einstellbare Schwellwert d^{STOP} ist. Um Unlösbarkeiten zu vermeiden, wird eine Verzögerung von $b^{STOP,tol}$ grundsätzlich toleriert. Andernfalls findet eine Beschränkung auf b^{max} für alle $n \in \{1; \dots; N\}$ statt:

$$u_{k+n_c-1|k}^{STOP,n} - u_{k+n_c|k}^{STOP,n} \geq \begin{cases} b^{max} \cdot \Delta t & , \text{wenn } x_{k+n_c|k}^n - x_{k+n_c|k}^{n+1} \leq d^{STOP} \\ b^{STOP,tol} \cdot \Delta t & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.38)$$

Auch hier werden die Mess- beziehungsweise Schätzwerte zu Beginn des Prädiktionshorizonts herangezogen. Wie Ungleichung (4.24) enthält auch Ungleichung (4.38) eine logische Bedingung. Hierzu wird die Hilfsvariable aux^{STOP} eingeführt. Diese zeigt mit dem Wert 0 an, dass der Abstand zum nächsten Hindernis größer ist als der Schwellwert d^{STOP} . Beim Unterschreiten dieses Abstands, nimmt die Hilfsvariable den Wert 1 an.

$$u_{k+n_c-1|k}^{STOP,n} - u_{k+n_c|k}^{STOP,n} \geq (b^{STOP,tol} + b^{max} \cdot aux_{k+n_c|k}^{STOP}) \cdot \Delta t \quad (4.39)$$

Da das Verzögerungsverhalten nur vor der Haltlinie relevant ist und es ansonsten zu Umschaltproblemen von grün nach rot während des Steuerhorizonts kommen kann, nimmt aux^{STOP} nur dann den Wert 1 an, wenn das Fahrzeug die Haltlinie noch nicht überquert hat. Dies geschieht durch Verknüpfung mit der entsprechenden Hilfsvariablen aux^{HL} . Das Verhalten der Hilfsvariablen aux^{STOP} wird so mit den folgenden Nebenbedingungen erzielt:

$$d^{STOP} \cdot (1 - aux_{k+n_c|k}^{STOP}) - S \cdot (1 - aux_{k+n_c|k}^{HL}) \leq x_{k+n_c|k}^n - x_{k+n_c|k}^{n+1} \quad (4.40)$$

$$S \cdot (1 - aux_{k+n_c|k}^{STOP}) - 0,5 \cdot S \cdot (1 + aux_{k+n_c|k}^{HL}) + d^{STOP} \geq x_{k+n_c|k}^n - x_{k+n_c|k}^{n+1} \quad (4.41)$$

Es gilt jeweils $n \in \{1; \dots; N\}$, $aux_{k+n_c|k}^{STOP} \in \{0; 1\}$.

Die Beschränkung der Hilfsvariablen auf binäre Werte erfolgt erneut analog zu (4.21).

Da für das Fahrzeug, welches sich als nächstes zur Haltlinie befindet, keine Beschränkung der Zeitlücke besteht, kann der Minimalabstand kleiner gesetzt werden. Aus diesem Grund wird für das vorderste Fahrzeug jeder Zufahrt der Abstand $d^{STOP,LSA}$ anstelle von d^{STOP} genutzt.

Berücksichtigung von Mischfahrstreifen

Die bisher eingeführten Nebenbedingungen dienen dazu, den Verkehrsablauf inklusive eines Signals auf einem einzelnen Fahrstreifen abzubilden. Die durch unterschiedliche optimale Annäherungsgeschwindigkeiten auf einem Mischfahrstreifen entstehenden Probleme wurden in Beispiel 1 in Kapitel 2.2.1 aufgezeigt. Um diese zu adressieren, ist eine Modellierung von Mischfahrstreifen notwendig. Grundsätzlich werden Fahrstreifen, die exklusiv einem Signalgeber zugeordnet sind, bei der gewählten Modellierung separat behandelt. Diese exklusive Zuordnung von Fahrstreifen zu Signalgeber ist in der Regel aber nur für die Aufstellbereiche gegeben. Um Mischfahrstreifen abbilden zu können, werden die exklusiven Fahrstreifenbereiche stromaufwärts im Modell über ihre tatsächliche Länge hinaus verlängert. Im Bereich des Mischfahrstreifens wird auf beiden parallel verlaufenden Fahrstreifen je ein Fahrzeug erzeugt und mittels Nebenbedingungen festgelegt, dass diese doppelt auftretenden Fahrzeuge denselben Abstand zur Haltlinie aufweisen. Diese Fahrzeuge sind in Bild 4.7 jeweils mit demselben Symbol gekennzeichnet. Ein Pfeil deutet an, dass diese Fahrzeuge in dem als nicht exklusiv bezeichneten Bereich jeweils denselben Abstand zur Haltlinie aufweisen. So wird beispielsweise sichergestellt, dass sich Geschwindigkeitshinweise auf Mischfahrstreifen auch auf nachfolgende Fahrzeuge auswirken, die einen anderen Abbiegewunsch haben als das beeinflusste Fahrzeug. Befindet sich ein Fahrzeug bereits in dem als exklusiv bezeichneten Bereich, so wird es ausschließlich in diesem Fahrstreifen betrachtet. Bewegt sich ein Fahrzeug jedoch während des Prädiktionshorizonts vom nicht exklusiven in den exklusiven Bereich des Fahrstreifens, so wäre es wünschenswert, es vom anderen Fahrstreifen zu entfernen. Da das Entfernen eines Fahrzeugs im Laufe des Steuerhorizonts, also innerhalb eines Optimierungsvorgangs, einen großen Eingriff in die Struktur des Vektors der Entscheidungsvariablen zur Folge hätte, wird das Fahrzeug an die Position des nächsten vorausfahrenden Fahrzeugs beziehungsweise an diejenige der Signalbarriere versetzt. Siehe hierzu Bild 4.7 unten. Das mit dem Paragraphensymbol gekennzeichnete Fahrzeug bewegt sich auf den Aufstellstreifen für Linksabbieger und wird auf dem Geradeausfahrstreifen zum gleichen Zeitschritt auf die Position des vorausfahrenden Fahrzeugs versetzt.

Um diese Modellierung umzusetzen, wird eine weitere Hilfsvariable aux^{exkl} eingeführt, welche den Wert 1 annimmt, wenn sich ein Fahrzeug im exklusiven Bereich befindet und sonst den Wert 0 annimmt. Hierzu muss zuvor in Abhängigkeit der Knotenpunktgeometrie mit Hilfe des

Parameter l^{exkl} angegeben werden, wie lange der exklusive Bereich eines Fahrstreifens ist. Die Nebenbedingungen zum Erzielen dieses Verhaltens der Hilfsvariablen lauten wie folgt:

$$x_{k+n_c|k} + l^{exkl} \cdot aux_{k+n_c|k}^{exkl} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{HL} \geq l^{exkl} - S \tag{4.42}$$

$$x_{k+n_c|k} + S \cdot aux_{k+n_c|k}^{exkl} \leq S + l^{exkl} \tag{4.43}$$

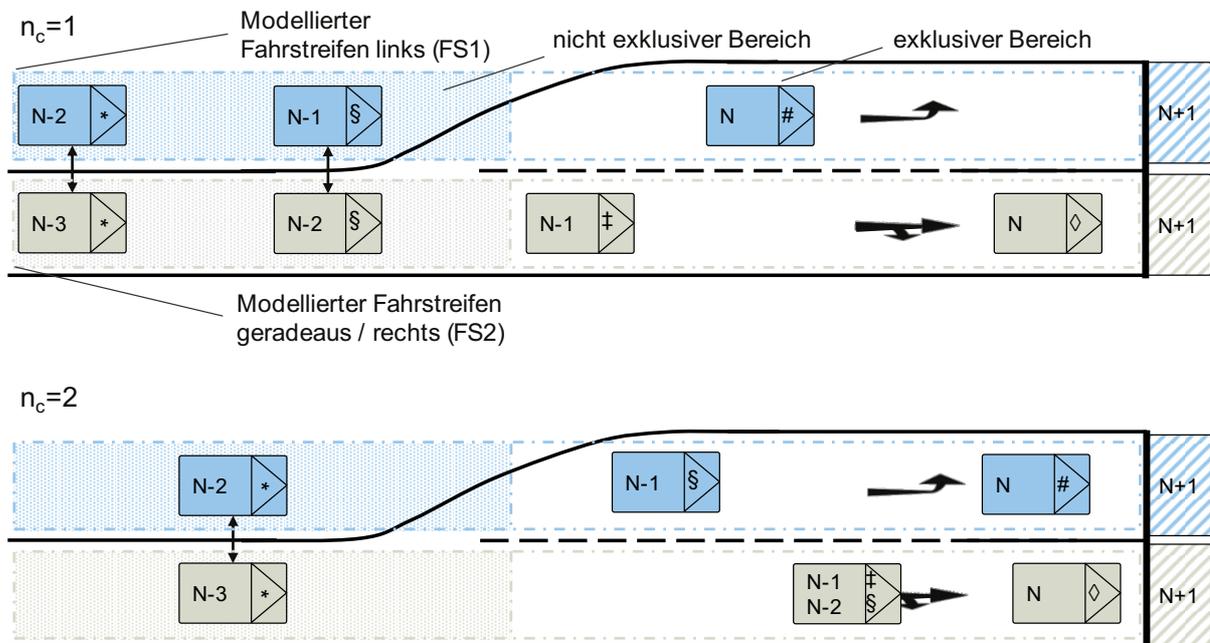


Bild 4.7 Berücksichtigung von Mischfahrstreifen und Aufstellstreifen in der Modellierung des Verkehrsflusses für zwei Prädiktionschritte

Um sicherzustellen, dass ein Fahrzeug, welches die Haltlinie bereits überfahren hat, grundsätzlich als im exklusiven Bereich befindlich modelliert wird, wird eine zusätzliche Nebenbedingung eingeführt. Die folgende Ungleichung bewirkt, dass nicht gleichzeitig die Haltlinie überfahren und das Fahrzeug im Mischbereich befindlich sein kann. Es wird also der Fall

$aux_{k+n_c|k}^{exkl} = aux_{k+n_c|k}^{HL} = 0$ ausgeschlossen:

$$aux_{k+n_c|k}^{exkl} + aux_{k+n_c|k}^{HL} \geq 1 \tag{4.44}$$

Es gilt jeweils $aux_{k+n_c|k}^{HL} \in \{0; 1\}$, $aux_{k+n_c|k}^{exkl} \in \{0; 1\}$.

Die Beschränkung der Hilfsvariablen in Ungleichung (4.44) auf binäre Werte erfolgt wiederum analog zu Gleichung (4.21).

Wie in Bild 4.7 bereits angedeutet, weisen die verdoppelten Fahrzeuge, deren Position gleichgesetzt werden soll, nicht zwangsläufig denselben Positionsindex auf. Zunächst wird daher überprüft, welchen Index die beiden gleichzusetzenden Fahrzeuge aufweisen. Statt der unterschiedlichen Indices wird hierfür der Übersicht halber das Sternsymbol verwendet. Für diese Fahrzeuge wird dann die Position auf den beiden Fahrstreifen FS1 und FS2 mittels

zweier Ungleichungen gleichgesetzt. Dabei kommt zur Vermeidung von Unlösbarkeiten ein Toleranzabstand d^{tol} zum Einsatz:

$$x_{k+n_c|k}^{*FS1} - x_{k+n_c|k}^{*FS2} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{*FS1.exkl} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{*FS2.exkl} \leq d^{tol} \quad (4.45)$$

$$x_{k+n_c|k}^{*FS2} - x_{k+n_c|k}^{*FS1} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{*FS1.exkl} - S \cdot aux_{k+n_c|k}^{*FS2.exkl} \leq d^{tol} \quad (4.46)$$

Unter der Annahme, dass ein Fahrzeug während des Prädiktionshorizonts den exklusiven Bereich des Fahrstreifens FS1 erreicht, soll es zu diesem Prädiktionsschritt $n_{c,del}$ auf dem benachbarten Fahrstreifen FS2 die Position des vorausfahrenden Fahrzeugs beziehungsweise der Signalbarriere einnehmen. Hierzu wird die Bewegungsgleichung aus Gleichung (4.20) für dieses Fahrzeug wie folgt abgeändert:

$$x_{k+n_c|k}^n = x_{k+n_c|k}^{n+1}, n_c \in \{n_{c,del}; \dots; N_c\} \quad (4.47)$$

Neben der Bewegungsgleichung müssen weitere der zuvor genannten Nebenbedingungen in diesem Fall angepasst werden. So muss beispielsweise die Nebenbedingung zur Einhaltung des Minimalabstandes zwischen Fahrzeugen aus Ungleichung (4.23) aufgehoben werden. Auf die mathematischen Formulierungen dieser Änderungen wurde der Übersichtlichkeit halber im Rahmen der schriftlichen Ausarbeitung aber verzichtet.

In den vorigen Abschnitten wurde die Modellierung des Verkehrsflusses auf einem Fahrstreifen inklusive eines Signalgebers beschrieben. Hierzu wurde eine Bewegungsgleichung für Einzelfahrzeuge gegeben und mittels zusätzlicher Nebenbedingungen wurden weitere Modelleigenschaften wie beispielsweise Minimalabstände zwischen Fahrzeugen und deren Beschleunigungsvermögen eingeführt. Tab. 4.1 fasst die zuvor eingeführten Variablen und Parameter inklusive exemplarischer Werte zusammen.

Zeichen	Erläuterung	Beispielwert
x	Abstand Fahrzeugs / Signalbarriere zur Haltlinie	50 m
u^{GLOSA}	Geschwindigkeitsreduktion durch Hinweis	4 m/s
u^{STOP}	Sonstige Geschwindigkeitsreduktion	5 m/s
u^{LSA}	Signalisierungszustand	0
aux^{HL}	Hilfsvariable „Fahrzeuge befindet sich vor Haltlinie“	1
aux^{STOP}	Hilfsvariable „Abstand erlaubt Verzögerung“	1
aux^{exkl}	Hilfsvariable „Fahrzeug auf exklusivem Fahrstreifen“	1
η	Vektor der Entscheidungsvariablen	
k	Berechnungsschritt	5
Δt	Zeitintervall zwischen zwei Berechnungsschritten	1 s
N_c	Länge des Steuerhorizonts	20
n_c	Betrachteter Schritt im Steuerhorizont	5
N	Anzahl der je Fahrstreifen berücksichtigten Fahrzeuge	15
n	Betrachtetes Fahrzeug	5
v^{max}	Maximalgeschwindigkeit	13,9 m/s
$v^{max,noV2X}$	Maximalgeschwindigkeit für nicht vernetzte Fahrzeuge	12 m/s
r^{GLOSA}	Beschränkung u^{GLOSA} bezogen auf v^{max}	0,5
d^{min}	Minimaler Abstand zwischen zwei Fahrzeugen	7,5 m
z^{min}	Minimale Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen	2 s
d^{LSA}	Minimaler Abstand zwischen Fahrzeug und LSA	15 m
$d^{LSA,nachHL}$	wie d^{LSA} , nach Haltlinie	10 m
d^{tol}	Toleranz eines auf zwei Fahrstreifen gespiegeltem Fzg	0,5 m
d^{STOP}	Abstand zur Bestimmung von aux^{STOP}	80 m
$d^{STOP,LSA}$	Abstand zur Bestimmung von aux^{STOP} für erstes Fzg	20 m
a^{max}	Maximale Beschleunigung	2,5 m/s ²
$a^{max,noV2X}$	Maximale Beschleunigung für nicht vernetzte Fahrzeuge	1,3 m/s ²
b^{max}	Maximale Verzögerung	-10 m/s ²
$b^{GLOSA,max}$	Maximale Verzögerung durch Geschwindigkeitshinweis	-2 m/s ²
$b^{STOP,tol}$	Grundsätzliche erlaubte Verzögerung	-0,5 m/s ²
l^{exkl}	Länge des exklusiven Fahrstreifens	60 m
S	Obere Schranke	10000

Tab. 4.1 Verwendete Formelzeichen zur Modellierung des Verkehrsflusses mit Erläuterung und Beispielwert für Entscheidungsvariablen (blau), Zählvariablen (weiß) und statische Parameter (grau)

Als Zustandsvariable dient der Abstand der Fahrzeuge zur Haltlinie, als Stellgrößen werden die Geschwindigkeitsreduktionen der Fahrzeuge aufgefasst. Diese werden in Reduktionen durch Geschwindigkeitshinweise und darüberhinausgehende Reduktionen aufgeteilt. Für den Signalgeber dient die Position der Signalbarriere, die bei rotem Signal wie ein auf der Haltlinie stehendes Fahrzeug die Zufahrt sperrt, als Zustandsgröße. Als Stellgröße dient ein binäres Signal, welches Freigabe und Sperrung entspricht. Da zum Teil auch logische Verknüpfungen zum Erreichen des Modellverhaltens nötig sind, wurden neben den Zustands- und Stellgrößen drei Hilfsvariablen eingeführt. Werden Zustands-, Stell- und Hilfsgrößen für ein Fahrzeug an Position n des Fahrstreifens i zum Zeitschritt k zu einem Vektor $\eta_k^{n,FSi}$ zusammengefasst, so ergibt sich:

$$\eta_k^{n,FSi} = \begin{bmatrix} x_{k+1|k}^n & \cdots & x_{k+N_c|k}^n & u_{k+1|k}^{n,GLOSA} & \cdots & u_{k+N_c|k}^{n,GLOSA} & u_{k+1|k}^{n,STOP} & \cdots & u_{k+N_c|k}^{n,STOP} \\ aux_{k+1|k}^{n,HL} & \cdots & aux_{k+N_c|k}^{n,HL} & aux_{k+1|k}^{n,STOP} & \cdots & aux_{k+N_c|k}^{n,STOP} & aux_{k+1|k}^{n,exkl} & \cdots & aux_{k+N_c|k}^{n,exkl} \end{bmatrix}^T \quad (4.48)$$

Für die Signalbarriere lautet der Vektor:

$$\eta_k^{N+1,LSA,FSi} = \begin{bmatrix} x_{k+1|k}^{N+1} & \cdots & x_{k+N_c|k}^{N+1} & u_{k+1|k}^{LSA} & \cdots & u_{k+N_c|k}^{LSA} \end{bmatrix}^T \quad (4.49)$$

Bei maximal N betrachteten Fahrzeugen je Fahrstreifen und einem Signalgeber am Ende des Fahrstreifens lautet der Vektor der Entscheidungsvariablen je Fahrstreifen:

$$\eta_k^{FSi} = \begin{bmatrix} \eta_k^{1,FSi} & \cdots & \eta_k^{N,FSi} & \eta_k^{N+1,LSA,FSi} \end{bmatrix}^T \quad (4.50)$$

Die Dimension des Gesamtvektors η für einen Knotenpunkt ergibt sich damit wie folgt:

$$dim(\eta) = (N \cdot 6 + 2) \cdot N_c \cdot AnzahlFahrstreifen \quad (4.51)$$

Durch die Berücksichtigung von Mischfahrstreifen wurden zwar zwei benachbarte Fahrstreifen im Modell miteinander verknüpft. Dennoch würde die Steuerung mit der bis zu dieser Stelle beschriebenen Modellierung für jeden Fahrstreifen einzeln agieren. Würde man beispielsweise die Geschwindigkeitsreduktion u^{STOP} in der Kostenfunktion bestrafen, so wären alle Zufahrten eines Knotenpunktes dauerhaft freigegeben, da dies optimal wäre. Erst durch weitere Nebenbedingungen, die die Steuerung der Lichtsignalanlage betreffen, werden regelkonforme Steuerungsentscheidungen möglich. Diese Modellierung wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

4.3 Modellierung von Lichtsignalen zur prädiktiven Regelung von Knotenpunkten

Die als Signalbarriere für einzelne Fahrstreifen modellierten Signalgruppen werden über weitere Nebenbedingungen der Optimierung so beeinflusst, dass unverträgliche Verkehrsströme nicht gleichzeitig freigegeben werden können und eine einstellbare Zwischenzeit zwischen

dem Freigabeende des räumenden und dem Freigabebeginn des einfahrenden Verkehrsstroms verstreichen muss. Darüber hinaus wird die Möglichkeit zur Einhaltung einer einstellbaren Mindestfreigabezeit und Mindestsperrzeit gegeben. Diese unmittelbar sicherheitsrelevanten Signalzeiten werden im Folgenden durch die Formulierung von Nebenbedingungen erzielt. Da keine feste Umlaufzeit besteht, erscheint es darüber hinaus sinnvoll, eine maximale Sperrzeit festzulegen und eine Freigabe für die betreffende Signalgruppe zu erzwingen. Da jedoch die maximale Sperrzeit für zwei unverträgliche Verkehrsströme gleichzeitig erreicht werden kann, könnten ohne weitere Vorkehrungen Unlösbarkeiten auftreten. Um dies zu vermeiden, wird die maximale Sperrzeit nicht hart über Nebenbedingungen begrenzt, sondern über eine Anpassung der Gewichtungen in der Kostenfunktion. Dieses Vorgehen wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

Verträglichkeit von Verkehrsströmen

Da eine signalgruppenbasierte Steuerung angestrebt wird, werden die einzelnen Signalgruppen nicht in Phasen eingeteilt und auch eine feste Abfolge wird nicht erzwungen. Stattdessen wird die Verträglichkeit der einzelnen Verkehrsströme zueinander festgelegt und im Rahmen der Optimierung können alle Kombinationen von zueinander verträglichen Verkehrsströmen beziehungsweise deren Signalgruppen ausgewählt werden. Bild 4.8 zeigt einen Knotenpunkt mit vier Zufahrten, die jeweils einen separaten Fahrstreifen für Linksabbieger mit getrennter Signalisierung aufweisen. Jede Signalgruppe SG ist einem der Fahrstreifen FS zugeordnet und wird durch eine Signalbarriere repräsentiert. Es können gegenüberliegende, geradeaus gerichtete Verkehrsströme, gegenüberliegende Linksabbieger sowie die beiden Signalgruppen einer Zufahrt gleichzeitig freigegeben werden.

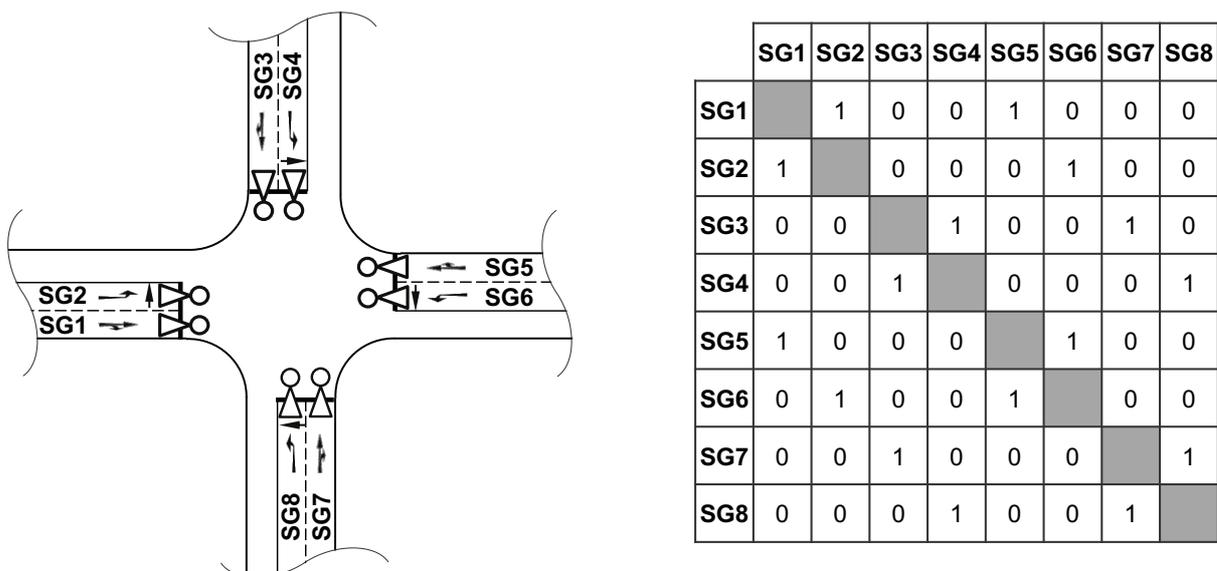


Bild 4.8 Knotenpunkt mit vier Zufahrten und jeweils getrennt signalisierten Linksabbiegern mit zugehöriger Verträglichkeitsmatrix

Dadurch ergibt sich die in Bild 4.8 gezeigte Verträglichkeitsmatrix. Der Wert 1 steht darin für eine mögliche gleichzeitige Freigabe, der Wert 0 wird entsprechend bei Signalgruppen mit zueinander unverträglichen Verkehrsströmen angegeben. Eine Abbildung bedingt verträglicher Verkehrsströme ist durch das oben erläuterte Verkehrsflussmodell nicht möglich, könnte aber durch Einführung weiterer Nebenbedingungen ermöglicht werden.

Für alle Signalgruppenkombinationen (i, j) , welche in der Verträglichkeitsmatrix den Wert 0 aufweisen, wird folgende Nebenbedingung eingeführt, die die gleichzeitige Freigabe der beiden Signalgruppen verhindert:

$$u_{k+n_c|k}^{LSA,SGi} + u_{k+n_c|k}^{LSA,SGj} \geq 1, n_c \in \{1; \dots; N_c\} \tag{4.52}$$

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, nimmt $u_{k+n_c|k}^{LSA}$ den Wert 0 für ein grünes und den Wert 1 für ein rotes Signal an.

Zwischenzeit

Um zu verhindern, dass zwischen zwei unverträglichen Signalgruppen unmittelbar in zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten umgeschaltet wird, wird eine Zwischenzeit t_Z eingestellt. Diese muss zwischen dem Freigabeende des räumenden Verkehrsstroms und dem Freigabebeginn des einfahrenden Verkehrsstroms verstreichen.

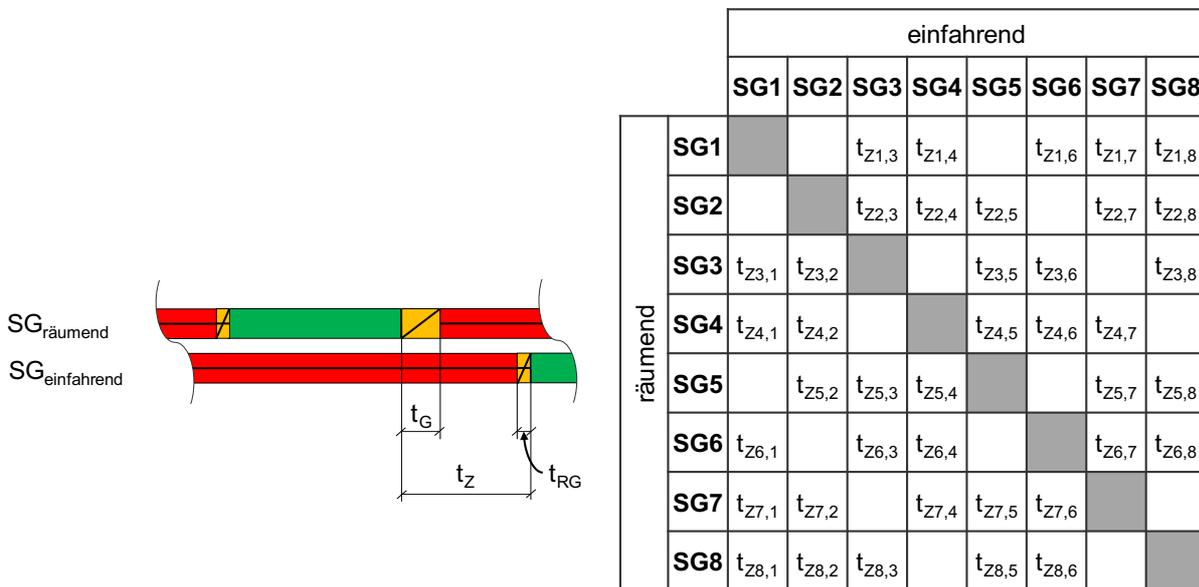


Bild 4.9 Illustration der Zwischenzeit (links) und Zwischenzeitenmatrix (rechts) für den Knotenpunkt mit acht Signalgruppen aus Bild 4.8

Damit beinhaltet die Zwischenzeit die Übergangszeiten mit gelbem Signal t_G sowie die mit rot/gelbem Signal t_{RG} . Der linke Teil von Bild 4.9 illustriert dies anhand eines Ausschnitts aus dem Signalzeitenplan zweier Signalgruppen. Im rechten Teil von Bild 4.9 ist die Zwischenzeitenmatrix für den in Bild 4.8 dargestellten Knotenpunkt gegeben.

Um die Zwischenzeiten während der Vorhersage zu garantieren, wird folgende Nebenbedingung eingeführt, wobei SGr für die Signalgruppe des räumenden und SGe für die des einfahrenden Verkehrsstroms steht:

$$\begin{aligned} (u_{k+n_c|k}^{LSA,SGr} - u_{k|k-1}^{LSA,SGr}) - (u_{k+n_c+z|k}^{LSA,SGe} - u_{k|k-1}^{LSA,SGe}) &\leq 1 \quad , \text{wenn } n_c = 1 \\ (u_{k+n_c|k}^{LSA,SGr} - u_{k+n_c-1|k}^{LSA,SGr}) - (u_{k+n_c+z|k}^{LSA,SGe} - u_{k+n_c-1|k}^{LSA,SGe}) &\leq 1 \quad , \text{sonst} \end{aligned} \quad (4.53)$$

Dabei gilt $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$, $z \in \{0; \dots; t_{Zr,e} - 1\}$, $z + n_c \leq N_c$.

Die beiden Zählvariablen n_c und z werden unabhängig inkrementiert, sodass für jeden Prädiktionsschritt und jeden Zeitschritt der Zwischenzeit je eine Nebenbedingung erstellt wird. Die Subtraktion des Steuereingriffs des jeweils vorhergehenden Prädiktionsschrittes erlaubt eine Betrachtung des Umschaltvorgangs anstelle des Signals selbst. Für $n_c = 1$ liegt kein vorausgehender Prädiktionsschritt vor, weshalb in diesem Fall stattdessen der Steuereingriff $u_{k|k-1}^{LSA}$ des vorherigen Zeitschrittes verwendet wird.

Schritt	$k k-1$	$k+1 k$	$k^* 2 k$	$k^* 3 k$	$k^* 4 k$	$k^* 5 k$	$k^* 6 k$	$k^* 7 k$	$k^* 8 k$	$k^* 9 k$	$k^* 10 k$
$u^{LSA,SGr}$	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$u^{LSA,SGe}$	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
z für $n_c = 3$	-	-	-	0	1	2	3	4	5	6	7
LHS	-	-	-	1	1	1	1	2	2	2	2

Berechnung der linken Seite der Ungleichung (4.53) für $n_c = 3$, $z = 2$:

$$(u_{k+3|k}^{LSA,SGr} - u_{k+3-1|k}^{LSA,SGr}) - (u_{k+3+2|k}^{LSA,SGe} - u_{k+3-1|k}^{LSA,SGe}) = 1$$

Tab. 4.2 Signalzustände zur Verdeutlichung der Nebenbedingung (4.53) zur Vorhersage von Zwischenzeiten mit Angabe der linken Seite der Ungleichung (LHS) für $n_c = 3$

In dem in Tab. 4.2 für $n_c = 3$ gezeigten Beispiel würde eine Zwischenzeit von $t_{Zr,e} = 4s$ eingehalten. Zur Demonstration der Funktionsweise wird die Zählvariable z weiter erhöht. So wird deutlich, dass ab $z = 4$ die Nebenbedingung (4.53) verletzt würde, da sich für die linke Seite der Ungleichung (LHS) der Wert 2 ergäbe.

Die Nebenbedingung (4.53) sorgt zunächst nur für das Einhalten der Zwischenzeit im Rahmen des Steuerhorizonts. Im obigen Beispiel bedeutet dies, dass bei einem Freigabewechsel beide Signalgruppen für 4 s gesperrt sein müssen. Ist aber eine Zwischenzeit bereits aktiv,

muss gesichert werden, dass diese vollständig verstreicht, bevor die nächste Freigabe beginnt. Hierzu wird die Signalgruppe des einfahrenden Verkehrsstroms für die verbleibende Zwischenzeit Z_{Rest} auf rot gesetzt:

$$u_{k+Z_{Rest}|k}^{LSA,SGe} = 1, Z_{Rest} \in \{1; \dots; Z_{Rest}\} \quad (4.54)$$

Tab. 4.3 zeigt beispielhaft die Signalzustände der einfahrenden und räumenden Signalgruppe für $Z_{Rest} = 2$, wobei die beiden von der Nebenbedingung (4.54) betroffenen Zustände hervorgehoben sind.

Schritt	$k k-1$	$k+1 k$	$k^* 2 k$	$k^* 3 k$	$k^* 4 k$	$k^* 5 k$	$k^* 6 k$	$k^* 7 k$	$k^* 8 k$	$k^* 9 k$	$k^* 10 k$
$u^{LSA,SGr}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$u^{LSA,SGe}$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.3 Signalzustände zur Verdeutlichung der Nebenbedingung (4.54) zum Einhalten von Zwischenzeiten für $Z_{Rest} = 2$

Zur Bestimmung von Z_{Rest} werden Umschaltvorgänge der Signalgruppen des räumenden Verkehrsstroms nach rot erkannt und ein Zähler bestimmt die aktuell verbleibende Zeit bis zum frühestmöglichen Freigabezeitpunkt der Signalgruppe des einfahrenden Verkehrsstroms.

Mindestfreigabezeit

Um den Erwartungen der Fahrer gerecht zu werden, müssen sehr kurze Freigabezeiten vermieden werden. Hierzu werden durch die Regelwerke Mindestfreigabezeiten $t_{F,min}$ festgelegt. Laut RiLSA [FGSV, 2010B] darf beispielsweise eine Mindestfreigabezeit von 5 s nicht unterschritten werden. Wie bei den Zwischenzeiten werden zwei verschiedene Arten von Nebenbedingungen formuliert. So wird zum einen das Einhalten der Freigabezeit für vorhergesagte Freigaben garantiert und zum anderen sichergestellt, dass eine kürzlich begonnene Freigabe nicht vor Ende der Mindestfreigabezeit abgebrochen wird.

Um eine korrekte Vorhersage mit Berücksichtigung von Mindestfreigabezeiten zu erzielen, werden Nebenbedingungen aufgestellt, welche das Umschalten einer Signalgruppe innerhalb des einstellbaren Zeitintervalls $t_{F,min}$ von grün nach rot verhindern. Hierzu wird wiederum eine Nebenbedingung je Prädiktionsschritt n_c und je Schritt τ innerhalb des Zeitintervalls $t_{F,min}$ eingeführt. Die Subtraktion in den beiden Termen der linken Seite der Ungleichung dient dazu, wie bereits bei der Formulierung von (4.53), den Signalwechsel und nicht den Signalzustand zu betrachten. Für $n_c = 1$ wird anstelle von $u_{k+n_c-1|k}^{LSA}$ wiederum das Ergebnis des vorherigen Zeitschritts $u_{k|k-1}^{LSA}$ eingesetzt:

$$\begin{aligned}
 (u_{k+n_c+\tau|k}^{LSA} - u_{k+n_c|k}^{LSA}) - (u_{k+n_c|k}^{LSA} - u_{k|k-1}^{LSA}) &\leq 1 \quad , \text{wenn } n_c = 1 \\
 (u_{k+n_c+\tau|k}^{LSA} - u_{k+n_c|k}^{LSA}) - (u_{k+n_c|k}^{LSA} - u_{k+n_c-1|k}^{LSA}) &\leq 1 \quad , \text{sonst}
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

Dabei gilt $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$, $\tau \in \{1; \dots; t_{F,min} - 1\}$, $\tau + n_c \leq N_c$.

Tab. 4.4 illustriert das Vorgehen zur Bestimmung der linken Seite (LHS) von Ungleichung (4.55). Dabei sind die Beispielwerte für $n_c = 3$ dargestellt und für $\tau = 2$ wird die Berechnung explizit angegeben. Im gezeigten Beispiel würde eine Mindestfreigabezeit von 4 s garantiert, ab $\tau = 4$ wäre Ungleichung (4.55) nicht mehr erfüllt.

Schritt	$k k-1$	$k+1 k$	$k^* 2 k$	$k^* 3 k$	$k^* 4 k$	$k^* 5 k$	$k^* 6 k$	$k^* 7 k$	$k^* 8 k$	$k^* 9 k$	$k^* 10 k$
u^{LSA}	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
τ	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7
LHS	-	-	-	-	1	1	1	2	2	2	2

Berechnung der linken Seite der Ungleichung (4.55) für $n_c = 3$, $\tau = 2$:

$$(u_{k+3+2|k}^{LSA} - u_{k+3|k}^{LSA}) - (u_{k+3|k}^{LSA} - u_{k+3-1|k}^{LSA}) = 1$$

Tab. 4.4 Signalzustände zur Verdeutlichung der Nebenbedingung (4.55) zur Vorhersage von Mindestfreigabezeiten mit Angabe der linken Seite der Ungleichung (LHS) für $n_c = 3$

Wie schon bei der Berücksichtigung von Zwischenzeiten, dient Ungleichung (4.55) lediglich der Berücksichtigung von Mindestfreigabezeiten während der Vorhersage. Um deren tatsächliche Umsetzung zu garantieren, sind zusätzliche Nebenbedingungen erforderlich, falls ein Verkehrsstrom freigegeben wird. In diesem Fall dient ein Zähler dazu, die verbleibende Mindestfreigabezeit $t_{F,min,Rest}$ zu bestimmen. Die zusätzliche Nebenbedingung zum Fixieren der Freigabe lautet dann:

$$u_{k+\tau_{Rest}|k}^{LSA} = 0, \quad \tau_{Rest} \in \{1; \dots; t_{F,min,Rest}\} \tag{4.56}$$

Mindestsperrzeit

Analog zur Mindestfreigabezeit kann eine Mindestsperrzeit $t_{s,min}$ festgelegt werden. Wird darauf verzichtet, könnte eine freigegebene Signalgruppen nach kurzer Sperrzeit erneut freigegeben werden. Die Formulierungen erfolgen analog zu denjenigen der Mindestfreigabezeit und werden daher nur verkürzt wiedergegeben:

$$\begin{aligned}
 (u_{k+n_c|k}^{LSA} - u_{k|k-1}^{LSA}) - (u_{k+n_c+\tau|k}^{LSA} - u_{k+n_c|k}^{LSA}) &\leq 1 && , \text{wenn } n_c = 1 \\
 (u_{k+n_c|k}^{LSA} - u_{k+n_c-1|k}^{LSA}) - (u_{k+n_c+\tau|k}^{LSA} - u_{k+n_c|k}^{LSA}) &\leq 1 && , \text{sonst}
 \end{aligned}
 \tag{4.57}$$

Dabei gilt $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$, $\tau \in \{1; \dots; t_{S,min} - 1\}$, $\tau + n_c \leq N_c$.

Wiederum wird mittels eines Zählers das Einhalten der minimalen Sperrzeit zu Beginn des Prädiktionshorizonts sichergestellt:

$$u_{k+\tau_{Rest}|k}^{LSA} = 1, \tau_{Rest} \in \{1; \dots; t_{S,min,Rest}\} \tag{4.58}$$

Tab. 4.5 fasst die verwendeten Formelzeichen zur Modellierung von Lichtsignalen zusammen, sofern diese nicht bereits in Tab. 4.1 angegeben sind.

Zeichen	Erläuterung	Beispielwert
$t_{Zr,e}$	Zwischenzeit (räumend, einfahrend)	7 s
z	Betrachteter Zeitschritt der Zwischenzeit	3
Z_{Rest}	Verbleibende Zwischenzeit	3 s
z_{Rest}	Betrachteter Zeitschritt der verbleibenden Zwischenzeit	2
t_G	Gelbzeit	3 s
t_{RG}	Rot/Gelbzeit	1 s
$t_{F,min}$	Mindestfreigabezeit	5 s
$t_{S,min}$	Mindestsperrzeit	5 s
τ	Betrachteter Zeitschritt der Mindestfreigabe/-sperrzeit	3
$t_{F,min,Rest}$	Verbleibende Mindestfreigabezeit	3 s
$t_{S,min,Rest}$	Verbleibende Mindestfreigabezeit	3 s
τ_{Rest}	Betrachteter Zeitschritt der verbleibenden Mindestzeit	1

Tab. 4.5 Verwendete Formelzeichen zur Modellierung von Lichtsignalanlagen mit Erläuterung und Beispielwert für Zählvariablen (weiß) und statische Parameter (grau)

4.4 Bestimmung der Kostenfunktion

Die wichtigsten Elemente zur Bestimmung der Kostenfunktion von preXible werden in diesem Abschnitt beschrieben. Die in den vorigen Kapiteln vorgestellte Formulierung von Nebenbedingungen wird dazu genutzt, den Wertebereich der Entscheidungsvariablen so einzuschränken, dass ein plausibles Modell des Verkehrsflusses und der Signalisierung entsteht. Erst eine geeignete Kostenfunktion sorgt allerdings dafür, dass sich das gewünschte Systemverhalten einstellt. Das Wunschverhalten kann, je nach Nutzeranforderungen, variieren und die Kostenfunktion muss so gewählt werden, dass das gewünschte Verhalten im mathematischen Sinne optimal ist. Dazu wird, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, im Falle einer linearen

Kostenfunktion ein Gewichtungsvektor f erstellt und zusätzlich eine Gewichtungsmatrix H im Falle einer quadratischen Kostenfunktion. Die Gewichte sorgen für eine Bestrafung des Anwachsens der korrespondierenden Entscheidungsvariable. Im Folgenden werden unterschiedliche Beispiele diskutiert, mit denen eine geeignete Kostenfunktion aufgestellt werden kann. Es wird zwar lediglich auf den Gewichtungsvektor f eingegangen, das Vorgehen ist aber auf quadratische Kostenfunktionen mit einer Gewichtungsmatrix H übertragbar.

Minimierung von Haltevorgängen und Wartezeiten

Das Hauptziel der Steuerung besteht in einer Reduktion der Anzahl der Halte. Haltevorgänge verringern durch den anschließenden Beschleunigungsvorgang zum einen die Kapazität des Knotenpunktes und haben zum anderen einen erhöhten Energiebedarf und erhöhte Emissionen zur Folge. Wie Gleichung (4.20) angibt, beschreiben die Entscheidungsvariablen u^{GLOSA} und u^{STOP} eine Geschwindigkeitsreduktion des jeweils betrachteten Fahrzeugs. Da es sich bei der Optimierung gemäß den Gleichungen (4.5) und (4.7) um eine Minimierung handelt, sorgt eine Gewichtung dieser Variablen dafür, dass Geschwindigkeitsreduktionen vermieden werden. Die Gewichtung führt nicht nur zu einer Bestrafung von Haltevorgängen, sondern auch von Wartezeiten, da ein haltendes Fahrzeug durch die dann dauerhaft auftretende Geschwindigkeitsreduktion das Ergebnis der Kostenfunktion erhöht. Zur gleichzeitigen Berücksichtigung von Signalisierung und Geschwindigkeitshinweisen wird die Reduktion der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs in zwei Anteile aufgeteilt. So kann eine Reduktion durch einen Geschwindigkeitshinweis u^{GLOSA} mit einem geringeren Gewicht belegt werden als eine darüber hinausgehende Reduktion u^{STOP} . Da die Haltevorgänge durch ein Auftreffen auf die Signalbarriere oder vorausfahrende Fahrzeuge erzeugt werden, wird die Optimierung dazu führen, dass, durch eine geeignete Einteilung der Freigabezeit, Halte möglichst vermieden werden. Die geringere Gewichtung von u^{GLOSA} sorgt dafür, dass ansonsten unvermeidbare Haltevorgänge reduziert werden, indem die Geschwindigkeit der Fahrzeuge bis zum Schwellwert abgesenkt wird. Obwohl Geschwindigkeitsreduktionen bis zum Schwellwert gewünscht sind, sollte u^{GLOSA} mit einem Gewichtungsfaktor belegt werden. Andernfalls würden Hinweise auch dann erzeugt werden, wenn diese nicht zwingend notwendig wären. Um die Geschwindigkeitshinweise erst in möglichst geringem Abstand zur Haltlinie zu aktivieren, kann auch der Abstand zur Haltlinie mit einem Gewicht belegt werden. Prinzipiell soll für die Wahl der Gewichtungen gelten:

$$p^{STOP} > p^{GLOSA} > p^{dist}, \quad p^{STOP} > 0, p^{GLOSA} > 0, p^{dist} \geq 0 \quad (4.59)$$

Für den Gewichtungsvektor eines Fahrzeugs ergibt sich gemäß dem Vektor der Entscheidungsvariablen aus (4.48):

$$f^{n,FSi} = [p_{k+1|k}^{n,dist} \quad \dots \quad p_{k+N_c|k}^{n,dist} \quad p_{k+1|k}^{n,GLOSA} \quad \dots \quad p_{k+N_c|k}^{n,GLOSA} \quad p_{k+1|k}^{n,STOP} \quad \dots \quad p_{k+N_c|k}^{n,STOP} \quad 0 \quad \dots] \quad (4.60)$$

Die Nulleinträge am Ende des Vektors (4.60) rühren daher, dass die Hilfsvariablen nicht mit einer Gewichtung belegt werden, da diese lediglich der korrekten Formulierung von Nebenbedingungen dienen und keiner mit Kosten zu belegenden physikalischen Größe entsprechen.

Analog zu (4.50) lautet der Gewichtungsvektor für einen Fahrstreifen damit:

$$f^{FSi} = [f^{1,FSi} \quad \dots \quad f^{N,FSi} \quad f^{N+1,LSA,FSi}] \quad (4.61)$$

Dieser Vektor bildet die Basis für die nachfolgend beschriebenen dynamischen Ergänzungen.

Ausgleich von Gewichtungen vernetzter und nicht vernetzter Fahrzeuge

Da nicht vernetzte Fahrzeuge keine Geschwindigkeitshinweise erhalten, wird der fehlende Freiheitsgrad der Geschwindigkeitsbeeinflussung auch in der Optimierung berücksichtigt. Dies geschieht, indem der Geschwindigkeitsreduktionsanteil $u^{GLOSA} = 0$ gewählt wird und die Geschwindigkeitsreduktion lediglich über u^{STOP} erfolgt. Darüber hinaus kann, wie in Kapitel 4.2 erläutert, für nicht vernetzte Fahrzeuge eine geringere Maximalgeschwindigkeit $v^{max,noV2X}$ für die Modellierung eingestellt werden. Im Ergebnis führt diese unterschiedliche Behandlung von vernetzten und nicht vernetzten Fahrzeugen zu einer unterschiedlich starken Gewichtung. Um dies zu vermeiden, werden die Gewichtungen für ein nicht vernetztes Fahrzeug an der Stelle $n = v$ so angepasst, dass ein vollständiger Halt dieselben Kosten verursacht, wie der eines vernetzten Fahrzeugs:

$$f^{v,STOP} = p^{STOP} \cdot p^{noV2X} \quad (4.62)$$

Dabei gilt:

$$p^{noV2X} = \frac{p^{STOP} \cdot v^{max} \cdot (1 - r^{GLOSA}) + p^{GLOSA} \cdot v^{max} \cdot r^{GLOSA}}{p^{STOP} \cdot v^{max,noV2X}} \quad (4.63)$$

Priorisierung von Einzelfahrzeugen

Lichtsignalanlagen werden seit Beginn ihres Einsatzes nicht nur zur sicheren Steuerung des Verkehrsablaufs, sondern auch zur Umsetzung politischer Ziele genutzt. So werden beispielsweise Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs oder Einsatzfahrzeuge gegenüber dem Individualverkehr priorisiert. Aufgrund der mikroskopischen Modellierung des Verkehrsflusses ist eine Priorisierung von einzelnen Fahrzeugen an der Lichtsignalanlage mit Hilfe von preXible einfach umsetzbar. Wird ein zu priorisierendes Fahrzeug an der Stelle $n = v$ erkannt, erfolgt die Bevorrechtigung vollständig integriert in das Steuerungsverfahren, indem die Gewichtungen von $f^{v,STOP}$ beziehungsweise $f^{v,GLOSA}$ gegenüber anderen Fahrzeugen um einen einzustellenden Faktor erhöht werden:

$$f^{v,GLOSA} = p^{GLOSA} \cdot p^{GLOSA,PRIO}, \quad p^{GLOSA,PRIO} \geq 1 \quad (4.64)$$

$$f^{v,STOP} = p^{STOP} \cdot p^{STOP,PRIO}, \quad p^{STOP,PRIO} \geq 1 \quad (4.65)$$

Eine separate Modellierung der zu priorisierenden Fahrzeuge oder eine Einführung weiterer Regeln zu deren Priorisierung erfolgt nicht. Für unterschiedliche Fahrzeuge können unterschiedliche Gewichtungsfaktoren $p^{GLOSA,PRIO}$ und $p^{STOP,PRIO}$ entsprechend der Anforderungen des Betreibers gewählt werden. Die Möglichkeiten einer flexiblen Priorisierung werden maßgeblich durch die Verfügbarkeit der entsprechenden Daten limitiert, wenngleich durch die zunehmende Vernetzung eine Übertragung von Daten, die über Fahrzeugposition und -geschwindigkeit hinausgehen, denkbar ist. Beispielhaft seien hier genannt:

- Verkehrsmodus (Pkw, Bus, Straßenbahn, Lkw, Einsatzfahrzeug, Fahrrad, Fußgänger),
- Fahrplanabweichung von Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs,
- Anzahl der Insassen und
- Emissionsklassen.

Mit derartigen Informationen ist es möglich, eine klassische Priorisierung nach Fahrzeugtyp vorzunehmen. So kann der öffentliche Verkehr mit einer höheren Gewichtung versehen werden als der Individualverkehr. Einsatzfahrzeuge können eine noch höhere Gewichtung als Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs erhalten, um eine absolute Priorisierung zu ermöglichen. Für Einsatzfahrzeuge sollte auch der Faktor $p^{GLOSA,PRIO}$ sehr hoch gewählt werden, da Geschwindigkeitshinweise unerwünscht sind. Neben dieser klassischen Priorisierung nach Fahrzeugtyp ist aber auch eine sogenannte „balanced priority“ mit den oben genannten Daten umsetzbar. So kann sich, je nach verkehrspolitischer Vorgabe, der Priorisierungsfaktor beispielsweise nach der Anzahl der Insassen eines Fahrzeugs richten, womit ein mit fünf Personen besetzter Pkw die gleiche Gewichtung erführe, wie ein mit fünf Personen besetzter Bus.

Stabilisierung der Prädiktion der Schaltzeitpunkte

Die im Rahmen der modellbasierten prädiktiven Regelung erzeugten Vorhersagen von Steuerungseingriffen werden, abgesehen vom ersten Zeitschritt, welcher tatsächlich umgesetzt wird, in der Regel verworfen. Die Vorhersage dient also lediglich dazu, die Entscheidungen der Steuerung basierend auf dem längerfristig resultierenden Systemverhalten zu treffen. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, können Lichtsignalsteuerungsverfahren, die auf dem Prinzip des rollenden Zeithorizonts beruhen, sich diese systemimmanente Vorhersage aber zu Nutze machen. So können, basierend auf den vorhergesagten Schaltzeitpunkten, Geschwindigkeitshinweise für Fahrzeuge generiert werden oder infrastrukturbasierte Countdown-Anzeigen versorgt werden. Im Falle von preXible werden Geschwindigkeitshinweise zwar direkt im Rahmen der Optimierung generiert. Aufgrund des limitierten Informationsgehalts von SPAT und TPEG-TSI Nachrichten wäre bei einer realen Anwendung aber gegebenenfalls nur die Übertragung von Informationen über Schaltzeitpunkte an die Fahrzeuge möglich. Unabhängig davon ist es sinnvoll, die Geschwindigkeitshinweise im Rahmen der Optimierung zu berücksichtigen, da

nur auf diese Art eine vollständige Integration in den Regelkreis gegeben ist. Es erscheint damit sinnvoll, die Vorhersage der Schaltzeitpunkte zu stabilisieren, um ein Springen der Hinweise zu vermeiden. Im Regelfall ist der für den Zeitschritt $k + n_c$ prädizierte Steuereingriff $u_{k+n_c|k}$ zum Zeitschritt k von der im nächsten Zeitschritt $k + 1$ vorgenommenen Prädiktion $u_{k+n_c|k+1}$ an derselben Stelle unabhängig. Die Vorhersage der Schaltzeitpunkte ist also zunächst nicht mit der Vorhersage des vorigen Berechnungsschritts verknüpft. Um aber zu vermeiden, dass eine geringe Verbesserung der Kostenfunktion eine starke Veränderung der Vorhersage zur Folge hat, wird eine derartige Verknüpfung vorgenommen. Diese erfolgt dynamisch, wird also zu jedem Berechnungsschritt angepasst.

Falls eine Signalgruppe rot zeigt und zum vorhergehenden Zeitschritt keine Freigabe vorhergesagt wurde, wird eine frühzeitige Vorhersage der Freigabe zum aktuellen Zeitschritt bestraft. Dies geschieht aber nicht für den gesamten Steuerhorizont. Die letzten Schritte $N_{c, frei}$ der Vorhersage werden nicht beeinflusst, um die Flexibilität der Steuerung nicht zu stark einzuschränken. Um eine unvorhergesagte Freigabe zu bestrafen, wird u^{LSA} der betreffenden Zufahrt mit einer negativen Gewichtung belegt. Damit die Freigabe umso stärker bestraft wird, je früher sie im Steuerhorizont auftritt, wird sie mit dem potenzierten Abstand zum Ende des Steuerhorizonts multipliziert. Mit Hilfe des Faktors $p^{früh, fak}$ und dem Exponenten $p^{früh, exp}$ wird die Gewichtung parametrisiert. Für die Schritte $n_c \in \{1; \dots; N_c - N_{c, frei}\}$ gilt damit:

$$f_{k+n_c|k}^{LSA, früh} = \begin{cases} -p^{früh, fak} \cdot (N_c - n_c)^{p^{früh, exp}} & , \text{wenn } u_{k-1+n_c|k-1}^{LSA} = 1; n_c \in \{1; \dots; N_c\} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.66)$$

Um das Verwerfen oder Verspäten einer zum vorigen Zeitschritt vorhergesagten Freigabe zu vermeiden, wird eine Gewichtung von u^{LSA} an den um einen Zeitschritt verschobenen vorhergesagten Freigabebeginn \widehat{t}_{F0} vorgenommen. Dadurch wird ein Senken der Kostenfunktion für den Fall einer Freigabe zu diesen Zeitpunkten erzielt. Auch diese Gewichtung wird beschränkt auf die ersten Prädiktionsschritte und zwar umso stärker, je näher sich \widehat{t}_{F0} am Beginn des Steuerhorizonts befindet. Wiederum dienen der Faktor $p^{spät, fak}$ sowie der Exponent $p^{spät, exp}$ der Parametrisierung:

$$f_{k+n_c|k}^{LSA, spät} = \begin{cases} p^{spät, fak} \cdot (N_c - (\widehat{t}_{F0} - 1))^{p^{spät, exp}} & , \text{wenn } (\widehat{t}_{F0} - 1) \leq N_{c, frei} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.67)$$

Der Freigabebeginn zum vorigen Zeitschritt ist der Zeitschritt, an dem $u_{k-1+n_c|k-1}^{LSA}$ erstmals den Wert 0 annimmt:

$$\widehat{t}_{F0} = \min (n_c \in \{1; \dots; N_c\} \mid u_{k-1+n_c|k-1}^{LSA} = 0) \quad (4.68)$$

Beschränkung der maximalen Sperrzeit

Ist der Verkehrsstrom einer Signalgruppe stark ausgelastet, der einer anderen hingegen nur sehr gering, kann der Fall eintreten, dass es für das Gesamtsystem optimal wäre, den wenig

ausgelasteten Verkehrsstrom nicht zu bedienen. Für den gesamten Knotenpunkt betrachtet, können so die Anzahl der Halte und die Wartezeit reduziert werden. Für die Verkehrsteilnehmer des schwach nachgefragten Verkehrsstroms kann die Wartezeit jedoch inakzeptable Werte annehmen. Unter anderem aus diesem Grund sind die Umlaufzeiten in Deutschland auf 120 s beschränkt [FGSV, 2010B]. Bei verkehrsabhängigen Steuerungen kann zwar auf die regelmäßige Freigabe verzichtet werden, für diesen Fall ist aber ein Anforderungsdetektor vorzusehen. Da das Verfahren preXible nicht umlaufbasiert ist, erscheint es sinnvoll, eine maximale Sperrzeit $t_{S,max}$ für jede Signalgruppe zu definieren. Diese kann entweder generell erzwungen werden oder lediglich, wenn ein Anforderungsdetektor vorhanden und durch ein Fahrzeug belegt ist. Eine maximale Sperrzeit ließe sich prinzipiell auch durch die Formulierung von Nebenbedingungen erzwingen. Allerdings kann der Fall eintreten, bei dem zwei Signalgruppen unverträglicher Verkehrsströme die maximale Sperrzeit gleichzeitig oder so zeitversetzt erreichen, dass die zweite Signalgruppe den Grenzwert während der Mindestfreigabezeit der ersten Signalgruppe erreicht. Zwar ließen sich diese Anforderungen mit Hilfe zusätzlicher Regeln sequentiell bedienen und so Unlösbarkeiten vermeiden, das gewünschte Systemverhalten lässt sich jedoch mit weniger Komplexität durch eine Veränderung der Zielfunktion erreichen. So wird beim Erreichen der maximalen Sperrzeit eine hohe Gewichtung für das Fahrzeug festgelegt, welches den Anforderungsdetektor belegt. Ist kein solcher Detektor vorhanden, wird stattdessen ein Fahrzeug kurz vor der Haltlinie im Modell eingefügt. Die Erhöhung der Gewichtung erfolgt analog zu der oben beschriebenen Priorisierung von Einzelfahrzeugen, allerdings lediglich für die Schritte des Steuerhorizonts ab dem Erreichen der maximalen Sperrzeit bis zum Verstreichen der Mindestfreigabezeit. Ein Zähler $t_{S,akt}$ bestimmt hierzu die seit dem Ende der letzten Freigabe vergangene Zeit für jede Signalgruppe:

$$f_{k+n_c|k}^{N,STOP} = \begin{cases} p^{STOP} \cdot p^{ts} & , \text{wenn } (t_{S,max} - t_{S,akt}) \leq n_c \leq (t_{S,max} - t_{S,akt}) + t_{F,min} \\ p^{STOP} & , \text{sonst} \end{cases} \quad (4.69)$$

Dies gilt für alle $n_c \in \{1; \dots; N_c\}$. Analog zu (4.69) erfolgt die Gewichtung auch für die Anteile $f_{k+n_c|k}^{N,GLOSA}$.

Die Gewichtung p^{ts} ist größer zu wählen als diejenige der zu priorisierenden Einzelfahrzeuge, um eine Freigabe der entsprechenden Signalgruppe zu garantieren. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die einstellbare maximale Sperrzeit $t_{S,max}$ dennoch nicht zwingend eingehalten wird, wenn beispielsweise zwei zueinander unverträgliche Verkehrsströme gleichzeitig die maximale Sperrzeit erreichen. Zwar sind auch lange Sperrzeiten wegen vermehrter Rotlichtverstöße bei langen Wartezeiten als sicherheitskritisch zu betrachten, allerdings scheint die sekundengenaue Einhaltung dieser Grenzwerte weniger kritisch als etwa bei Mindestfreigabezeiten und Zwischenzeiten.

In Tab. 4.6 werden die in diesem Abschnitt eingeführten Formelzeichen zur Bestimmung der Kostenfunktion mit Erläuterung und Beispielwert aufgelistet.

Zeichen	Erläuterung	Beispielwert
p^{GLOSA}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{GLOSA}	50
p^{STOP}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{STOP}	1000
p^{dist}	Gewichtung des Abstands zur Haltlinie x	10
$p^{GLOSA,PRIO}$	Faktor zur Erhöhung von p^{GLOSA} zur Priorisierung	50
$p^{STOP,PRIO}$	Faktor zur Erhöhung von p^{STOP} zur Priorisierung	50
$p^{früh,fak}$	Faktor zur Vermeidung frühzeitiger Freigabe	-100
$p^{früh,exp}$	Exponent zur stärkeren Gewichtung frühzeitiger Freigabe zu Beginn des Horizonts	2
$p^{spät,fak}$	Faktor zur Vermeidung verspäteter Freigabe	100
$p^{spät,exp}$	Exponent zur stärkeren Gewichtung verspäteter Freigabe zu Beginn des Horizonts	2
$N_{c,frei}$	Steuerhorizontanteil ohne Bestrafung von Abweichung	5 s
p^{ts}	Faktor zur Begrenzung der maximalen Sperrzeit	100
$t_{s,max}$	Maximale Sperrzeit	90 s
$t_{s,akt}$	Aktuelle Sperrzeit einer Signalgruppe	17 s
\widehat{t}_{F0}	Vorhergesagter Freigabebeginn zum vorigen Zeitschritt	3 s

Tab. 4.6 Verwendete Formelzeichen zur Bestimmung der Kostenfunktion mit Erläuterung und Beispielwert für Zählvariablen (weiß), statische Parameter (grau)

4.5 Erweiterung der Knotenpunktsteuerung auf Netze

Bei dem Steuerungsverfahren preXible handelt es sich um ein dezentrales Steuerungsverfahren, die Steuerungsentscheidungen werden also mit Fokus auf den Knotenpunkt ermittelt. Um die Flexibilität der Steuerung durch gemeinsame Umlaufzeiten und feste Versatzzeiten nicht einzuschränken, wird auf das gezielte Ermitteln einer Koordinierung der Lichtsignalanlagen zwar verzichtet. Eine Koordinierung soll sich aber bei entsprechender Verkehrssituation dynamisch einstellen, wie es auch bei dem Verfahren von LÄMMER [2016] angestrebt wird. Erfolgt die Erfassung von Fahrzeugen in ausreichender Entfernung zum Knotenpunkt, erscheint dies prinzipiell möglich, da durch modellbasierte Steuerungsansätze die Ankunft von Fahrzeugpulks antizipiert werden kann. Die frühzeitige Erfassung wird im Falle von preXible durch weit vom Knotenpunkt entfernte Detektoren beziehungsweise eine entsprechende Kommunikationsreichweite der vernetzten Fahrzeuge sichergestellt. Dennoch können in Straßennetzen Situationen und Effekte auftreten, welche bei rein knotenpunktbasierter Betrachtung nicht vollständig zu beherrschen sind. Hierzu zählen zum einen Überstauungen an flussabwärts gelegenen Knotenpunkten und zum anderen Knotenpunkte, die einen geringen Abstand zueinander aufweisen.

Ist eine Zufahrt an einem stromabwärts gelegenen Knotenpunkt überstaut, sollten an stromaufwärts gelegenen Knotenpunkten möglichst keine Verkehrsströme freigegeben werden, welche den stromabwärts gelegenen Knotenpunkt weiter überlasten könnten. Im schlechtesten Fall kann der Rückstau bis zum stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt gelangen und dort den Abfluss von Fahrzeugen behindern, womit in der Folge Freigabezeit ungenutzt verstreichen würde. Zur Berücksichtigung von stromabwärtigen Überstauungen übermitteln benachbarte Knotenpunkte ihren derzeitigen Zustand untereinander. Überschreitet der Rückstau an einem stromabwärts gelegenen Knotenpunkt einen festgelegten Schwellwert, werden am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkte diejenigen Fahrzeuge mit einer geringeren Gewichtung versehen, welche Verkehrsströmen zugehörig sind, die zu einem weiteren Anwachsen des stromabwärts gelegenen Rückstaus führen. Die Auswirkungen auf die Gewichtungen der Fahrzeuge an einem Knotenpunkt mit überstauter Zufahrt sowie am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt illustriert Bild 4.10.

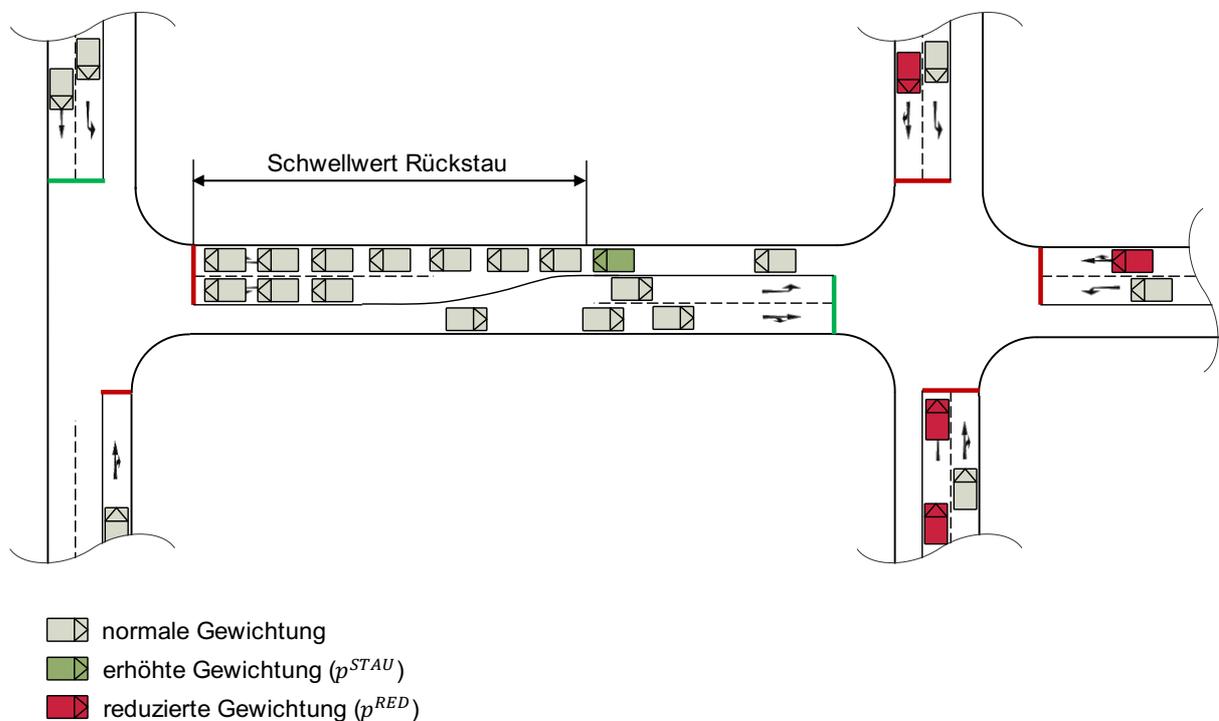


Bild 4.10 Schematische Darstellung des Einflusses einer überstauten Zufahrt auf die Gewichtungen der Fahrzeuge

Die Reduzierung der Gewichtung von Fahrzeugen am stromaufwärts befindlichen Knotenpunkt geschieht ähnlich zu der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Priorisierung einzelner Fahrzeug. Allerdings erfolgt die um p^{RED} reduzierte Gewichtung nun für alle Fahrzeuge eines Fahrstreifens:

$$f^{FSi,STOP} = p^{STOP} \cdot p^{RED}, \quad 0 < p^{RED} < 1 \quad (4.70)$$

Analog zu (4.70) erfolgt die reduzierte Gewichtung auch für die Anteile $f^{FSi,GLOSA}$.

Um Überstauungen vorzubeugen, wird bei Überschreiten der Rückstaulänge das letzte Fahrzeug des Rückstaus, welches mit Hilfe des Verkehrsflussmodells an der Stelle $n = v$ erkannt wird, um p^{STAU} stärker gewichtet:

$$f^{v,STOP} = p^{STOP} \cdot p^{STAU}, \quad p^{STAU} \geq 1 \quad (4.71)$$

Wiederum erfolgt eine entsprechende Veränderung der Gewichtung auch für $f^{v,GLOSA}$.

Neben der Berücksichtigung von Überstauungen durch die stromaufwärts gelegenen Knotenpunkte, werden auch die erwarteten Ankünfte von Fahrzeugen an die stromabwärts gelegenen Knotenpunkte übermittelt. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn die Strecke zwischen zwei Knotenpunkten so kurz ist, dass Fahrzeuge diese in einer Zeit zurücklegen, die kürzer ist als der Steuerhorizont. Um auch bei solch kurzen Strecken die Fahrzeugankünfte frühzeitig antizipieren zu können, wurde das Verkehrsflussmodell dahingehend erweitert, dass ein Anfügen neuer Fahrzeuge zum Zustandsvektor während des Steuerhorizonts möglich ist. Für die zu empfangenden Fahrzeuge wird, mit Hilfe der am stromaufwärts gelegenen Knotenpunkt ermittelten Vorhersage, der erwartete Eintritt in den Steuerhorizont bestimmt und die Fahrzeuge werden an den ermittelten Stellen in den Zustandsvektor eingefügt und fortan im Rahmen der Optimierung berücksichtigt. Bild 4.11 zeigt die Fahrzeugpositionen für vier Zeitschritte des Steuerhorizonts mit grau dargestellten, bereits in der Zufahrt befindlichen Fahrzeugen und blau dargestellten, während des Steuerhorizonts hinzugefügten Fahrzeugen.

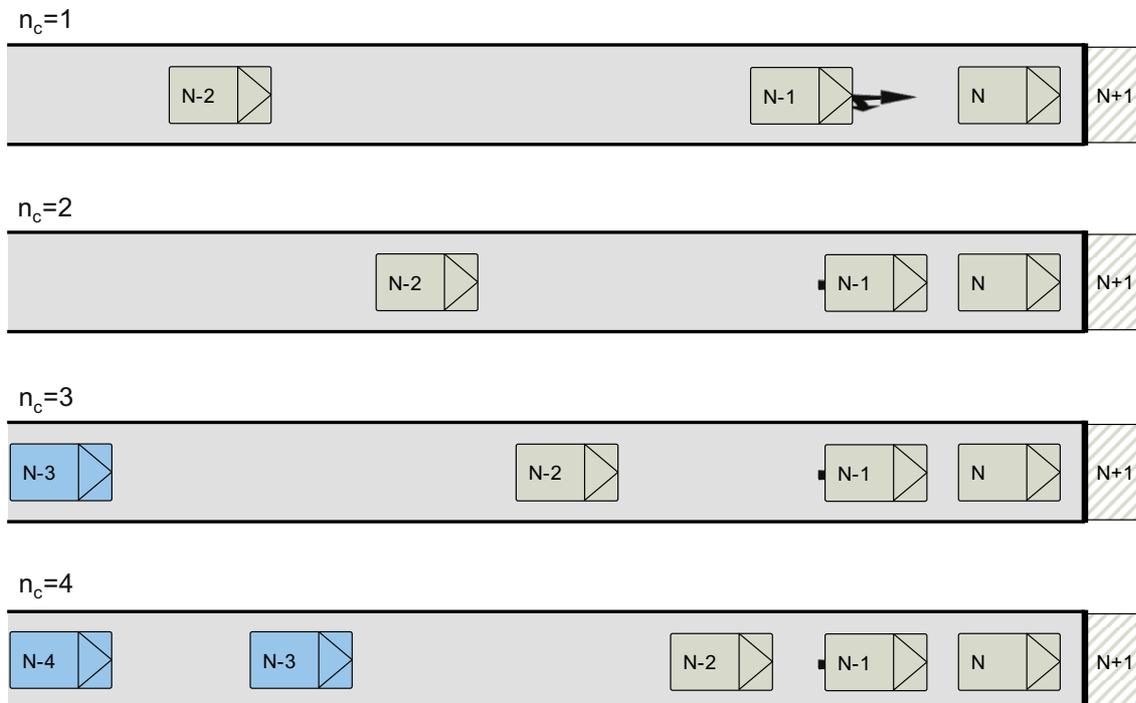


Bild 4.11 Schematische Darstellung der Berücksichtigung von bereits in der Zufahrt befindlichen (grau) und erwarteten Fahrzeugen (blau) während des Steuerhorizonts

Wie sich im Laufe der Entwicklung von preXible herausstellte, sind insbesondere die in Abschnitt 4.4 beschriebenen Eingriffe durch die Begrenzung der maximalen Sperrzeit der Ausbildung einer Koordinierung von Streckenzügen abträglich. Erfolgen diese Eingriffe strikt und unkoordiniert zum Zeitpunkt der eingestellten maximalen Sperrzeit, kann eine Vielzahl zusätzlicher Haltevorgänge verursacht werden. Daher wird für die Netzsteuerung ein zweistufiges Konzept für die Beschränkung der Sperrzeit eingesetzt. Zusätzlich zu der eingeführten maximalen Sperrzeit $t_{S,max}$ und der zugehörigen Gewichtung p^{ts} werden zwei weitere Größen mit vergleichbarer Wirkung eingeführt. So wird eine geringere Grenze $t_{S,max,flex} < t_{S,max}$ mit einer deutlich geringeren Gewichtung $p^{ts,flex} \ll p^{ts}$ genutzt, um ein vorzeitiges Beenden der Sperrzeit zu ermöglichen. Dies soll dann der Fall sein, wenn nur wenige Fahrzeuge konkurrierender Verkehrsströme von einem solchen Eingriff betroffen sind. Tritt bis zum Erreichen von $t_{S,max}$ kein günstiger Moment ein, sorgt der höhere Faktor p^{ts} für ein Erzwingen der Freigabe. Insbesondere in Kombination mit der Berücksichtigung von Fahrzeugen stromaufwärts gelegener Knotenpunkte während des Steuerhorizonts, kann so im Bedarfsfall eine Freigabe zu einem günstigeren Zeitpunkt vorgezogen werden. Im Vergleich zu einer ausschließlichen Anhebung von $t_{S,max}$ verringert sich die höchste auftretende Sperrzeit tendenziell, bei gleichzeitiger Verringerung der durch den Eingriff entstehenden negativen Einflüsse.

Die beschriebenen Erweiterungen von preXible zur Berücksichtigung von Effekten in Straßennetzen beruhen auf dem Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Knotenpunkten und gegebenenfalls einer Anpassung der Gewichtungen. Die Entscheidungen der Steuerung erfolgen weiterhin dezentral am Knotenpunkt. Neben den genannten Erweiterungen kann es auch wünschenswert sein, auf einem strategischen Teil des Straßennetzes die Qualität des Verkehrsablaufs gegenüber anderen Routen zu erhöhen. Dies ließe sich mit einer höheren Gewichtung der Fahrzeuge auf den Fahrstreifen des strategischen Netzes erzielen, wird aber zunächst nicht weiter betrachtet, sondern erst in Kapitel 6.3 aufgegriffen.

Die neu eingeführten Parameter fasst Tab. 4.7 zusammen.

Zeichen	Erläuterung	Beispielwert
p^{RED}	Faktor zur Reduktion von f bei Überstauung stromabwärts	0,01
p^{STAU}	Faktor zur Erhöhung von f bei Überstauung der Zufahrt	2
$t_{S,max,flex}$	Flexible Begrenzung der Sperrzeit	70 s ($< t_{S,max}$)
$p^{ts,flex}$	Faktor zur flexiblen Begrenzung der Sperrzeit	3 ($< p^{ts}$)

Tab. 4.7 Verwendete Formelzeichen zur Erweiterung der Kostenfunktion um Aspekte der Netzsteuerung mit Erläuterung und Beispielwert, statische Parameter hellgrau hinterlegt

4.6 Algorithmus des Verfahrens preXible

Durch die mathematischen Formulierungen der Nebenbedingungen sowie die Bildung einer geeigneten Zielfunktion ist zwar der Kern des Verfahrens preXible bereits beschrieben. Zur Untersuchung der Wirkung des Verfahrens sind diese Beschreibungen aber in einen ablauf-fähigen Programmcode zu übertragen. Das hierzu gewählte Vorgehen wird in diesem Abschnitt beschrieben. Das Verfahren ist in der Programmiersprache Python 2.7 implementiert und mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulationssoftware SUMO 0.28 [KRAJZEWICZ ET AL., 2012] verbunden. Die Optimierung wird mit Hilfe des kommerziell verfügbaren Lösungs-algorithmus CPLEX 12.6.2 [IBM, 2015] vorgenommen. Aufbauend auf Bild 4.1 zeigt Bild 4.12, wie der Algorithmus von preXible mit den beiden externen Programmen SUMO und CPLEX verbunden ist.

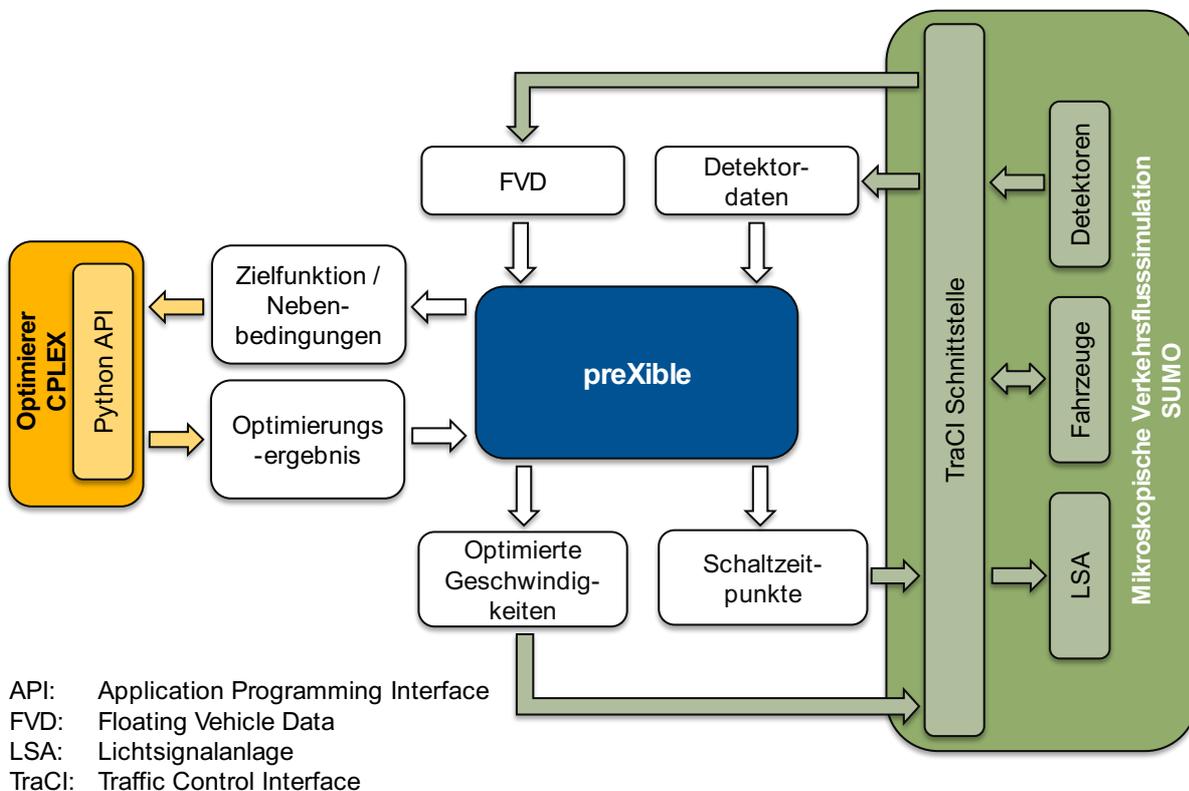


Bild 4.12 Verbindung von preXible mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation SUMO und der Optimierungsoftware CPLEX

SUMO bietet mit dem Traffic Control Interface (TraCI) eine Möglichkeit zum Austausch von Informationen während der Laufzeit. Über diese Schnittstelle werden Detektordaten, aber auch Positions- und Geschwindigkeitsdaten sowie der Abbiegewunsch der vernetzten Fahrzeuge an preXible übertragen. Die durch die Optimierung ermittelten Schaltzeitpunkte werden von preXible an die in der Simulation abgebildeten Lichtsignalanlagen übermittelt. Die optimierten Geschwindigkeiten werden über die TraCI Schnittstelle an die vernetzten Fahrzeuge gesendet. Das Optimierungsergebnis, also den Vektor η sowie den Wert der Zielfunktion J ,

liefert die Optimierungssoftware CPLEX über eine Python Schnittstelle an den preXible Algorithmus. Zuvor werden die zum jeweiligen Zeitschritt gültigen Nebenbedingungen und Gewichtungen der Kostenfunktion über diese Schnittstelle an CPLEX übergeben.

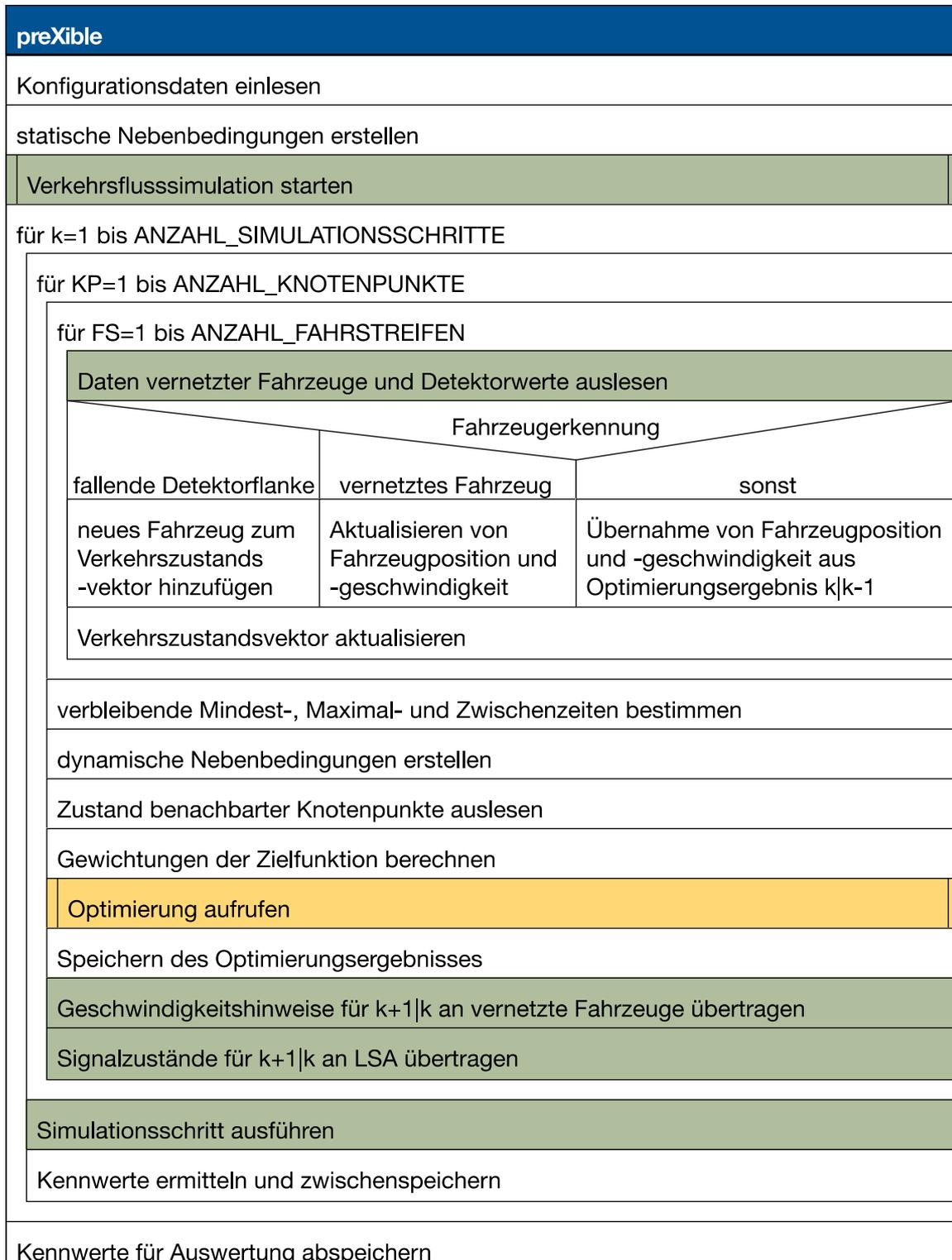


Bild 4.13 Struktogramm des preXible Algorithmus mit farblicher Markierung der genutzten Fremdsoftware gemäß Bild 4.12

Bild 4.13 zeigt zur Verdeutlichung des Ablaufs des Algorithmus von preXible ein vereinfachtes Struktogramm. Mit dessen Hilfe werden im Folgenden die einzelnen Schritte des Algorithmus genauer erläutert.

4.6.1 Konfiguration des Algorithmus

Bevor die Simulation gestartet werden kann, muss eine Konfiguration des Steuerungsverfahrens vorgenommen werden. Hierbei müssen vom Benutzer die zeitlich unveränderlichen Parameter festgelegt werden, die in den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels Erwähnung fanden und in Tab. 4.1 bis Tab. 4.7 aufgelistet sind. Um preXible mit der Simulationsumgebung verknüpfen zu können, müssen außerdem Informationen über das Simulationsnetz dem Algorithmus von preXible zugänglich gemacht werden. So muss eine Zuordnung der Bezeichner der Fahrstreifen in der Simulation zu den in preXible durchnummerierten Fahrstreifen erfolgen. Dies erfolgt sowohl für die Fahrstreifen, welche exklusiv einer Signalgruppe zugeordnet werden können, als auch für die stromaufwärts liegenden Mischfahrstreifen. Diese Zuordnung ermöglicht beispielsweise die Verortung von vernetzten Fahrzeugen zur Berücksichtigung durch preXible und umgekehrt die korrekte Übertragung der Signalisierungszustände aus dem Optimierungsergebnis auf die Signalgruppen der Simulation.

Da insbesondere bei der Betrachtung mehrerer Knotenpunkte eine Vielzahl von Parametern eingestellt werden muss, werden diese Informationen in einer Konfigurationsdatei ausgelagert, welche von preXible vor Beginn der Simulation eingelesen wird. Diese Konfigurationsdatei kann manuell oder mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche befüllt werden.

4.6.2 Erstellen von Nebenbedingungen

Einige der in den Abschnitten 4.2 und 4.3 beschriebenen Nebenbedingungen sind zeitlich unveränderlich. Zu diesen statischen Nebenbedingungen zählen beispielsweise diejenigen aus Ungleichung (4.52), welche zur Berücksichtigung von Unverträglichkeiten von Verkehrsströmen dienen. Andere Nebenbedingungen sind dynamisch, also abhängig von zeitlich veränderlichen Variablen, wie beispielsweise dem Optimierungsergebnis des letzten Zeitschritts. Hier sei die Nebenbedingung zur Berücksichtigung von Zwischenzeiten im Rahmen der Prädiktion genannt, welche durch Ungleichung (4.53) gegeben ist. Um die Laufzeit des Algorithmus möglichst niedrig zu halten, werden die Matrizen M und E sowie die korrespondierenden Vektoren g und d der statischen Nebenbedingungen nur einmalig zu Beginn erstellt. Die dynamischen Nebenbedingungen werden dagegen zu jedem Zeitschritt erneut ermittelt, wie aus Bild 4.13 hervorgeht.

Zum erleichterten Verständnis wurden die Nebenbedingungen in den Abschnitten 4.2 und 4.3 nicht strikt in die Form von Ungleichung (4.6) beziehungsweise Gleichung (4.9) überführt. Für die Implementierung von preXible und die Übergabe der Nebenbedingungen an die Optimierungssoftware werden mathematische Umformungen in ebendiese Formen vorgenommen.

Die Matrizen M und E werden als dünnbesetzte Matrizen erstellt, da häufig nur wenige Einträge einer Matrix von null verschieden sind. Dünnbesetzte Matrizen sind weniger speicherintensiv, weshalb deren Verwendung deutlich die Performanz des entwickelten Algorithmus steigert. Nach Gleichung (4.51) ergeben sich mit den in Tab. 4.1 sowie Tab. 4.5 angegebenen Beispielwerten bei einem Knotenpunkt mit acht Fahrstreifen über 10000 Einträge für den Vektor der Entscheidungsvariablen η . Beispielsweise wird für die Nebenbedingung, welche den Mindestabstand zwischen zwei Fahrzeugen festlegt, unter Verwendung von Ungleichung (4.23) für jedes Fahrzeug und jeden Prädiktionsschritt eine neue Zeile der Matrix M angelegt. Die Spaltenanzahl dieser Matrix entspricht dabei der Dimension von η . Für das betrachtete Beispiel des Mindestabstands hat jede Zeile r aber lediglich zwei Einträge in den Spalten c und $c + 1$, welche von null verschieden sind. Im Rahmen von preXible wird das Koordinaten-Format zur Darstellung von dünnbesetzten Matrizen verwendet, bei dem drei Listen zur Erstellung einer Matrix benötigt werden. Je eine Liste nimmt die Einträge der Zeilen (engl.: row), der Spalten (engl.: col) und der von null verschiedenen Daten (engl.: data) der Matrix auf. Bild 4.14 zeigt die Erstellung dieser Listen für eine Zeile der Matrix M anhand der in die Form von Ungleichung (4.6) umgeformten Nebenbedingung aus Ungleichung (4.23).

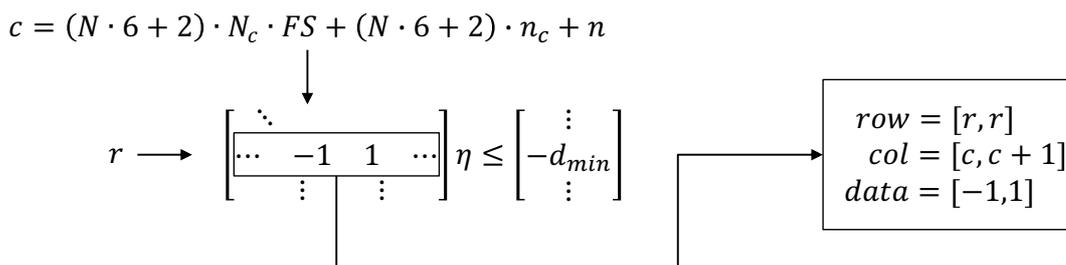


Bild 4.14 Erstellung einer dünnbesetzten Matrix im Koordinaten-Format am Beispiel von Ungleichung (4.23)

Statt der über 10000 Einträge, die vorrangig null wären, kann die in Bild 4.14 dargestellte Zeile nun mit drei Listen mit je zwei Einträgen formuliert werden. Zur Erstellung derartiger Matrizen und zu deren weiteren Verarbeitung steht mit SciPy [JONES ET AL., 2001] eine frei verfügbare Erweiterung für Python zur Verfügung.

4.6.3 Schätzung des Verkehrszustands

Um die Steuerung vornehmen zu können, müssen Messwerte verarbeitet werden, welche Rückschlüsse auf den vorherrschenden Verkehrszustand geben. Im Rahmen der in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen werden mit vernetzten Fahrzeugen und konventionellen Schleifendetektoren zwei unterschiedliche Datenquellen verwendet. Es wird angenommen, dass vernetzte Fahrzeuge aktuelle Daten zu Position, Geschwindigkeit, Abbiegewunsch und Fahrzeugtyp zu jedem Zeitschritt k übermitteln. Die Übermittlung der Daten wird idealisiert als nicht fehlerbehaftet und latenzfrei angenommen. Um nicht vernetzte Fahrzeuge in der

Steuerung berücksichtigen zu können, werden Schleifendetektoren verwendet. Es wird angenommen, dass deren Belegungssignal abrufbar ist, womit Detektorflanken und damit die Überfahrt einzelner Fahrzeuge ermittelt werden können. Geschwindigkeiten oder sonstige weitere Informationen werden durch die Detektoren nicht ermittelt.

Je Knotenpunkt wird zu jedem Zeitschritt für jede Zufahrt eine Liste erstellt, welche die folgenden Informationen der einzelnen Fahrzeuge enthält:

- Detektionsart und -zeitpunkt,
- Fahrzeugtyp,
- Fahrzeugposition,
- Fahrzeuggeschwindigkeit,
- Fahrzeug-ID und
- Angabe ob Erkennung auf exklusivem oder nicht exklusivem Bereich der Fahrstreifen erfolgte.

Zu jedem Zeitschritt wird hierzu die Liste des vorherigen Zeitschritts herangezogen, um die Daten der Fahrzeuge zu aktualisieren, neu erkannte Fahrzeuge hinzuzufügen oder Fahrzeuge zu entfernen, welche die Haltlinie überfahren haben. Das Vorgehen ist ähnlich wie bei der Verwendung eines Kalman-Filters, demgegenüber jedoch stark vereinfacht. Bild 4.15 beschreibt den Ablauf des Kalman-Filters. Zunächst wird der Zustand zum aktuellen Zeitschritt durch eine auf dem Zustand zum vorherigen Zeitschritt basierenden Prädiktion ermittelt. Für diese Prädiktion kommt ein mathematisches Modell des betrachteten Systems zum Einsatz. Anschließend findet eine Korrektur dieser Prädiktion durch Messwerte statt. Je nach Genauigkeit der Messwerte können diese gegenüber dem vorhergesagten Zustand mehr oder weniger stark gewichtet werden.

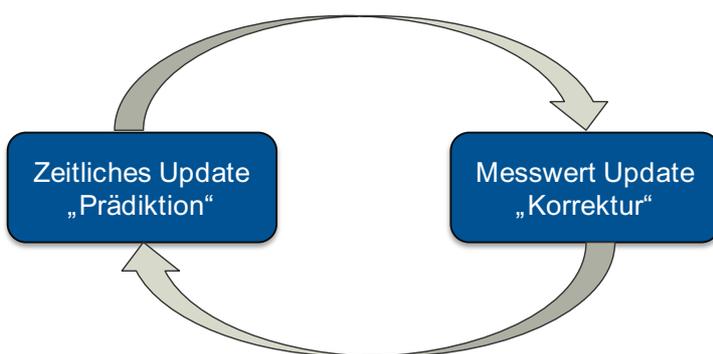


Bild 4.15 Funktionsweise des Kalman-Filter nach [BISHOP & WELCH, 2006]

Im Rahmen von preXible wird für die Prädiktion zum Zeitschritt k der erste Schritt des Prädiktionshorizonts zum vorherigen Zeitschritt, also $k|k-1$, herangezogen. Da die Messwerte als ideal angenommen werden, werden die Werte aller vernetzten Fahrzeuge bei der anschließenden Korrektur überschrieben. Umgekehrt wird für die bereits bekannten, nicht vernetzten Fahrzeuge lediglich auf die durch das Modell vorhergesagten Werte zurückgegriffen. Wird

eine fallende Flanke im Detektorsignal erkannt, so wird ein neues nicht vernetztes Fahrzeug der Liste hinzugefügt.

Nachdem die aktualisierte Liste der in der Zufahrt befindlichen Fahrzeuge zur Schätzung des Verkehrszustands erstellt wurde, wird diese für den folgenden Berechnungsschritt angepasst. Dabei wird sichergestellt, dass die ermittelten Werte nicht zu Unlösbarkeiten im Rahmen der Optimierung führen. Beispielsweise können durch die Schätzung Abstände zwischen Fahrzeugen ermittelt werden, die kleiner als der durch die Nebenbedingungen geforderte Mindestabstand d^{min} sind. Durch inkrementelle Anpassungen der geschätzten Fahrzeugpositionen werden Konflikte vermieden. Nachdem diese Anpassungen erfolgt sind, wird die Liste der Fahrzeuge nach dem Abstand zur Haltlinie in absteigender Reihenfolge sortiert. Anschließend wird jedem Fahrzeug die Position n im Zustandsvektor zugeordnet.

4.6.4 Aktualisierung dynamischer Nebenbedingungen und Gewichtungen

Um die Rechenzeit möglichst gering zu halten, werden statische Nebenbedingungen und Gewichtungen der Kostenfunktion nur einmalig zu Beginn des Aufrufs von preXible ermittelt. Einige Nebenbedingungen und Gewichtungen müssen allerdings zur Laufzeit angepasst werden, was im Folgenden näher erläutert wird.

Ermittlung von Zählvariablen

Einige der in diesem Kapitel beschriebenen Nebenbedingungen sind von vergangenen Steuerungsentscheidungen abhängig. Hierzu werden Zählvariablen genutzt, welche für jede Signalgruppe die verbleibende Mindestfreigabezeit, Mindestsperrzeit und Zwischenzeit aufzeichnen. Darüber hinaus nimmt eine Variable die aktuelle Länge der Sperrzeit jeder Signalgruppe auf. Diese Variablen werden zu jedem Zeitschritt überprüft und dienen im Bedarfsfall der Erstellung von Nebenbedingungen zur Einhaltung von Mindest-, Zwischen- und Maximalzeiten.

Informationsaustausch zwischen Knotenpunkten im Netz

Wie in Kapitel 4.5 beschrieben, stützt sich die Netzsteuerung maßgeblich auf den Datenaustausch zwischen den Knotenpunkten. Zu jedem Zeitschritt wird dazu nach der Optimierung der aktuelle Zustand und die vorhergesagten Zustände, also Fahrzeugpositionen, -geschwindigkeiten und Signalzustände, des jeweiligen Knotenpunktes gespeichert. Im nächsten Zeitschritt werden diese Informationen von den benachbarten Knotenpunkten ausgelesen. Daraufhin wird bestimmt, ob und zu welchem Zeitpunkt Fahrzeuge von stromaufwärts befindlichen Knotenpunkten während des Steuerhorizonts gemäß Bild 4.11 berücksichtigt werden müssen. Basierend auf den Berechnungen der stromabwärts befindlichen Knotenpunkte wird gegebenenfalls eine Anpassung der Gewichtungen von Fahrzeugen in einzelnen Zufahrten vorgenommen.

Berechnung der Gewichtungen der Zielfunktion

Die stärkere Gewichtung von Geschwindigkeitsreduktionen durch Geschwindigkeitshinweise gegenüber darüberhinausgehenden Geschwindigkeitsreduktionen bildet die Grundlage der Zielfunktion. Die in Kapitel 4.4 beschriebenen sonstigen Gewichtungen sind dagegen dynamisch, verändern sich also zur Laufzeit des Algorithmus. Aufbauend auf der in Abschnitt 4.6.3 beschriebenen Liste der Fahrzeuge zur Beschreibung des Verkehrszustands, werden die dort hinterlegten Fahrzeugtypen zur Ermittlung der Priorisierungsgewichtung und zur Gewichtung von Überstauungen verwendet. Basierend auf der Prädiktion der Schaltzeitpunkte des vorherigen Zeitschritts und der aktuell je Signalgruppe ermittelten Sperrzeit werden die Gewichtungen zur Beschränkung der maximalen Sperrzeit sowie diejenigen zur Stabilisierung der Prädiktion ermittelt.

4.6.5 Beeinflussung von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen

Nachdem die Optimierung durchgeführt wurde, werden die relevanten Einträge des Vektors der Entscheidungsvariablen extrahiert und zur Beeinflussung von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen genutzt. Für jedes vernetzte Fahrzeug wird der Wert $u_{k+1|k}^{n, GLOSA}$ an der geeigneten Stelle n des Vektors η für den ersten Prädiktionsschritt ausgelesen. Anschließend wird das betreffende Fahrzeug mit Hilfe des TraCI Befehls „slowDown“ um den Wert $u_{k+1|k}^{n, GLOSA}$ verzögert beziehungsweise beschleunigt. Die durch das Fahrzeugfolgemodell der Simulation gegebenen maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen werden durch gewählten Befehl nicht verletzt. Die Befolgung der Geschwindigkeitshinweise durch die vernetzten Fahrzeuge erfolgt zunächst fehlerfrei. Alternativ kann ein zufällig ausgewählter Faktor mit der ermittelten Geschwindigkeit multipliziert werden, um Abweichungen von den empfohlenen Geschwindigkeiten abzubilden. Nicht ausgestattete Fahrzeuge erhalten grundsätzlich keine Hinweise.

Die Beeinflussung der Lichtsignalanlagen erfolgt auf ähnliche Weise. So werden die Werte des ersten Prädiktionsschritts $u_{k+1|k}^{LSA}$ jedes Fahrstreifens aus dem Vektor η extrahiert. Über die im Rahmen der Konfiguration festgelegte Zuordnung der Fahrstreifen in preXible zu denjenigen der Simulation werden die korrespondierenden Signalgruppen über TraCI angesprochen. Ein Wert von $u_{k+1|k}^{LSA} = 1$ wird in ein rotes Signal übersetzt, ein Wert von $u_{k+1|k}^{LSA} = 0$ entsprechend in ein grünes. Im Rahmen der Optimierung kann lediglich zwischen Freigabe und Sperrung einer Signalgruppe unterschieden werden, weshalb Übergangszeiten nicht gesondert betrachtet werden, sondern in den Zwischenzeiten als rotes Signal enthalten sind. Um eine Gelbzeit zu ermöglichen, wird daher ein Umschalten der Signalgruppen von $u_{k+1|k}^{LSA} = 0$ auf $u_{k+1|k}^{LSA} = 1$ überwacht und für das gewählte Zeitintervall t_G ein gelbes anstelle eines roten Signals geschaltet. Auf die Anzeige eines rot/gelben Signals zu Beginn der Freigabezeit wird im Rahmen der Simulation verzichtet, da die simulierten Fahrzeuge nicht anders reagieren, als auf ein rotes Signal.

4.6.6 Ermittlung von Kenngrößen zur Bewertung der Wirkung von preXible

Zur Bewertung der Wirkung von preXible werden im Rahmen der in Kapitel 5 vorgestellten Simulationsstudien verschiedene Kenngrößen ermittelt, die Rückschlüsse auf die Verkehrs- und Umwelteffizienz des Verfahrens erlauben. Derartige Werte können entweder nach Abschluss der Simulation aus den Bewegungsdaten der Fahrzeuge abgeleitet werden oder zur Laufzeit der Simulation ermittelt werden. Zur Untersuchung von preXible wird letzterer Weg gewählt, da die benötigten Werte direkt über die TraCI Schnittstelle abgefragt werden können. Hierzu werden, unterschieden nach Fahrzeugtyp, die folgenden Verkehrseffizienzgrößen ermittelt:

- Anzahl der Halte [-],
- maximale Wartezeit [s] und
- gesamte im Netz verbrachte Zeit [Fzg·s], (engl.: total time spent, kurz: tts).

Die Grenzggeschwindigkeit, ab der ein Fahrzeug als haltend erkannt wird, wird auf 1 m/s festgelegt und für die zwei erstgenannten Kenngrößen verwendet. Um eine überhöhte Anzahl der Halte durch Oszillationen um diesen Geschwindigkeitswert zu vermeiden, wird ein erneuter Halt erst dann angenommen, wenn die Geschwindigkeit von 1,5 m/s zuvor überschritten wurde. Zusätzlich wird die maximale Wartezeit ermittelt, die ein einzelnes Fahrzeug im Netz verbringt. Dies geschieht, um im Rahmen der Simulationsstudien feststellen zu können, ob einzelne Fahrzeuge aufgrund langer Sperrzeiten stark erhöhte Wartezeiten zugunsten des Gesamtsystems in Kauf nehmen müssen. Bei der gesamten im Netz verbrachten Zeit werden die Zeiten aller Fahrzeuge aufaddiert, die vom Eintreten in das Simulationsnetz bis zum Verlassen desselben notwendig sind. Zur Bewertung der Umwelteffizienz können über die TraCI Schnittstelle auch Verbrauchs- und Emissionskennwerte zur Laufzeit abgerufen werden. Für die Auswertung werden beispielhaft Kohlenstoffdioxidemissionen herangezogen. Die Ermittlung der Emissionen durch SUMO basiert auf dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) [KELLER ET AL., 2004].

Neben den zuvor genannten Kennwerten zur Bewertung der Wirkung von preXible sollen auch Aussagen zur Vorhersagequalität der Schaltzeitpunkte getroffen werden. Wie Kapitel 3 zu entnehmen ist, hat sich hierzu bisher kein einheitlicher Kennwert durchsetzen können. Aus diesem Grund wird für die Bewertung der Vorhersagequalität von preXible ein Kennwert eingeführt, der aus der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl.: root-mean-square error (RMSE)) gebildet wird. Ausgehend von einem stattgefundenen Umschaltvorgang auf ein grünes Signal werden die letzten Ω Zeitschritte betrachtet und jeweils die Differenz zwischen dem zum Zeitpunkt $k - \omega$ vorhergesagten Freigabebeginn $\hat{t}_{F0|k-\omega}$ und der Zeit bis zum tatsächlichen Umschaltvorgang ω gebildet und quadriert. Durch Berücksichtigung der insgesamt betrachteten Zeitschritte und dem Ziehen der Quadratwurzel ergibt sich somit folgende Berechnungsvorschrift:

$$RMSE_{pred,t_F} = \sqrt{\frac{\sum_{\omega=1}^{\Omega} (\hat{t}_{F0|k-\omega} - \omega)^2}{\Omega}}, \Omega \leq N_c \quad (4.72)$$

Die Anzahl der Zeitschritte Ω , die zur Bewertung der Vorhersagequalität herangezogen werden, wird sinnvollerweise so gewählt, dass derjenige Teil des Steuerhorizonts berücksichtigt wird, der gemäß den Gleichungen (4.66) und (4.67) mit einer Gewichtung zur Verbesserung der Vorhersage versehen ist. Für den Fall, dass zu einem Zeitschritt keine Vorhersage der Freigabe stattfand, \hat{t}_{F0} also nicht ermittelt werden kann, wird stattdessen Ω angenommen, um den schlechtesten Fall zu repräsentieren. Der in Gleichung (4.72) angegebenen Kennwert wird zu jedem Freigabebeginn ermittelt und aufaddiert. Nach Abschluss der Simulation wird der addierte Wert durch die Anzahl der Freigaben geteilt.

Die zur Laufzeit aufgezeichneten Informationen werden nach Abschluss des Simulationslaufs in einer Ergebnisdatei gespeichert und stehen dann zur weiteren statistischen Auswertung mit separater Software zur Verfügung.

4.7 Theoretische Überlegungen zur Leistungsfähigkeit von preXible

In diesem Abschnitt soll die Funktionsweise von preXible erläutert und dessen theoretische Leistungsfähigkeit untersucht werden. Entgegen der zuvor dargestellten Kopplung mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, wird zu diesem Zweck für die Modellierung des Verkehrsflusses dasselbe Modell verwendet, wie dasjenige, das zur Ermittlung der Steuerungsentscheidungen genutzt wird. Somit entspricht das Verhalten der Fahrzeuge genau demjenigen, welches durch das Modell der Steuerung vorhergesagt wird. Zur Untersuchung wird ein vereinfachtes Beispiel gewählt, in dem nur zwei konfligierende Verkehrsströme bestehen und durch eine kleine Konfliktfläche Zwischenzeiten von 2 s zwischen der Freigabe der beiden Signalgruppen SG A und SG B ausreichend sind. Der untere Teil von Bild 4.16 zeigt die Anordnung der beiden Zufahrten. Die kurzen Zwischenzeiten und die gewählten Parameter, welche in Tab. 4.8 zusammengefasst sind, zielen auf eine hohe Flexibilität der Steuerung und eine starke Beeinflussungsmöglichkeit der Fahrzeuge ab. So werden hohe Beschleunigungen und Verzögerungen sowie starke Geschwindigkeitsreduktionen ermöglicht. Die in Tab. 4.8 gegebenen Parameter gelten für alle in diesem Abschnitt betrachteten Szenarien, sofern eine Abweichung nicht explizit angegeben wird. Mit 2 s wird die minimale Zeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen so gewählt, dass auf einer Strecke Verkehrsstärken von 1800 Fzg/h erreicht werden können. Im Folgenden wird untersucht, welche Verkehrsstärken theoretisch bedient werden können, wenn zwei konfligierende Verkehrsströme vorliegen.

Zeichen	Erläuterung	Wert
N_c	Länge des Steuerhorizonts	20 s
N	Anzahl der je Fahrstreifen berücksichtigten Fahrzeuge	20
v^{max}	Maximalgeschwindigkeit	13,9 m/s
r^{GLOSA}	Beschränkung u^{GLOSA} bezogen auf v^{zul}	0,4
z_l^{min}	Minimale Zeitlücke	2,0 s
a^{max}	Maximale Beschleunigung	2,5 m/s ²
$b^{GLOSA,max}$	Maximale Verzögerung durch Geschwindigkeitshinweis	-3,0 m/s ²
$t_{F,min}$	Mindestfreigabezeit	2 s
$t_{S,min}$	Mindestsperrzeit	2 s
p^{GLOSA}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{GLOSA}	10
p^{STOP}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{STOP}	1000
p^{dist}	Gewichtung des Abstands zur Haltlinie x	1

Tab. 4.8 Gewählte Parameter zur Untersuchung der theoretischen Leistungsfähigkeit von preXible

Zunächst werden die Startzeitpunkte der einzelnen Fahrzeuge deterministisch so vorgegeben, dass die von links und von oben kommenden Fahrzeuge jeweils gleichzeitig starten und zwischen den einzelnen Fahrzeugen ein zeitlicher Abstand von 4 s liegt. Betrachtet man beide Zufahrten gemeinsam, ergibt sich also eine Gesamtverkehrsstärke von 900 Fzg/h. Durch die gleichzeitigen Startzeitpunkte der Fahrzeuge der konfligierenden Verkehrsströme würde ohne Beeinflussung der Fahrzeuge unweigerlich ein Haltevorgang am Knotenpunkt verursacht werden. Teil a) von Bild 4.16 zeigt das Zeit-Weg-Diagramm dieses Szenarios, wobei die Trajektorien der Fahrzeuge aus den beiden Zufahrten und die jeweiligen Freigabezeiten entsprechend dem unteren Teil von Bild 4.16 eingefärbt sind. Wie man der Darstellung entnehmen kann, können Haltevorgänge vollständig vermieden werden, indem die Geschwindigkeiten der von links kommenden Fahrzeuge etwa 50 m vor der Haltlinie reduziert werden.

Um zu zeigen, welchen Einfluss unterschiedliche Gewichtungen der Zustandsvariablen in der Kostenfunktion haben, wurde für das in Teil b) von Bild 4.16 gezeigte Szenario die Gewichtung des Abstands zur Haltlinie auf null gesetzt. Es ergeben sich ähnliche Trajektorien der Fahrzeuge wie in Teil a) von Bild 4.16, allerdings sind die Zeitpunkte, an denen die Geschwindigkeitsreduktionen erfolgen, früher und wechseln von Fahrzeug zu Fahrzeug.

Das Szenario, welches in Teil c) von Bild 4.16 dargestellt ist, entspricht demjenigen aus Teil a) mit dem Unterschied, dass die Mindestfreigabezeit für beide Zufahrten auf 5 s erhöht wurde. Es zeigt sich, inwiefern sich stärkere Einschränkungen von Nebenbedingungen der Signalsteuerung auf das Verhalten von preXible auswirken. Auch in diesem Fall können die insgesamt 900 Fzg/h in zwei Zufahrten noch ohne Haltevorgänge abgewickelt werden. Allerdings werden nun durch die längeren Freigabezeiten jeweils zwei Fahrzeuge einer Zufahrt innerhalb

einer Freigabezeit bedient. Hierzu wird das jeweils vordere Fahrzeug abgebremst, um eine Ankunft bei Freigabezeitbeginn zu ermöglichen, während das hintere Fahrzeuge ohne Geschwindigkeitshinweis auskommt. An diesem Verhalten zeigt sich das wechselseitige Zusammenspiel aus Geschwindigkeitshinweisen und Lichtsignalsteuerung und die vollständige Integration der Fahrzeugbeeinflussung in den Regelkreis.

Bei Zeitlücken von 2 s und Zwischenzeiten von 2 s ist es theoretisch möglich, die maximale Verkehrsstärke auf einer Strecke von 1800 Fzg/h auf zwei Zufahrten aufzuteilen und ohne Haltevorgänge zu bedienen. Im betrachteten theoretischen Fall, kann dies mit Hilfe der Optimierung durch preXible erreicht werden, wie Teil a) von Bild 4.17 zeigt. Ähnlich wie in Teil a) von Bild 4.16 zeigen sich sehr kurze Freigabezeiten, die dazu führen, dass die beiden Zufahrten abwechselnd bedient werden. Es zeigt sich wiederum eine Verzögerung der Fahrzeuge etwa 50 m vor der Haltlinie, die jeweils für eine Ankunft an der Haltlinie während der Freigabezeit sorgt. Bei ansonsten gleichen Einstellungen und einer Gesamtverkehrsstärke von 1800 Fzg/h werden nun die Startzeitpunkte der Fahrzeuge zufällig gewählt. Dabei werden durch die Geschwindigkeitshinweise größere Fahrzeugpulks gebildet und durch vergleichsweise starke Geschwindigkeitsreduktionen eine Ankunft der Pulks zu Freigabezeitbeginn und damit eine haltfreie Durchfahrt ermöglicht. Dies wird in Teil b) von Bild 4.17 dargestellt und zeigt wiederum das Zusammenspiel aus Geschwindigkeitshinweisen und Wahl der Schaltzeitpunkte. Bei gleicher Verkehrsstärke kann im Falle stochastischer Startzeitpunkte der Fahrzeuge ein vollständiges Vermeiden von Haltevorgängen allerdings nicht garantiert werden. Dies wird beispielhaft in Teil c) von Bild 4.17 gezeigt und wird durch die zum Teil horizontal verlaufenden Trajektorien sichtbar. Bei genauer Betrachtung zeigt sich hier auch, dass der Rückstau bei der Berechnung der Geschwindigkeitshinweise berücksichtigt wird.

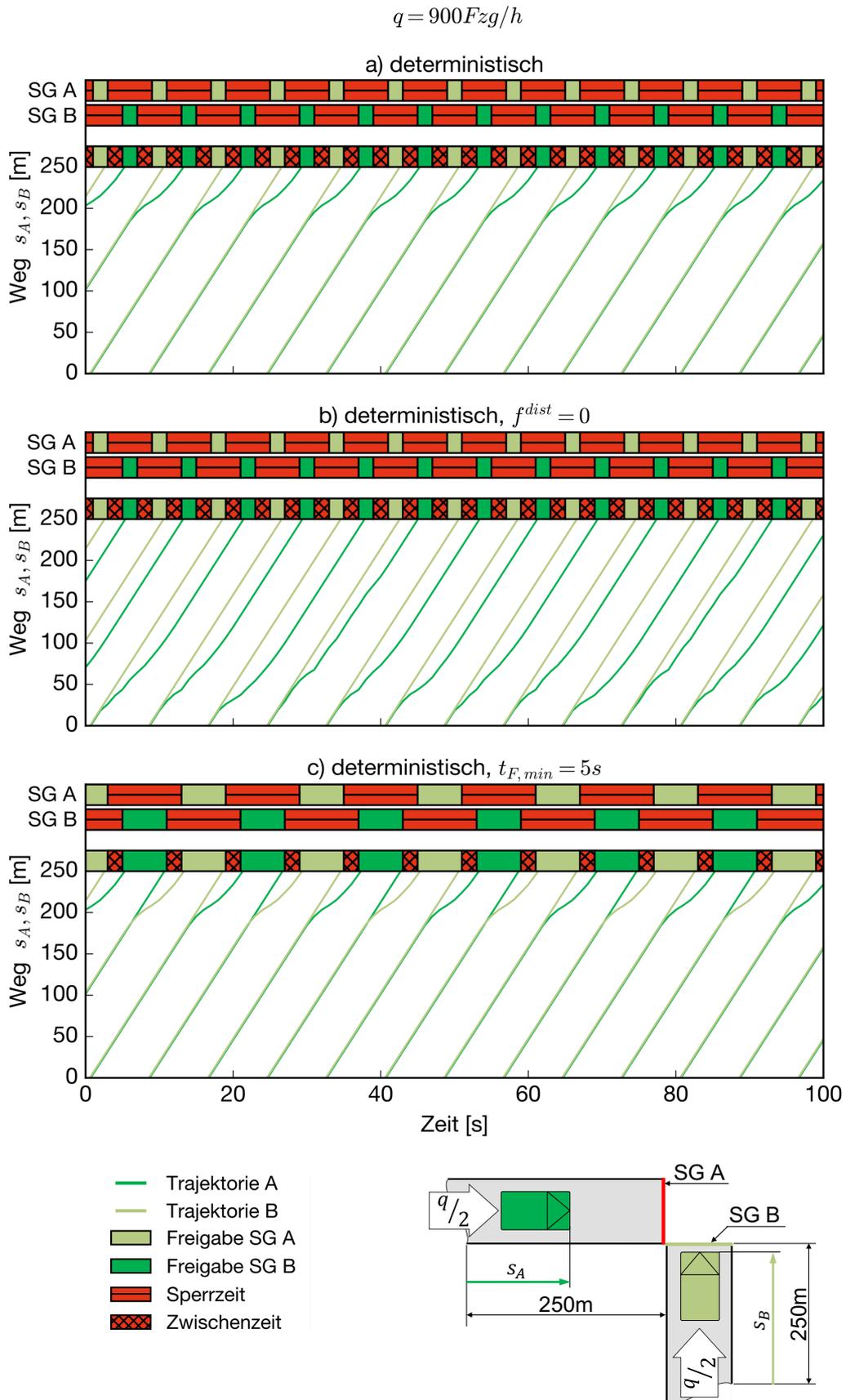


Bild 4.16 Zeit-Weg-Diagramme bei Modellierung und Steuerung mittels preXible mit einer Gesamtverkehrsstärke von 900 Fzg/h bei zwei konfligierenden Verkehrsströmen

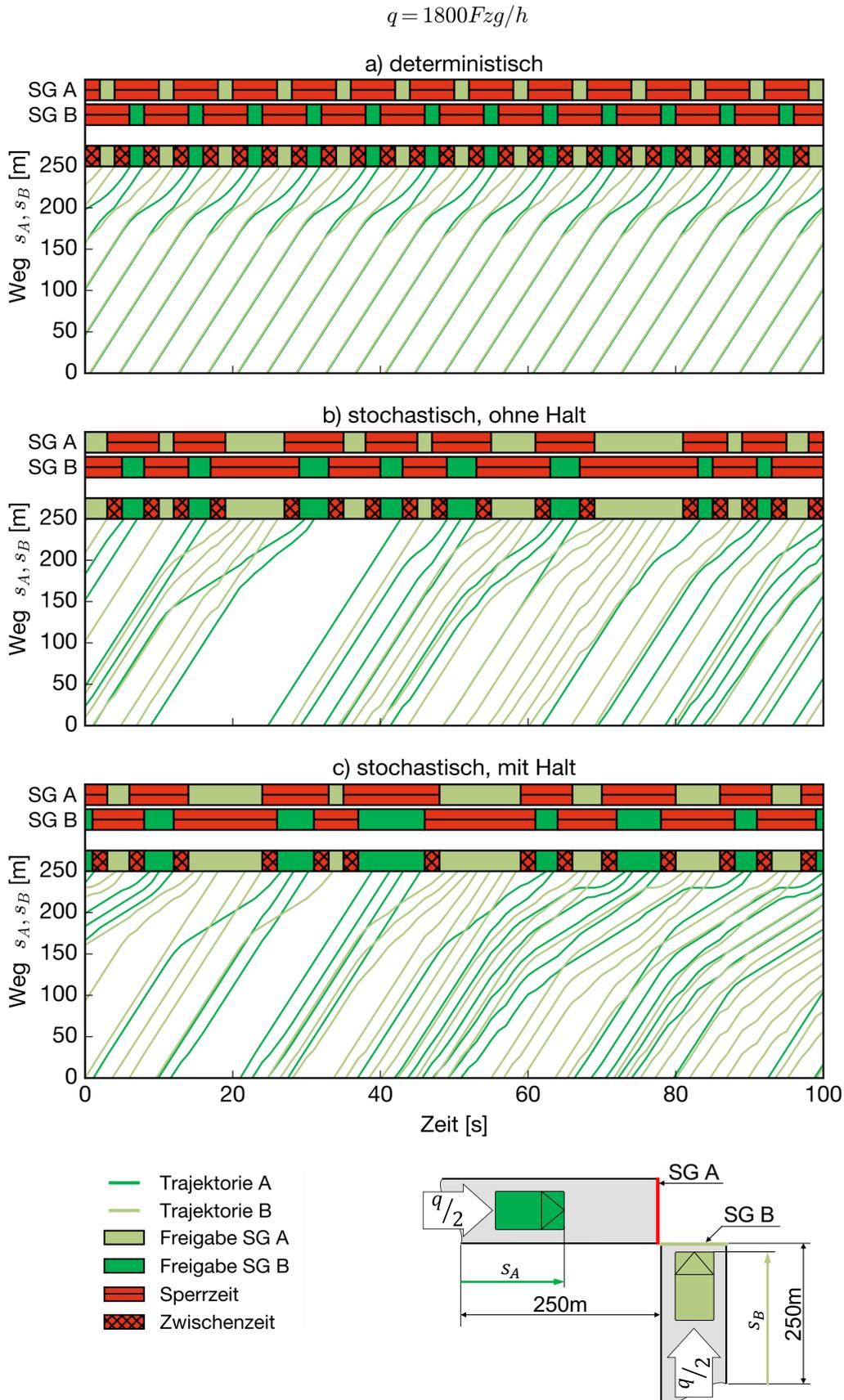


Bild 4.17 Zeit-Weg-Diagramme bei Modellierung und Steuerung mittels preXible mit einer Gesamtverkehrsstärke von 1800 Fzg/h bei zwei konfligierenden Verkehrsströmen

5. Simulationsstudien zur Untersuchung von preXible

In diesem Kapitel wird das Systemverhalten des entwickelten Steuerungsverfahrens mit Hilfe von Simulationsstudien untersucht. Nach einer Erläuterung zur statistischen Analyse erfolgt die Darstellung der Ergebnisse untergliedert nach den drei Untersuchungsschwerpunkten isolierter Knotenpunkt, Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen und Steuerung in Netzen.

Das Szenario zum Nachweis der theoretischen Leistungsfähigkeit, wie es im vorigen Kapitel erläutert wurde, erscheint allenfalls bei vollständiger Automatisierung vorstellbar. So entspricht in der Realität das Fahrzeugverhalten nicht genau demjenigen des zur Steuerung verwendeten Modells und die zuvor gewählten kurzen Freigabe- und Zwischenzeiten sind aus Sicherheitsgründen ebenfalls nicht umsetzbar. Zur Untersuchung des Verfahrens unter realistischen Randbedingungen dienen daher die Simulationsstudien in diesem Kapitel. Hierbei sorgen insbesondere folgende Voraussetzungen für ein von dem, im vorigen Kapitel vorgestellten, Idealfall abweichendes Verhalten:

- stochastisches Fahrzeugverhalten in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation, welches von dem durch preXible modellierten Verhalten abweicht,
- nicht ausgestattete Fahrzeuge werden durch Schleifendetektoren punktuell erfasst, nach der Erfassung werden Geschwindigkeit und Position der Fahrzeuge mit Hilfe des entwickelten Verkehrsflussmodells geschätzt,
- stärker einschränkende Nebenbedingungen durch die Signalisierung wie längere Mindestfreigabe- und Zwischenzeiten,
- größere Anzahl unverträglicher Verkehrsströme an einem Knotenpunkt,
- endlicher Zeithorizont der Optimierung und gegebenenfalls höhere Anzahl an Fahrzeugen in Zufahrten als die maximal durch preXible betrachtete Anzahl.

Für die vorgestellten Simulationsstudien werden außerdem folgende Annahmen getroffen:

- Ausgestattete Fahrzeuge kommunizieren sekundlich Position, Geschwindigkeit, Fahrzeugtyp und Abbiegewunsch mit einer Reichweite von 200 m. Latenzzeiten oder Ortungsfehler werden nicht berücksichtigt.
- Alle ausgestatteten Fahrzeuge befolgen die an sie übermittelten Geschwindigkeitshinweise fehlerfrei, wobei der Geschwindigkeitshinweis die Hälfte der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nicht unterschreitet und für die Befolgung der Geschwindigkeitshinweise notwendige Beschleunigungen und Verzögerungen gemäß den gewählten Nebenbedingungen beschränkt sind. Eine Verletzung der maximalen Beschleunigungen und Verzögerungen, die durch das Fahrzeugfolgemodell gegeben sind, erfolgt nicht.

5.1 Statistische Analyse

Die statistische Analyse zur Untersuchung der Simulationsergebnisse orientiert sich an den relevanten Regelwerken [FGSV, 2006; DOWLING ET AL., 2004]. Da fiktive Knotenpunkte untersucht werden, ist eine Kalibrierung der Simulationsmodelle mit Hilfe von Realdaten, wie sie in den genannten Regelwerken beschrieben ist, nicht möglich. Stattdessen werden die Standardparameter der Simulationssoftware SUMO [KRAJZEWICZ ET AL., 2012] verwendet.

Die Kenngrößen zur verkehrlichen Bewertung werden zur Laufzeit der Simulation ermittelt und für jeden Fahrzeugtyp getrennt aufgezeichnet. Bei Bedarf findet eine separate Kenngrößen-ermittlung für ausgewählte Routen statt. Die anschließende statistische Analyse beruht nicht unmittelbar auf den Trajektorien der Einzelfahrzeuge. Stattdessen werden aus den Bewegungsdaten der Einzelfahrzeuge zunächst aggregierte Kenngrößen wie mittlere Anzahl der Halte oder die gesamte im Netz verbrachte Zeit gebildet. Zur Darstellung der Daten werden Boxplots verwendet. Ein Beispiel mit Erläuterungen ist in Bild 5.1 gezeigt, wobei etwaige Ausreißer aufgrund der Skalierung nicht dargestellt werden.

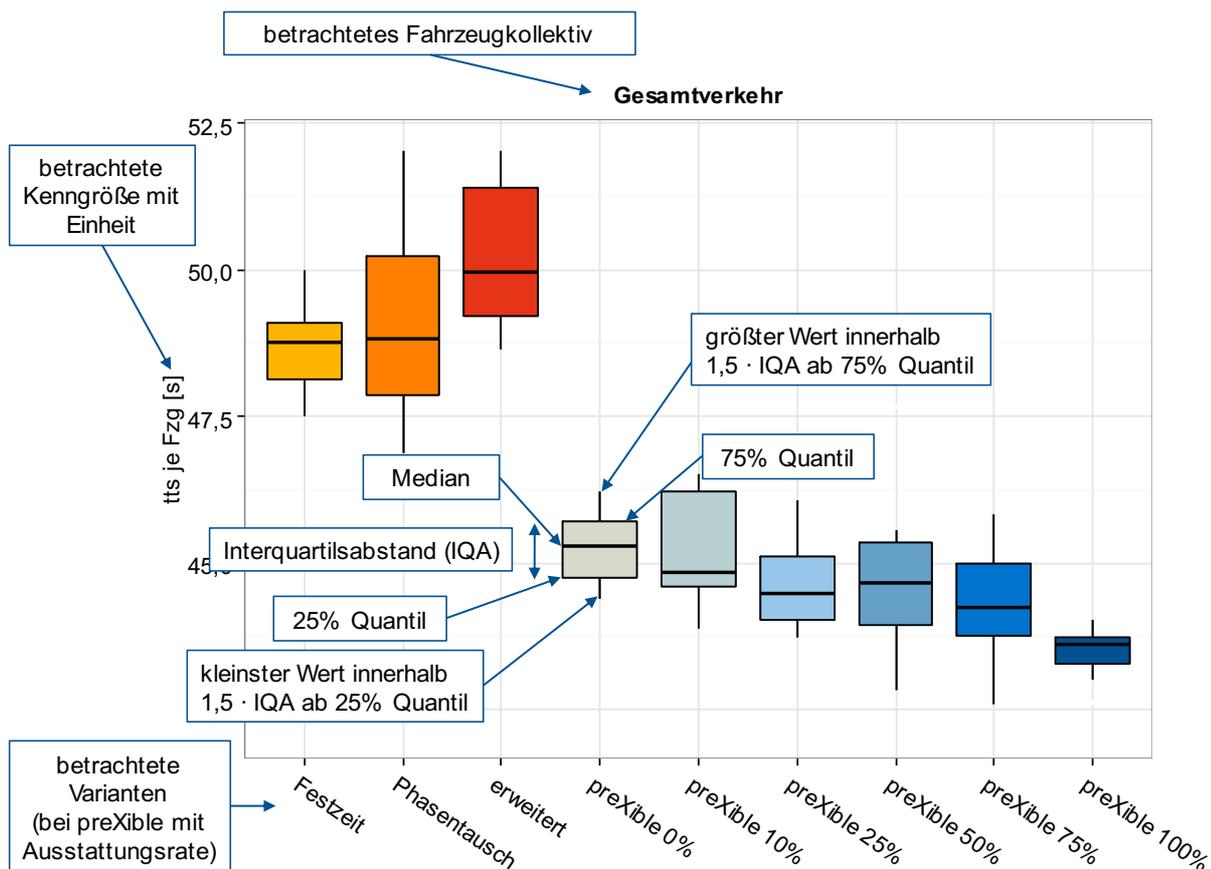


Bild 5.1 Beispielhafte Darstellung eines Boxplots mit Erläuterungen

Um statistisch belastbare Ergebnisse zu erhalten, ist eine ausreichende Anzahl von Simulationsläufen für jede untersuchte Variante durchzuführen. Nach [DOWLING ET AL., 2004]

wird das Konfidenzintervall in Abhängigkeit der Anzahl der Simulationsläufe wie folgt berechnet:

$$CI_{(1-\alpha)\%} = 2 \cdot t_{(1-\frac{\alpha}{2}), N-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (5.1)$$

$CI_{(1-\alpha)\%}$: Konfidenzintervall, mit Wahrscheinlichkeit α , dass wahrer Mittelwert nicht im Konfidenzintervall liegt

N : Anzahl der Simulationsläufe

$t_{(1-\frac{\alpha}{2}), N-1}$: Studentisches t-Quantil für die Wahrscheinlichkeit eines zweiseitigen Fehlers mit der Summe α mit $N - 1$ Freiheitsgraden

s : Standardabweichung

Aus Gleichung (5.1) lässt sich nun iterativ die minimale Anzahl der Simulationsläufe bestimmen oder alternativ das Konfidenzintervall CI berechnen. Im Rahmen dieser Arbeit wird $\alpha = 0,05$ als Signifikanzniveau gewählt und es werden je untersuchter Variante 12 Simulationsläufe à 1800 s durchgeführt. Ist das Konfidenzintervall größer als das Zweifache der Standardabweichung, werden weitere Simulationsläufe durchgeführt.

Die in diesem Kapitel betrachteten Szenarien umfassen stets mehr als zwei Varianten. Um festzustellen, ob eine der Varianten der Untersuchung einen signifikanten Unterschied zu den übrigen Varianten aufweist, wird zunächst eine Varianzanalyse (engl.: Analysis of Variance, kurz: ANOVA) durchgeführt. Die Nullhypothese wird verworfen, wenn ein signifikanter Unterschied mit dem Signifikanzniveau $p = 0,05$ festgestellt wird. Sollte die Nullhypothese verworfen werden, werden anschließend paarweise Vergleiche durchgeführt. Diese dienen dazu, festzustellen, zwischen welchen der untersuchten Varianten signifikante Unterschiede bestehen. Laut DOWLING ET AL. [2004] führt ein mehrfaches Anwenden des t-Tests zu einer schrittweisen Absenkung des Konfidenzintervalls, weshalb der konservativere John Tukey „Honestly Significantly Different“-Test zum paarweisen Vergleich herangezogen wird. Da sowohl die ANOVA als auch der Tukey-Test eine Normalverteilung der Daten voraussetzen, wird der Shapiro-Wilk-Test zur Überprüfung der Normalverteilung durchgeführt. Ein Verwerfen der Nullhypothese zeigt bei diesem Test an, dass keine Normalverteilung der Daten vorliegt. Wie schon bei der ANOVA, werden auch für den Tukey-Test und den Shapiro-Wilk-Test Ergebnisse unterhalb von $p = 0,05$ als signifikant betrachtet. Liegt keine Normalverteilung vor, werden im Bedarfsfall weitere Simulationsläufe durchgeführt. Die genannten statistischen Tests und Berechnungen werden mit der Statistiksoftware R [R CORE TEAM, 2008] durchgeführt, die Boxplots werden mit der Erweiterung ggplot2 [WICKHAM, 2009] erstellt. Die Ergebnisse werden in Form von Tabellen dargestellt, die in den ersten Zeilen Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD) und Konfidenzintervall (CI) für alle Varianten angeben. In Matrixform werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten in Prozent und der zugehörige p-Wert des Tukey-Tests angegeben. Bei einem signifikanten Unterschied wird der Prozentwert fett dargestellt. Liegt eine signifikant verbesserte Wirkung vor, wird der Wert grün dargestellt, bei

einer Verschlechterung rot. Tab. 5.1 zeigt die zu Bild 5.1 zugehörigen Ergebnisse. Die den Boxplots zugehörigen Ergebnistabellen sind der Übersicht halber im Anhang dargestellt.

betrachtete Kenngröße
mit Einheit

betrachtetes
Fahrzeugkollektiv

tts je Fahrzeug [s] (Gesamtverkehr)

		Festzeit	Phasentausch	erweitert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
Mittelwert	MW	48,7	49,2	50,2	45,3	45,2	44,7	44,7	44,3	43,4
Standardabw.	SD	0,81	1,70	1,26	0,62	0,93				
Konfidenzintervall	CI	1,03	1,96	1,46	0,78	1,18				
	Norm	0,578	0,479	0,107	0,433	0,082				
p-Wert des Shapiro-Wilk-Tests (fett: p<0,05)	ANOVA	0,000								
	Festzeit		1,1%	3,1%	-7,1%	-7,2%	-8,3%	-8,2%	-9,1%	-11,0%
p-Wert der ANOVA (fett: p<0,05)	Phasentausch			2,0%	-8,1%	-8,2%	-9,3%	-9,2%	-10,1%	-11,9%
	erweitert				-9,8%	-10,0%	-11,0%	-10,9%	-11,8%	-13,6%
p-Wert des Tukey-Tests der markierten Varianten	preXible 0%					1,000	0,905	0,946	0,374	0,001
	preXible 10%						0,958	0,980	0,496	0,002
	preXible 25%							1,000	0,993	0,082
	preXible 50%								0,983	0,057
	preXible 75%									0,484

Prozentuale Veränderung des Mittelwerts der markierten Varianten (grün fett: Verbesserung und p<0,05 rot fett: Verschlechterung und p<0,05)

Tab. 5.1 Beispielhafte Ergebnistabelle

5.2 Isolierter Knotenpunkt

In diesem Szenario wird das Systemverhalten am isolierten Knotenpunkt untersucht, wobei den Untersuchungsvarianten verschiedene Verkehrsstärken und Ausstattungsraten zugrunde liegen. Ein weiteres Hauptaugenmerk dieser Untersuchung liegt auf der Vorhersagbarkeit der Schaltzeitpunkte.

5.2.1 Szenariobeschreibung

Für die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen wird ein isolierter, vierarmiger Knotenpunkt herangezogen, welcher in jeder Zufahrt einen gesonderten Fahrstreifen für Linksabbieger mit getrennter Signalisierung aufweist. Da das Verkehrsflussmodell von preXible keine bedingt verträglichen Verkehrsströme unterstützt, wird kein Fußgänger- oder Radverkehr simuliert und diese werden auch nicht in der Signalisierung berücksichtigt. Bild 5.2 zeigt die Geometrie des Knotenpunkts sowie die Lage der Detektoren. Die Zeitlücken-

detektoren werden lediglich für die Referenzsteuerung eingesetzt, während die übrigen Detektoren ausschließlich für preXible genutzt werden. Die Lage der Detektoren in den Mischfahrstreifen entspricht mit 200 m der Reichweite vernetzter Fahrzeuge. Die Verkehrsnachfrage wird so variiert, dass sich bei einer Sättigungsverkehrsstärke von 1800 Fzg/h und in Bezug auf die im nächsten Absatz beschriebene Festzeitsteuerung ein durchschnittlicher Auslastungsgrad des Knotenpunkts von 25 %, 50 % beziehungsweise 85 % ergibt. Die angegebenen Auslastungsgrade beziehen sich auf eine deterministische Ankunftsverteilung der Fahrzeuge. Da die Ankunftsverteilung in der Simulation aber stochastisch verteilt ist, kann laut RiLSA [FGSV, 2010B] für den Auslastungsgrad von 85 % bereits von einer Sättigung des Knotenpunkts ausgegangen werden. Höhere Auslastungsgrade werden nicht untersucht, da sich Rückstaulängen einstellen, die das Eintreten weiterer Fahrzeuge in das Simulationsnetz verhindern. Die Verkehrsnachfrage am Knotenpunkt wird an allen vier Armen identisch gewählt, wobei die linksabbiegenden Verkehrsströme mit q_l jeweils die Hälfte der Verkehrsnachfrage des Geradeausstroms q_g aufweisen. Entsprechend wird die Verkehrsnachfrage des Geradeausstroms q_g stufenweise von 117 Fzg/h über 233 Fzg/h auf 400 Fzg/h gesteigert.

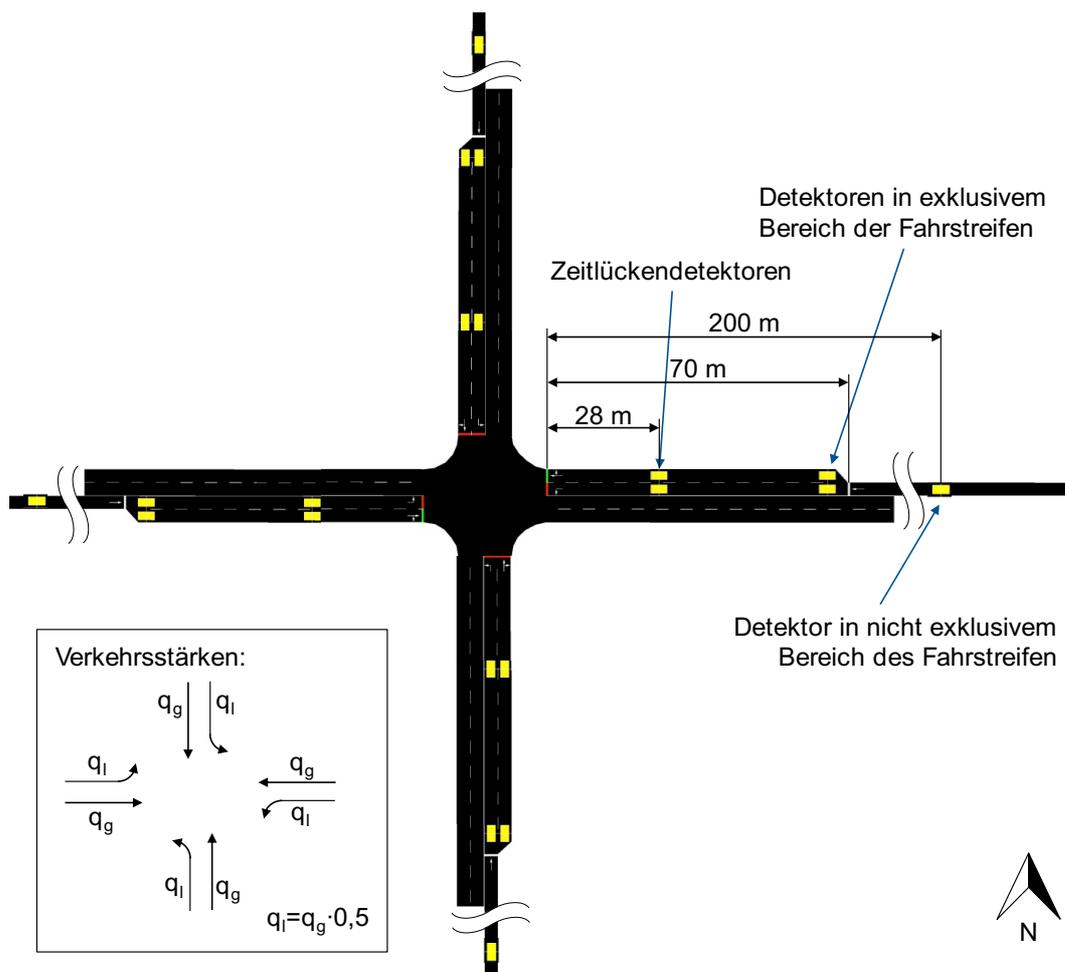


Bild 5.2 Simulationsnetz des Szenarios „isolierter Knotenpunkt“

5.2.2 Referenzsteuerung

Für die Referenzsteuerung werden die Signalgruppen zu vier Phasen zusammengefasst, deren Abfolge unveränderlich ist. Aufgrund der Verkehrsnachfrage werden die geradeausfahrenden Verkehrsströme und die Linksabbieger in unterschiedliche Phasen eingeteilt. Um einen möglichst einfachen Vergleich zwischen Referenzsteuerung und preXible zu ermöglichen, wird mit 5 s für alle Zwischenzeiten das Maximum der aufgrund der Knotenpunktgeometrie ermittelten Zwischenzeiten gewählt. Sowohl bei der Referenzsteuerung als auch bei der Verwendung von preXible beinhalten die Zwischenzeiten 3 s Gelbzeit. Phaseneinteilung der Referenzsteuerung und Zwischenzeitenmatrix sind in Bild 5.3 dargestellt.

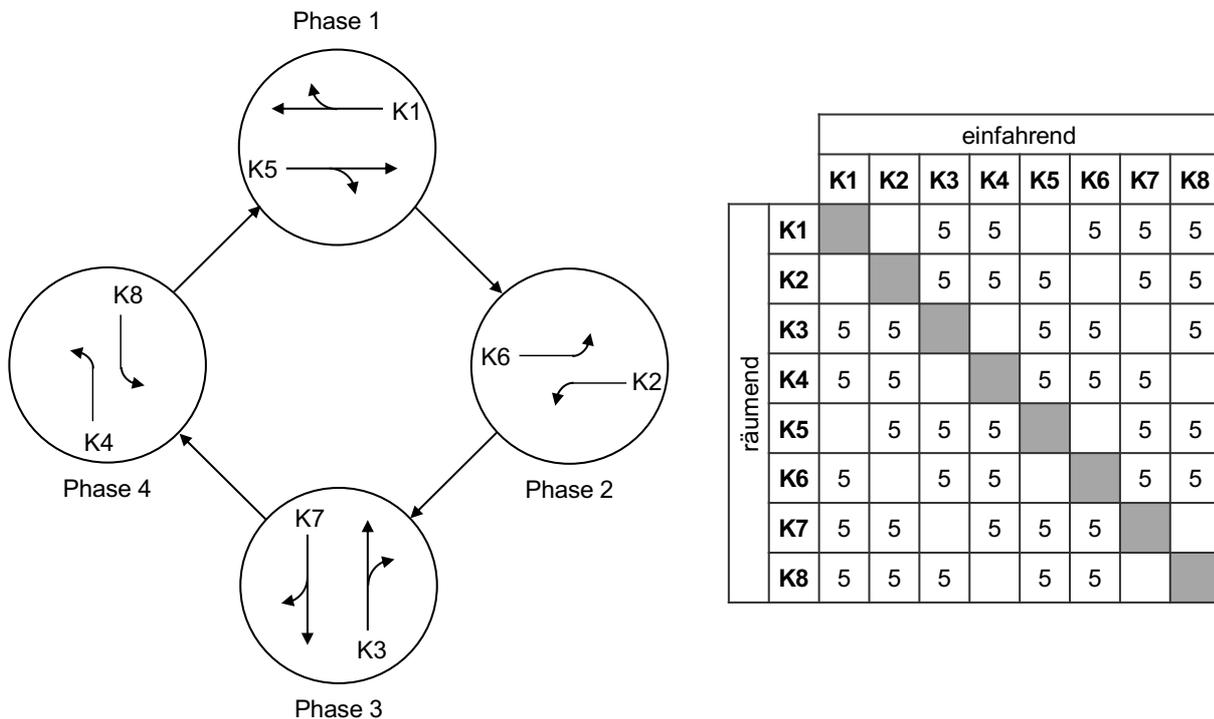


Bild 5.3 Phaseneinteilung der Referenzsteuerung und Zwischenzeitenmatrix am isolierten Knotenpunkt

Auf dieser Grundlage werden zwei Referenzsteuerungen entworfen. Eine Festzeitsteuerung mit einer Umlaufzeit von $t_U = 90$ s sowie eine regelbasierte Steuerung mit Bemessung der Freigabezeit durch Zeitlücken. Bei der Festzeitsteuerung werden, entsprechend der Nachfrage, für die Phasen 1 und 3 je 24 s Freigabezeit gewählt, während die Phasen 2 und 4 je 11 s Freigabezeit erhalten. Die Zeitlückensteuerung wird so eingestellt, dass die Phasen ab einer Zeitlücke von 2 s abgebrochen werden und die Detektoren entsprechend einen Abstand von etwa 28 m zur Haltlinie aufweisen. Unabhängig von den gemessenen Zeitlücken muss für die Phasen 1 und 3 eine Mindestfreigabezeit von 10 s verstreichen. Für die Phasen 2 und 4 gilt eine Mindestfreigabezeit von 5 s. Die maximale Freigabezeit der Phasen wird in Übereinstimmung mit deren Länge im Festzeitprogramm gewählt, sodass die Umlaufzeit der verkehrsabhängigen Steuerung 90 s nicht überschreitet.

5.2.3 Konfiguration von preXible

Die wichtigsten Parameter zur Konfiguration von preXible sind in Tab. 5.2 zusammengefasst. Die Zwischenzeiten sind identisch mit denjenigen der Referenzsteuerung. Hervorzuheben ist an dieser Stelle die Wahl der maximalen Sperrzeit von 90 s. Diese ist von der Umlaufzeit der Referenzsteuerung abgeleitet, wenngleich diese beiden Größen sich nicht direkt entsprechen.

Zeichen	Erläuterung	Wert
N_c	Länge des Steuerhorizonts	18 s
N	Anzahl der je Fahrstreifen berücksichtigten Fahrzeuge	15
v^{max}	Maximalgeschwindigkeit	13,89 m/s
$v^{max,noV2X}$	Maximalgeschwindigkeit nicht vernetzter Fahrzeuge	12 m/s
r^{GLOSA}	Beschränkung u^{GLOSA} bezogen auf v^{max}	0,5
z_l^{min}	minimale Zeitlücke	1,8 s
a^{max}	maximale Beschleunigung	2,0 m/s ²
$a^{max,noV2X}$	maximale Beschleunigung nicht vernetzter Fahrzeuge	1,3 m/s ²
$b^{GLOSA,max}$	maximale Verzögerung durch Geschwindigkeitshinweis	-1,5 m/s ²
$t_{F,min}$	Mindestfreigabezeit	5 s
$t_{S,min}$	Mindestsperrzeit	5 s
$t_{S,max}$	Maximale Sperrzeit	90 s
p^{ts}	Faktor zur Begrenzung der maximalen Sperrzeit	100
p^{GLOSA}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{GLOSA}	50
p^{STOP}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{STOP}	1000
p^{dist}	Gewichtung des Abstands zur Haltlinie x	10

Tab. 5.2 Gewählte Parameter für preXible zur Untersuchung am isolierten Knotenpunkt

Die untersuchten Ausstattungsraten werden von 0 % bis 100 % in 25 % Schritten erhöht. Da in naher Zukunft nur mit geringen Ausstattungsraten vernetzter Fahrzeuge gerechnet werden kann, wird zusätzlich eine Variante mit 10 % untersucht. Die nicht ausgestatteten Fahrzeuge werden mittels stationärer Detektoren erfasst und erhalten keine Geschwindigkeitshinweise.

5.2.4 Ergebnisse

Bei niedriger Knotenpunktauslastung können die Haltevorgänge durch die Nutzung von preXible zwar nicht vollständig vermieden, bei Vollausrüstung gegenüber der Festzeitsteuerung aber nahezu halbiert werden. Mit zunehmender Ausstattungsrate treten die Effekte der Geschwindigkeitshinweise stärker zu Tage, weshalb die Anzahl der Halte stetig abnimmt, wie Bild 5.4 zu entnehmen ist.

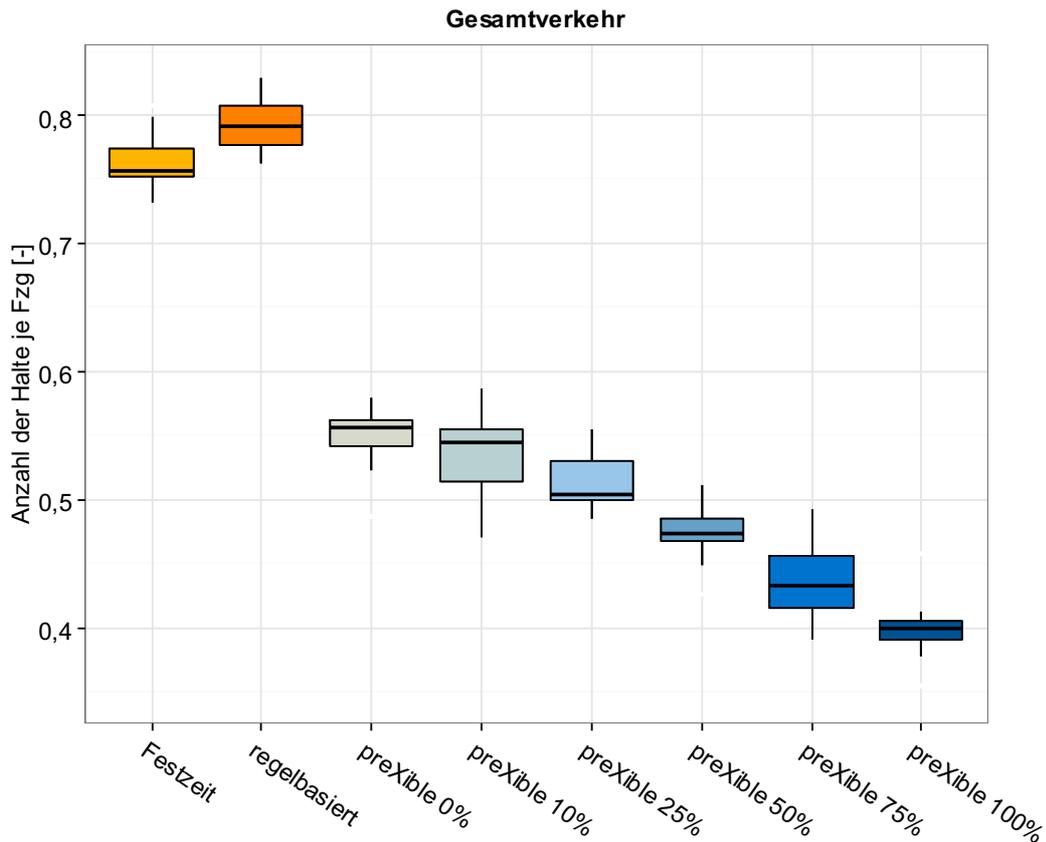


Bild 5.4 Boxplots der Anzahl der Halte bei niedriger Auslastung (25 %)

Aus diesem Grund stellen sich zwischen den verschiedenen Ausstattungsrate n zumeist signifikante Unterschiede ein. Aufgrund des reaktiven Charakters der regelbasierten Steuerung erhöht sich die Anzahl der Halte gegenüber der Festzeitsteuerung leicht, jedoch statistisch nicht signifikant. Bei mittlerer und hoher Auslastung des Knotenpunkts erhöht sich erwartungsgemäß die Anzahl der Halte für alle untersuchten Varianten, wie Bild 5.5 und Bild 5.6 zeigen. Unabhängig von der Ausstattungsrate reduziert sich die Anzahl der Halte durch die Verwendung von preXible aber weiterhin signifikant gegenüber beiden Referenzsteuerungen. Die relativen Unterschiede verringern sich gegenüber der Variante mit niedriger Auslastung jedoch.

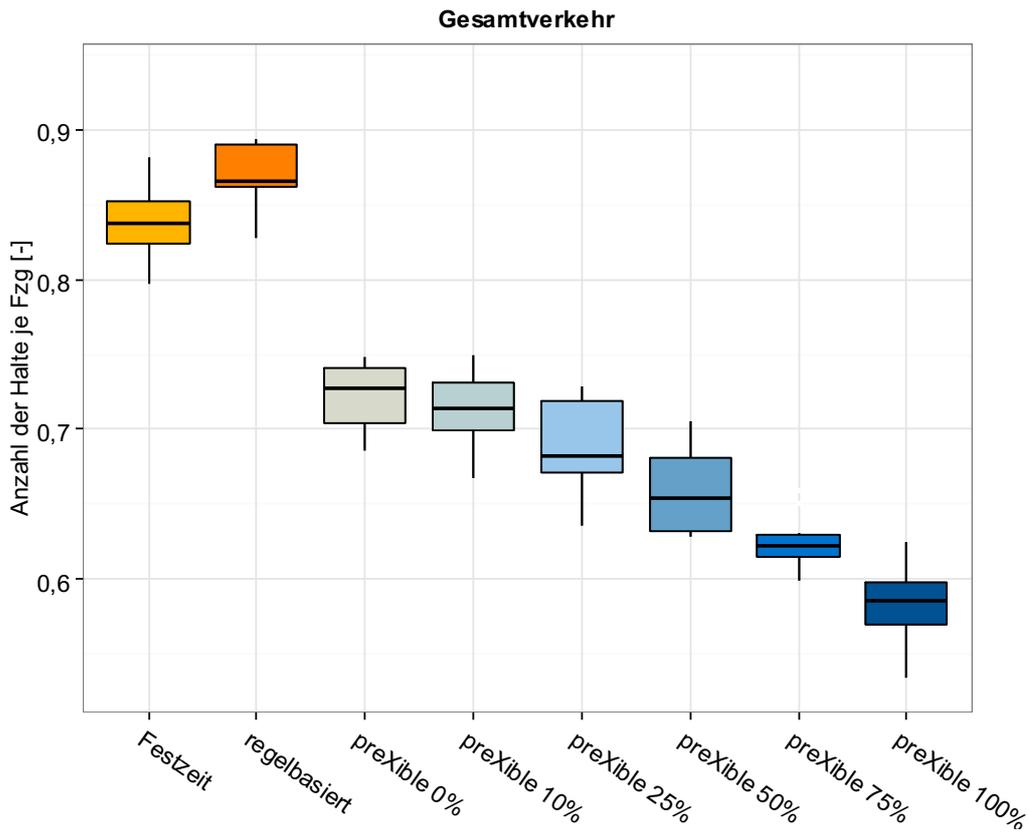


Bild 5.5 Boxplots der Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %)

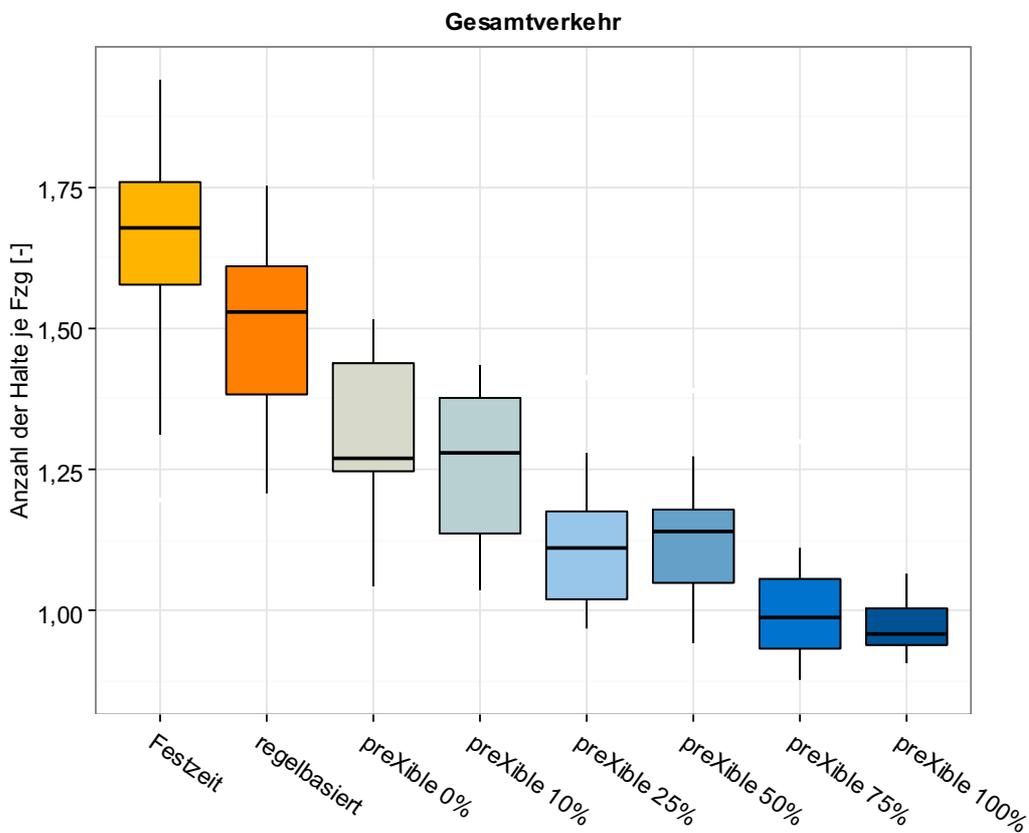


Bild 5.6 Boxplots der Anzahl der Halte bei hoher Auslastung (85 %)

Während der Unterschied zwischen regelbasierter Steuerung und Festzeitsteuerung in Bezug auf die Anzahl der Halte gering ist, verringert sich die gesamte im Netz verbrachte Zeit durch die regelbasierte Steuerung deutlich, wie Bild 5.7 am Beispiel der mittleren Auslastung zeigt. Dennoch führt die Verwendung von preXible zu einer weiteren Reduktion der gesamten im Netz verbrachten Zeit gegenüber beiden Referenzsteuerungen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die gesamte im Netz verbrachte Zeit mit steigenden Ausstattungsraten weiter abnimmt. Dies ist auf die Verstetigung des Verkehrsflusses durch die Geschwindigkeitshinweise sowie die verbesserte Datengrundlage durch vernetzte Fahrzeuge zurückzuführen. Während die Geschwindigkeitshinweise einen unmittelbaren Einfluss auf die Anzahl der Halte haben, ist der Einfluss auf die Verlustzeit mittelbar. Aus diesem Grund fallen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Ausstattungsraten für diesen Kennwert geringer aus als bei der Anzahl der Halte. Dennoch sind häufig signifikante Verbesserungen mit steigender Ausstattungsrate festzustellen. Für niedrige und hohe Auslastung des Knotenpunkts ergeben sich ähnliche Tendenzen, weshalb auf die Darstellung der Ergebnisse verzichtet wird.

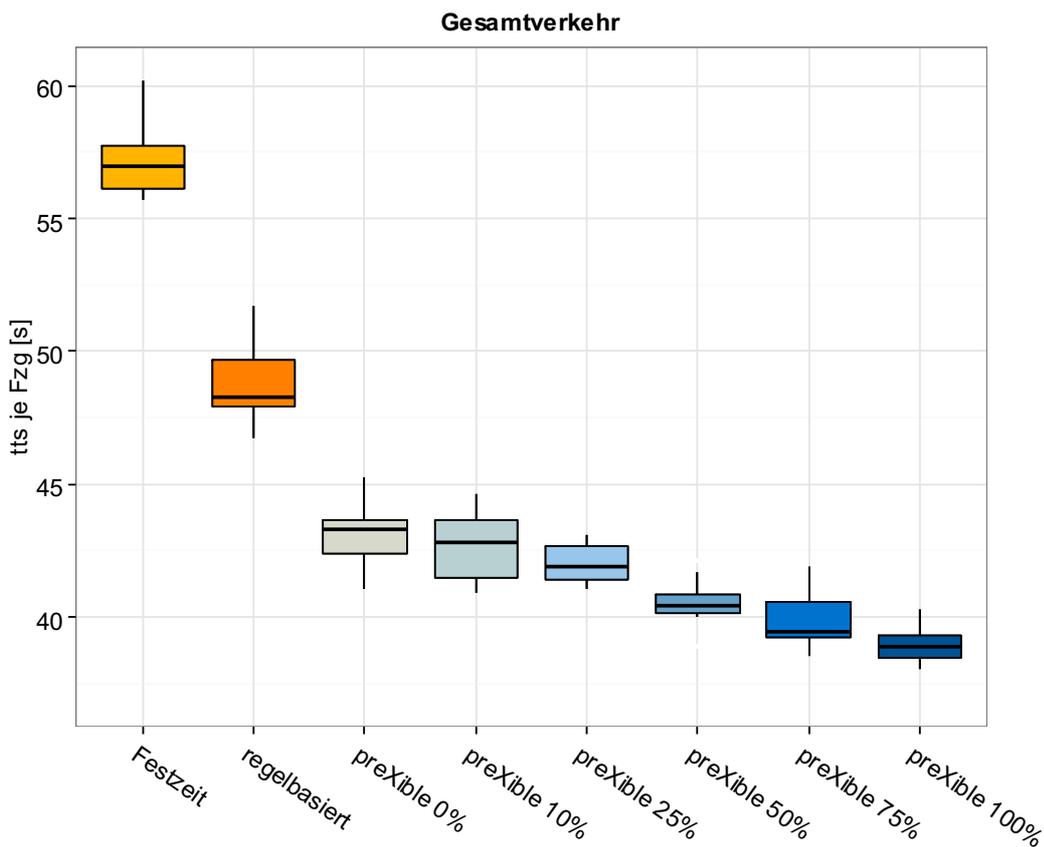


Bild 5.7 Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit bei mittlerer Auslastung (50 %)

Bild 5.8 zeigt die Ergebnisse der Kohlendioxidemissionen bei niedriger Knotenpunkt-auslastung. Da die Anzahl der Halte aufgrund der Anfahrverluste einen großen Einfluss auf die Emissionen hat, verringern sich diese mit steigender Ausstattungsrate. Es stellen sich Verbesserungen zwischen 11,8 % und 22,5 % gegenüber der regelbasierten Steuerung ein. Bei

mittlerer und hoher Knotenpunktauslastung verringern sich die relativen Verbesserungen zwar, sind aber weiterhin zumeist signifikant und reichen von 5,3 % bis 18,1 %.

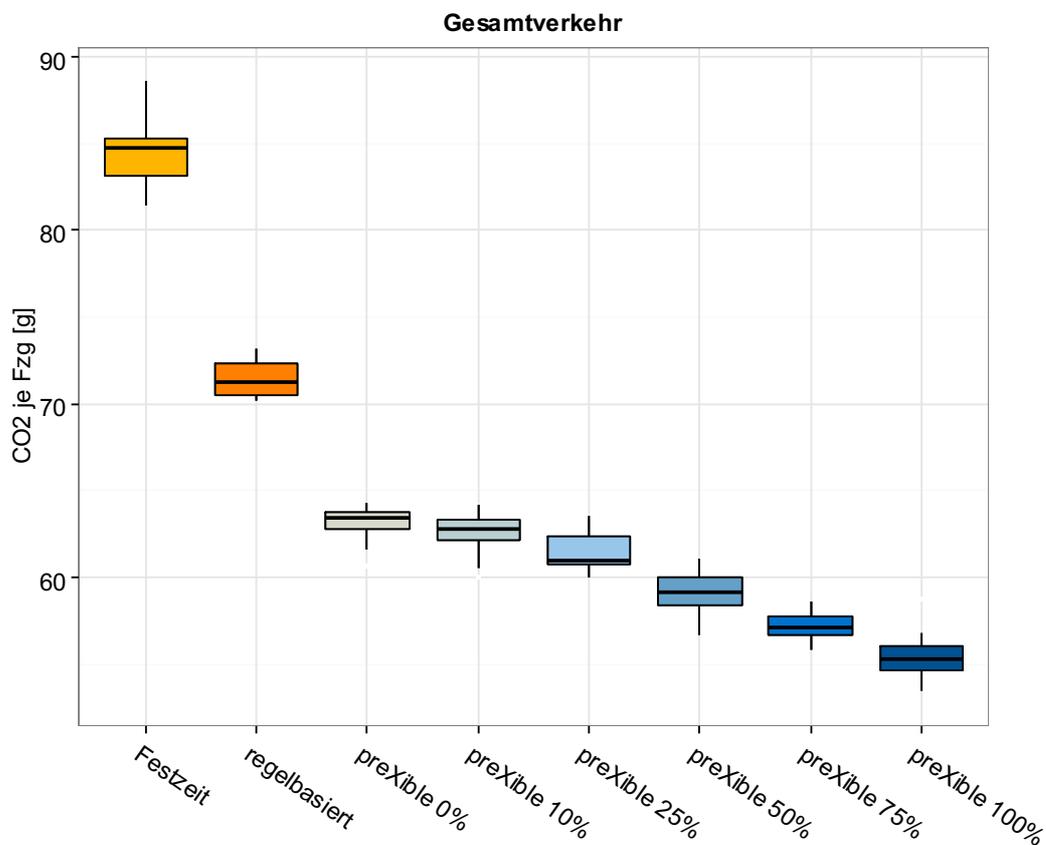


Bild 5.8 Boxplots der Kohlenstoffdioxidemissionen bei niedriger Auslastung (25 %)

Die abschließende Betrachtung zur Verkehrseffizienz erfolgt anhand der maximalen Wartezeit, also derjenigen Zeit, die das am längsten stillstehende Fahrzeug vom Halt bis zum Anfahren verbringt. Bei niedriger Knotenpunktauslastung verringert sich diese aufgrund der flexiblen Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung meist signifikant. Gegenüber der regelbasierten Steuerung treten jedoch Verschlechterungen auf, wie Bild 5.9 zeigt. Diese sind darauf zurückzuführen, dass die regelbasierte Steuerung zyklisch mit relativ kurzen Umlaufzeiten operiert. Mit steigender Auslastung des Knotenpunkts, steigt auch die maximal auftretende Wartezeit bei der Verwendung von preXible zugunsten der Erhöhung der Verkehrseffizienz deutlich an. Bei mittlerer Auslastung sind die mit preXible erzielten Ergebnisse nahezu identisch mit denjenigen der Festzeitsteuerung, während die regelbasierte Steuerung wiederum die niedrigsten maximalen Wartezeiten aufweist. Bei hoher Auslastung des Knotenpunkts nähern sich die Umlaufzeiten und damit die maximalen Wartezeiten von regelbasierter Steuerung und Festzeitsteuerung an. Bild 5.10 zeigt, dass die Verwendung von preXible demgegenüber zu höheren maximalen Wartezeiten führt, die der eingestellten maximalen Sperrzeit von 90 s entsprechen. Einzelne Werte oberhalb dieses Grenzwerts sind auf das simultane Erreichen der maximalen Sperrzeit durch nicht verträgliche Signalgruppen zurückzuführen.

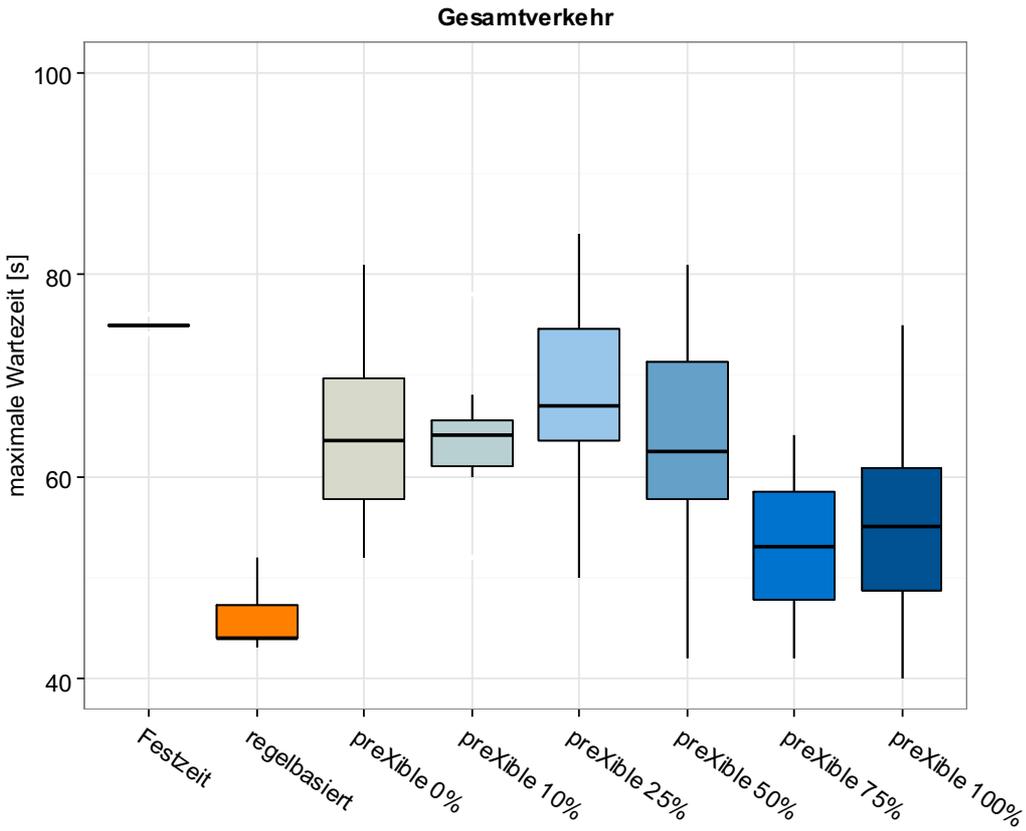


Bild 5.9 Boxplots der maximalen Wartezeit bei niedriger Auslastung (25 %)

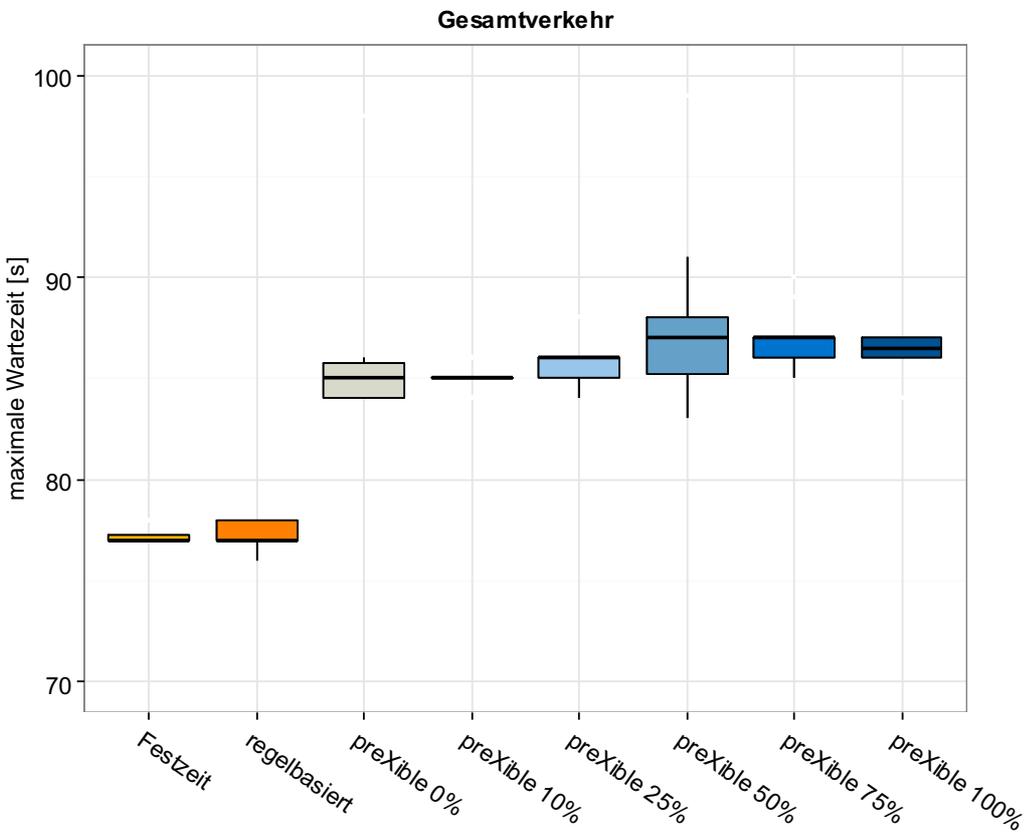


Bild 5.10 Boxplots der maximalen Wartezeit bei hoher Auslastung (85 %)

Die vorangegangenen Erläuterungen zeigen eine Steigerung der Verkehrseffizienz und eine Reduktion der Emissionen durch die Verwendung von preXible. Dabei steigen die Verbesserungen tendenziell mit zunehmender Ausstattungsrate und sinken mit zunehmender Auslastung des Knotenpunkts. Die eingestellte maximale Sperrzeit sorgt für eine Beschränkung der maximal auftretenden Wartezeit. Bei hoher Auslastung des Knotenpunkts treten jedoch höhere Wartezeiten im Vergleich zu den Referenzsteuerungen auf. Anhand dieser Ergebnisse zeigt sich, dass mit der Einstellung der maximalen Sperrzeit eine Abwägung zwischen Nutzer- und Systemoptimum getroffen werden kann. In der vorliegenden Untersuchung sorgen die relativ lang gewählten maximalen Sperrzeiten für eine Steigerung der Verkehrseffizienz des Gesamtsystems, einzelne Fahrzeuge können aber höheren Wartezeiten ausgesetzt sein. Würde man zum Vergleich die Umlaufzeit der Referenzsteuerungen anheben, sodass die maximal auftretenden Wartezeiten sich denen von preXible angleichen, ist bei hoher Auslastung des Knotenpunkts mit einer geringeren Verbesserung der Verkehrseffizienz durch preXible gegenüber den Referenzsteuerungen zu rechnen. Weiterhin ist zu beachten, dass hohe Wartezeiten, insbesondere für die in dieser Untersuchung nicht berücksichtigten Fußgänger, nachteilig sind.

Im Folgenden wird die Vorhersagbarkeit der Schaltzeitpunkte untersucht, wozu der in Gleichung (4.72) eingeführte Kennwert herangezogen wird. Die modellprädiktive Regelung beinhaltet zwar eine systemimmanente Vorhersage, allerdings kann diese zu jedem diskreten Zeitschritt, also bei der sekundlichen Neuberechnung, verworfen werden. Gründe hierfür sind Abweichungen zwischen Modell und Realität sowie neu detektierte Fahrzeuge. Um Abweichungen von der Vorhersage zu bestrafen, wurde in Kapitel 4.4 eine Erweiterung der Kostenfunktion eingeführt. Da kein Vorhersagealgorithmus für die Referenzsteuerungen vorliegt, werden Annahmen getroffen, um Vergleichswerte zur Einordnung der Ergebnisse zu erhalten. Im Falle der Festzeitsteuerung wird, aufgrund des deterministischen Verhaltens, eine fehlerfreie Vorhersage angenommen. Für die regelbasierte Steuerung wird die Phasenfolge als Systemwissen genutzt. Beginnt ein Phasenübergang, wird der Beginn der nächsten Phase als bekannt angenommen. Vor dem Phasenübergang wird dagegen angenommen, dass der nächste Freigabebeginn nicht vorhergesagt wird.

Bild 5.11 zeigt die Prädiktionsabweichung am Beispiel der mittleren Knotenpunktauslastung. Diese Ergebnisse, wie auch die zuvor präsentierten Ergebnisse bezüglich der Verkehrseffizienz, wurden ohne eine Berücksichtigung der Prädiktionsabweichung in der Kostenfunktion ermittelt. Aufgrund der für die Referenzsteuerungen getroffenen Annahmen reduzieren sich die Boxplots jeweils zu Medianen, da keine Streuung der Daten vorliegt. Den Boxplots ist zu entnehmen, dass die Prädiktionsabweichung von preXible mit steigender Ausstattungsrate sinkt, die Vorhersagequalität also steigt. Dies ist insbesondere auf im Mischfahrstreifen detektierte, nicht vernetzte Fahrzeuge zurückzuführen, deren Abbiegewunsch nicht bekannt ist. Dieser Abbiegewunsch wird lediglich basierend auf der Abbiegerate ge-

schätzt und erst dann gegebenenfalls korrigiert, wenn das betroffene Fahrzeug in einem Fahrstreifen detektiert wird, der exklusiv einer Signalgruppe zuzuordnen ist. Diese Korrektur kann eine Anpassung der Schaltstrategie mit entsprechender Verschlechterung der Vorhersagequalität zur Folge haben. Weiterhin zeigt Bild 5.11, dass durch die systemimmanente Vorhersage zwar eine Verbesserung gegenüber der einfachen Vorhersage der regelbasierten Steuerung erzielt wird. Die Ergebnisse bleiben aber weit von der fehlerfreien Vorhersage der Festzeitsteuerung entfernt.

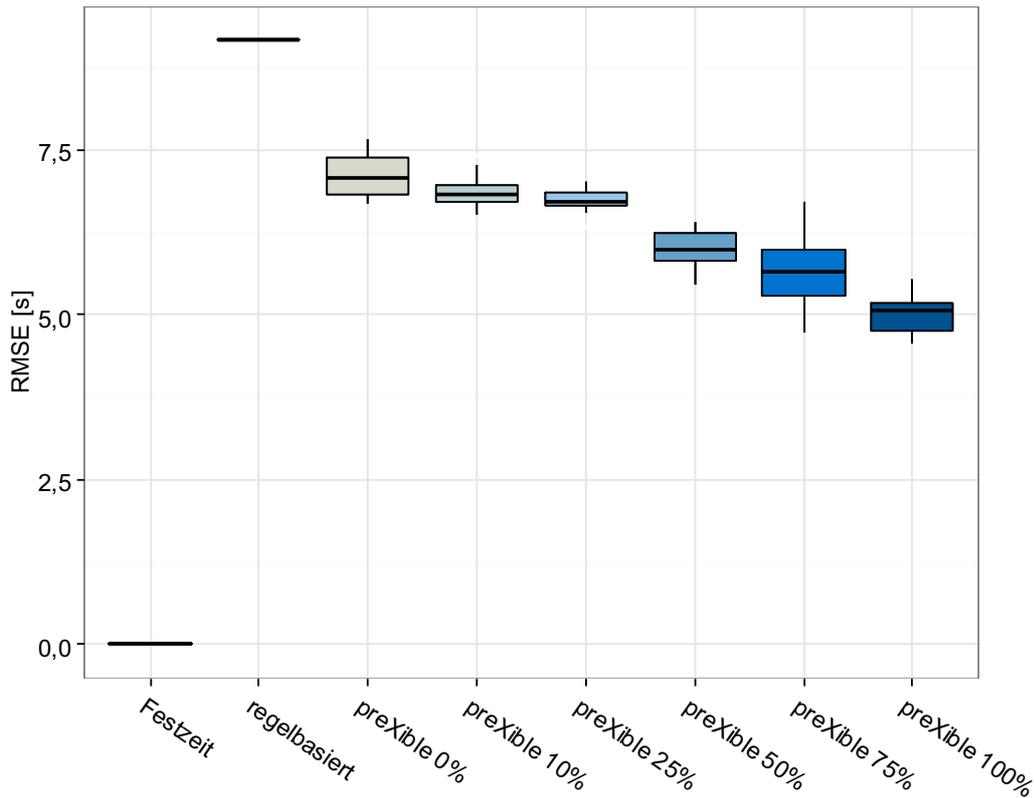


Bild 5.11 Boxplots der Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) ohne Berücksichtigung in der Kostenfunktion

Die gezeigten Ergebnisse ähneln denjenigen der beiden anderen Auslastungsszenarien. Tendenziell zeigt sich eine leicht verbesserte Vorhersagequalität bei hoher und eine leicht verschlechterte Vorhersagequalität bei niedriger Knotenpunktauslastung. Die Untersuchung des Einflusses der Berücksichtigung der Vorhersagequalität in der Kostenfunktion wird nun exemplarisch am Beispiel der mittleren Knotenpunktauslastung für eine Ausstattungsrate von 50 % durchgeführt. Dazu werden zwei unterschiedliche Gewichtungen gewählt, um deren Einfluss darzulegen. Die Faktoren werden in der ersten Variante zu $p^{spät,fak} = -p^{früh,fak} = 100$ und in der zweiten Variante zu $p^{spät,fak} = -p^{früh,fak} = 150$ gewählt. Die Exponenten zur stärkeren Gewichtung der Zeitschritte am Beginn des Steuerhorizonts sind für beide Varianten mit $p^{früh,exp} = p^{spät,exp} = 2$ identisch.

Bild 5.12 und die zugehörigen Zahlenwerte in Tab. A.9 zeigen, dass die Vorhersagequalität durch die Berücksichtigung der Prädiktionsabweichungen in der Kostenfunktion signifikant gegenüber der Variante ohne gesonderte Gewichtung verbessert wird. Die stärkere Gewichtung mit $p^{spät,fak} = -p^{früh,fak} = 150$ sorgt für eine weitere, statistisch signifikante Senkung der Prädiktionsabweichungen gegenüber der geringer gewichteten Variante. Damit zeigt sich, dass die in Kapitel 4.4 eingeführte Erweiterung der Kostenfunktion ein probates Mittel zur Erhöhung der Vorhersagequalität darstellt.

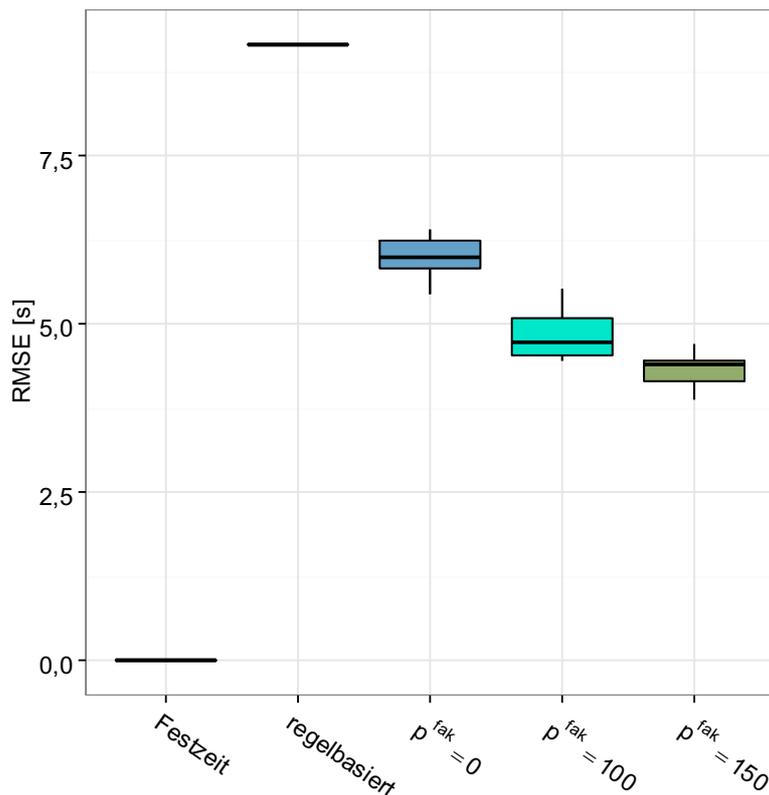


Bild 5.12 Boxplots der Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %

Wie zu erwarten ist, sorgt die Erhöhung der Gewichtung nicht nur für eine stärkere Stabilisierung der Prädiktion, sondern auch für einen wachsenden negativen Einfluss auf die Verkehrseffizienz. Die Berücksichtigung der Prädiktionsabweichungen in der Kostenfunktion erhöht damit zwar die Vorhersagequalität, schränkt aber auch die Möglichkeiten zur Neuberechnung von Schaltzeitpunkten und damit die Flexibilität der Steuerung insgesamt ein. Bild 5.13 zeigt beispielsweise, dass die Anzahl der Halte gegenüber der Variante mit Prädiktionsstabilisierung zunimmt. Bei geringer Gewichtung ist diese Erhöhung statistisch nicht signifikant, während die höhere Gewichtung eine statistisch signifikante Verschlechterung zur Folge hat. Die Anzahl der Halte ist aber gegenüber den Referenzsteuerungen weiterhin signifikant geringer.

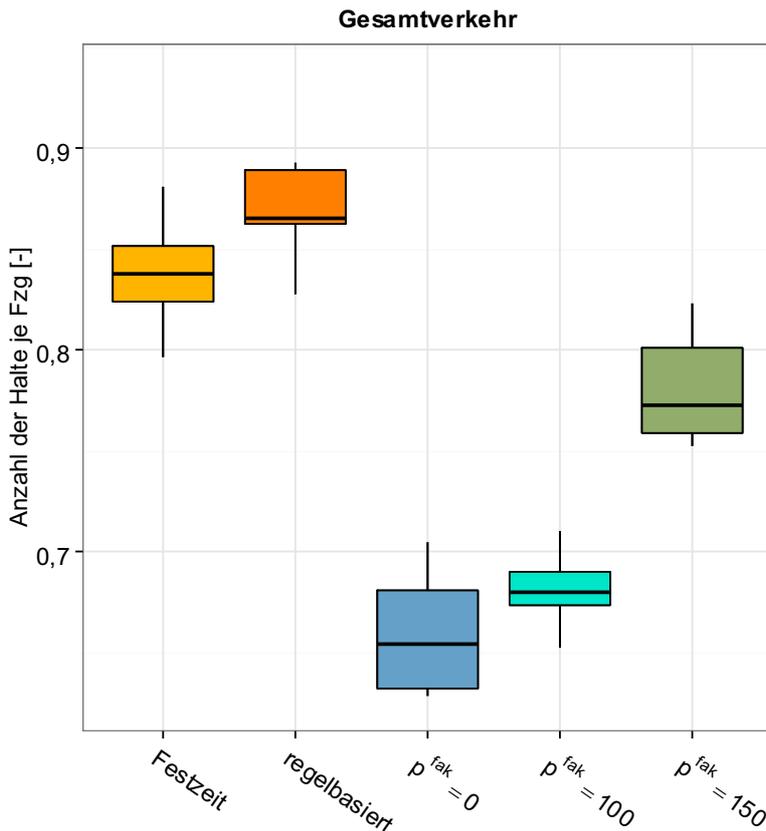


Bild 5.13 Boxplots der Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %

Wie Tab. A.11 im Anhang zu entnehmen ist, weist die gesamte im Netz verbrachten Zeit ähnliche Tendenzen wie die Anzahl der Halte auf. Allerdings fallen die Verschlechterungen gegenüber der Variante ohne Berücksichtigung der Vorhersagequalität in beiden Fällen signifikant aus. Die stärkere Gewichtung zeigt sogar eine signifikante Verschlechterung gegenüber der regelbasierten Steuerung.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die systemimmanente Vorhersage von Schaltzeitpunkten mittels Anpassung der Gewichtung der Kostenfunktion verbessert werden kann. Allerdings gehen diese Verbesserungen mit einer Verschlechterung der Verkehrseffizienz einher. Es ist also abzuwägen, ob und in welchem Maße eine Verbesserung der Vorhersagequalität vonnöten ist.

5.3 Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen

In diesem Szenario, welches bereits in einer früheren Veröffentlichung zugrunde gelegt wurde [KATHS, 2017], wird die Möglichkeit der Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen durch preXible am Beispiel einer Buspriorisierung untersucht. Die Bevorrechtigung erfolgt dabei vollständig integriert in das Verkehrsflussmodell und verlangt keine gesonderten Regeln.

5.3.1 Szenariobeschreibung

Zur Untersuchung der Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen wird ein dreiarmiger Knotenpunkt aus der Beispielsammlung der RiLSA [FGSV, 2010A] ausgewählt, für den eine Referenzsteuerung mit Phasentausch zur Bevorrechtigung eines Busses besteht. Bild 5.14 zeigt einen Ausschnitt des Simulationsnetzwerks mit Maßangaben und Beschriftungen der Detektoren. Die in Bild 5.14 gezeigten Meldepunkte dienen der An- beziehungsweise Abmeldung des von Süden nach Westen verkehrenden Busses und werden ausschließlich von den Referenzsteuerungen verwendet, da Busse bei der Verwendung von preXible stets als vernetztes Fahrzeug angenommen werden. Die Busse verkehren in einem zeitlichen Abstand von 5 Minuten mit einer normalverteilten Abweichung, sodass 95 % aller Busse eine Pünktlichkeit von -60 s bis +180 s aufweisen. Die übrigen angenommenen Verkehrsstärken orientieren sich an den in der Beispielsammlung gegebenen Freigabezeiten der jeweiligen Verkehrsströme und sind ebenfalls in Bild 5.14 gezeigt. Da das Verkehrsflussmodell von preXible derzeit keine bedingt verträglichen Verkehrsströme vorsieht, werden entgegen der Beispielsammlung keine Fußgängerströme betrachtet.

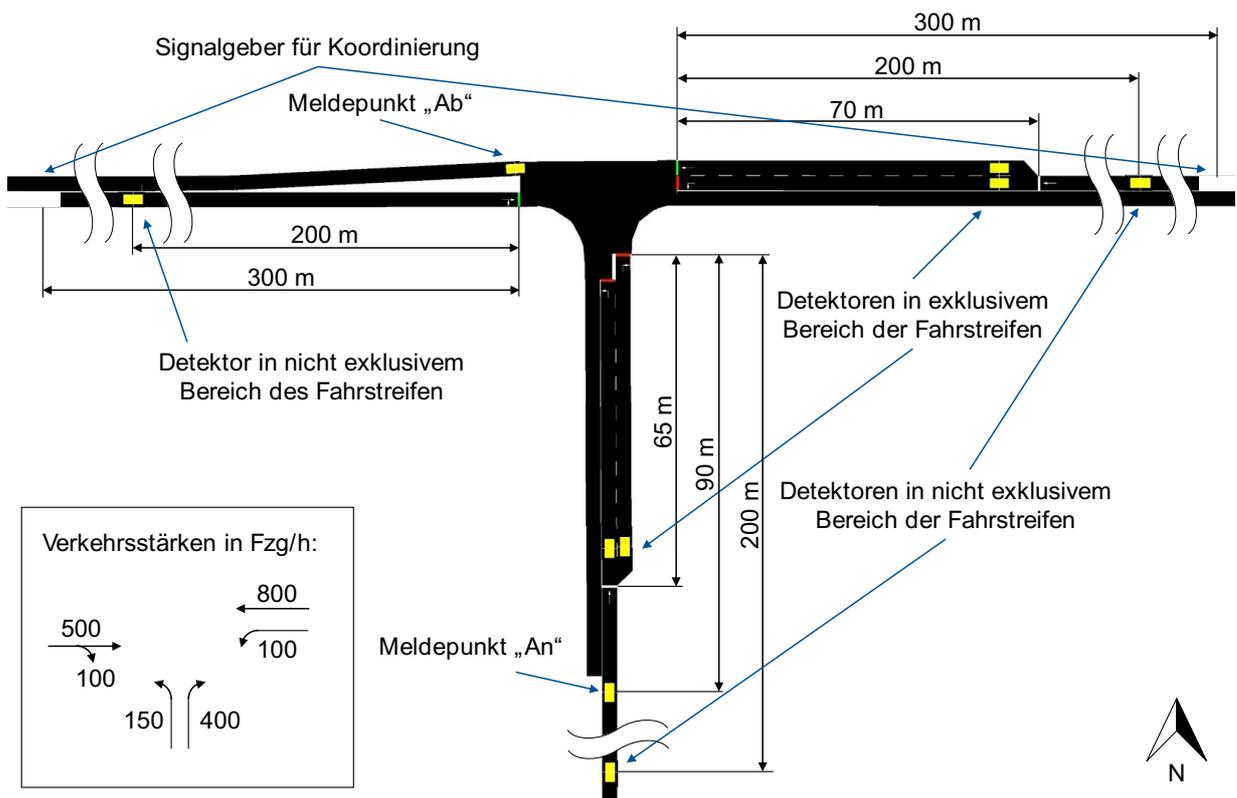


Bild 5.14 Simulationsnetz des Szenarios „Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen“

In der Beispielsammlung ist angegeben, dass der Knotenpunkt in eine Koordinationierung eingebunden ist, welche sowohl für die Richtung von West nach Ost als auch für die Richtung von Ost nach West besteht. Um eine dementsprechende Pulkung der Fahrzeuge zu erreichen,

werden zusätzliche Signalgeber im Zulauf der beiden Hauptrichtungen eingefügt. Diese werden in Festzeit mit derselben Umlaufzeit betrieben, wie die Referenzsteuerung und sorgen mit entsprechender Versatzzeit für ein Grünband von 35 s. Eine zweite, kürzere Freigabezeit bildet einbiegenden Verkehr aus flussaufwärts gelegenen Nebenströmen ab. In der südlichen und östlichen Zufahrt sind für die Verwendung durch preXible Detektoren in den nicht exklusiven und den exklusiven Bereichen der Fahrstreifen verbaut. Da von Westen kommend keine Aufteilung des Fahrstreifens besteht, wird hier nur ein Detektor verwendet. Die Detektoren in den nicht exklusiven Bereichen befinden sich in einem Abstand von 200 m zur Haltlinie, die in den exklusiven Bereichen befinden sich am Beginn des jeweiligen Fahrstreifens. Da in der Beispielsammlung der RiLSA keine Längen für die Aufstellbereiche angegeben sind, werden 65 m beziehungsweise 70 m angenommen.

5.3.2 Referenzsteuerung

Um aussagekräftige Ergebnisse zur erzielen, wird die Referenzsteuerung in drei Varianten ausgeführt, welche auf den Angaben der RiLSA Beispielsammlung basieren. In allen Varianten werden die Signalgruppen in drei Phasen eingeteilt, welche zusammen mit den Zwischenzeiten in Bild 5.15 dargestellt sind.

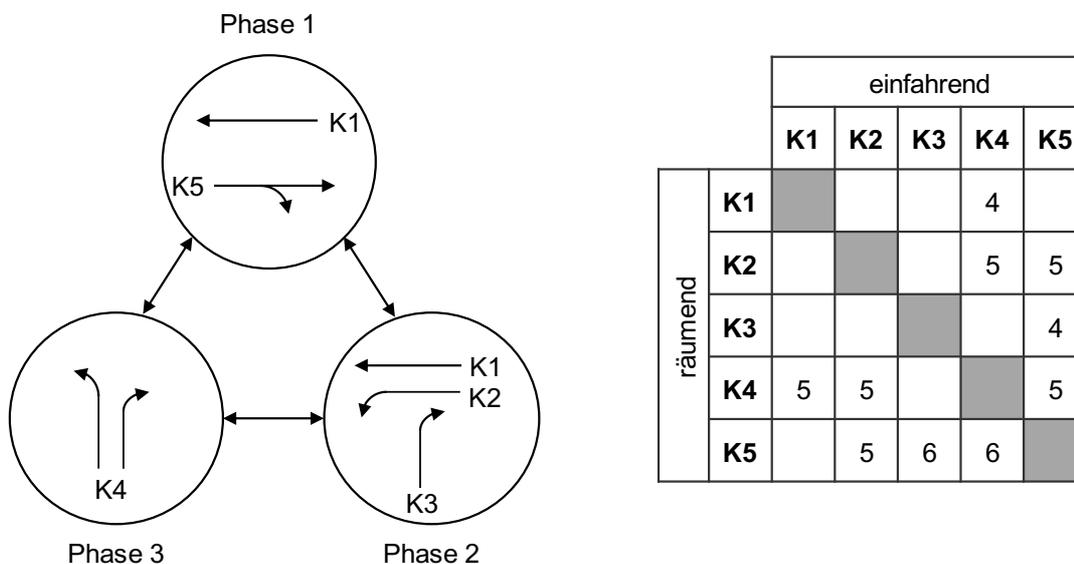


Bild 5.15 Phaseneinteilung und Zwischenzeitenmatrix der Referenzsteuerung zur Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen, adaptiert von RiLSA Beispielsammlung [FGSV, 2010A]

Durch das Weglassen des Fußgängerverkehrs werden die Phasenübergänge gegenüber der in der Beispielsammlung angegebenen Steuerung verkürzt. Da die Freigabezeiten nicht angepasst werden, ergibt sich eine verkürzte Umlaufzeit von 85 s.

In der ersten Variante der Referenzsteuerung wird der Knotenpunkt in Festzeit gesteuert, die Phasenfolge ist 1-2-3-1. Die Phasendauer für Phase 1 beträgt 35 s, 14 s für Phase 2 und 20 s

für Phase 3. Diese Steuerung wird im Folgenden als „Festzeit“ bezeichnet. Bei einer angenommenen Sättigungsverkehrsstärke von 1800 Fzg/h ergibt sich durch die gewählten Freigabezeiten eine Gesamtkapazität von etwa 3500 Fzg/h am Knotenpunkt. Die mittlere Auslastung mit den angenommenen Verkehrsstärken beträgt damit etwa 60 %. Der mit über 80 % am stärksten ausgelastete Verkehrsstrom ist der von Westen kommende und Signalgruppe K5 zugehörige Strom. Die Verkehrsnachfrage der von Süden kommenden Linksabbieger wurde niedrig gewählt, um die Effektivität der Bevorrechtigungsmaßnahme, die nachfolgend vorgestellt wird, nicht zu beeinträchtigen.

Die zweite Variante der Referenzsteuerung entspricht der in der Beispielsammlung beschriebenen Steuerung und wird im Folgenden mit „Phasentausch“ bezeichnet. Wird der Meldepunkt „An“ durch einen Bus während Phase 1 aktiviert, so wird die Phasenfolge 1-3-2-1 anstelle der üblichen Phasenfolge aktiviert. Anschließend wird wieder zur üblichen Phasenfolge zurückgeschaltet. Aufgrund des kürzeren Phasenübergangs von Phase 1 zu Phase 3 befindet sich der Meldepunkt „An“ gegenüber der Beispielsammlung in kürzerer Distanz zur Haltlinie.

Da die Variante mit Phasentausch eine nur geringe Bevorrechtigung des Busses zur Folge hat, wird eine dritte Variante genutzt, die Eingriffe in allen drei Phasen ermöglicht. Diese Variante wird nachfolgend als „erweitert“ bezeichnet. Bei einer Anmeldung des Busses in Phase 1, erfolgt wie zuvor ein Phasentausch. Allerdings wird Phase 1, sofern die Mindestfreigabezeit von 10 s verstrichen ist, vorzeitig abgebrochen. Bei einer Anmeldung in Phase 2 erfolgt ebenfalls ein vorzeitiger Abbruch, um schneller in Phase 3 zu gelangen. Erfolgt eine Anmeldung in Phase 3, wird diese verlängert, bis der Meldepunkt „Ab“ durch den Bus aktiviert wird. Um in den folgenden Umläufen die Koordination wiederherzustellen, wird die Freigabezeit von Phase 1 nach der Bevorrechtigungsmaßnahme entsprechend verlängert.

5.3.3 Konfiguration von preXible

Für die Konfiguration von preXible wird die in Bild 5.15 gezeigte Zwischenzeitenmatrix herangezogen. Weitere wichtige Parameter sind in Tab. 5.3 zusammengefasst. Die Ausstattungsraten entsprechen denjenigen des vorherigen Szenarios. Da die Busse bei allen Ausstattungsraten als vernetzt angenommen werden, werden die Meldepunkte durch preXible nicht genutzt und es werden auch keine zusätzlichen Regeln definiert. Lediglich die Gewichtung der Busse wird gegenüber normalen Fahrzeugen um das 50-fache erhöht, wie Tab. 5.3 zu entnehmen ist. Die Signalgeber zur Pulkung werden auch bei der Verwendung von preXible aktiviert und verbleiben festzeitgesteuert.

Zeichen	Erläuterung	Wert
N_c	Länge des Steuerhorizonts	18 s
N	Anzahl der je Fahrstreifen berücksichtigten Fahrzeuge	15
v^{max}	Maximalgeschwindigkeit	13,89 m/s
$v^{max,noV2X}$	Maximalgeschwindigkeit nicht vernetzter Fahrzeuge	12 m/s
r^{GLOSA}	Beschränkung u^{GLOSA} bezogen auf v^{zul}	0,5
z^{lmin}	minimale Zeitlücke	1,8 s
a^{max}	maximale Beschleunigung	2,0 m/s ²
$a^{max,noV2X}$	maximale Beschleunigung nicht vernetzter Fahrzeuge	1,3 m/s ²
$b^{GLOSA,max}$	maximale Verzögerung durch Geschwindigkeitshinweis	-1,5 m/s ²
$t_{F,min}$	Mindestfreigabezeit	5 s
$t_{S,min}$	Mindestsperrzeit	5 s
$t_{S,max}$	Maximale Sperrzeit	90 s
p^{ts}	Faktor zur Begrenzung der maximalen Sperrzeit	100
p^{GLOSA}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{GLOSA}	50
p^{STOP}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{STOP}	1000
p^{dist}	Gewichtung des Abstands zur Haltlinie x	10
$p^{GLOSA,PRIO}$	Faktor zur Erhöhung von f^{GLOSA} zur Priorisierung	50
$p^{STOP,PRIO}$	Faktor zur Erhöhung von f^{STOP} zur Priorisierung	50

Tab. 5.3 Gewählte Parameter für preXible zur Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen

5.3.4 Ergebnisse

Zur Bewertung der Effektivität der Bevorrechtigungsmaßnahme ist zunächst die gesamte im Netz verbrachte Zeit der Busse relevant. Aus Bild 5.16 geht hervor, dass bei der Verwendung von preXible in allen untersuchten Ausstattungsdaten die für Busse benötigte Zeit zum Durchfahren der Route gegenüber der Festzeitsteuerung und den regelbasierten Bevorrechtigungen reduziert wird. Bei Betrachtung der zugehörigen Ergebnisse zeigt sich, dass die gesamte im Netz verbrachte Zeit für Busse bei allen Ausstattungsdaten durch die Verwendung von preXible signifikant um über 35 % gegenüber der Festzeitsteuerung gesenkt werden kann. Gegenüber der Variante Phasentausch treten Verbesserungen um über 30 % ein. Auch gegenüber der regelbasierten Bevorrechtigung mit Eingriffsmöglichkeiten in allen Phasen stellen sich Verbesserungen um etwa 15 % ein, welche allerdings erst ab 10 % Ausstattungsrate signifikant sind. Die Ergebnisse der verschiedenen Ausstattungsdaten unterscheiden sich untereinander nicht signifikant. Dies entspricht insofern der Erwartung, als dass alle Busse als vernetzt angenommen werden und sich die Ausstattungsdaten lediglich auf den Individualverkehr beziehen.

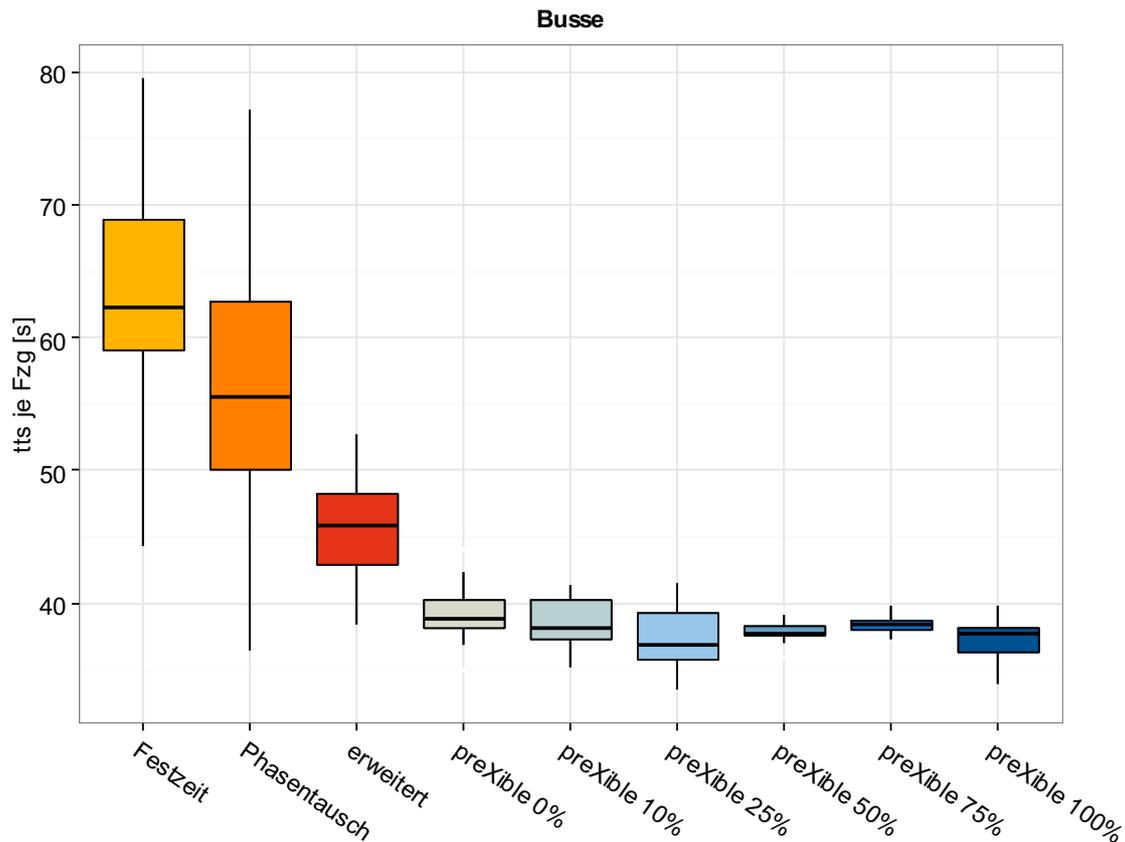


Bild 5.16 Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Fahrzeugtyp Bus

Betrachtet man die in Bild 5.17 gezeigte Anzahl der Halte von Bussen, so treten die Bevorrechtigungseffekte durch preXible noch stärker zu Tage. Dies ist auf das zur Steuerung eingesetzte Verkehrsflussmodell von preXible zurückzuführen, welches den vor dem Bus liegenden Rückstau berücksichtigt. Für eine haltfreie Durchfahrt des Busses wird gegebenenfalls die Freigabe zum Abbau des Rückstaus vorgezogen. Zudem werden den Bussen Geschwindigkeitshinweise übermittelt, die die Wahrscheinlichkeit eines Halts weiter reduzieren. Aus diesem Grund werden ab 25 % Ausstattungsrate keine Halte mehr festgestellt und es werden nur die Mediane im Boxplot sichtbar. Interessant ist nun, inwiefern die Bevorrechtigungsmaßnahmen die Verkehrseffizienz des Gesamtverkehrs beeinträchtigen, wozu in Bild 5.18 die Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit des Gesamtverkehrs dargestellt sind. Je stärker die regelbasierten Eingriffe ausfallen, desto höher fallen die Beeinträchtigungen für den Gesamtverkehr aus. Diese Verschlechterungen sind gegenüber der Festzeitsteuerung jedoch nur bei der erweiterten regelbasierten Bevorrechtigung als signifikant einzustufen. Trotz der effektiven Priorisierung durch preXible, ist die gesamte im Netz verbrachte Zeit geringer als im Falle der Festzeitsteuerung. Es zeigen sich für alle Ausstattungsraten bei der Verwendung von preXible signifikante Verbesserungen gegenüber den Referenzsteuerungen. Zwischen den verschiedenen Ausstattungsraten zeigen sich zumeist keine signifikanten Veränderungen.

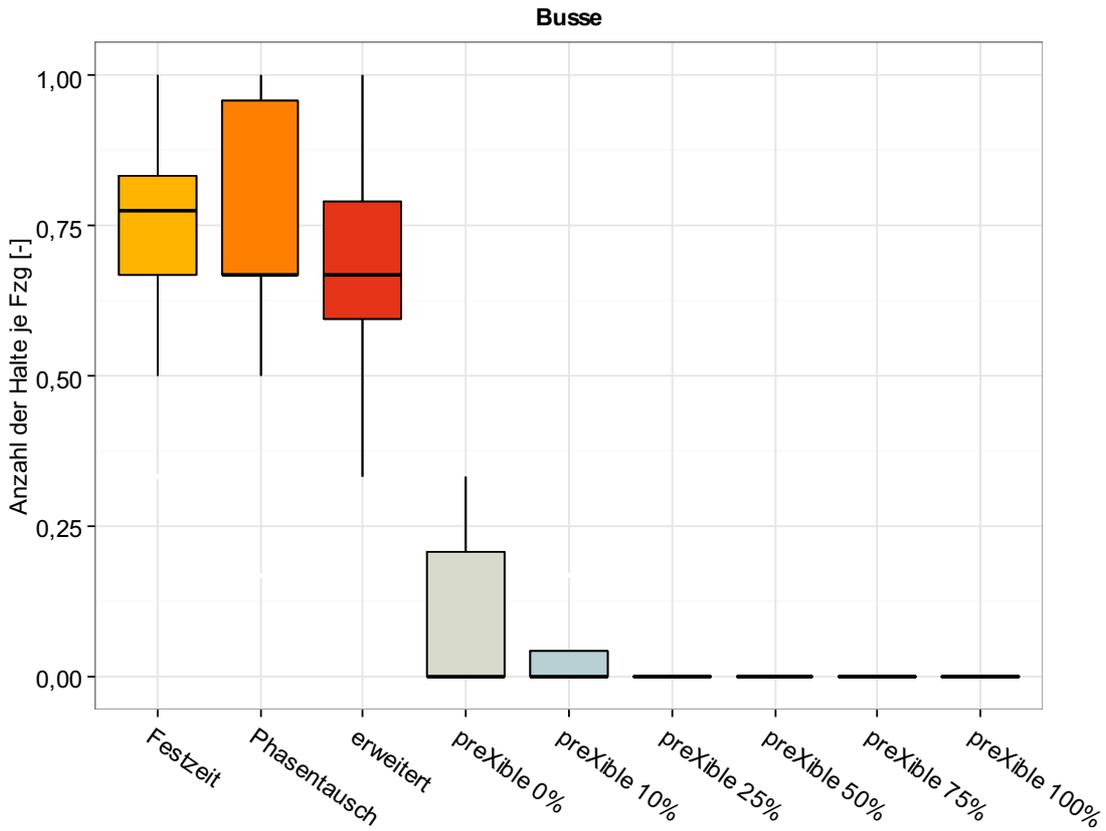


Bild 5.17 Boxplots der Anzahl der Halte für den Fahrzeugtyp Bus

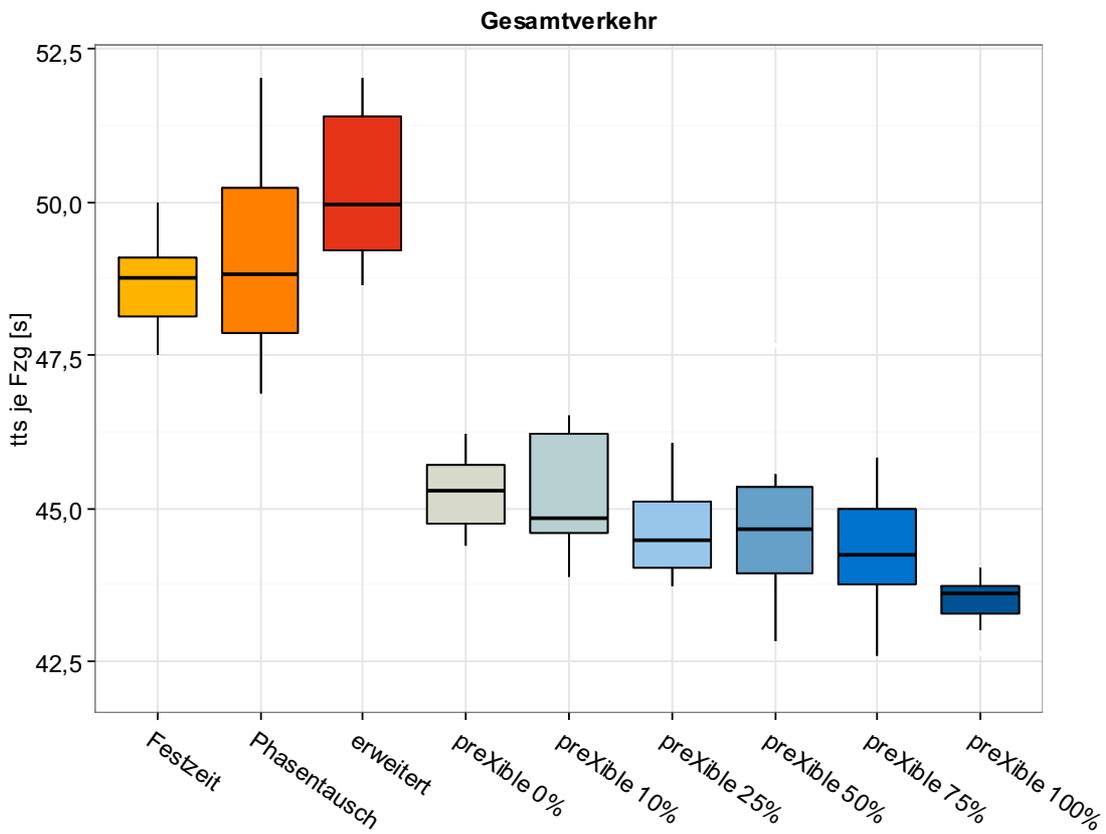


Bild 5.18 Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Gesamtverkehr

Die Anzahl der Halte des Gesamtverkehrs verringert sich bei der Verwendung von preXible gegenüber den Referenzsteuerungen, wie Bild 5.19 zeigt. Die Verbesserungen sind ab einer Ausstattungsrate von 25 % gegenüber allen Referenzsteuerungen signifikant. Da der Effekt der Geschwindigkeitshinweise mit höheren Ausstattungsraten ansteigt, zeigen sich zumeist signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit verschiedenen Ausstattungsraten.

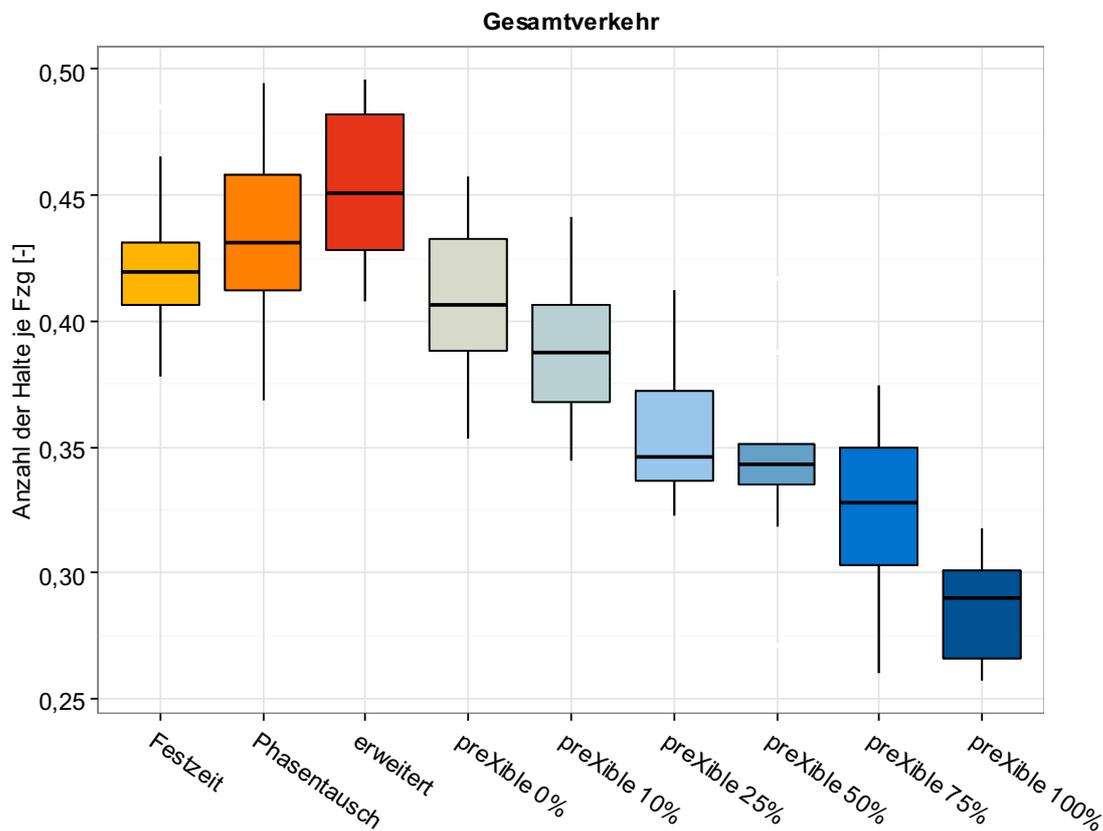


Bild 5.19 Boxplots der Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr

Wie Bild 5.20 zu entnehmen ist, wird die gesteigerte Verkehrseffizienz des Knotenpunkts bei Verwendung von preXible nicht durch eine übermäßige Beeinträchtigung der Nebenströme erzielt. Durch die voreingestellte maximale Sperrzeit von 90 s zeigen sich unterhalb der Vollausstattung moderate Verschlechterungen der maximalen auftretenden Wartezeit gegenüber der Festzeitsteuerung. Gegenüber den beiden Referenzsteuerungen mit Bevorrechtigungsmaßnahmen lassen sich sogar Verbesserungen erzielen, welche zumeist signifikant ausfallen.

Während die regelbasierten Bevorrechtigungsmaßnahmen keinen signifikanten Einfluss auf den Kohlenstoffdioxidausstoß zeigen, werden durch preXible bei allen untersuchten Ausstattungsraten signifikante Verbesserungen erzielt. Bild 5.21 zeigt weiterhin stärkere Reduktionen der Emissionen bei steigender Ausstattungsrate. Dies ist auf den steigenden Einfluss der Geschwindigkeitshinweise zurückzuführen, welche die Anzahl der Halte und damit die Anfahrverluste reduzieren. In der Regel unterscheiden sich daher die Varianten mit unterschiedlichen Ausstattungsraten signifikant voneinander.

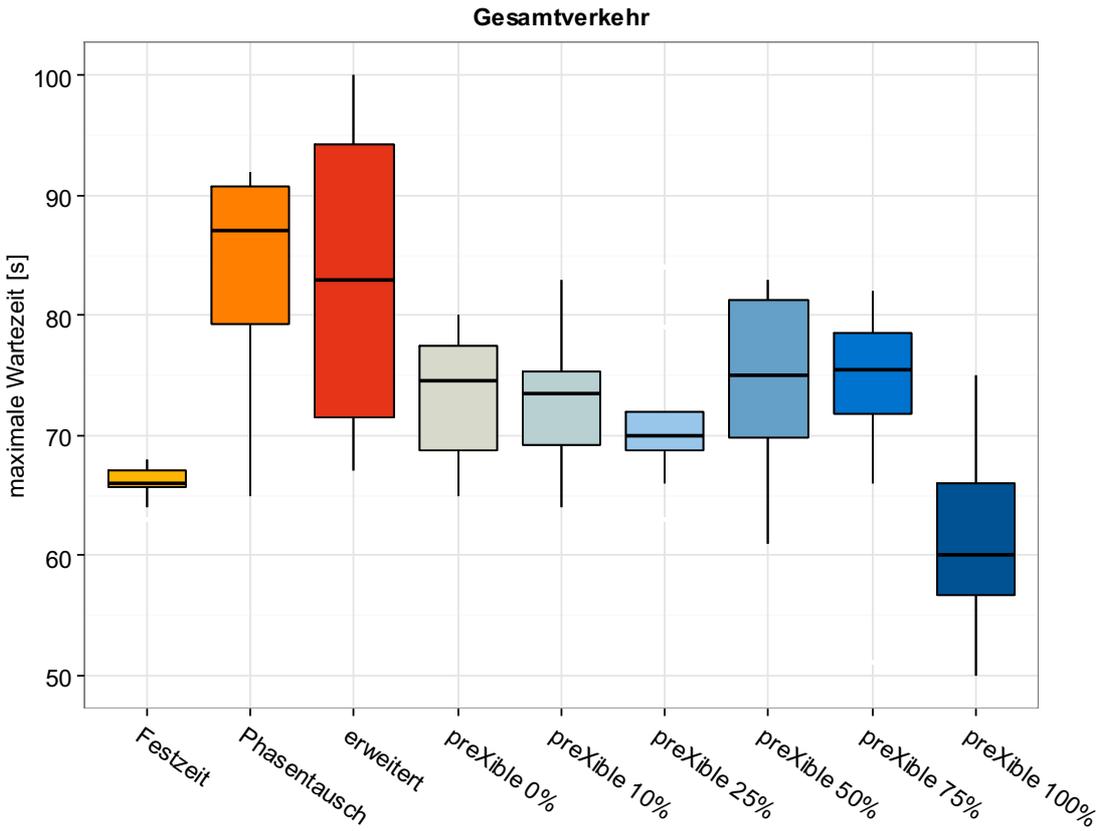


Bild 5.20 Boxplots der maximalen Wartezeit für den Gesamtverkehr

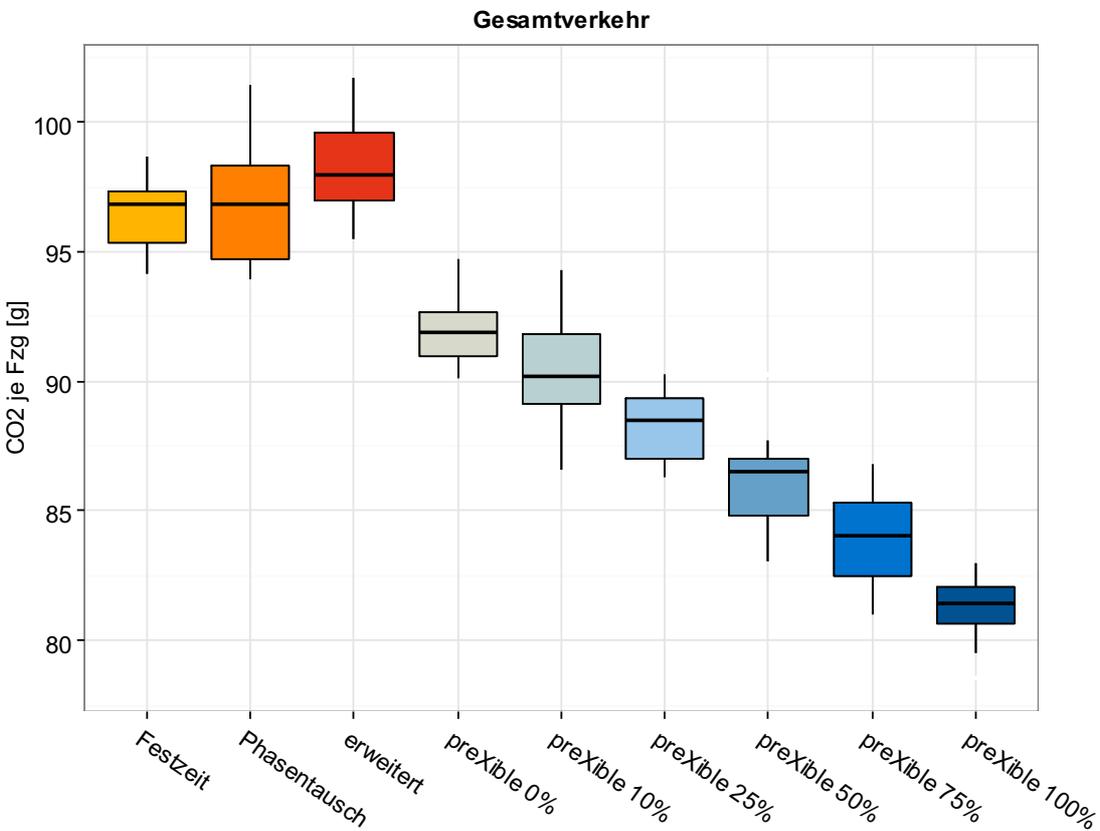


Bild 5.21 Boxplots des Kohlenstoffdioxidausstoßes für den Gesamtverkehr

Insgesamt zeigt sich, dass die Erhöhung der Gewichtungen von Einzelfahrzeugen in der Kostenfunktion von preXible eine effektive Bevorrechtigung ermöglicht. Gegenüber der regelbasierten Bevorrechtigung können Reduktionen der Verlustzeiten der Busse erzielt werden. Durch die Integration in das Verkehrsflussmodell und die damit verbundene Berücksichtigung des aktuellen Rückstaus sowie durch den Einsatz von Geschwindigkeitshinweisen können signalbedingte Halte für Busse fast vollständig vermieden werden. Obwohl der Knotenpunkt in eine Koordinierung eingebunden ist und diese von preXible im vorliegenden Fall nicht speziell berücksichtigt wird, sind die Beeinträchtigungen für den Gesamtverkehr durch die Bevorrechtigungsmaßnahmen gering. Die Verkehrseffizienz übersteigt sogar diejenige der Festzeitsteuerung.

5.4 Netz geregelter Knotenpunkte

Nachdem in den beiden vorherigen Szenarien das Systemverhalten an einzelnen Knotenpunkten untersucht wurde, wird die Untersuchung in diesem Beispiel auf ein Netz geregelter Knotenpunkte ausgedehnt. Wie schon bei dem in Kapitel 5.3 beschriebenen Szenario, wurden auch Teile der im Folgenden beschriebenen Untersuchung bereits veröffentlicht [KATHS, 2017].

5.4.1 Szenariobeschreibung

Die folgenden Untersuchungen beruhen auf einem Netz, welches aus drei lichtsignalisierten Knotenpunkten besteht. Die Knotenpunkte sind jeweils vierarmig und entsprechen in ihrer Geometrie denjenigen aus Abschnitt 5.2. Es wird ein asymmetrisches Netz mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Knotenpunkten betrachtet. Eine Strecke wird bewusst kurz gewählt, um das Systemverhalten von preXible für den Fall zu untersuchen, bei dem die typische Zeit zum Durchfahren der Zufahrt kürzer ist als die Länge des Steuerhorizonts. Bild 5.22 zeigt schematisch die Anordnung der Knotenpunkte im Netz. Zusätzlich sind die drei Hauptrichtungen des Netzes abgebildet, auf welchen die Verkehrsnachfrage $q_{HR} = 260$ Fzg/h eingestellt wird. Die Routen der Nebenrichtungen werden so definiert, dass an jeder Signalgruppe der drei Knotenpunkte eine Nachfrage besteht. Die Nachfrage der Nebenrichtung wird zu $q_{NR} = 0,25 \cdot q_{HR} = 65$ Fzg/h gewählt. Eine Vorabuntersuchung beleuchtet zusätzlich den Extremfall, in dem $q_{NR} = 0$ Fzg/h gilt, also nur die Hauptrichtung befahren wird. Wie schon in Abschnitt 5.3 beschrieben, dienen Signalgeber an den Rändern des Netzes dazu, eine Pulkung der Fahrzeuge durch vorherige Lichtsignalanlagen abzubilden. Diese Anlagen werden mit einer Umlaufzeit von 90 s betrieben und werden zweimal je Umlauf freigegeben. Die erste Freigabe erfolgt für 20 s nach einer Sperrzeit von 42 s, um einen größeren Fahrzeugpulk zu generieren. Die anschließende Freigabe erfolgt für 15 s nach einer Sperrzeit von 13 s, um stromaufwärts einbiegende Fahrzeuge abzubilden. Durch die zusätzliche zweite Freigabe

wird zudem verhindert, dass eine Koordination bei der Verwendung von preXible von außen aufgeprägt wird.

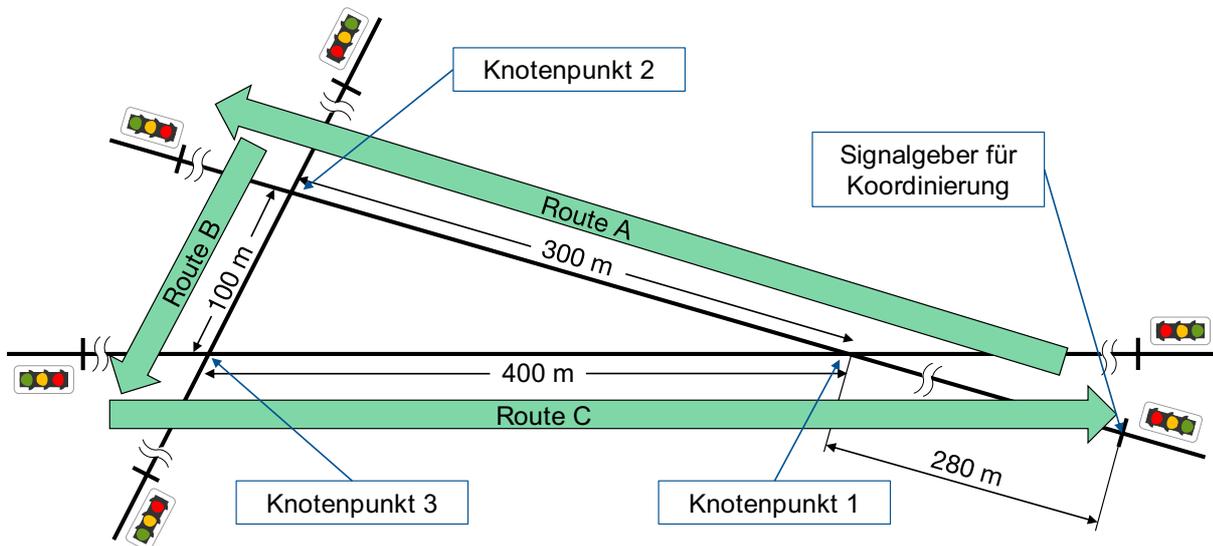


Bild 5.22 Anordnung dreier Knotenpunkte im Straßennetz (nicht maßstabsgetreu) mit drei Hauptrichtungen und Signalgebern im Zufluss

5.4.2 Referenzsteuerung

Für die Referenzsteuerung wird eine koordinierte Festzeitsteuerung entworfen. Die Phaseneinteilung an den einzelnen Knotenpunkten entspricht derjenigen des isolierten Knotenpunkts aus Abschnitt 5.2. Die zu koordinierenden Phasen, welche die geradeausfahrenden Verkehrsströme bedienen, erhalten eine Freigabezeit von 25 s. Die Linksabbieger erhalten eine Freigabezeit von 10 s, womit sich eine Umlaufzeit von $t_u = 90$ s ergibt. Die Freigabezeit der zu koordinierenden Verkehrsströme wird mit 25 s um 5 s länger gewählt als diejenige der Signalgeber im Zulauf, um einen Vorlauf zu ermöglichen. Dies erlaubt die Bildung durchgängiger Grünbänder von mindestens 20 s Breite bei einer angenommenen Progressionsgeschwindigkeit von 12,5 m/s auf den drei Hauptrouten. Durch Anpassung der Versatzzeiten und der Phasenfolgen, ergibt sich die in Bild 5.23 gezeigte Lage der Grünbänder zwischen den Knotenpunkten (KP). Der sich ergebende Sättigungsgrad auf den Hauptrouten bei einer Sättigungsverkehrsstärke von 1800 Fzg/h beläuft sich für den Untersuchungsfall mit $q_{NR} = 0$ auf 52 %. Dieser ist niedrig gewählt, um eine effektive Koordination auf den Hauptrouten für die Referenzsteuerung garantieren zu können.

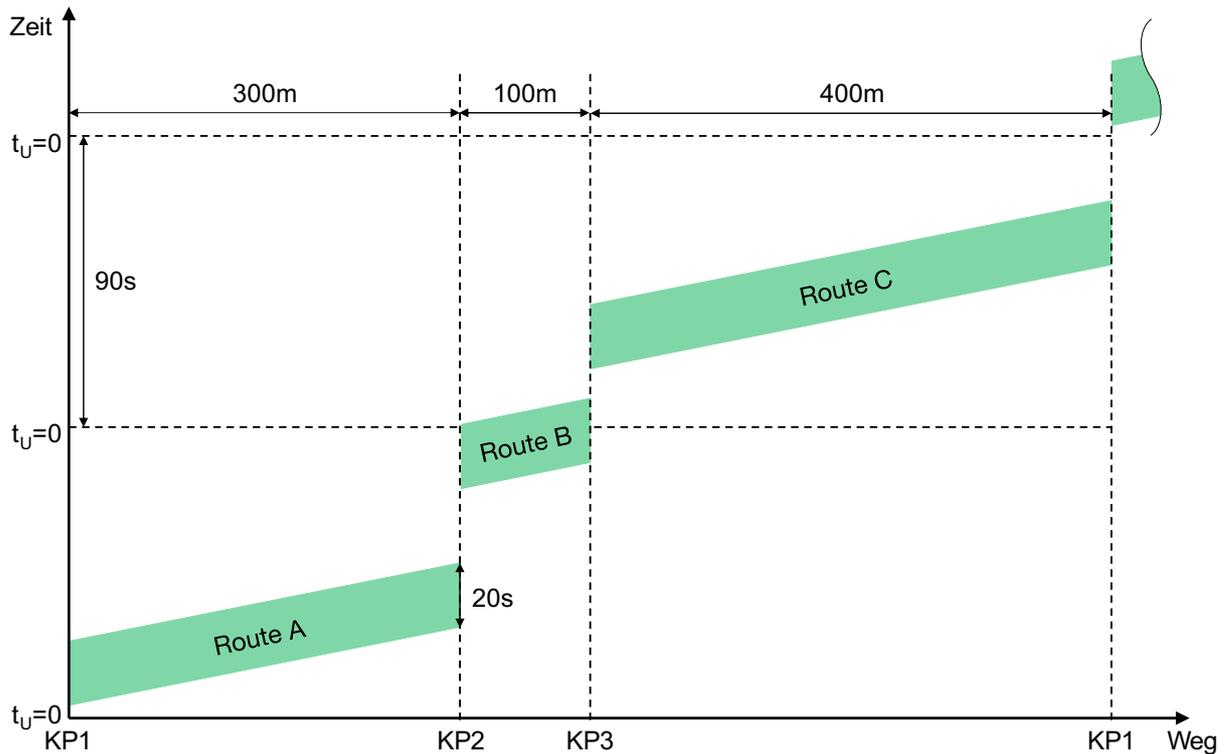


Bild 5.23 Lage der Grünbänder der Referenzsteuerung auf den drei Hauptrouten

5.4.3 Konfiguration von preXible

Die Konfiguration von preXible entspricht weitgehend derjenigen des isolierten Knotenpunkts aus Abschnitt 5.2. Lediglich die Gewichtungparameter zur Netzsteuerung sowie das Einsetzen von Fahrzeugen während des Steuerhorizonts werden ergänzt. Weiterhin wird das beschriebene zweistufige Vorgehen zum Beschränken der maximalen Sperrzeit gewählt. Ab einer Sperrzeit von 90 s wird eine moderate Erhöhung der Gewichtung der gesperrten Signalgruppe vorgenommen, um die Freigabe des gesperrten Stroms möglichst ohne Beeinträchtigung der Koordinierung zu ermöglichen. Ab 120 s findet eine hohe Gewichtung statt, um eine über diese Grenze hinausgehende Sperrzeit zu unterbinden. Diese, wie auch die übrigen wichtigsten Parameter, sind in Tab. 5.4 gegeben.

Als weiterer Unterschied gegenüber dem isolierten Knotenpunkt ist die Lage der Detektoren auf Route B und in Gegenrichtung zu Route B zu nennen. Aufgrund des kurzen Abstands zwischen den Knotenpunkten werden hier lediglich Detektoren zu Beginn des exklusiven Bereichs der Fahrstreifen eingesetzt.

Zeichen	Erläuterung	Wert
N_c	Länge des Steuerhorizonts	18 s
N	Anzahl der je Fahrstreifen berücksichtigten Fahrzeuge	15
v^{max}	Maximalgeschwindigkeit	13,89 m/s
$v^{max,noV2X}$	Maximalgeschwindigkeit nicht vernetzter Fahrzeuge	12 m/s
r^{GLOSA}	Beschränkung u^{GLOSA} bezogen auf v^{zul}	0,5
z^{lmin}	minimale Zeitlücke	1,8 s
a^{max}	maximale Beschleunigung	2,0 m/s ²
$a^{max,noV2X}$	maximale Beschleunigung nicht vernetzter Fahrzeuge	1,3 m/s ²
$b^{GLOSA,max}$	maximale Verzögerung durch Geschwindigkeitshinweis	-1,5 m/s ²
$t_{F,min}$	Mindestfreigabezeit	5 s
$t_{S,min}$	Mindestsperrzeit	5 s
$t_{S,max}$	Maximale Sperrzeit	120 s
$t_{S,max,flex}$	Flexible Begrenzung der Sperrzeit	90 s
p^{ts}	Faktor zur Begrenzung der maximalen Sperrzeit	100
$p^{ts,flex}$	Faktor zur flexiblen Begrenzung der Sperrzeit	3
p^{GLOSA}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{GLOSA}	50
p^{STOP}	Gewichtung der Geschwindigkeitsreduktion u^{STOP}	1000
p^{dist}	Gewichtung des Abstands zur Haltlinie x	10
p^{STAU}	Faktor zur Erhöhung von f^{GLOSA} und f^{STOP} bei Überstauung der Zufahrt	2
p^{RED}	Faktor zur Reduzierung von f^{GLOSA} und f^{STOP} bei Überstauung relevanter Zufahrten flussabwärts	0,1

Tab. 5.4 Gewählte Parameter für preXible zur Untersuchung im Netz geregelter Knotenpunkte

5.4.4 Ergebnisse

Vor der eigentlichen Untersuchung zur Leistungsfähigkeit von preXible mit unterschiedlichen Ausstattungsraten soll die Wirkungsweise der Netzsteuerung verdeutlicht werden. Hierzu dient ein Vergleich zwischen der Festzeitsteuerung und preXible in unterschiedlichen Varianten. In einer Variante wird preXible isoliert betrieben, also ohne die in Tab. 5.4 gezeigten zusätzlichen Parameter und ohne die Kommunikation von geschätzten Fahrzeugankünften zwischen den Knotenpunkten. In der zweiten Variante sind die Funktionen der Netzsteuerung aktiviert, womit diese Variante denjenigen entspricht, die für die darauffolgende Untersuchung genutzt werden. Die maximale Sperrzeit wird für die beiden ersten Varianten auf 120 s eingestellt. In der dritten Variante wird preXible ohne jegliche Sperrzeitbegrenzung, also mit $t_{S,max} = \infty$, betrieben. Die zugrunde gelegte Ausstattungsrate beträgt in allen Fällen 50 %, die

Verkehrsnachfrage beschränkt sich auf die Hauptrouten. Aufgrund des kurzen Abstandes zwischen den Knotenpunkten ist Route B als besonders kritisch einzustufen. Bild 5.24 zeigt die Anzahl der Halte auf diesem Streckenabschnitt. Es wird deutlich, dass die Anzahl der Halte gegenüber der Festzeitsteuerung stark ansteigt, wenn preXible isoliert betrieben wird. Die Erweiterung von preXible um Funktionen der Netzsteuerung sorgt bei einer maximalen Sperrzeit von 120 s zwar für eine signifikante Verbesserung gegenüber der rein isolierten Steuerung, bleibt aber auf dem kurzen Streckenabschnitt weiterhin statistisch signifikant hinter der Festzeitsteuerung zurück. Im untersuchten Extremfall, bei dem sich die Verkehrsnachfrage auf die Hauptrouten beschränkt, kommt die Forderung nach einer maximalen Sperrzeit besonders zum Tragen, da diese auch für die nicht nachgefragten Nebenrichtungen verlangt wird. Dies wird deutlich, wenn der Fall betrachtet wird, in dem keine maximale Sperrzeit vorgegeben wird. Dieser zeigt sogar eine Verbesserung gegenüber der Festzeitsteuerung, wenngleich diese nicht signifikant ist.

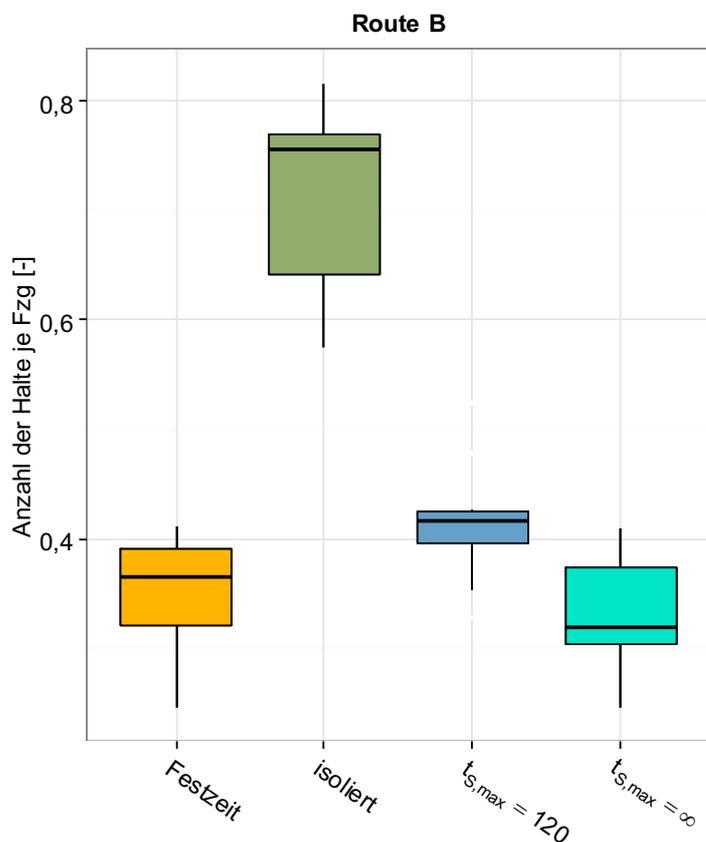


Bild 5.24 Boxplots der Anzahl der Halte für Route B, Nachfrage nur auf Hauptrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %

Die Erhöhung der Anzahl der Halte tritt nur auf Route B derart deutlich zu Tage. Diese Ergebnisse relativieren sich bei einem Blick auf die Anzahl der Halte auf dem gesamten Netz, wie Bild 5.25 zeigt. So ergeben sich für preXible im isolierten Betrieb weiterhin signifikante Verschlechterungen gegenüber der Festzeitsteuerung, bei Aktivierung der Netzsteuerung ergeben sich nun dagegen signifikante Verbesserungen.

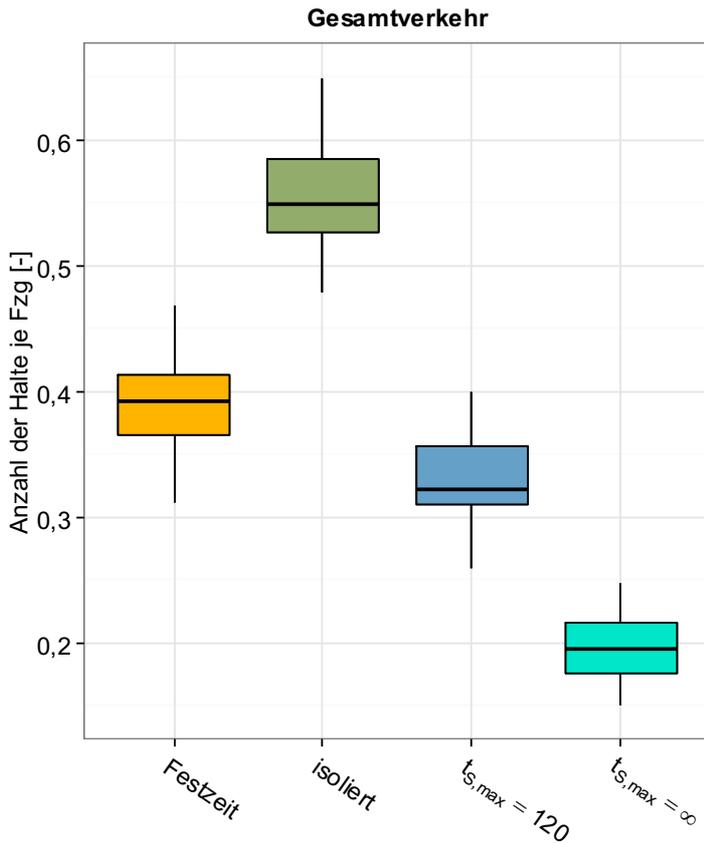


Bild 5.25 Boxplots der Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Hauptrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %

Betrachtet man die gesamte im Netz verbrachte Zeit, so wird anhand von Bild 5.26 deutlich, dass dieser Kennwert durch die Verwendung von preXible stets reduziert werden kann. Dies ist damit zu begründen, dass im Falle der Festzeitsteuerung die Koordinierung fest auf die erste Freigabezeit der Signalgeber im Zufluss des Netzes ausgelegt ist. Durch die flexiblere Steuerung von preXible ist eine schnellere Bedienung der aus Nebenströmen zufließenden Fahrzeuge möglich. Zudem sorgen die Eingriffe der maximalen Sperrzeit im Falle der isolierten Steuerung zwar für eine Vielzahl zusätzlicher Halte, die dadurch entstehende Verlustzeit ist aber nur gering. Der Grund ist, dass diejenigen Signalgruppen, deren maximale Sperrzeit zuvor überschritten wurde, nur für die Mindestfreigabezeit freigegeben werden und anschließend eine erneute Freigabe des Hauptstroms erfolgen kann. Aus diesem Grund wird selbst die zur Befahrung von Route B benötigte Gesamtzeit für alle Varianten von preXible gegenüber der Festzeitsteuerung signifikant reduziert.

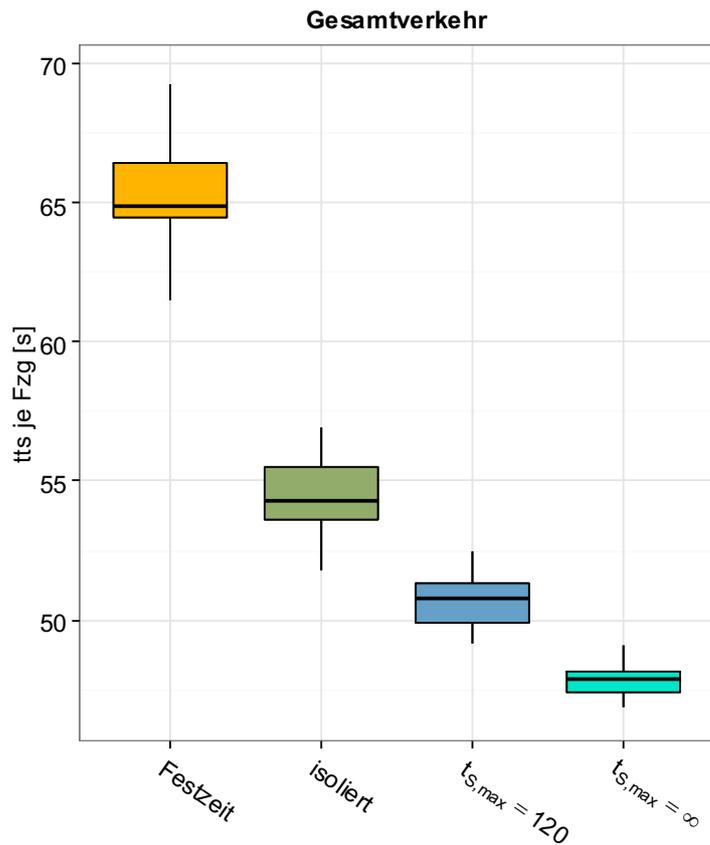


Bild 5.26 Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Hauptrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %

Die bisher in diesem Abschnitt erläuterten Ergebnisse beziehen sich auf den Extremfall, bei dem die Verkehrsnachfrage auf die Hauptrouten beschränkt ist. Erwartungsgemäß sind in diesem Fall ohne zentrale Vorgabe einer Koordination nur begrenzte Verbesserungen gegenüber einer ideal koordinierten Festszeitsteuerung zu erzielen. Der Informationsaustausch zwischen den Knotenpunkten und die Erweiterungen um die Elemente der Netzsteuerung ermöglichen jedoch, bezogen auf das Gesamtnetz, eine Reduktion der Anzahl der Halte sowie der gesamten im Netz verbrachten Zeit. Im Folgenden werden nun diejenigen Ergebnisse analysiert, bei denen auch eine Nachfrage auf Nebenrouten besteht. Wie Bild 5.27 zeigt, ergibt sich für dieses Nachfrageszenario eine Verringerung der Anzahl der Halte für alle Ausstattungsrate, wobei die Verbesserungen ab einer Ausstattungsrate von 25 % statistisch signifikant sind. Mit steigender Ausstattungsrate verringert sich die Anzahl der Halte tendenziell weiter, was auf den vermehrten Einfluss der Geschwindigkeitshinweise zurückzuführen ist. Da bei der Verwendung von preXible keine zentrale Vorgabe der Koordination erfolgt, erhöht sich die Anzahl der Halte auf den Hauptrouten allerdings, wie Bild 5.28 exemplarisch an Route B zeigt. Zwar ist dieser Streckenabschnitt aufgrund der kurzen Distanz als besonders kritisch einzustufen, die Ergebnisse ähneln aber denen der anderen Routen. Daraus ist zu folgern, dass die Koordination der Hauptrouten zugunsten der Leistungsfähigkeit des Gesamtnetzes geschwächt wird.

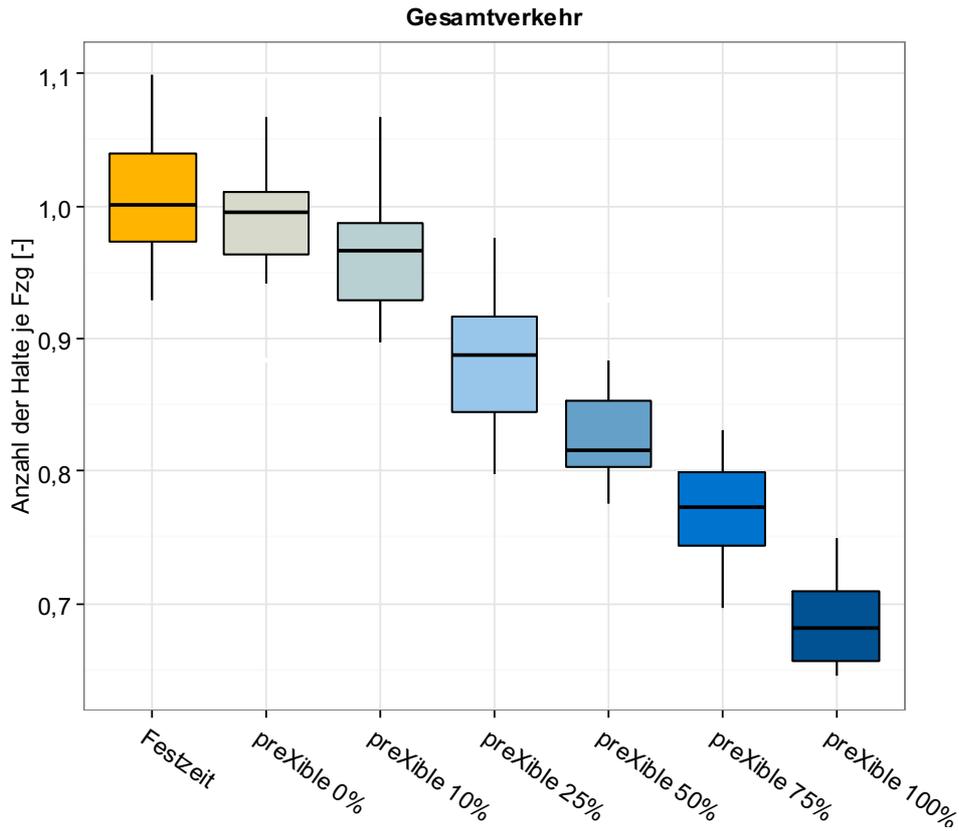


Bild 5.27 Boxplots der Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr

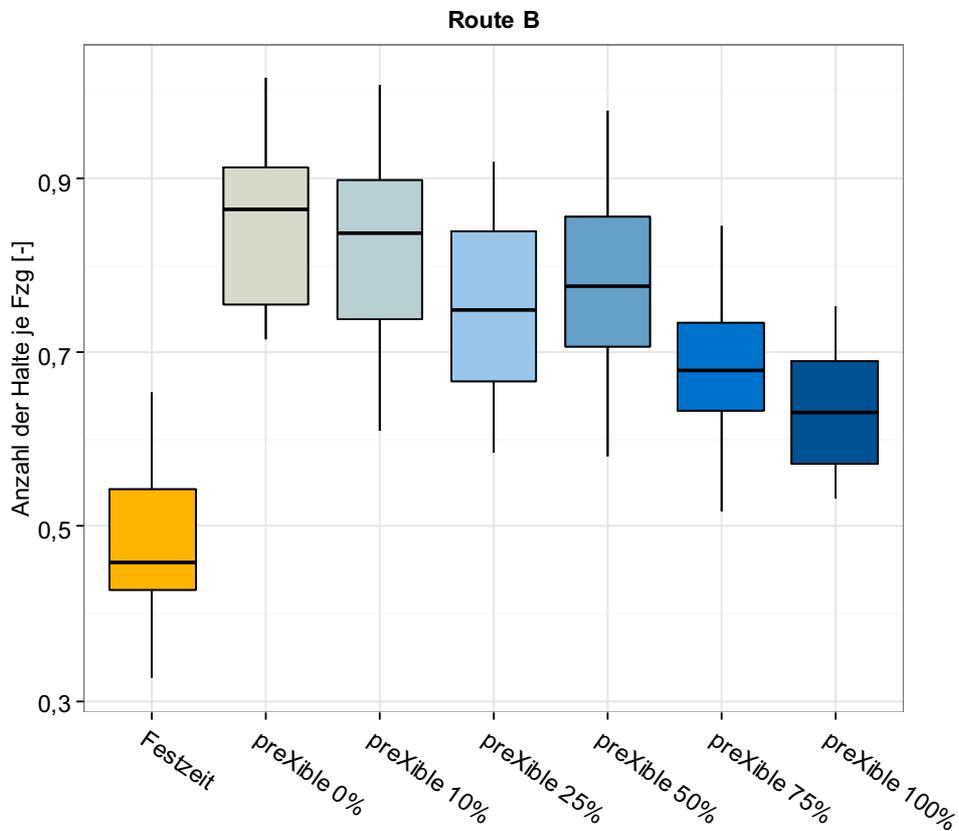


Bild 5.28 Boxplots der Anzahl der Halte für Route B

Bei Betrachtung der gesamten im Netz verbrachten Zeit werden deutliche Verbesserungen von über 20 % durch den Einsatz von preXible erzielt. Ähnlich wie in den vorherigen Szenarien nimmt die gesamte im Netz verbrachte Zeit mit steigenden Ausstattungsraten ab. Der Unterschied zwischen den einzelnen Varianten ist jedoch weniger stark als bei der Anzahl der Halte, da die zunehmende Verwendung von Geschwindigkeitshinweisen nur einen geringeren Beitrag zur Senkung der gesamten im Netz verbrachten Zeit liefern kann. Obwohl sich die Anzahl der Halte auf den Haupttrouten erhöht, verringert sich die zur Befahrung der Haupttrouten notwendige Zeit ebenfalls.

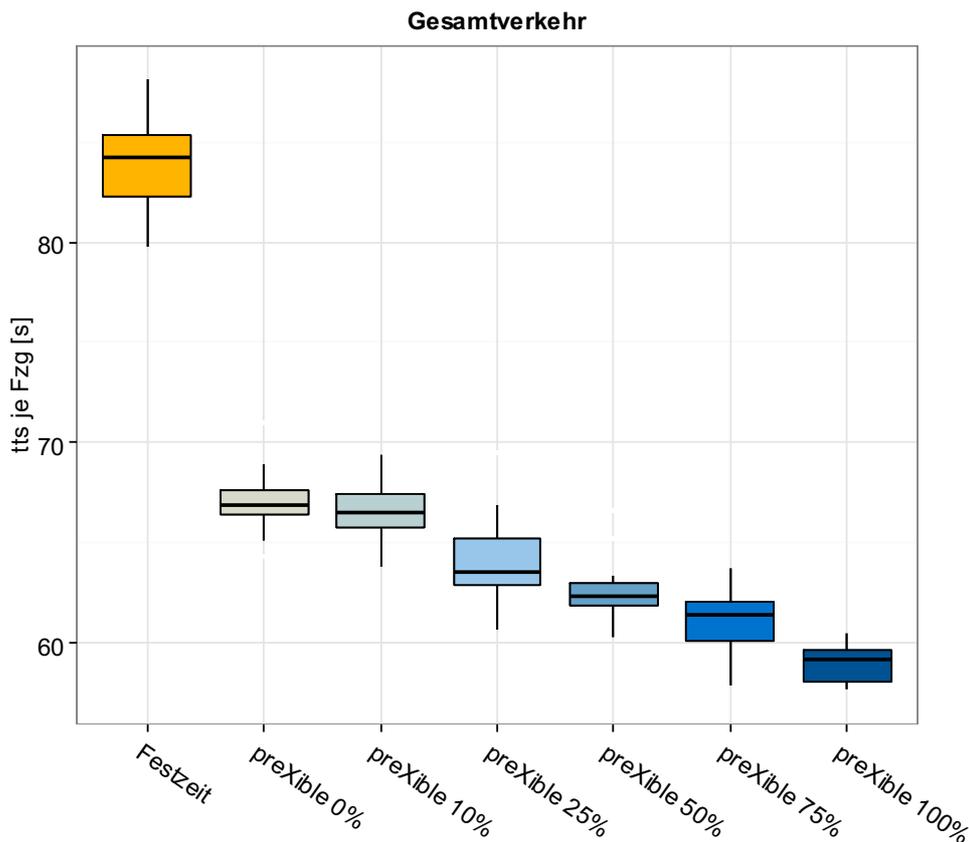


Bild 5.29 Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Gesamtverkehr

Die vorgestellten Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf eine Erhöhung der Verkehrseffizienz im Gesamtnetz zu. Wie Bild 5.30 zeigt, geht diese Steigerung der Verkehrseffizienz allerdings mit einer Erhöhung der maximal auftretenden Wartezeit einher. Dies ist auf die Flexibilisierung der Beschränkung der maximalen Sperrzeit zurückzuführen. Die Werte der maximalen Sperrzeit nähern sich dem eingestellten Grenzwert $t_{s,max} = 120 s$ an. Da sich Umlaufzeiten von 120 s noch innerhalb der Vorgaben der Richtlinien [FGSV, 2010B] befinden, sind diese Werte in Anbetracht der Verbesserungen der Verkehrseffizienz noch akzeptabel, wenngleich deutlich erhöht im Vergleich zur Festzeitsteuerung.

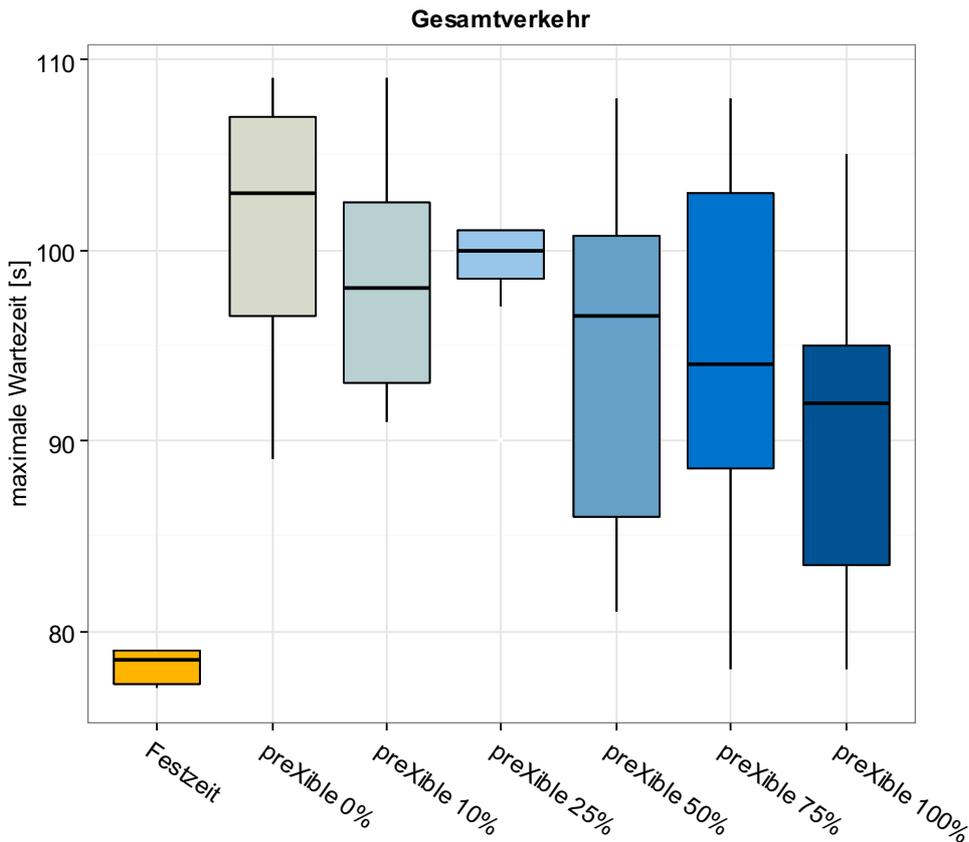


Bild 5.30 Boxplots der maximalen Wartezeit für den Gesamtverkehr

Abschließend werden die Auswirkungen auf die Kohlenstoffdioxidemissionen betrachtet. Wie Bild 5.31 zeigt, können die Emissionen bereits ohne vernetzte Fahrzeuge deutlich gesenkt werden. Die Reduktion der Anzahl der Halte mit zunehmender Ausstattungsrate sorgt auch für ein weiteres Absinken der Emissionen. So stellen sich gegenüber der Festzeitsteuerung Verbesserungen von über 13 % bei einer Ausstattungsrate von 0 % ein. Zwischen den einzelnen Ausstattungsraten zeigen sich zumeist ebenfalls signifikante Veränderungen, sodass bei einer Ausstattungsrate von 100 % mehr als 28 % der Kohlenstoffdioxidemissionen vermieden werden können.

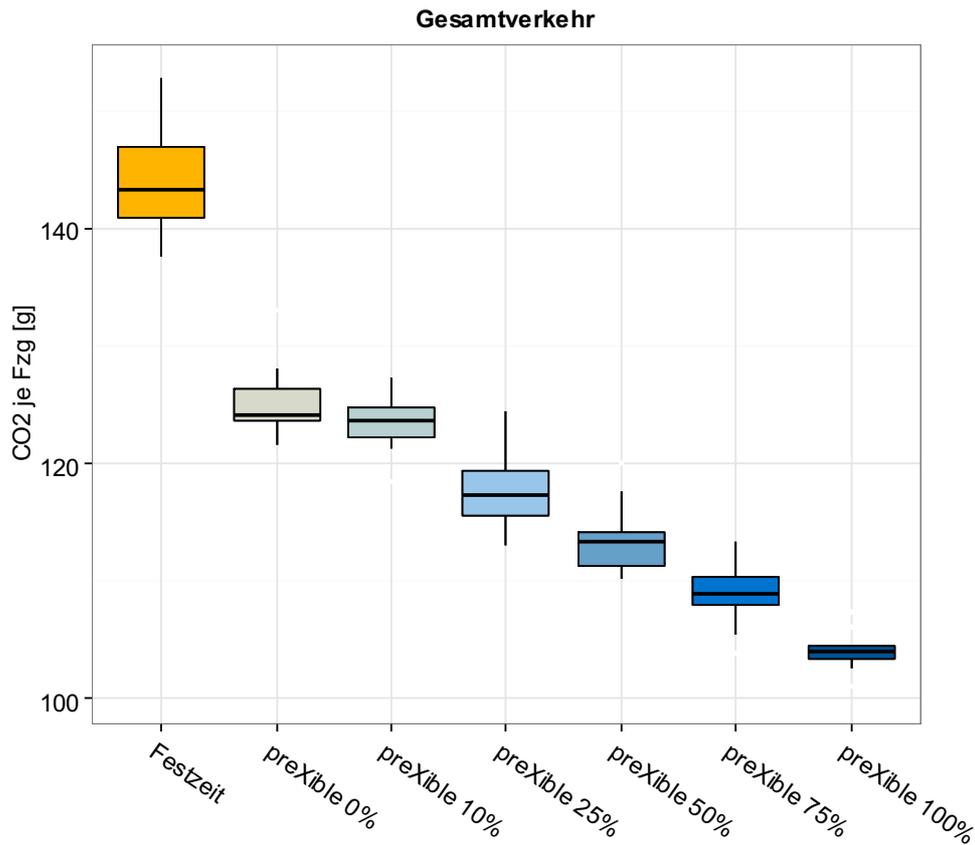


Bild 5.31 Boxplots der Kohlenstoffdioxidemissionen für den Gesamtverkehr

Die Ergebnisse dieses Kapitels legen nahe, dass die Verwendung des dezentralen Steuerungsverfahrens preXible auch in einem Netz aus geregelten Knotenpunkten zur Erhöhung der Verkehrseffizienz beitragen kann. So zeigt sich zwar eine Erhöhung der Anzahl der Halte auf den Hauptrouten, für das Gesamtnetz werden jedoch Verbesserungen erzielt. Die gesamte im Netz verbrachte Zeit sowie der Ausstoß von Kohlendioxid werden ebenfalls deutlich reduziert. Die Verbesserungen gehen jedoch mit einer Steigerung der maximal auftretenden Wartezeit für einzelne Verkehrsteilnehmer einher, welche durch die flexiblere Begrenzung der maximalen Sperrzeit hervorgerufen wird. Daran, wie auch an den vorgestellten Ergebnissen der Voruntersuchung ohne Nachfrage auf den Nebenrouten, wird deutlich, dass die Möglichkeiten der Koordinierung eines rein dezentralen Verfahrens beschränkt sind. Die Erweiterung von preXible um Elemente der Netzsteuerung wirkt sich jedoch deutlich positiv aus.

6. Bewertung und Übertragbarkeit

In diesem Kapitel werden zunächst, basierend auf den Ergebnissen des vorherigen Kapitels, die zu Beginn der Arbeit aufgestellten Forschungsfragen beantwortet. Anschließend wird die Übertragbarkeit der entwickelten Ansätze aufgezeigt. Hierzu werden notwendige Schritte zur Realisierung von preXible, eine mögliche Einbindung des dezentralen Steuerungsverfahrens in Verkehrszentralen sowie die Übertragbarkeit der entwickelten Ansätze auf andere Verkehrssteuerungsinstrumente aufgezeigt.

6.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Die übergeordnete Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit besteht in der Bestimmung des Potentials der kooperativen Lichtsignalsteuerung. Im Rahmen der Literaturrecherche zeigte sich, dass bereits zahlreiche Arbeiten vorliegen, in denen die Vernetzung von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen untersucht wurde. Die große Mehrheit der Forschungsansätze verfolgt eine Übermittlung künftiger Schaltzeitpunkte an vernetzte Fahrzeuge, um durch optimierte Annäherungsgeschwindigkeiten Haltevorgänge zu vermeiden. Weiterhin bestehen Ansätze, bei denen die Daten vernetzter Fahrzeuge genutzt werden, um die Entscheidungsgrundlage der Lichtsignalsteuerung zu stärken. Nur wenige Verfahren kombinieren allerdings die Beeinflussungsmöglichkeit von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen. Ebendieser Ansatz wurde in der vorliegenden Arbeit verfolgt, um das Potential der Vernetzung von Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen möglichst vollständig zu erschließen. Durch die gemeinsame Optimierung von Schaltzeitpunkten und Annäherungsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge sowie die Modellierung von Mischfahrstreifen wird eine im eigentlichen Sinne kooperative Steuerung ermöglicht. Im Rahmen einer theoretischen Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass unter Idealbedingungen zwei konfligierende Verkehrsströme selbst dann ohne Haltevorgänge bedient werden können, wenn die kombinierte Nachfrage der Sättigungsverkehrsstärke entspricht. Das Potential des entwickelten Lösungsansatzes liegt demnach vor allem in einer Steigerung der Verkehrseffizienz und einer damit einhergehenden Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen. So werden, in Abhängigkeit des Verkehrszustands, die Anzahl der Halte und damit die Anfahrverluste deutlich reduziert. Gegenüber der Verwendung von preXible ohne ausgestatte Fahrzeuge lässt sich die Anzahl der Halte bei Vollausrüstung um fast ein Drittel reduzieren. Aber auch bei hoher Verkehrsstärke können die Haltevorgänge durch den Einsatz der Geschwindigkeitshinweise noch deutlich reduziert werden. Durch die geringere Anzahl der Halte wird eine Verstetigung des Verkehrsflusses erzielt, was sich in einer Senkung der gesamten im Netz verbrachten Zeit widerspiegelt. Diese kann bei Vollausrüstung gegenüber der Variante ohne vernetzte Fahrzeuge um bis zu 24 % reduziert werden. In der Folge werden auch die verkehrsbedingten Emissionen um bis zu 12 % reduziert.

Die zu Beginn der Arbeit gestellte Frage nach der Vorhersagbarkeit der Lichtsignalsteuerung unter der Verwendung der feingliedrigen Daten vernetzter Fahrzeuge, führte zu der Wahl eines Steuerungsansatzes mit systemimmanenter Vorhersage. So werden bei Verwendung von MPC mit Hilfe des entwickelten Verkehrsflussmodells nicht nur die künftigen Verkehrszustände, sondern auch künftige Schaltzeitpunkte ermittelt. Durch die endliche Länge des Steuerhorizonts sowie Diskrepanzen zwischen Modell und Realität ergeben sich allerdings Abweichungen zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Schaltzeitpunkten. Aus diesem Grund wurde ein Vorgehen entwickelt, welches diese Abweichungen in erhöhte Kosten überführt. Damit wird eine Abwägung zwischen der Vorhersagbarkeit der Steuerung und der Verkehrseffizienz bei der Wahl der Gewichtungen der Kostenfunktion ermöglicht. Beispielhaft wurde hierzu gezeigt, dass eine signifikante Verbesserung der Zuverlässigkeit der Vorhersage bei moderater Verschlechterung der Verkehrseffizienz möglich ist. So erhöhte sich die Vorhersagequalität um etwa 20 % bei einer Zunahme der gesamten im Netz verbrachten Zeit von etwa 8 %.

Zuletzt soll die Frage beantwortet werden, inwiefern sich Ausstattungsraten unterhalb der Vollausrüstung für eine kooperative Lichtsignalsteuerung nutzen lassen. Hierzu wurde das Steuerungsverfahren um die Möglichkeit der Verwendung von Induktionsschleifen erweitert. Es wurde eine signalgruppenorientierte Steuerung entwickelt, welche aufgrund des modellbasierten Ansatzes einen vorausschauenden Charakter aufweist. Aus diesem Grund wurde gegenüber den eingesetzten Referenzsteuerungen schon bei ausschließlicher Verwendung konventioneller Detektion eine Steigerung der Verkehrseffizienz beobachtet. Da die Daten vernetzter Fahrzeuge, im Gegensatz zur punktuellen Erfassung durch Schleifendetektoren, kontinuierliche Positionsmeldungen enthalten, werden die Auswirkungen durch Schätzfehler des Modells reduziert. Weiterhin sorgen steigende Ausstattungsraten für einen stärkeren Einfluss der Geschwindigkeitshinweise, welche sich gegebenenfalls auch auf nachfolgende, nicht vernetzte Fahrzeuge auswirken. Die Vernetzung der Fahrzeuge wurde schon beim Entwurf der Lichtsignalsteuerung berücksichtigt und es wurde eine vollständige Integration der Fahrzeuge in den Regelkreis angestrebt. In der Folge steigt die Verkehrseffizienz stetig mit zunehmender Ausstattungsrate. Wie die Literaturrecherche zeigte, ist dies für konventionelle Systeme mit Erweiterungen für vernetzte Fahrzeuge keineswegs immer der Fall.

6.2 Übertragbarkeit von preXible auf reale Systeme

Für eine erfolgreiche Umsetzung sind, insbesondere bei vernetzten Verkehrssystemen, neben der funktionalen Ebene auch die technische und die organisatorische Ebene zu betrachten. Während die funktionale Ebene die Zielsetzung des entwickelten Systems beschreibt, betrachtet die technische Ebene, wie ein System physikalisch umzusetzen ist. Die organisatorische Ebene umfasst die Beschreibung, welche Akteure im Gesamtsystem zusammenwirken

müssen. Die Diskussion der Übertragbarkeit von preXible auf reale Systeme orientiert sich an diesen drei Betrachtungsebenen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der funktionalen Entwicklung einer kooperativen Lichtsignalsteuerung. Hierzu wurde ein dezentrales Steuerungsverfahren entwickelt, welches gleichzeitig Schaltzeitpunkte und Fahrzeuggeschwindigkeiten optimiert. Um die vielversprechenden Ergebnisse der Simulationsstudien auf ein reales System übertragen zu können, sind aber funktionale Weiterentwicklungen notwendig. Hierzu zählt vor allem die Integration von bedingt verträglichen Verkehrsströmen. Diese werden derzeit nicht vom Verkehrsflussmodell abgebildet, was insbesondere die Integration von Fußgänger- und Radverkehr erschwert. Die Integration nicht vernetzter Fahrzeuge wurde mittels Schleifendetektoren demonstriert. Allerdings wurde beispielsweise die Abbiegerate als bekannt angenommen, welche für eine Umsetzung im Feld dynamisch zu schätzen wäre. Weiterhin könnte eine funktionale Integration von Videodetektion die Auswirkungen der Schätzfehler des Modells gegenüber der Verwendung von Schleifendetektoren reduzieren. Damit wären, insbesondere bei geringen Ausstattungsraten, weitere Verbesserungen der Verkehrseffizienz zu erwarten. Zudem sollte das Modell um die Möglichkeit zur Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrzeuglängen erweitert werden, da die Fahrzeuglänge besonders bei mikroskopischer Modellierung des Verkehrs deutlichen Einfluss auf den Verkehrszustand haben kann. So kann etwa schon beim Vorhandensein weniger Lkw ein Abbiegefahrstreifen belegt sein und damit den stromaufwärts befindlichen Mischfahrstreifen beeinflussen.

Das vorgestellte Steuerungsverfahren wurde weitgehend losgelöst von technischen Randbedingungen entwickelt. Entsprechend sind auf dieser Betrachtungsebene weitreichende Anpassungen für eine Umsetzung im Feld vorzunehmen. So ist zunächst zu untersuchen, inwiefern sich Ortungsfehler der ausgestatteten Fahrzeuge und Latenzzeiten der Kommunikation auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems auswirken und ob diesbezüglich Änderungen auf funktionaler Ebene notwendig sind. Dasselbe gilt für Detektoren, deren Signale in der vorliegenden Arbeit als fehlerfrei angenommen wurden. Weiterhin ist die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalsteuerung sowie zwischen den Knotenpunkten mit geeigneten technischen Standards umzusetzen. Auch für die Versorgung der Knotenpunkte sowie die Anbindung an eine Verkehrsmanagementzentrale, wie sie im nächsten Unterkapitel beschrieben wird, ist eine Datenübertragung notwendig. Für den drahtlosen Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und Lichtsignalsteuerung bieten sich die eingangs erwähnten Nachrichtenformate CAM, MAP, SPAT, TPEG-TSI, SRM und SSM an. Wie weiter unten beschrieben, sind zur vollständigen Ausschöpfung des Potentials von preXible allerdings Erweiterungen der Nachrichtenformate notwendig. Eine weitere technische Hürde stellt die Rechenzeit dar. Zwar kann bei kurzem Steuerhorizont und dem Einsatz moderner Rechner bereits Echtzeitfähigkeit erreicht werden, jedoch würde die Rechenleistung aktueller Steuergeräte nicht für einen Betrieb von preXible ausreichen. Zur Nutzung des Verfahrens an realen Knotenpunkten ist eine entsprechende Rechenleistung des Steuergeräts erforderlich und es

sind diesbezüglich Änderungen auf funktionaler Ebene vorzunehmen. So könnte eine Vergrößerung des Steuerhorizonts, gegebenenfalls mit variabler Schrittweite wie bei VAN KATWIJK [2008], zu einer deutlichen Steigerung der Rechengeschwindigkeit beitragen. Die Integration von leistungsfähigen Rechnern und konventionellen Steuergeräten inklusive Nutzung der Signalsicherungssysteme zeigen OERTEL ET AL. [2017].

Auf organisatorischer Ebene ist vor allem der für preXible angenommene Datenaustausch als kritisch anzusehen. So ermittelt das Steuerungsverfahren optimale Annäherungsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung des Rückstaus, welche anschließend an die Fahrzeuge übermittelt werden. Die standardisierten Nachrichtenformate SPAT und TPEG-TSI sehen stattdessen eine Übermittlung künftiger Schaltzeitpunkte vor, womit sie sich lediglich für den Multi- oder Broadcast von einem Sender an mehrere Empfänger eignen. Die Ableitung von Geschwindigkeitshinweisen obliegt damit den Fahrzeugsystemen. Es ist dennoch vorteilhaft, die Geschwindigkeitshinweise durch das Lichtsignalsteuerungsverfahren berechnen zu lassen. Denn auf diese Weise wird, selbst bei einer fahrzeugseitigen Neuberechnung der Annäherungsgeschwindigkeit, eine Integration in den Regelkreis ermöglicht. Es kann allerdings nicht das gesamte Potential der kooperativen Lichtsignalsteuerung ausgenutzt werden. Beispielsweise würden beim ausschließlichen Versand künftiger Schaltzeitpunkte hintereinanderfahrende Fahrzeuge mit unterschiedlichem Abbiegewunsch und separater Signalisierung gegebenenfalls unterschiedliche optimale Annäherungsgeschwindigkeiten ermitteln. Die in Beispiel 1 in Kapitel 2.2.1 gezeigte Problematik könnte somit ohne weitere Anpassungen nicht aufgelöst werden. Dies wäre lediglich durch eine Erweiterung der Nachrichteninhalte um Geschwindigkeitsempfehlungen möglich, welche fahrzeugindividuell durch einen Unicast von der Infrastruktur zum Fahrzeug übertragen würden. Die Art der Ermittlung von Geschwindigkeitshinweisen und der Entwurf der Regelung insgesamt bringen eine weitere organisatorische Herausforderung mit sich. So wird durch preXible das Systemoptimum angestrebt, welches im Allgemeinen nicht dem Optimum aller Nutzer entspricht. So können beispielsweise Geschwindigkeitsreduktionen erfolgen, welche der Effizienz des einzelnen Fahrzeugs abträglich, der Gesamtverkehrseffizienz aber zuträglich sind. Auch können durch das azyklische Verhalten der Signalisierung höhere maximale Wartezeiten für einzelne Fahrzeuge zugunsten der Gesamtverkehrseffizienz auftreten.

6.3 Einbindung von preXible in Verkehrsmanagementzentralen

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Lichtsignalsteuerung agiert dezentral, ist also auf die Knotenpunktebene fokussiert. Um dennoch Netzeffekte zu berücksichtigen, wurde das Verfahren zwar um einen Informationsaustausch zwischen den Knotenpunkten erweitert, jedoch wurde keine zentrale Steuerungsinstanz vorgesehen. Trotz des dezentralen Charakters des entwickelten Steuerungsverfahrens könnte eine solche zentrale Instanz in realen Systemen aber notwendig oder vorteilhaft sein. Dies gilt insbesondere dann, wenn:

1. strategische Linien im städtischen Verkehrsnetz vorliegen,
2. Linien und Fahrpläne des öffentlichen Verkehrs hinterlegt sind,
3. politische Vorgaben im Rahmen der Signalsteuerung berücksichtigt werden sollen,
4. Sperrungen einzelner Streckenzüge vorliegen,
5. preXible nur in einem Teilbereich des Netzes betrieben und mit konventionellen Steuerungsverfahren kombiniert wird oder
6. die Zustandsschätzung von preXible auf zentraler Ebene weiterverwendet werden soll.

Durch zahlreiche Nebenbedingungen und Gewichtungen können die Zielvorgaben der durch preXible vorgenommenen Optimierung angepasst werden. Im Folgenden wird darauf eingegangen, inwiefern eine zentrale Steuerungsinstanz durch ebensolche Anpassungen preXible so beeinflussen kann, dass die aufgezählten Anwendungsfälle adressiert werden können. Hierzu dient das in Bild 6.1 dargestellte hypothetische Szenario mit den nachfolgenden Erläuterungen. Das Szenario umfasst ein Teilnetz der Stadt München, das sowohl durch preXible gesteuerte Knotenpunkte, als auch konventionell gesteuerte Knotenpunkte enthalte.

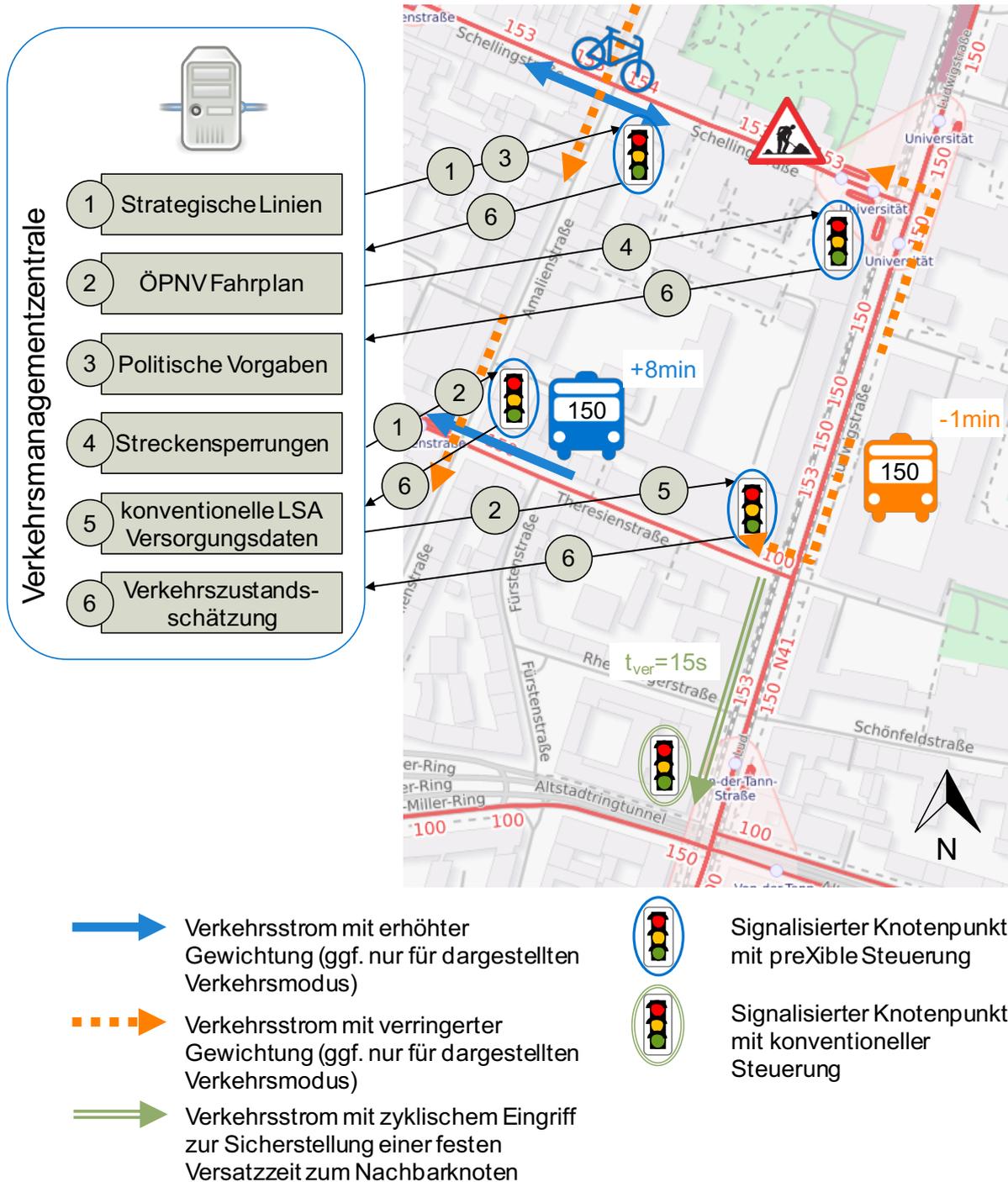


Bild 6.1 Einbindung von preXible in eine Verkehrsmanagementzentrale in einem hypothetischen Szenario der Stadt München (Kartendarstellung: openstreetmap.org)

1. In einem Netz können auf zentraler Ebene strategische Linien definiert werden, welche den Verkehr vorrangig abwickeln sollen, um diese Strecken auszulasten und im Gegenzug beispielsweise Durchgangsverkehr in Wohngebieten zu reduzieren. Für preXible bedeutet dies, dass Fahrzeuge in Zufahrten, die Teil dieser Linien sind, gegenüber anderen höher zu gewichten sind. Weiterhin könnten für diese Zufahrten Untergrenzen für Freigabezeiten

eingestellt werden, die oberhalb der von der RiLSA [FGSV, 2010B] geforderten Mindestfreigabezeit liegen. Dadurch wird zwar gegebenenfalls eine schlechtere Verkehrseffizienz erzielt, da sich die Lichtsignalsteuerung nicht vollständig entsprechend der derzeitigen Nachfrage verhält. Im Gegenzug wird jedoch die Verkehrsqualität in den Zufahrten der strategischen Linien gegenüber den anderen Zufahrten angehoben und damit vermieden, dass auf den Nebenstrecken Verkehr induziert wird. In Bild 6.1 wird diese Umsetzung eines Stadtfahrplans durch eine geringere Gewichtung der entlang der Einbahnstraße Amalienstraße führenden Verkehrsströme verdeutlicht, um eine Verkehrsverlagerung von der Ludwigstraße zu vermeiden.

2. In Kapitel 5.3 wurde die Möglichkeit zur Priorisierung einzelner Fahrzeuge anhand von Bussen an einem einzelnen Knotenpunkt demonstriert. Liegen zentrale Informationen über die Linien des öffentlichen Verkehrs vor, können die Priorisierungsmaßnahmen durch Anpassungen am Knotenpunkt weiter verbessert werden. Ist ein Bus beispielsweise verfrüht, kann unter Umständen auf eine erhöhte Gewichtung des Fahrzeugs verzichtet werden. Ist ein Bus dagegen pünktlich, der negative Einfluss auf die Steuerung durch dessen höhere Gewichtung am betrachteten Knotenpunkt aber sehr groß, so kann unter Umständen eine Priorisierung am nächsten flussabwärts gelegenen Knotenpunkt ausreichend sein. Ist ein Bus stark verspätet und folgt ihm dadurch ein Bus derselben Linie sehr dicht (engl.: bus bunching), so kann es, je nach Vorgaben, sogar sinnvoll sein, den zweiten Bus nicht zu priorisieren, um gleichmäßigere Zeitabstände zwischen den Fahrzeugen wiederherzustellen. Bild 6.1 zeigt zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs zwei aufeinanderfolgende Busse der Linie 150, wobei der vorausfahrende Bus acht Minuten verspätet und der nachfolgende Bus eine Minute verfrüht ist. Durch einen Abgleich mit dem in der Zentrale hinterlegten Fahrplan, der einen Sollabstand von zehn Minuten ausweist, werden die Gewichtungen im Rahmen der Optimierung von preXible für den verspäteten Bus angehoben, während sie für den nachfolgenden Bus reduziert werden.
3. Durch die flexible Gewichtung von Einzelfahrzeugen können politische Vorgaben, die über die Priorisierung des öffentlichen Verkehrs hinausgehen, vergleichsweise einfach mit Hilfe von preXible in die Lichtsignalsteuerung einfließen. Damit ist, unter der Voraussetzung der entsprechenden Datenverfügbarkeit, eine differenzierte Verteilung der Knotenpunkt-kapazitäten auf unterschiedliche Verkehrsmodi möglich. Es sind beispielsweise Korridore mit hohem Schwerverkehrsanteil denkbar, auf denen die Halte von Lkw zur Emissionsreduzierung gegenüber anderen Fahrzeugen stärker gewichtet werden. In anderen Bereichen könnten dagegen Elektrofahrzeuge, Radfahrer oder Fußgänger stärker gewichtet werden, um die Attraktivität dieser Verkehrsmodi zu steigern. Für die beiden zuletzt genannten Modi müsste das Verkehrsflussmodell von preXible entsprechend erweitert werden. Die politischen Vorgaben würden anschließend auf zentraler Ebene in Gewichtungen übersetzt und an die mit preXible gesteuerten Knotenpunkte übertragen, sodass die zentralen Strategien lokal umgesetzt werden. In Bild 6.1 ist das Beispiel der Radfahrer-

priorisierung durch ein Fahrradsymbol gekennzeichnet, welches eine erhöhte Gewichtung der Radverkehrsströme entlang der Schellingstraße andeuten soll.

4. Liegen vollständige oder teilweise Sperrungen einzelner Streckenzüge vor und sind diese Informationen zentral erfasst, könnten sie auf lokaler Ebene genutzt werden, um die reduzierten Kapazitäten einzelner Verkehrsströme auf Knotenpunktebene zu berücksichtigen. Eine vollständige Sperrung einer stromabwärts gelegenen Strecke könnte beispielsweise zur Aufhebung der maximalen Sperrzeit für die betroffenen Fahrbeziehungen genutzt werden, während eine Sperrung einzelner Fahrstreifen in einer Begrenzung der Freigabezeit resultieren könnte, um Überlastungen der gestörten Strecke zu vermeiden. In Kombination mit Umleitungsempfehlungen könnte so ein aktives Störungsmanagement ermöglicht werden. Bild 6.1 zeigt hierzu eine verringerte Gewichtung der von der Ludwigstraße links in die, durch eine Baustelle teilweise gesperrte, Schellingstraße abbiegenden Verkehrsströme. Die hierzu notwendigen Informationen über Sperrungen könnten einem Baustellen- oder Veranstaltungsmanagementsystem der Zentrale entnommen werden.
5. Häufig werden verschiedene Verfahren zur Lichtsignalsteuerung in einem Netz kombiniert. Zwar verzichtet das in dieser Arbeit entwickelte Steuerungsverfahren bewusst auf einige Komponenten herkömmlicher Verfahren, wie beispielsweise eine feste Umlaufzeit. Um jedoch eine Kompatibilität von preXible mit anderen Steuerungsverfahren im Netz zu erreichen, könnten ebensolche Eigenschaften notwendig sein. So könnte an Randbereichen des von preXible gesteuerten Gebiets ein zeitlich fest definierter Beginn einer Phase vorgegeben werden, um, unter Berücksichtigung einer entsprechenden Versatzzeit, eine feste Koordinierung mit stromaufwärts gelegenen Knotenpunkten zu erzielen. Durch einen Eingriff, der in der Implementierung demjenigen entspricht, der bei Erreichen der maximalen Sperrzeit genutzt wird, könnte preXible zentralseitig eine Umlaufzeit aufgeprägt werden. Weiterhin könnten Nebenbedingungen eingeführt werden, die bestimmte Signalgruppenkombinationen ausschließen, um sich dem phasenorientierten Prinzip der Nachbarknoten anzunähern. In Bild 6.1 ist ein zyklischer Eingriff an dem im südlichen Bereich der Ludwigstraße gelegenen und durch preXible gesteuerten Knotenpunkt gezeigt. Dieser sorgt für eine feste Versatzzeit von 15 s gegenüber dem weiter südlich gelegenen, konventionell gesteuerten Knotenpunkt, um eine Koordinierung zwischen den etwa 190 m voneinander entfernten Lichtsignalanlagen zu ermöglichen.
6. Zuletzt soll noch erwähnt werden, dass die Ergebnisse der detaillierten Zustandsschätzung und -vorhersage von preXible an die Zentrale übertragen werden könnten, um dort als Datengrundlage für Verkehrsmanagementmaßnahmen zu dienen. Bild 6.1 deutet den Informationsfluss von Knotenpunkten zur Zentrale durch in diese Richtung verlaufende Pfeile an.

6.4 Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes auf weitere Verkehrssteuerungsinstrumente

Die im Rahmen dieser Arbeit für die Lichtsignalsteuerung gewählten Ansätze lassen sich auf weitere Verkehrssteuerungsinstrumente übertragen. In diesem Kapitel werden hierzu Möglichkeiten für die beiden in Kapitel 1 genannten Beispiele aufgezeigt. Drei Eigenschaften des entwickelten Verfahrens sind dabei besonders hervorzuheben: die Nutzung der individuellen Beeinflussungsmöglichkeiten von Fahrzeugen, die kooperative Abstimmung zwischen unterschiedlichen Steuereingriffen sowie der proaktive Charakter der Steuereingriffe.

Im Rahmen einer Netzbeeinflussung liegt erhebliches Potential in einer Umleitung von Fahrzeugen gemäß den drei zuvor genannten Eigenschaften. Im Falle einer Störung oder Überlastung einer Strecke des Straßennetzes könnten Fahrzeuge gemäß den Restkapazitäten möglicher Umleitungsstrecken auf diese verteilt werden. Analog zur Berücksichtigung von Geschwindigkeitshinweisen bei der Ermittlung von Schaltzeitpunkten sollte im Rahmen der Ermittlung von Umleitungsempfehlungen die zusätzliche Verkehrsbelastung auf diesen Strecken berücksichtigt werden. Dies ist bei den nach dem Stand der Technik eingesetzten Netzbeeinflussungsanlagen und Navigationssystemen nicht der Fall, da hier in der Regel alle Fahrzeuge die gleichen Hinweise erhalten und auf eine Überlastung der Umleitungsstrecken erst bei einer bereits erfolgten Verschlechterung des Verkehrsablaufs auf diesen Routen reagiert wird. Lediglich durch unterschiedliche Systemanbieter und variierende Befolgungsraten durch die Fahrer ergibt sich eine Verteilung der Fahrzeuge auf verschiedene Strecken, die aber nicht abgestimmt erfolgt und somit deutlich hinter dem systematisch zu erzielenden Optimum zurückbleiben dürfte. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz kann auf eine solche Netzbeeinflussung übertragen werden. Hierzu wäre zunächst ein geeignetes Verkehrsmodell zu entwickeln, welches anstelle von Geschwindigkeitsreduktionen Reisezeiten auf verschiedenen Strecken als Ausgangsgrößen liefert. Zusammen mit einer Störungserkennung und einem geeigneten Verkehrsnachfragemodell könnte eine modellprädiktive Regelung eingesetzt werden, welche eine Minimierung der Reisezeiten im System anstrebt und hierzu individuelle Umleitungsempfehlungen für Einzelfahrzeuge berechnet, deren Einfluss auf die Umleitungsstrecken sogleich im Modell berücksichtigt wird. Als Nebenbedingungen wären beispielsweise der maximale Umweg und die größte Verlustzeit einzelner Fahrzeuge gegenüber der schnellsten Route zu wählen. Letztere Nebenbedingung würde der bestehenden Gefahr entgegenwirken, dass einzelne Fahrzeuge zum Erreichen des Systemoptimums starke Einbußen erfahren, das Systemoptimum sich also zu weit vom individuellen Nutzeroptimum entfernt.

Als zweites System zur Übertragung des entwickelten Ansatzes bieten sich Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen an. Deren dynamische Geschwindigkeitsanzeigen können dazu genutzt werden, die Geschwindigkeiten von Fahrzeugen zu harmonisieren und im Falle hoher Verkehrsstärken instabile Verkehrszustände zu vermeiden. Durch eine Begrenzung der Geschwindigkeit kann so die Kapazität des betrachteten Autobahnquerschnitts

bestmöglich genutzt werden. Die gezeigten Geschwindigkeitsbegrenzungen gelten hierbei jeweils für alle Fahrzeuge. Unter der Voraussetzung, dass umfassende Informationen zum Verkehrszustand vorliegen und eine Beeinflussung von Einzelfahrzeugen möglich ist, ließe sich die Wirkung von Streckenbeeinflussungsanlagen jedoch weiter verbessern. Mit Hilfe der modellprädiktiven Regelung ließen sich Geschwindigkeitsverläufe für Einzelfahrzeuge so berechnen, dass auftretende Stoßwellen gedämpft würden. Durch gezielte und vorausschauende Geschwindigkeitsreduktionen könnten Verzögerungen bis zum Stillstand und anschließende Anfahrvorgänge vermieden werden. Wiederum müssten die Steuereingriffe mit Blick auf das Gesamtsystem so erfolgen, dass eventuell auftretende negative Effekte, beispielsweise für nachfolgende Fahrzeuge, berücksichtigt werden. Als Nebenbedingungen liegen dabei maximal auftretende Beschleunigungen und Verzögerungen nahe.

7. Zusammenfassung und Ausblick

“I find it difficult to believe that, as we approach the end of this century, traffic engineers and drivers will continue to tolerate signals with green and red times that were decided by the flows and queues that happened to be observed on one day many years earlier, rather than in the last five minutes.” – [ROBERTSON, 1986]

“Ich kann mir nicht vorstellen, dass Verkehrsingenieure und Autofahrer gegen Ende des Jahrhunderts weiterhin Lichtsignalanlagen mit Freigabe- und Sperrzeiten tolerieren werden, welche auf der Grundlage von Verkehrsstärken und Warteschlangen basieren, welche nicht in den letzten fünf Minuten, sondern an einem Tag vor vielen Jahren beobachtet wurden.”

Das Zitat entstammt einer Veröffentlichung zum Steuerungsverfahren SCOOT. Rund dreißig Jahre später ist der Vernetzungs- und Automatisierungsgrad von Fahrzeugen stark gestiegen. Überführt man den Gedanken des Zitats in die heutige Zeit, lässt sich die Frage stellen, ob eine Reaktion von Lichtsignalanlagen auf Basis der in den letzten Minuten von Schleifendetektoren erhobenen Daten noch zukunftsfähig ist. In der zitierten Veröffentlichung postuliert ROBERTSON [1986] für die 1990er Jahre außerdem die Integration fahrzeugbasierter Anzeigesysteme in den Regelkreis. In der vorliegenden Arbeit werden Lösungsansätze für diese immer noch aktuellen Forschungsgegenstände aufgezeigt. So wurde ein Steuerungsverfahren vorgestellt, welches auf sekundlicher Basis Entscheidungen mit Hilfe der Daten vernetzter Fahrzeuge trifft. Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet, dass eine Integration der Fahrzeugsysteme in den Regelkreis durch geeignete Berücksichtigung im Verkehrsflussmodell erfolgt. So werden Schaltzeitpunkte der Lichtsignalanlage und Annäherungsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge in gegenseitiger Abstimmung optimiert, um das Potential einer kooperativen Lichtsignalsteuerung vollständig ausnutzen zu können. Die Ergebnisse der vorgestellten Simulationsstudien zeigen, dass ein derartiges System auf Knotenpunkts- wie auch auf Netzebene zu hoher Verkehrseffizienz führen kann. Die positiven verkehrlichen Wirkungen nehmen dabei mit steigender Ausstattungsrate stetig zu. Weiterhin wurden Möglichkeiten zur gezielten Verbesserung der systemimmanenten Vorhersage von Schaltzeitpunkten sowie zur Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen demonstriert. Damit lassen sich derzeitige politische Vorgaben, wie die Verkehrseffizienz insgesamt, die Bevorrechtigung des öffentlichen Verkehrs, aber auch eine künftige mögliche Forderung nach verbesserter Vorhersagbarkeit der Schaltzeitpunkte, in der Steuerung umsetzen und mittels Gewichtungen gegeneinander abwägen.

Ausgehend von dem entwickelten Verfahren zur Lichtsignalsteuerung und den beantworteten Forschungsfragen lassen sich weitergehende Forschungsfragen identifizieren, welche im Folgenden dargelegt werden. Aufgrund der mikroskopischen Modellierung des Verkehrsflusses ließe sich mit dem vorgestellten Verfahren eine wesentlich feinere Abstufung der Priorisierung ermöglichen, als dies bei konventionellen Verfahren der Fall ist. So könnten bei

Verfügbarkeit der notwendigen Daten beispielsweise die Anzahl der Passagiere, der Belegungsgrad, die Emissionsklasse oder die bisher im Netz erfahrene Verlustzeit die Ermittlung von Freigabezeiten beeinflussen. Würden zudem Fahrrad- und Fußgängerverkehrsströme auf ähnliche Weise modelliert werden, wie es im Rahmen dieser Arbeit für den Fahrzeugverkehr geschehen ist, könnte eine integrierte und vollständig multimodale Steuerung erzeugt werden. Eine zu klärende Fragestellung wäre, inwieweit ein solcher multimodaler Ansatz tatsächlich zu nachweisbaren und erlebbaren Unterschieden bei unterschiedlicher Parameterwahl führen kann.

Eine weitere interessante Fragestellung ergibt sich bei der Betrachtung höherer Automatisierungsgrade von Fahrzeugen. So wäre zunächst zu untersuchen, inwiefern sich die Befolungsgrade von Geschwindigkeitshinweisen durch teil- oder vollautomatisierte Fahrzeugführungssysteme verändern und welchen Einfluss Befolungsgrade auf die Effizienz des Gesamtsystems haben. Untersucht werden sollte hierbei auch, ob bei der Benutzung automatisierter Fahrzeuge niedrigere Grenzgeschwindigkeiten zur Annäherung an die Lichtsignalanlage akzeptiert würden, wodurch die Anzahl der Halte weiter reduziert werden könnte. Durch eine automatisierte Längsführung in einem kooperativen Verkehrssystem ist es außerdem denkbar, dass beim Anfahren deutlich geringere Reaktionszeiten und Zeitlücken realisiert werden. Nähert sich der Anfahrvorgang dem einer mechanischen Kopplung von Fahrzeugen an, so könnte dies entsprechend im Verkehrsflussmodell berücksichtigt werden und durch die höhere Verkehrsstärke zu Beginn der Freigabezeit könnte diese effektiver genutzt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Optimierung von Schaltzeitpunkten und Fahrzeuggeschwindigkeiten aus verkehrlicher Perspektive vorgenommen. Insbesondere bei hohen Ausstattungsraten und Befolungsgraden könnte es aber sinnvoll sein, die Belange der einzelnen Fahrzeuge stärker einzubeziehen. Beispielsweise können, je nach Fahrzeugtyp und Antriebsstrang, unterschiedliche Annäherungsgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Verzögerungen optimal sein, um möglichst viel Energie zu rekuperieren oder eine möglichst energieeffiziente Beschleunigung durchzuführen. Hierbei wäre zunächst zu identifizieren, wie stark sich fahrzeug- und verkehrsoptimale Steuerung unterscheiden und inwiefern eine Abwägung zwischen den beiden Perspektiven zu treffen ist.

Der Stand der Technik und Wissenschaft der Lichtsignalsteuerung zeigt ein sehr heterogenes Bild. Die eingesetzten Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Steuerungsphilosophie, der eingesetzten Detektion und ihrer Systemarchitektur stark voneinander. Dasselbe gilt für die gegebenenfalls nachgeschalteten Vorhersagealgorithmen. Es zeichnen sich derzeit keine maßgeblichen Änderungen an dieser Heterogenität ab. Allerdings ist es durchaus denkbar, dass sich die Anforderungen an adaptive Steuerungsverfahren ändern könnten. Neben den aktuellen Forderungen nach Steigerung der Verkehrseffizienz bei möglichst geringem Detektionsaufwand sowie hoher Nutzerfreundlichkeit und Wartbarkeit des Systems, könnten

künftig die Fähigkeit zur Nutzung der Daten vernetzter Fahrzeuge sowie die Vorhersage von Schaltzeitpunkten Eingang in das Lastenheft der Steuerungsverfahren finden. Die Nutzung der Daten vernetzter Fahrzeuge könnte zu einer Reduktion der stationären Detektion genutzt werden, um den Wartungs- und Kostenaufwand der Systeme zu reduzieren. Bei hohen Ausstattungsraten erscheint dabei auch ein Verzicht auf stationäre Detektion möglich, wobei Maßnahmen zu ergreifen wären, die eine Bedienung aller Verkehrsteilnehmer, auch der nicht vernetzten, garantieren würden. Hierzu wäre auch zu erforschen, welche Art von Daten in welcher Qualität und Durchdringungsrate notwendig sind, um eine Steuerung zu ermöglichen, deren Leistungsfähigkeit mindestens derjenigen aktueller Steuerungsverfahren entspricht. In letzter Konsequenz wäre sogar ein vollständig vernetztes und vollständig automatisiertes Verkehrssystem vorstellbar. Dabei stellt sich die Frage, ob Lichtsignale überhaupt weiterhin notwendig sind. Zum einen könnten intelligente Fahrzeuge mit verteilter Intelligenz ihre Passierzeiten kooperativ abstimmen. Zum anderen könnte weiterhin eine infrastrukturseitige Steuerung genutzt, aber auf eine Aktorik mittels Lichtsignalen verzichtet werden. Die Steuerung würde stattdessen unmittelbar über aktive Fahrzeugeingriffe erfolgen. Für eine solche infrastrukturbasierte Lösung wäre das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren prinzipiell geeignet, müsste aber gegebenenfalls um eine Fahrstreifenzuteilung erweitert werden. Es ist allerdings zu bedenken, dass in einem solchen Szenario Fußgänger und Radfahrer entweder ebenfalls vollständig mit Systemen zur Anforderung und Anzeige von Freigabezeiten ausgestattet sein oder planfrei geführt werden müssten. Fraglich ist jedoch, ob die damit einhergehenden Effizienzsteigerungen und Kostenreduktionen im Fahrzeugverkehr den möglichen Verlust an städtischer Lebensqualität aufwiegen können und so auch gesellschaftlich akzeptiert würden.

Literaturverzeichnis

- 5G INFRASTRUCTURE ASSOCIATION [2015]: 5G Vision - The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services.
- AXER, S. & FRIEDRICH, B. [2016]: A Methodology for Signal Timing Estimation Based on Low Frequency Floating Car Data: Analysis of Needed Sample Sizes and Influencing Factors. *Transportation Research Procedia*, 15, S.220–232.
- BAUER, T.; MA, J. & OFFERMANN, F. [2015]: An Online Prediction System of Traffic Signal Status for Assisted Driving on Urban Streets: Pilot Experiences in the United States, China and Germany. *ITE Journal*, 85(2), S.37–43.
- BAUR, M.; HOFFMANN, S.; HANDKE, D. & KEMPER, C. [2013]: simTD - Ergebnisse Verkehrssimulation – Teil A 1.3.2.1 Optimierung des LSA gesteuerten Verkehrsflusses - Working Document W43.3, München.
- BEMPORAD, A. & MORARI, M. [1999]: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica*, 35(3), S.407–427.
- BIDLINGMAIER, J. [1967]: Absatzpolitik und Distribution: Karl Christian Behrens zum 60. Geburtstag. In J. Bidlingmaier, H. Jacobi, & E. W. Uherek, hrsg. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 353–395.
- BISHOP, G. & WELCH, G. [2006]: An introduction to the kalman filter, University of North Carolina at Chapel Hill.
- BLEY, O.; KUTZNER, R.; FRIEDRICH, B.; SAUST, F.; WILLE, J.M.; MAURER, M.; NIEBEL, W.; NAUMANN, S.; WOLF, F.; SCHÜLER, T.; BOGENBERGER, K.; JUNGE, M. & LANGENBERG, J. [2011]: Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung. In AAET 2011 Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. Braunschweig.
- BMJV [2013]: Intelligente Verkehrssysteme Gesetz vom 11. Juni 2013 (BGBl. I S. 1553), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2640) geändert worden ist, Deutschland.
- BOLTZE, M.; BUSCH, F.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.; KOHOUTEK, S.; LÖHNER, H.; LÜBMANN, J. & OTTERSTÄTTER, T. [2011]: AMONES: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen - Teil 1: Problemstellung und Methodik. *Straßenverkehrstechnik*, (5), S.S. 293-300.
- BOTTERO, M.; ALCARAZ, G.; FRANCO, G.; MILLI, M. & SCHMID, A. [2015]: Enabling the cooperative traffic light: phases and timing prediction algorithms. In *Mobil.TUM 2015 - International Scientific Conference on Mobility and Transport*. München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- BRAUN, R. [2008]: Ein echtzeitfähiger Evolutionärer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung. Dissertation. Technische Universität München.
- BRESSER, C.; VAN DEN HAAG, W.P.; VAN KATWIJK, R.; LÜBMANN, J.; MANN, M.; NETTEN, B.; MATTHIAS, P.; VREESWIJK, J.; VAN WAES, F. & WILMINK, I. [2013]: eCoMove - Setup, manual and experiences with the traffic management and control applications - D550.58 (D5.8), Brüssel.
- BURGER, M.; VAN DEN BERG, M.; HEGYI, A.; DE SCHUTTER, B. & HELLENDORRN, J. [2013]:

- Considerations for model-based traffic control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 35.
- BUSCH, F. & KRUSE, G. [2001]: MOTION for SITRAFFIC-a modern approach to urban traffic control. In *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*. S. 61–64.
- CAMACHO, E.F. & BORDONS, C. [2004]: *Model Predictive Control*, Springer-Verlag, London.
- CANEPARI, G. UTOPIA - Database configuration, Turin.
- CARRIÈRE, J. [2011]: Reducing CO2 emissions in urban areas with adaptive traffic control and in-car speed advice. Master Thesis. TU Delft.
- CASTLEMAN, M. [2015]: All About Traffic Signal Controllers, Part One. verfügbar unter: <http://streets.mn/2015/06/20/all-about-traffic-signal-controllers-part-one/> [Zugegriffen 26. April 2016].
- CHANDRA, R. & GREGORY, C. [2012]: InSync Adaptive Traffic Signal Technology: Real-Time Artificial Intelligence Delivering Real-World Results. InSync White Paper.
- DAGANZO, C.F. [1994]: The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(4), S.269–287.
- DINKEL, A.; KRAUSE, M.; BENGLER, K.; ETTINGER, R. & BÖLLING, F. [2013]: Cooperative Optimization of Traffic Signal Control and Driver Assistance Outside Urban Areas. In *mobil.TUM 2013 - International Scientific Conference on Mobility and Transport*. München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München.
- DITTMAR, R. & PFEIFFER, B.-M. [2006]: Modellbasierte prädiktive Regelung in der industriellen Praxis (Industrial Application of Model Predictive Control). *at – Automatisierungstechnik*, 54(12), S.590–601.
- DONGES, E. [1982]: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 2, S.183–190.
- DOWLING, R.; SKABARDONIS, A. & ALEXIADIS, V. [2004]: *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Rep. No. FHWA-HRT-04-040, U.S. DOT, Federal Highway Administration, Washington, D.C, III(July), S.146.
- ERDMANN, J. [2013]: Combining Adaptive Junction Control with Simultaneous Green-Light-Optimal-Speed-Advisory. In *5th International Symposium on Wireless Vehicular Communications*. Dresden.
- ERDMANN, J.; OERTEL, R. & WAGNER, P. [2015]: VITAL: A Simulation-Based Assessment of New Traffic Light Controls. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2015–Octob*, S.25–29.
- ETSI [2014A]: EN 302 637-2 Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Frankreich.
- ETSI [2014B]: EN 302 637-3 Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service, Frankreich.
- ETSI [2016A]: TS 102 894-2 Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary, Frankreich.
- ETSI [2016B]: TS 103 301 Basic Set of Applications; Facilities layer protocols and communication requirements for infrastructure services, Frankreich.

- EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT [2010]: Richtlinie 2010/40/EU zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern, Belgien.
- FGSV [2010A]: Beispielsammlung zu den Richtlinien für Lichtsignalanlagen, Köln: FGSV Verlag.
- FGSV [2006]: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation - Grundlagen und Anwendung, Köln: FGSV Verlag.
- FGSV [2010B]: Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA), Köln: FGSV Verlag.
- FRIEDRICH, B. [1999]: Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen. Dissertation. Technische Universität München.
- FRIEDRICH, B. [2002]: Verkehrsadaptive Steuerung von Lichtsignalanlagen - Ein Überblick. In H. Keller, hrsg. Festschrift zum Ehrenkolloquium für Univ.- Prof. Dr./UCB Hartmut Keller. München: Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung.
- GARTNER, N.H.; POORAN, F.J. & ANDREWS, C.M. [2001]: Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network. In Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE. S. 195–200.
- GATELY, C.K.; HUTYRA, L.R. & WING, I.S. [2015]: Cities, traffic, and CO2: A multidecadal assessment of trends, drivers, and scaling relationships. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(16), S.4999–5004.
- GIPPS, P.G. [1981]: A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Part B: Methodological, 15(2), S.105–111.
- GRAYSTON, P.; ROBBIN, B. & KOENDERS, E. [2016]: GLASGLOSA – Deployment of In-Vehicle Green Light and Optimal Speed Advice within a SCOOT Urban Traffic Control Environment. In Proceedings of the 11th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. Glasgow, Schottland.
- HE, Q.; HEAD, K.L. & DING, J. [2012]: PAMSCOD: Platoon-based arterial multi-modal signal control with online data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 20(1), S.164–184.
- HENRY, J.J.; FARGES, J.L. & TUFFAL, J. [1984]: The PRODYN real time traffic algorithm. Proceedings of the 4th IFAC-IFIP-IFORS conference on Control in Transportation Systems, (June), S.307–311.
- IBM [2015]: IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User's Manual - Version 12 Release 6.
- JONES, E.; OLIPHANT, T.; PETERSON, P. & OTHERS [2001]: SciPy: Open source scientific tools for Python. verfügbar unter: <http://www.scipy.org/> [Zugegriffen 30. August 2016].
- KALLRATH, J. [2013]: Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- KATHS, J. [2017]: Gemeinsame Optimierung von Schaltzeitpunkten und Fahrzeuggeschwindigkeiten für kooperative Verkehrssysteme – Anwendung für Bevorrechtigung und in Netzen. In Heureka '17, Optimierung in Verkehr und Transport. Stuttgart: FGSV Verlag.
- KATHS, J. [2016]: Integrating reliable speed advisory information and adaptive urban traffic control for connected vehicles. In Transportation Research Board 95th Annual Meeting.

- KATHS, J. [2014]: Kooperative Lichtsignalsteuerung auf Basis eines mikroskopischen Verkehrsflussmodells. In Heureka '14, Optimierung in Verkehr und Transport. Stuttgart: FGSV Verlag, S. 431–446.
- VAN KATWIJK, R.T. [2008]: Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control. Dissertation. Technische Universiteit Delft.
- KELLER, M.; DE HAAN, P.; KNÖRR, W.; HAUSBERGER, S. & STEVEN, H. [2004]: Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 2.1 Dokumentation, Bern.
- KLOTZ, E. & NEWMAN, A.M. [2013]: Practical guidelines for solving difficult mixed integer linear programs. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 18(1), S.18–32.
- KOONCE, P.; RODEGERDTS, L.; LEE, K.; QUAYLE, S.; BEAIRD, S.; BRAUD, C.; BONNESON, J.; TARNOFF, P. & URBANIK, T. [2008]: Traffic Signal Timing Manual, Washington, D.C.
- KOUKOU MIDIS, E.; PEH, L.-S. & MARTONOSI, M. [2011]: Signalguru: Leveraging mobile phones for collaborative traffic signal schedule advisory. In 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys). Bethesda, Maryland.
- KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M. & BIEKER, L. [2012]: Recent development and applications of SUMO--simulation of urban mobility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4).
- LÄMMER, S. [2007]: Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken. Dissertation. Technische Universität Dresden.
- LÄMMER, S. [2016]: Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest. *Straßenverkehrstechnik*, (3), S.143–151.
- LÄMMER, S. & HELBING, D. [2010]: Self-Stabilizing Decentralized Signal Control of Realistic, Saturated Network Traffic. Santa Fe Institute Working Paper, 554(2010-09-019), S.30–37.
- LIN, W.Y.; LI, M.W.; LAN, K.C. & HSU, C.H. [2012]: A Comparison of 802.11a and 802.11p for V-to-I Communication: A Measurement Study. In X. Zhang & D. Qiao, hrsg. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 559–570.
- LUNZE, J. [2010]: *Regelungstechnik 1* 8. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer.
- LÜBMANN, J. [2015]: Koordinierung von Lichtsignalanlagen unter Berücksichtigung der Progressionsgeschwindigkeit und Pulkmanagement auf Basis der C2X-Kommunikation zur Reduzierung von CO₂ Emissionen. Dissertation. Technische Universität München.
- MAURO, V. [1991]: Road Network Control. In M. Papageorgiou, hrsg. *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems*. Amsterdam: Pergamon, S. 361–366.
- MAURO, V. & DI TARANTO, C. [1989]: UTOPIA. In *Proceedings of the 6th IFAC/IFORS Conference on Control*.
- MENIG, C. [2012]: Optimierung von LSA-Fahrzeug-Systemen durch Car-2-X-Kommunikation. Dissertation. Technische Universität München.
- MENIG, C.; HILDEBRANDT, R. & BRAUN, R. [2008]: Der informierte Fahrer – Optimierung des Verkehrsablaufs durch LSA-Fahrzeug-Kommunikation. In Heureka '08 - Optimierung in Verkehr und Transport. Stuttgart: FGSV, S. 144–163.
- MERTZ, J. [2001]: Ein mikroskopisches Verfahren zur verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs. Dissertation. Technische Universität

München.

- MIRCHANDANI, P. & HEAD, L. [2001]: A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9(6), S.415–432.
- MUECK, J. [2002]: Using detectors near the stop-line to estimate traffic flows. *Traffic Engineering and Control*, 43(11), S.429–434.
- MUELLER, E.A. [1970]: Aspects of the history of traffic signals. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 19(1), S.6–17.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.) [2000]: *Highway Capacity Manual 2000*, Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- DE NUNZIO, G. [2015]: *Traffic eco-management in urban traffic networks*. Dissertation. Université Grenoble Alpes.
- OERTEL, R. [2014]: *Verlustzeitbasierte Steuerung von Lichtsignalanlagen*. Dissertation. Technische Universität Dresden.
- OERTEL, R.; ERDMANN, J.; TRUMPOLD, J. & WAGNER, P. [2017]: *Steuerung von Lichtsignalanlagen auf der Basis von Fahrzeuginformationen – Umsetzung und Feldtests*. In *Heureka '17, Optimierung in Verkehr und Transport*. Stuttgart: FGSV Verlag.
- PAPAGEORGIU, M.; HADJ-SALEM, H. & BLOSSEVILLE, J.-M. [1991]: ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*, (1320), S.58–64.
- PEEK TRAFFIC BV [2012]: *ImFlow System Description*, Amersfoort, Niederlande.
- POLITI, S.; KATHS, J.; PASQUERO, M. & COCONEA, L. [2016]: *Integration of Floating Vehicle Data for Online Traffic Signal Control Optimization*. In *Proceedings of the 11th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Glasgow, Scotland.
- POPESCU-ZELETIN, R.; RADUSCH, I. & RIGANI, M.A. [2010]: *Vehicular-2-X Communication*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- PRIEMER, C. & FRIEDRICH, B. [2009]: *A decentralized adaptive traffic signal control using V2I communication data*. 2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.
- PRIEMER, C. & FRIEDRICH, B. [2008]: *A method for tailback approximation via C2I-data based on partial penetration*. In *15 th World Congress on Intelligent Transport Systems*. New York.
- PROTSCHKY, V.; WIESNER, K. & FEIT, S. [2014]: *Adaptive traffic light prediction via Kalman Filtering*. In *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014 IEEE*. S. 151–157.
- PU, H. [2012]: *Dynamic eHorizon with Traffic Light Information for Efficient Urban Traffic*. In M. Schuetz, Y. Wiyogo, M. Schmid, & J. Dickmann, hrsg. *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2012: Smart Systems for Safe, Sustainable and Networked Vehicles*. S. 167–176.
- R CORE TEAM [2008]: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Wien, Österreich.
- RADKE, S. [2016]: *Verkehr in Zahlen 2016/2017 45. Aufl.*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

- RAKHA, H.A.; VIA, C.E.; KANG, K. & VADAKPAT, G. [2016]: MMITSS Impacts Assessment: Field Testing and Simulation Results. In TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- RHYTHM ENGINEERING [2016]: The InSync Model. verfügbar unter: <https://rhythmtraffic.com/> [Zugegriffen 10. November 2016].
- ROBERTSON, D.I. [1986]: Research on the TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. ITE Journal (Institute of Transportation Engineers), 56(1), S.36–40.
- ROBERTSON, D.I. [1969]: TRANSYT: A Traffic Network Study Tool. Road Research Laboratory, Ministry of Transport, 253.
- SAE [2015]: J2735 Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary, United States of America.
- SÁNTA, C. [2015]: Rückstaulängenschätzung an signalisierten Knotenpunkten durch multiple lineare Regression. Dissertation. Technische Universität München.
- SÁNTA, C.; KATHS, J.; MATHIAS, P. & SCHENDZIELORZ, T. [2014]: Potenziale kooperativer Lichtsignal - steuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit. Straßenverkehrstechnik, (10), S.676–683.
- SAUTER, M. [2015]: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme 6. Aufl., Köln: Springer Vieweg, Wiesbaden.
- SCHIMANDL, F. & MARGREITER, M. [2013]: simTD - Bericht über die Ergebnisse von Simulationen und Feldversuch - Deliverable D43.1, München.
- SIMS, A.G. & DOBINSON, K.W. [1980]: The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System - Philosophy and Benefits. IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-29(2), S.130–137.
- SORGATZ, S.; KRANKE, F. & POPPE, H. [2016]: Der Kreuzungslotse von Volkswagen: urbane Assistenz für einen verbesserten Verkehrsfluss und Fahrkomfort. Straßenverkehrstechnik, 60(7), S.425–432.
- DE SOUZA DUTRA, D. [2009]: Traffic Light Prediction System, Paris.
- STEVANOVIC, A. [2010]: Adaptive traffic control systems: domestic and foreign state of practice, (NCHRP) Synthesis 403, Washington, D.C.
- STEVANOVIC, A.; STEVANOVIC, J. & KERGAYE, C. [2013]: Green Light Optimized Speed Advisory Systems: Impact of Signal Phasing Information Accuracy. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2390), S.53–59.
- TRL [2016A]: Advice Leaflet 1 : The “ SCOOT ” Urban Traffic Control System. verfügbar unter: <http://www.scoot-utc.com/> [Zugegriffen 15. Juli 2016].
- TRL [2016B]: Advice Leaflet 4 : Bus Priority in SCOOT. verfügbar unter: <http://www.scoot-utc.com/> [Zugegriffen 15. Juli 2016].
- VERBAND ÖFFENTLICHER VERKEHRSBETRIEBE [1984]: Technische Anforderungen an rechnergestützte Betriebsleitsysteme - Übertragungsverfahren Datenfunk.
- VEREINTE NATIONEN [2015]: World Urbanization Prospects The 2014 Revision, New York.
- VERKEHRS-SYSTEME AG [2016A]: Einführung in VS-PLUS. verfügbar unter: http://www.vs-plus.com/xml_1/internet/de/application/d2/d27/d101/f103.cfm [Zugegriffen 31. Mai 2016].

- VERKEHRS-SYSTEME AG [2016B]: VS-PLUS Produktblatt.
- VERKEHRS-SYSTEME AG [2016C]: VS-PLUS Version 8.
- VAN VLIET, K. & TURKSMA, S. [2013]: ImFlow: Policy-based adaptive urban traffic control. In 9th ITS European Congress, Dublin, Ireland, 4-7 June 2013. Dublin, Irland.
- WANG, L. [2009]: Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®, London: Springer London.
- WEERATUNGA, K. & SOMERS, A. [2015]: Connected Vehicles: Are we ready? - Internal Report on Potential Implications for Main Roads WA Report on Potential Implications for Main Roads WA, East Perth.
- WEISHEIT, T. & HOYER, R. [2014]: Prediction of Switching Times of Traffic Actuated Signal Controls Using Support Vector Machines. In F.-W. Jan & G. Meyer, hrsg. Advanced Microsystems for Automotive Applications. Springer International Publishing, S. 121–129.
- WICKHAM, H. [2009]: ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis, New York: Springer.
- ZIMDAHL, W. [1983]: Wolfsburger Welle – Ein Projekt der Volkswagen Forschung, Forschungsbericht, Wolfsburg.

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
BALANCE	Balancing Adaptive Network Control Method
BSM	Basic Safety Message
CAM	Cooperative Awareness Message
CEN	European Committee for Standardization
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
DSRC	Dedicated Short Range Communication
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EPICS	Enhanced Public Transport Intersection Control Strategy
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GLOSA	Green Light Optimized Speed Advisory
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HBEFA	HandBuch für EmissionsFAktoren des Straßenverkehrs
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
ISO	International Organization for Standardization
IVS	Intelligentes Verkehrssystem
IVSG	Intelligente Verkehrssysteme Gesetz
LAN	Local Area Network
LHS	Left Hand Side (linke Seite einer Ungleichung)
LSA	Lichtsignalanlage
LTE	Long Term Evolution
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIP	Mixed Integer Programming
MIQP	Mixed Integer Quadratic Programming
MLD	Mixed Logical Dynamical (System)
MOTION	Method for the Optimization of Traffic Signals in Online-Controlled Networks
MPC	Modellbasierte prädiktive Regelung oder modellprädiktive Regelung (engl.: Model Predictive Control)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OPAC	Optimized Policies for Adaptive Control

PRODYN	Programmation Dynamique
RHODES	Real-time, Hierarchical, Optimized, Distributed, and Effective System
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RSU	Road Side Unit
SAE	Society of Automotive Engineers
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
SCOOT	Split, Cycle and Offset Optimisation Technique
SPAT	Signal Phase and Timing
SPOT	Signal Progression Optimization Technology
SRM	Signal Request Message
SSM	Signal Status Message
STM	Signal Timing Manual
TISA	Traveller Information Services Association
TPEG	Transport Protocol Experts Group
TRANSYT	Traffic Network Study Tool
tts	Total Time Spent
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTOPIA	Urban Traffic OPTimization by Integrated Automation
V2I	Vehicle to Infrastructure (Communication)
V2V	Vehicle to Vehicle (Communication)
V2X	Vehicle to X (Communication)
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
WLAN	Wireless Local Area Network

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1	Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten kooperativer Lichtsignalsteuerungen auf Seiten der Fahrzeugbeeinflussung sowie der Lichtsignalsteuerung, vgl. SÁNTA ET AL. [2014]	5
Bild 2.1	Verkehrsablauf an untersättigten lichtsignalisierten Knotenpunkten, basierend auf dem Highway Capacity Manual 2000 [NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.), 2000]	8
Bild 2.2	Analoges Steuergerät für Lichtsignalanlagen, Foto: CASTLEMAN [2015].....	9
Bild 2.3	Geschlossener Regelkreis mit Beispielen der Zuflussregelung ALINEA (kursiv dargestellt)	11
Bild 2.4	Steuerung mit Beispielen einer zeitbasierten Signalprogrammauswahl (kursiv dargestellt)	13
Bild 2.5	Geschwindigkeitshinweis für ein vernetztes, linksabbiegendes Fahrzeug (grün) bei getrennter Signalisierung der Linksabbieger	14
Bild 2.6	Zeit-Weg-Diagramm bei Bemessung mit Staulänge ohne Freigabezeitverlängerung (links) und mit Freigabezeitverlängerung (rechts)	15
Bild 2.7	Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit gleichzeitiger Beeinflussung von Fahrzeugen und Nutzung fahrzeuggenerierter Daten mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau).....	16
Bild 2.8	Vereinfachte Darstellung der Kommunikationswege zwischen Fahrzeug und Lichtsignalanlage mittels Mobilfunk und WLAN	19
Bild 3.1	Strukturierung von Kapitel 3 anhand der genutzten Beeinflussungsrichtungen	21
Bild 3.2	Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Beeinflussung von Fahrzeugen durch Nutzung von Systemwissen der Lichtsignalsteuerung mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau).....	22
Bild 3.3	Kategorisierung von Steuerungsverfahren nach Entscheidungsgrundlage, Phaseneinteilung und Steuerungsfokus	24
Bild 3.4	Flussdiagramm (links) und Phasenfolgeplan (rechts) einer zweiphasigen Zeitlückensteuerung	25
Bild 3.5	Gewöhnliches Ring-and-Barrier Diagramm [KOONCE ET AL., 2008].....	27
Bild 3.6	Prinzip des rollenden Zeithorizonts [GARTNER ET AL., 2001]	30
Bild 3.7	a) Beispielknotenpunkt mit b) zugehörigem Blockschema und c) einer möglichen Signalfolge nach [VAN KATWIJK, 2008]	34
Bild 3.8	Nutzung von Videodaten zur Bestimmung von Rückstaulängen [RHYTHM ENGINEERING, 2016]	36
Bild 3.9	Festlegung der Freigabe- und Pufferzeiten [FRIEDRICH, 1999]	40
Bild 3.10	Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Beeinflussung von Fahrzeugen ohne Nutzung von Systemwissen der Lichtsignalsteuerung mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau).....	44
Bild 3.11	Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Beeinflussung der Steuerung durch Nutzung von fahrzeuggenerierten Daten mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau)	47
Bild 3.12	Regelkreis einer Lichtsignalsteuerung mit Berücksichtigung der Beeinflussung von Fahrzeugen im Rahmen der Lichtsignalsteuerung mit konventionellen Elementen (grau) und Erweiterungen durch Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (blau)	51
Bild 4.1	Übersicht über die Funktionsweise sowie Ein- und Ausgangsdaten von preXible	59

Bild 4.2	Analogie von Fahrzeugführung und Regelungsstrategien nach CAMACHO & BORDONS [2004]	60
Bild 4.3	Grafischer Überblick über die Funktionsweise von MPC sowie die verwendeten Formelzeichen nach BURGER ET AL. [2013].....	61
Bild 4.4	Regelkreis der modellbasierten prädiktiven Regelung am Beispiel der kooperativen Lichtsignalsteuerung	66
Bild 4.5	Entscheidungsvariablen von preXible für zwei von maximal N Fahrzeugen in einer rot signalisierten Zufahrt.....	69
Bild 4.6	Erläuterung zur Notation der verwendeten Variablen	70
Bild 4.7	Berücksichtigung von Mischfahrstreifen und Aufstellstreifen in der Modellierung des Verkehrsflusses für zwei Prädiktionsschritte.....	77
Bild 4.8	Knotenpunkt mit vier Zufahrten und jeweils getrennt signalisierten Linksabbiegern mit zugehöriger Verträglichkeitsmatrix.....	81
Bild 4.9	Illustration der Zwischenzeit (links) und Zwischenzeitenmatrix (rechts) für den Knotenpunkt mit acht Signalgruppen aus Bild 4.8	82
Bild 4.10	Schematische Darstellung des Einflusses einer überstauten Zufahrt auf die Gewichtungen der Fahrzeuge	93
Bild 4.11	Schematische Darstellung der Berücksichtigung von bereits in der Zufahrt befindlichen (grau) und erwarteten Fahrzeugen (blau) während des Steuerhorizonts	94
Bild 4.12	Verbindung von preXible mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation SUMO und der Optimierungssoftware CPLEX	96
Bild 4.13	Struktogramm des preXible Algorithmus mit farblicher Markierung der genutzten Fremdsoftware gemäß Bild 4.12.....	97
Bild 4.14	Erstellung einer dünnbesetzten Matrix im Koordinaten-Format am Beispiel von Ungleichung (4.23)	99
Bild 4.15	Funktionsweise des Kalman-Filter nach [BISHOP & WELCH, 2001]	100
Bild 4.16	Zeit-Weg-Diagramme bei Modellierung und Steuerung mittels preXible mit einer Gesamtverkehrsstärke von 900 Fzg/h bei zwei konfligierenden Verkehrsströmen.....	107
Bild 4.17	Zeit-Weg-Diagramme bei Modellierung und Steuerung mittels preXible mit einer Gesamtverkehrsstärke von 1800 Fzg/h bei zwei konfligierenden Verkehrsströmen.....	108
Bild 5.1	Beispielhafte Darstellung eines Boxplots mit Erläuterungen.....	110
Bild 5.2	Simulationsnetz des Szenarios „isolierter Knotenpunkt“	113
Bild 5.3	Phaseneinteilung der Referenzsteuerung und Zwischenzeitenmatrix am isolierten Knotenpunkt	114
Bild 5.4	Boxplots der Anzahl der Halte bei niedriger Auslastung (25 %).....	116
Bild 5.5	Boxplots der Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %)	117
Bild 5.6	Boxplots der Anzahl der Halte bei hoher Auslastung (85 %)	117
Bild 5.7	Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit bei mittlerer Auslastung (50 %).....	118
Bild 5.8	Boxplots der Kohlenstoffdioxidemissionen bei niedriger Auslastung (25 %)	119
Bild 5.9	Boxplots der maximalen Wartezeit bei niedriger Auslastung (25 %).....	120
Bild 5.10	Boxplots der maximalen Wartezeit bei hoher Auslastung (85 %)	120
Bild 5.11	Boxplots der Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) ohne Berücksichtigung in der Kostenfunktion	122

Bild 5.12	Boxplots der Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %	123
Bild 5.13	Boxplots der Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %	124
Bild 5.14	Simulationsnetz des Szenarios „Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen“	125
Bild 5.15	Phaseneinteilung und Zwischenzeitenmatrix der Referenzsteuerung zur Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen, adaptiert von RiLSA Beispielsammlung [FGSV, 2010A]	126
Bild 5.16	Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Fahrzeugtyp Bus	129
Bild 5.17	Boxplots der Anzahl der Halte für den Fahrzeugtyp Bus	130
Bild 5.18	Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Gesamtverkehr	130
Bild 5.19	Boxplots der Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr	131
Bild 5.20	Boxplots der maximalen Wartezeit für den Gesamtverkehr	132
Bild 5.21	Boxplots des Kohlenstoffdioxidausstoßes für den Gesamtverkehr	132
Bild 5.22	Anordnung dreier Knotenpunkte im Straßennetz (nicht maßstabsgetreu) mit drei Hauptrichtungen und Signalgebern im Zufluss	134
Bild 5.23	Lage der Grünbänder der Referenzsteuerung auf den drei Hauptrouten	135
Bild 5.24	Boxplots der Anzahl der Halte für Route B, Nachfrage nur auf Hauptrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %	137
Bild 5.25	Boxplots der Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Hauptrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %	138
Bild 5.26	Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Hauptrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %	139
Bild 5.27	Boxplots der Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr	140
Bild 5.28	Boxplots der Anzahl der Halte für Route B	140
Bild 5.29	Boxplots der gesamten im Netz verbrachten Zeit für den Gesamtverkehr	141
Bild 5.30	Boxplots der maximalen Wartezeit für den Gesamtverkehr	142
Bild 5.31	Boxplots der Kohlenstoffdioxidemissionen für den Gesamtverkehr	143
Bild 6.1	Einbindung von preXible in eine Verkehrsmanagementzentrale in einem hypothetischen Szenario der Stadt München (Kartendarstellung: openstreetmap.org)	150

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Bewertung unterschiedlicher Lichtsignalsteuerungsverfahren hinsichtlich Flexibilität und Vorhersagbarkeit von Schaltzeitpunkten unter Nutzung von Systemwissen.....	43
Tab. 4.1	Verwendete Formelzeichen zur Modellierung des Verkehrsflusses mit Erläuterung und Beispielwert für Entscheidungsvariablen (blau), Zählvariablen (weiß) und statische Parameter (grau).....	79
Tab. 4.2	Signalzustände zur Verdeutlichung der Nebenbedingung (4.53) zur Vorhersage von Zwischenzeiten mit Angabe der linken Seite der Ungleichung (LHS) für $nc = 3$	83
Tab. 4.3	Signalzustände zur Verdeutlichung der Nebenbedingung (4.54) zum Einhalten von Zwischenzeiten für $Z_{Rest} = 2$	84
Tab. 4.4	Signalzustände zur Verdeutlichung der Nebenbedingung (4.55) zur Vorhersage von Mindestfreigabezeiten mit Angabe der linken Seite der Ungleichung (LHS) für $nc = 3$	85
Tab. 4.5	Verwendete Formelzeichen zur Modellierung von Lichtsignalanlagen mit Erläuterung und Beispielwert für Zählvariablen (weiß) und statische Parameter (grau)	86
Tab. 4.6	Verwendete Formelzeichen zur Bestimmung der Kostenfunktion mit Erläuterung und Beispielwert für Zählvariablen (weiß), statische Parameter (grau)	92
Tab. 4.7	Verwendete Formelzeichen zur Erweiterung der Kostenfunktion um Aspekte der Netzsteuerung mit Erläuterung und Beispielwert, statische Parameter hellgrau hinterlegt	95
Tab. 4.8	Gewählte Parameter zur Untersuchung der theoretischen Leistungsfähigkeit von preXible	105
Tab. 5.1	Beispielhafte Ergebnistabelle.....	112
Tab. 5.2	Gewählte Parameter für preXible zur Untersuchung am isolierten Knotenpunkt.....	115
Tab. 5.3	Gewählte Parameter für preXible zur Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen.....	128
Tab. 5.4	Gewählte Parameter für preXible zur Untersuchung im Netz geregelter Knotenpunkte .	136
Tab. A.1	Ergebnistabelle zu Bild 5.4 – Anzahl der Halte bei niedriger Auslastung (25 %).....	175
Tab. A.2	Ergebnistabelle zu Bild 5.5 – Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %)	176
Tab. A.3	Ergebnistabelle zu Bild 5.6 – Anzahl der Halte bei hoher Auslastung (85 %)	176
Tab. A.4	Ergebnistabelle zu Bild 5.7 – gesamte im Netz verbrachte Zeit bei mittlerer Auslastung (50 %)	177
Tab. A.5	Ergebnistabelle zu Bild 5.8 – Kohlenstoffdioxidemissionen bei niedriger Auslastung (25 %)	177
Tab. A.6	Ergebnistabelle zu Bild 5.9 – maximale Wartezeit bei niedriger Auslastung (25 %).....	178
Tab. A.7	Ergebnistabelle zu Bild 5.10 – maximale Wartezeit bei hoher Auslastung (85 %).....	178
Tab. A.8	Ergebnistabelle zu Bild 5.11 – Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) ohne Berücksichtigung in der Kostenfunktion.....	179
Tab. A.9	Ergebnistabelle zu Bild 5.12 – Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %	179
Tab. A.10	Ergebnistabelle zu Bild 5.13 – Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %	180
Tab. A.11	Ergebnistabelle der gesamten im Netz verbrachten Zeit bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %	180

Tab. A.12	Ergebnistabelle zu Bild 5.16 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Fahrzeugtyp Bus	181
Tab. A.13	Ergebnistabelle zu Bild 5.17 – Anzahl der Halte für den Fahrzeugtyp Bus.....	182
Tab. A.14	Ergebnistabelle zu Bild 5.18 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Gesamtverkehr.....	182
Tab. A.15	Ergebnistabelle zu Bild 5.19 – Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr.....	183
Tab. A.16	Ergebnistabelle zu Bild 5.20 – maximale Wartezeit für den Gesamtverkehr.....	183
Tab. A.17	Ergebnistabelle zu Bild 5.21 – Kohlenstoffdioxidausstoß für den Gesamtverkehr.....	184
Tab. A.18	Ergebnistabelle zu Bild 5.24 – Anzahl der Halte für Route B, Nachfrage nur auf Haupttrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %	184
Tab. A.19	Ergebnistabelle zu Bild 5.25 – Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Haupttrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %	185
Tab. A.20	Ergebnistabelle zu Bild 5.26 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Haupttrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %.....	185
Tab. A.21	Ergebnistabelle zu Bild 5.27 – Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr.....	186
Tab. A.22	Ergebnistabelle zu Bild 5.28 – Anzahl der Halte für Route B	186
Tab. A.23	Ergebnistabelle zu Bild 5.29 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Gesamtverkehr.....	187
Tab. A.24	Ergebnistabelle zu Bild 5.30 – maximale Wartezeit für den Gesamtverkehr.....	187
Tab. A.25	Ergebnistabelle zu Bild 5.31 – Kohlenstoffdioxidemissionen für den Gesamtverkehr	188

Anhang A: Ergebnistabellen

A.1 Ergebnistabellen zu Kapitel 5.2 – Isolierter Knotenpunkt

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Gesamtverkehr)								
	Festzeit	regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	0,76	0,79	0,55	0,54	0,51	0,47	0,44	0,39
SD	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
CI	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04	0,04
Norm	0,203	0,657	0,078	0,616	0,070	0,563	0,976	0,304
ANOVA	0,000							
Festzeit		3,5% 0,133	-28,3% 0,000	-29,9% 0,000	-32,7% 0,000	-38,0% 0,000	-42,9% 0,000	-48,5% 0,000
regelbasiert			-30,7% 0,000	-32,2% 0,000	-35,0% 0,000	-40,0% 0,000	-44,8% 0,000	-50,2% 0,000
preXible 0%				-2,2% 0,951	-6,1% 0,043	-13,5% 0,000	-20,4% 0,000	-28,1% 0,000
preXible 10%					-4,0% 0,462	-11,5% 0,000	-18,6% 0,000	-26,5% 0,000
preXible 25%						-7,8% 0,004	-15,2% 0,000	-23,4% 0,000
preXible 50%							-8,0% 0,008	-16,9% 0,000
preXible 75%								-9,7% 0,003

Tab. A.1 Ergebnistabelle zu Bild 5.4 – Anzahl der Halte bei niedriger Auslastung (25 %)

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Gesamtverkehr)								
	Festzeit	regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	0,84	0,87	0,72	0,71	0,69	0,66	0,62	0,58
SD	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
CI	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
Norm	0,999	0,074	0,152	0,508	0,444	0,162	0,334	0,989
ANOVA	0,000							
Festzeit		4,2%	-13,8%	-15,0%	-17,8%	-21,6%	-25,5%	-30,3%
		0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
regelbasiert			-17,3%	-18,4%	-21,1%	-24,8%	-28,5%	-33,1%
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 0%				-1,4%	-4,6%	-9,1%	-13,5%	-19,1%
				0,972	0,020	0,000	0,000	0,000
preXible 10%					-3,3%	-7,8%	-12,3%	-18,0%
					0,251	0,000	0,000	0,000
preXible 25%						-4,7%	-9,3%	-15,2%
						0,030	0,000	0,000
preXible 50%							-4,9%	-11,1%
							0,025	0,000
preXible 75%								-6,5%
								0,001

Tab. A.2 Ergebnistabelle zu Bild 5.5 – Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %)

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Gesamtverkehr)								
	Festzeit	regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	1,64	1,54	1,33	1,25	1,12	1,13	1,01	0,97
SD	0,20	0,20	0,17	0,15	0,13	0,11	0,11	0,05
CI	0,21	0,21	0,19	0,18	0,14	0,13	0,14	0,06
Norm	0,364	0,849	0,070	0,208	0,337	0,906	0,103	0,276
ANOVA	0,000							
Festzeit		-6,4%	-19,2%	-23,6%	-31,6%	-31,2%	-38,5%	-40,8%
		0,513	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
regelbasiert			-13,7%	-18,4%	-27,0%	-26,5%	-34,3%	-36,8%
			0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 0%				-5,5%	-15,4%	-14,9%	-23,9%	-26,8%
				0,903	0,008	0,012	0,000	0,000
preXible 10%					-10,4%	-9,9%	-19,5%	-22,5%
					0,311	0,378	0,002	0,000
preXible 25%						0,6%	-10,1%	-13,5%
						1,000	0,503	0,173
preXible 50%							-10,6%	-14,0%
							0,427	0,134
preXible 75%								-3,8%
								0,998

Tab. A.3 Ergebnistabelle zu Bild 5.6 – Anzahl der Halte bei hoher Auslastung (85 %)

tts je Fahrzeug [s] (Gesamtverkehr)								
	Festzeit	regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	57,2	48,6	43,1	42,6	42,0	40,5	39,9	38,8
SD	1,37	1,31	1,09	1,30	0,72	0,83	1,08	0,89
CI	1,58	1,30	1,38	1,66	0,92	1,06	1,31	1,07
Norm	0,071	0,215	0,873	0,154	0,274	0,648	0,246	0,542
ANOVA	0,000							
Festzeit		-15,1%	-24,7%	-25,5%	-26,5%	-29,1%	-30,3%	-32,2%
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
regelbasiert			-11,3%	-12,3%	-13,5%	-16,6%	-17,9%	-20,2%
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 0%				-1,1%	-2,5%	-6,0%	-7,5%	-10,0%
				0,967	0,266	0,000	0,000	0,000
preXible 10%					-1,4%	-4,9%	-6,5%	-9,0%
					0,885	0,000	0,000	0,000
preXible 25%						-3,5%	-5,1%	-7,7%
						0,031	0,000	0,000
preXible 50%							-1,6%	-4,3%
							0,810	0,004
preXible 75%								-2,7%
								0,223

Tab. A.4 Ergebnistabelle zu Bild 5.7 – gesamte im Netz verbrachte Zeit bei mittlerer Auslastung (50 %)

CO2 je Fahrzeug [g] (Gesamtverkehr)								
	Festzeit	regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	84,5	71,5	63,0	62,5	61,5	59,2	57,2	55,4
SD	2,0	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	0,8	1,4
CI	2,3	1,3	1,4	1,6	1,4	1,3	1,1	1,8
Norm	0,637	0,064	0,128	0,139	0,221	0,725	0,975	0,555
ANOVA	0,000							
Festzeit		-15,3%	-25,4%	-26,0%	-27,2%	-29,9%	-32,3%	-34,4%
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
regelbasiert			-11,8%	-12,6%	-14,0%	-17,1%	-20,0%	-22,5%
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 0%				-0,8%	-2,4%	-6,0%	-9,3%	-12,1%
				0,977	0,096	0,000	0,000	0,000
preXible 10%					-1,6%	-5,2%	-8,5%	-11,3%
					0,572	0,000	0,000	0,000
preXible 25%						-3,7%	-7,0%	-9,9%
						0,001	0,000	0,000
preXible 50%							-3,5%	-6,4%
							0,003	0,000
preXible 75%								-3,1%
								0,030

Tab. A.5 Ergebnistabelle zu Bild 5.8 – Kohlenstoffdioxidemissionen bei niedriger Auslastung (25 %)

Maximale Wartezeit [s] (Gesamtverkehr)								
	Festzeit	regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	74,9	45,5	65,1	64,0	67,8	63,9	53,1	55,7
SD	0,62	2,68	8,76	6,06	9,81	11,03	7,04	10,18
CI	0,71	3,10	11,14	7,70	12,46	12,73	8,94	12,94
Norm	0,003	0,004	0,831	0,218	0,974	0,542	0,760	0,979
ANOVA	0,000							
Festzeit		-39,3% 0,000	-13,1% 0,036	-14,6% 0,012	-9,6% 0,279	-14,7% 0,007	-29,2% 0,000	-25,7% 0,000
regelbasiert			43,0% 0,000	40,7% 0,000	48,9% 0,000	40,5% 0,000	16,7% 0,216	22,3% 0,026
preXible 0%				-1,7% 1,000	4,1% 0,990	-1,8% 1,000	-18,4% 0,006	-14,5% 0,071
preXible 10%					5,9% 0,935	-0,1% 1,000	-17,1% 0,019	-13,0% 0,159
preXible 25%						-5,6% 0,914	-21,6% 0,000	-17,8% 0,006
preXible 50%							-17,0% 0,014	-12,9% 0,134
preXible 75%								4,9% 0,992

Tab. A.6 Ergebnistabelle zu Bild 5.9 – maximale Wartezeit bei niedriger Auslastung (25 %)

Maximale Wartezeit [s] (Gesamtverkehr)								
	Festzeit	regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	77,3	77,1	109,8	91,9	85,6	89,4	86,8	86,3
SD	0,45	0,72	55,70	24,97	1,24	8,00	1,41	0,89
CI	0,48	0,77	61,69	30,18	1,38	8,86	1,70	1,13
Norm	0,000	0,004	0,000	0,000	0,034	0,000	0,047	0,001
ANOVA	0,003							
Festzeit		-0,2% 1,000	42,1% 0,002	19,0% 0,632	10,8% 0,964	15,7% 0,787	12,4% 0,939	11,8% 0,960
regelbasiert			42,4% 0,002	19,2% 0,622	11,0% 0,961	15,9% 0,778	12,6% 0,935	11,9% 0,957
preXible 0%				-16,3% 0,395	-22,0% 0,062	-18,6% 0,191	-20,9% 0,119	-21,4% 0,119
preXible 10%					-6,9% 0,995	-2,7% 1,000	-5,5% 0,999	-6,1% 0,998
preXible 25%						4,4% 1,000	1,5% 1,000	0,9% 1,000
preXible 50%							-2,9% 1,000	-3,4% 1,000
preXible 75%								-0,6% 1,000

Tab. A.7 Ergebnistabelle zu Bild 5.10 – maximale Wartezeit bei hoher Auslastung (85 %)

		Prädiktionsabweichung [s] (Gesamtverkehr)							
		regelbasiert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%	
Festzeit									
MW	0,0	9,2	7,1	6,9	6,7	6,0	5,6	5,0	
SD	0,00	0,00	0,34	0,27	0,19	0,29	0,53	0,35	
CI	0,00	0,00	0,43	0,35	0,25	0,36	0,65	0,42	
Norm	n. a.	n. a.	0,378	0,271	0,811	0,878	0,995	0,135	
ANOVA	0,000								
Festzeit		n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	
regelbasiert			-22,2% 0,000	-24,9% 0,000	-26,5% 0,000	-34,6% 0,000	-38,5% 0,000	-45,1% 0,000	
preXible 0%				-3,5% 0,409	-5,5% 0,027	-16,0% 0,000	-21,0% 0,000	-29,4% 0,000	
preXible 10%					-2,1% 0,931	-12,9% 0,000	-18,1% 0,000	-26,9% 0,000	
preXible 25%						-11,1% 0,000	-16,3% 0,000	-25,3% 0,000	
preXible 50%							-5,9% 0,056	-16,0% 0,000	
preXible 75%								-10,7% 0,000	

Tab. A.8 Ergebnistabelle zu Bild 5.11 – Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) ohne Berücksichtigung in der Kostenfunktion

		Prädiktionsabweichung [s] (Gesamtverkehr)				
		regelbasiert	$p^{\text{fak}}=0$	$p^{\text{fak}}=100$	$p^{\text{fak}}=150$	
Festzeit						
MW	0,0	9,2	6,0	4,8	4,3	
SD	0,00	0,00	0,29	0,34	0,23	
CI	0,00	0,00	0,36	0,44	0,27	
Norm	n. a.	n. a.	0,878	0,194	0,702	
ANOVA	0,000					
Festzeit		n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	
regelbasiert			-34,6% 0,000	-47,2% 0,000	-52,6% 0,000	
$p^{\text{fak}}=0$				-19,2% 0,000	-27,5% 0,000	
$p^{\text{fak}}=100$					-10,3% 0,000	

Tab. A.9 Ergebnistabelle zu Bild 5.12 – Prädiktionsabweichung bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Gesamtverkehr)

	Festzeit	regelbasiert	$p^{\text{fak}}=0$	$p^{\text{fak}}=100$	$p^{\text{fak}}=150$
MW	0,84	0,87	0,66	0,68	0,78
SD	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
CI	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
Norm	0,999	0,074	0,162	0,913	0,103
ANOVA	0,000				
Festzeit		4,2% 0,001	-21,6% 0,000	-18,8% 0,000	-6,7% 0,000
regelbasiert			-24,8% 0,000	-22,1% 0,000	-10,5% 0,000
$p^{\text{fak}}=0$				3,6% 0,110	19,0% 0,000
$p^{\text{fak}}=100$					14,8% 0,000

Tab. A.10 Ergebnistabelle zu Bild 5.13 – Anzahl der Halte bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %

tts je Fahrzeug [s] (Gesamtverkehr)

	Festzeit	regelbasiert	$p^{\text{fak}}=0$	$p^{\text{fak}}=100$	$p^{\text{fak}}=150$
MW	57,2	48,6	40,5	43,7	52,6
SD	1,37	1,31	0,83	0,90	1,63
CI	1,58	1,30	1,06	1,15	1,88
Norm	0,071	0,215	0,648	0,278	0,305
ANOVA	0,000				
Festzeit		-15,1% 0,000	-29,1% 0,000	-23,6% 0,000	-8,1% 0,000
regelbasiert			-16,6% 0,000	-10,0% 0,000	8,3% 0,000
$p^{\text{fak}}=0$				7,9% 0,000	29,8% 0,000
$p^{\text{fak}}=100$					20,3% 0,000

Tab. A.11 Ergebnistabelle der gesamten im Netz verbrachten Zeit bei mittlerer Auslastung (50 %) mit Prädiktionsstabilisierung und einer Ausstattungsrate von 50 %

A.2 Ergebnistabellen zu Kapitel 5.3 – Bevorrechtigung von Einzelfahrzeugen

tts je Fahrzeug [s] (Busse)									
	Festzeit	Phasentausch	erweitert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	63,0	56,9	45,8	39,2	38,5	37,5	37,8	38,4	37,5
SD	10,55	10,52	3,80	2,46	1,98	2,54	0,98	0,75	1,68
CI	13,40	12,15	4,39	3,13	2,52	3,22	1,24	0,95	2,14
Norm	0,812	0,828	0,934	0,890	0,519	0,831	0,635	0,382	0,560
ANOVA	0,000								
Festzeit		-9,7% 0,119	-27,3% 0,000	-37,7% 0,000	-38,8% 0,000	-40,5% 0,000	-39,9% 0,000	-39,0% 0,000	-40,5% 0,000
Phasentausch			-19,5% 0,000	-31,1% 0,000	-32,3% 0,000	-34,1% 0,000	-33,5% 0,000	-32,5% 0,000	-34,2% 0,000
erweitert				-14,4% 0,068	-15,9% 0,028	-18,1% 0,006	-17,3% 0,011	-16,1% 0,024	-18,2% 0,006
preXible 0%					-1,8% 1,000	-4,4% 0,997	-3,5% 1,000	-2,0% 1,000	-4,5% 0,997
preXible 10%						-2,7% 1,000	-1,7% 1,000	-0,3% 1,000	-2,7% 1,000
preXible 25%							1,0% 1,000	2,5% 1,000	-0,1% 1,000
preXible 50%								1,5% 1,000	-1,0% 1,000
preXible 75%									-2,5% 1,000

Tab. A.12 Ergebnistabelle zu Bild 5.16 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Fahrzeugtyp Bus

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Busse)									
	Festzeit	Phasentausch	erweitert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	0,74	0,74	0,66	0,10	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
SD	0,19	0,23	0,19	0,15	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
CI	0,25	0,27	0,22	0,19	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Norm	0,334	0,028	0,248	0,000	0,000	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
ANOVA	0,000								
Festzeit		-0,3%	-10,6%	-86,9%	-94,4%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		1,000	0,865	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Phasentausch			-10,4%	-86,8%	-94,4%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
			0,855	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
erweitert				-85,3%	-93,7%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
				0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 0%					-57,1%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
					0,985	0,709	0,709	0,709	0,709
preXible 10%						-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
						0,998	0,998	0,998	0,998
preXible 25%							0,0%	0,0%	0,0%
							1,000	1,000	1,000
preXible 50%								0,0%	0,0%
								1,000	1,000
preXible 75%									0,0%
									1,000

Tab. A.13 Ergebnistabelle zu Bild 5.17 – Anzahl der Halte für den Fahrzeugtyp Bus

tts je Fahrzeug [s] (Gesamtverkehr)									
	Festzeit	Phasentausch	erweitert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	48,7	49,2	50,2	45,3	45,2	44,7	44,7	44,3	43,4
SD	0,81	1,70	1,26	0,62	0,93	0,79	1,24	1,00	0,63
CI	1,03	1,96	1,46	0,78	1,18	1,00	1,58	1,27	0,80
Norm	0,578	0,479	0,107	0,433	0,082	0,178	0,506	0,893	0,069
ANOVA	0,000								
Festzeit		1,1%	3,1%	-7,1%	-7,2%	-8,3%	-8,2%	-9,1%	-11,0%
		0,943	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Phasentausch			2,0%	-8,1%	-8,2%	-9,3%	-9,2%	-10,1%	-11,9%
			0,302	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
erweitert				-9,8%	-10,0%	-11,0%	-10,9%	-11,8%	-13,6%
				0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 0%					-0,2%	-1,3%	-1,2%	-2,2%	-4,2%
					1,000	0,905	0,946	0,374	0,001
preXible 10%						-1,1%	-1,0%	-2,0%	-4,0%
						0,958	0,980	0,496	0,002
preXible 25%							0,1%	-0,9%	-2,9%
							1,000	0,993	0,082
preXible 50%								-1,0%	-3,1%
								0,983	0,057
preXible 75%									-2,1%
									0,484

Tab. A.14 Ergebnistabelle zu Bild 5.18 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Gesamtverkehr

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Gesamtverkehr)									
	Festzeit	Phasentausch	erweitert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	0,42	0,44	0,45	0,41	0,39	0,35	0,34	0,32	0,29
SD	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02
CI	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03
Norm	0,638	0,952	0,065	0,771	0,797	0,262	0,210	0,603	0,138
ANOVA	0,000								
Festzeit		3,8% 0,952	7,1% 0,369	-3,7% 0,968	-8,0% 0,270	-16,2% 0,000	-18,5% 0,000	-24,7% 0,000	-32,4% 0,000
Phasentausch			3,2% 0,973	-7,2% 0,303	-11,4% 0,009	-19,3% 0,000	-21,4% 0,000	-27,5% 0,000	-34,9% 0,000
erweitert				-10,1% 0,022	-14,1% 0,000	-21,8% 0,000	-23,9% 0,000	-29,7% 0,000	-36,9% 0,000
preXible 0%					-4,5% 0,924	-13,0% 0,006	-15,3% 0,001	-21,8% 0,000	-29,8% 0,000
preXible 10%						-8,9% 0,235	-11,4% 0,045	-18,1% 0,000	-26,5% 0,000
preXible 25%							-2,7% 0,999	-10,1% 0,202	-19,3% 0,000
preXible 50%								-7,6% 0,609	-17,1% 0,001
preXible 75%									-10,2% 0,320

Tab. A.15 Ergebnistabelle zu Bild 5.19 – Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr

Maximale Wartezeit [s] (Gesamtverkehr)									
	Festzeit	Phasentausch	erweitert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	66,1	83,7	83,1	73,6	72,8	71,1	74,8	73,4	61,3
SD	1,51	8,45	12,00	5,35	5,50	5,60	7,06	8,49	6,92
CI	1,91	9,76	13,86	6,80	6,98	7,12	8,97	10,79	8,79
Norm	0,286	0,027	0,092	0,217	0,977	0,104	0,242	0,015	0,962
ANOVA	0,000								
Festzeit		26,7% 0,000	25,7% 0,000	11,3% 0,258	10,1% 0,415	7,6% 0,776	13,1% 0,112	11,1% 0,286	-7,2% 0,821
Phasentausch			-0,8% 1,000	-12,1% 0,021	-13,1% 0,009	-15,1% 0,001	-10,7% 0,066	-12,3% 0,018	-26,7% 0,000
erweitert				-11,4% 0,040	-12,4% 0,017	-14,4% 0,003	-10,0% 0,115	-11,6% 0,034	-26,2% 0,000
preXible 0%					-1,1% 1,000	-3,4% 0,996	1,6% 1,000	-0,2% 1,000	-16,6% 0,003
preXible 10%						-2,3% 1,000	2,7% 0,999	0,9% 1,000	-15,7% 0,008
preXible 25%							5,2% 0,953	3,3% 0,997	-13,7% 0,044
preXible 50%								-1,8% 1,000	-17,9% 0,001
preXible 75%									-16,5% 0,004

Tab. A.16 Ergebnistabelle zu Bild 5.20 – maximale Wartezeit für den Gesamtverkehr

CO2 je Fahrzeug [g] (Gesamtverkehr)									
	Festzeit	Phasentausch	erweitert	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	96,4	97,0	98,3	91,9	90,4	88,3	86,1	84,0	81,2
SD	1,3	2,4	1,9	1,3	2,1	1,4	2,0	1,8	1,3
CI	1,7	2,8	2,2	1,7	2,7	1,8	2,6	2,3	1,6
Norm	0,731	0,380	0,663	0,858	0,993	0,364	0,693	0,834	0,642
ANOVA	0,000								
Festzeit		0,5% 0,998	1,9% 0,205	-4,7% 0,000	-6,3% 0,000	-8,4% 0,000	-10,8% 0,000	-12,9% 0,000	-15,8% 0,000
Phasentausch			1,3% 0,602	-5,2% 0,000	-6,8% 0,000	-8,9% 0,000	-11,2% 0,000	-13,4% 0,000	-16,3% 0,000
erweitert				-6,5% 0,000	-8,0% 0,000	-10,1% 0,000	-12,4% 0,000	-14,5% 0,000	-17,4% 0,000
preXible 0%					-1,7% 0,495	-4,0% 0,000	-6,4% 0,000	-8,6% 0,000	-11,7% 0,000
preXible 10%						-2,3% 0,111	-4,8% 0,000	-7,1% 0,000	-10,2% 0,000
preXible 25%							-2,5% 0,073	-4,9% 0,000	-8,1% 0,000
preXible 50%								-2,4% 0,120	-5,7% 0,000
preXible 75%									-3,4% 0,007

Tab. A.17 Ergebnistabelle zu Bild 5.21 – Kohlenstoffdioxidausstoß für den Gesamtverkehr

A.3 Ergebnistabellen zu Kapitel 5.4 – Netz geregelter Knotenpunkte

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Route B)				
	Festzeit	isoliert	$t_{s,max}=120$	$t_{s,max}=\infty$
MW	0,35	0,71	0,41	0,33
SD	0,05	0,09	0,05	0,05
CI	0,06	0,11	0,06	0,07
Norm	0,213	0,054	0,402	0,617
ANOVA	0,000			
Festzeit		103,2% 0,000	18,8% 0,044	-6,2% 0,806
isoliert			-41,5% 0,000	-53,8% 0,000
$t_{s,max}=120$				-21,0% 0,006

Tab. A.18 Ergebnistabelle zu Bild 5.24 – Anzahl der Halte für Route B, Nachfrage nur auf Haupttrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Gesamtverkehr)

	Festzeit	isoliert	$t_{s,max}=120$	$t_{s,max}=\infty$
MW	0,39	0,56	0,33	0,20
SD	0,05	0,05	0,04	0,03
CI	0,06	0,06	0,06	0,04
Norm	0,699	0,817	0,624	0,948
ANOVA	0,000			
Festzeit		42,7% 0,000	-15,7% 0,004	-49,8% 0,000
isoliert			-40,9% 0,000	-64,8% 0,000
$t_{s,max}=120$				-40,5% 0,000

Tab. A.19 Ergebnistabelle zu Bild 5.25 – Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Haupttrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %

tts je Fahrzeug [s] (Gesamtverkehr)

	Festzeit	isoliert	$t_{s,max}=120$	$t_{s,max}=\infty$
MW	65,4	54,4	50,8	47,9
SD	2,42	1,51	1,08	0,64
CI	2,80	1,92	1,37	0,82
Norm	0,540	0,972	0,701	0,680
ANOVA	0,000			
Festzeit		-16,8% 0,000	-22,4% 0,000	-26,7% 0,000
isoliert			-6,7% 0,000	-11,9% 0,000
$t_{s,max}=120$				-5,6% 0,000

Tab. A.20 Ergebnistabelle zu Bild 5.26 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Gesamtverkehr, Nachfrage nur auf Haupttrouten mit einer Ausstattungsrate von 50 %

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Gesamtverkehr)							
	Festzeit	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	1,01	0,99	0,97	0,88	0,83	0,77	0,69
SD	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04
CI	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04
Norm	0,825	0,849	0,318	0,710	0,210	0,674	0,297
ANOVA	0,000						
Festzeit		-1,3%	-3,5%	-12,2%	-17,4%	-23,1%	-31,7%
		0,992	0,539	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 0%			-2,2%	-11,0%	-16,3%	-22,1%	-30,8%
			0,903	0,000	0,000	0,000	0,000
preXible 10%				-9,0%	-14,4%	-20,4%	-29,3%
				0,001	0,000	0,000	0,000
preXible 25%					-6,0%	-12,5%	-22,2%
					0,123	0,000	0,000
preXible 50%						-6,9%	-17,3%
						0,068	0,000
preXible 75%							-11,2%
							0,001

Tab. A.21 Ergebnistabelle zu Bild 5.27 – Anzahl der Halte für den Gesamtverkehr

Anzahl der Halte je Fahrzeug [-] (Route B)							
	Festzeit	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	0,48	0,84	0,82	0,75	0,77	0,68	0,63
SD	0,09	0,10	0,11	0,11	0,13	0,10	0,07
CI	0,11	0,11	0,15	0,14	0,16	0,13	0,09
Norm	0,324	0,191	0,793	0,649	0,665	0,813	0,520
ANOVA	0,000						
Festzeit		75,4%	70,0%	56,0%	60,4%	40,8%	31,0%
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007
preXible 0%			-3,1%	-11,1%	-8,5%	-19,7%	-25,3%
			0,995	0,240	0,552	0,001	0,000
preXible 10%				-8,3%	-5,6%	-17,2%	-22,9%
				0,680	0,928	0,021	0,001
preXible 25%					2,9%	-9,7%	-16,0%
					0,999	0,596	0,079
preXible 50%						-12,2%	-18,3%
						0,285	0,020
preXible 75%							-6,9%
							0,923

Tab. A.22 Ergebnistabelle zu Bild 5.28 – Anzahl der Halte für Route B

tts je Fahrzeug [s] (Gesamtverkehr)							
	Festzeit	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	84,0	67,1	66,4	64,2	62,7	61,2	59,1
SD	2,41	1,58	1,61	2,46	1,77	1,68	0,97
CI	2,79	1,75	2,04	3,12	2,24	2,14	1,23
Norm	0,867	0,436	0,823	0,690	0,137	0,905	0,417
ANOVA	0,000						
Festzeit		-20,1% 0,000	-20,9% 0,000	-23,6% 0,000	-25,4% 0,000	-27,1% 0,000	-29,7% 0,000
preXible 0%			-1,0% 0,958	-4,3% 0,002	-6,7% 0,000	-8,8% 0,000	-12,0% 0,000
preXible 10%				-3,3% 0,063	-5,7% 0,000	-7,9% 0,000	-11,1% 0,000
preXible 25%					-2,4% 0,379	-4,7% 0,003	-8,0% 0,000
preXible 50%						-2,3% 0,482	-5,7% 0,000
preXible 75%							-3,5% 0,084

Tab. A.23 Ergebnistabelle zu Bild 5.29 – gesamte im Netz verbrachte Zeit für den Gesamtverkehr

Maximale Wartezeit [s] (Gesamtverkehr)							
	Festzeit	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	78,2	101,3	99,8	100,1	97,7	96,3	88,3
SD	0,89	6,67	7,63	10,42	11,40	10,58	9,56
CI	1,03	7,39	9,69	13,24	14,48	13,44	12,15
Norm	0,001	0,109	0,266	0,051	0,552	0,880	0,946
ANOVA	0,000						
Festzeit		29,6% 0,000	27,5% 0,000	28,0% 0,000	24,9% 0,000	23,1% 0,000	12,8% 0,061
preXible 0%			-1,6% 0,999	-1,2% 1,000	-3,6% 0,928	-5,0% 0,734	-12,9% 0,004
preXible 10%				0,3% 1,000	-2,1% 0,997	-3,5% 0,955	-11,5% 0,026
preXible 25%					-2,4% 0,993	-3,8% 0,931	-11,8% 0,020
preXible 50%						-1,5% 1,000	-9,6% 0,120
preXible 75%							-8,3% 0,273

Tab. A.24 Ergebnistabelle zu Bild 5.30 – maximale Wartezeit für den Gesamtverkehr

CO2 je Fahrzeug [g] (Gesamtverkehr)							
	Festzeit	preXible 0%	preXible 10%	preXible 25%	preXible 50%	preXible 75%	preXible 100%
MW	144,3	125,1	123,5	117,8	113,5	108,9	103,8
SD	4,6	2,8	2,4	3,7	2,9	2,7	1,9
CI	5,4	3,1	3,1	4,7	3,7	3,4	2,5
Norm	0,568	0,040	0,964	0,354	0,131	0,877	0,658
ANOVA	0,000						
Festzeit		-13,3% 0,000	-14,5% 0,000	-18,4% 0,000	-21,4% 0,000	-24,5% 0,000	-28,1% 0,000
preXible 0%			-1,3% 0,824	-5,9% 0,000	-9,3% 0,000	-12,9% 0,000	-17,1% 0,000
preXible 10%				-4,6% 0,001	-8,1% 0,000	-11,8% 0,000	-16,0% 0,000
preXible 25%					-3,6% 0,022	-7,5% 0,000	-11,9% 0,000
preXible 50%						-4,0% 0,012	-8,6% 0,000
preXible 75%							-4,7% 0,003

Tab. A.25 Ergebnistabelle zu Bild 5.31 – Kohlenstoffdioxidemissionen für den Gesamtverkehr