

Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen – Regelungstechnischer Ansatz und Simulation

Stefan Lämmer*, Jürgen Krimmling[†] und Andreas Hoppe[‡]

Kurzfassung

Obwohl sich vollverkehrsabhängige Lichtsignal-Steuerungen an isolierten Einzelknoten bereits als sehr erfolgreich erwiesen haben, scheinen sie in komplexen Straßennetzwerken mit der Leistungsfähigkeit netzweit koordinierter Steuerungen bislang noch nicht mithalten zu können. Dennoch sind Verkehrswissenschaftler von ihnen fasziniert. Immerhin haben vollverkehrsabhängige Steuerungen das Potenzial, auf Unregelmäßigkeiten wie spontane Nachfrageschwankungen oder die Anmeldung von Bussen und Straßenbahnen außerordentlich flexibel und bedarfsgerecht zu reagieren.

An der TU Dresden wurde ein neuartiger regelungstechnischer Ansatz zur vollverkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerung entwickelt. In dieser Simulationsstudie wird die sogenannte Selbst-Steuerung am Beispiel eines komplexen Streckennetzes erprobt und mit der dortigen verkehrsabhängigen koordinierten Steuerung verglichen. Unter der Annahme idealer Fahrzeugerkennung zeigt sich, dass das neue Verfahren der Komplexität realer Straßennetze gewachsen ist und darüber hinaus signifikante Verbesserungen für alle Verkehrsarten aufweist. Seine Weiterentwicklung und die Vorbereitung auf einen Praxiseinsatz sind deshalb als sehr lohnenswert einzuschätzen.

Referenz

S. Lämmer, J. Krimmling, A. Hoppe (2009): Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken – Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. *Straßenverkehrstechnik* 11, S. 714-721, Kirschbaum Verlag, Bonn.

*stefan.laemmer@tu-dresden.de

†juergen.krimmling@tu-dresden.de

‡hoppe@dvbag.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Zielsetzung	3
2	Selbst-Steuerung	4
2.1	Ansatz	4
2.2	Aufbau	4
2.3	Funktionsbausteine	5
2.4	Dynamisches Verhalten	7
3	Untersuchungsgebiet	7
3.1	Bahnhof Dresden Mitte	7
3.2	Eingesetztes Steuerungsverfahren	9
4	Vergleichende Untersuchung	9
4.1	Aufbau	9
4.2	Verlustzeiten	10
4.3	Rotzeiten für Fußgänger	10
4.4	Einfluss des Zufalls	12
4.5	Variation der Verkehrsstärken	12
5	Zusammenfassung und Ausblick	14
	Literatur	15

1 Einleitung

1.1 Motivation

Auf koordinierten Straßenzügen sind die Spielräume verkehrsabhängiger Steuerungen durch feste Umlaufzeiten und Rahmenprogramme eingeschränkt. Zwar versuchen unterschiedliche Verfahren, wie beispielsweise SCOOT, Motion oder Balance (vgl. Hunt u. a. (1981), Busch u. Kruse (1993), bzw. Friedrich (2000)), durch das Nachführen von Umlaufzeiten, Grünzeiten und Versatz diesen Nachteil zu minimieren. Aber in allen Fällen setzen solche Steuerungen kurzzeitig konstante Umlaufzeit entlang der Straßenzüge voraus (vgl. Steierwald u. a. (2005); Braun (2008)).

An der TU Dresden wurde ein Regelungskonzept zur vollverkehrsabhängigen Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen entwickelt (vgl. Lämmer (2007)). Das Konzept ist so gestaltet, dass es dynamische Grüne Wellen sowie Maßnahmen zur ÖPNV-Beschleunigung realisiert. Bewusst wird auf eine Koordinierung im klassischen Sinn verzichtet. Stattdessen erhält die Steuerung maximale Flexibilität, um aus der lokalen Optimierung heraus Koordinierungen bedarfsgerecht von selbst entstehen zu lassen. Es besteht aus drei Grundverfahren: Das Antizipationsverfahren reagiert auf herannahende Fahrzeugkolonnen, das Optimierungsverfahren wählt aus allen möglichen Signalgruppenkombinationen die momentan beste aus, und das Stabilisierungsverfahren garantiert die Durchlassfähigkeit aller Knotenpunkte sowie das Einhalten aller sicherheitskritischen Randbedingungen.

Erste kleinere Studien bestätigten die Tragfähigkeit des Ansatzes. Um die Robustheit, die Potenziale und die Grenzen des Verfahrens zu erproben, wurde von der TU Dresden gemeinsam mit den Dresdner Verkehrsbetrieben (DVB AG) eine Simulationsstudie für ein kompliziertes Straßennetz erarbeitet. Dieses umfasst 13 lichtsignalisierte Knotenpunkte, die teilweise sehr nahe ($\approx 100\text{m}$) beieinander liegen und die von 7 ÖV-Linien stark frequentiert werden. Derzeit werden die Anlagen mit einer verkehrsabhängigen netzweit koordinierten Steuerung mit relativer ÖPNV-Bevorrechtigung betrieben.

1.2 Zielsetzung

Diese Studie wird beide Verfahren, die ausgereifte Koordinierung und die flexible Selbst-Steuerung, gegenüberstellen und bewerten. Als Simulationsumgebung wird die mikroskopische Verkehrssimulations-Software Vissim verwendet. Die zugehörige Versorgungsdatei, die den Verkehrsfluss und die Geometrie der Knotenpunkte realitätsnah abbildet, wurde von den DVB aufgebaut und bezüglich der charakteristischen Verkehrsstärken geeicht. Innerhalb dieser Simulationsumgebung konnten die DVB gemeinsam mit mehreren Planungsbüros die derzeit eingesetzte VS-PLUS-Steuerung projektieren. Auf dieser Grundlage wird die Selbst-Steuerung im gleichen Simulationsumfeld getestet, in dem die original verwendete Steuerung entworfen und optimiert wurde.

Die Studie basiert auf der Annahme, dass in der Simulation alle Fahrzeugpositionen bekannt sind. Auch wenn dies bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten sein wird, lässt sich dennoch die Frage klären, ob und wie gut das neu entwickelte Regelungskonzept die Komplexität realer Verkehrssysteme bewältigen kann. Die Studie soll aber auch einen Beitrag zur Diskussion leisten, welche Rolle vollverkehrsabhängige Steuerungen in Zukunft spielen können (vgl. Brilon u. Wietholt (2008)). Dass die Selbst-Steuerung zur Verkehrsflussoptimierung großes Potenzial hat, das legen bereits die Thesen der Dissertation Lämmer (2007) nahe. Ob sie aber auch einem realitätsnahen Vergleich mit dem Stand der Technik standhalten kann, das soll hier gezeigt werden.

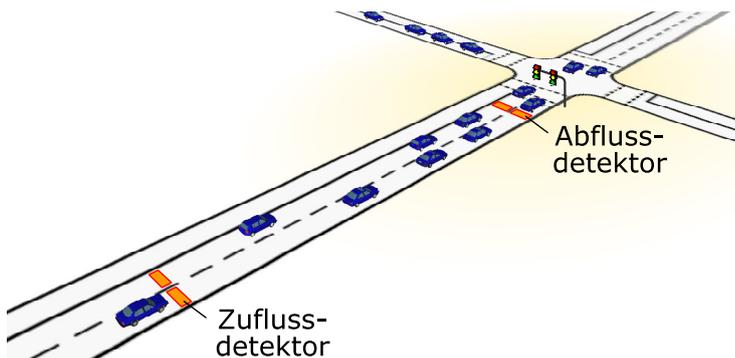


Bild 1: Die Selbst-Steuerung berechnet für jeden Verkehrsstrom, wie dringlich seine Bedienung ist. Dies erfordert die Erfassung des am Knotenpunkt zu- und abfließenden Verkehrs.

2 Selbst-Steuerung

2.1 Ansatz

Der Grundgedanke ist, dass sich die Lichtsignalanlagen an den Knotenpunkten eines Straßennetzwerks frei von Vorgaben wie Umlaufzeiten oder Phasenfolgen „selbst steuern“. Sie unterliegen lediglich den sicherheitsrelevanten Randbedingungen wie das Einhalten von Zwischenzeiten, Mindestfreigabezeiten und anderen in den einschlägigen Richtlinien aufgeführten Vorgaben. Indem die Lichtsignalanlagen ihre Schaltzustände fortlaufend bezüglich der aktuellen und tatsächlichen Verkehrssituation optimieren und dabei den gesamten Lösungsraum nutzen, entstehen hochkomplexe Bedienmuster wie dynamische Grüne Wellen flexibel und bedarfsgerecht von selbst.

Das regelungstechnische Konzept der Selbst-Steuerung beruht in großen Teilen auf der Theorie nichtlinearer hybrid-dynamischer Systeme (vgl. Savkin u. Evans (2002)). Dieses junge Teilgebiet der Mathematik beschäftigt sich mit der Regelung von Systemen, die sowohl durch kontinuierliche als auch diskrete Zustandsgrößen beschrieben werden. Ein Straßennetzwerk, in dem kontinuierliche Verkehrsströme durch diskrete Schaltzustände der Signalgeber gestoppt und wieder freigegeben werden, ist ein erstklassiges Beispiel für ein nichtlineares hybrid-dynamisches System.

2.2 Aufbau

Um den Verkehrsablauf an einem Knotenpunkt flexibel regeln zu können, benötigt die Selbst-Steuerung ein möglichst genaues Bild von der Fahrzeugbelegung jeder Knotenzufahrt. Während in der Simulation die Fahrzeugpositionen bekannt sind und unmittelbar ausgewertet werden, basiert das Grundprinzip der Selbst-Steuerung auf einer modellbasierten Rekonstruktion der Fahrzeugbelegung aus den Messreihen von Zu- und Abflussdetektoren (Bild 1). Der Zuflussdetektor befindet sich möglichst weit stromaufwärts der Haltlinie und erfasst den auf den Knotenpunkt zufließenden Verkehr. Der Abflussdetektor unmittelbar an der Haltlinie stellt fest, welche Fahrzeuge tatsächlich abgeflossen sind und ob bzw. wann eine Warteschlange erfolgreich geleert wurde. Eine entsprechende drahtgebundene oder Funk-Verbindung vorausgesetzt, ist es durchaus denkbar, dass die Zuflussdetektion durch die Abflussdetektoren der vorgelagerten Knotenpunkte ergänzt oder sogar gänzlich ersetzt wird.

Die Detektor-Messreihen dienen der Selbst-Steuerung als dynamische Eingangsgröße (Bild 2). Abbiegebeziehungen, Fahrstreifenanzahl sowie Verträglichkeits- und Zwischenzeiten-Matrizen sind als System-Parameter fest vorgegeben. Die Algorithmen der Selbst-Steuerung wählen fort-

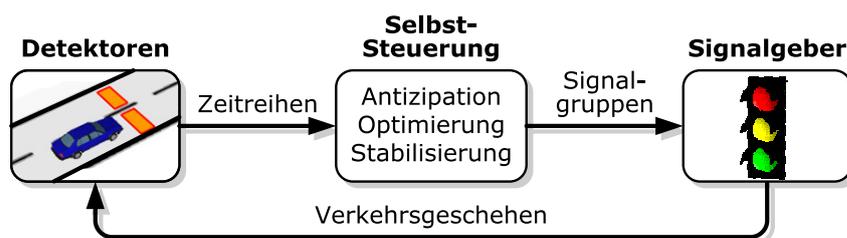


Bild 2: Die Algorithmen der Selbst-Steuerung sind in einen dynamischen Regelkreis eingebunden. Sie leiten aus den Detektor-Messreihen die momentan beste Signalgruppenkombination ab.

laufend aus allen zulässigen Signalgruppenkombinationen (über 100 je Knoten) diejenige aus, mit der für alle Fahrzeuge am Knotenpunkt die geringsten Gesamtwarezeiten entstehen. Dass hierfür die Erfassung des zu- bzw. abfließenden Verkehrs ausreicht, begünstigt eine dezentrale Architektur.

2.3 Funktionsbausteine

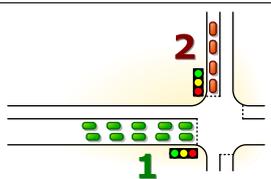
Für die dynamische Optimierung des Verkehrsablaufs ist das Zusammenspiel dreier Funktionsbausteine verantwortlich. Sie werden in Lämmer (2007); Lämmer u. a. (2007); Lämmer u. Helbing (2008) detailliert vorgestellt. Hier soll es genügen, ihren Grundgedanken kurz zu umreißen.

Antizipation

Der erste Baustein beantwortet die Frage, welche zusätzlichen Wartezeiten entstehen würden, falls eine Signalgruppe nicht sofort, sondern erst später zur Bedienung ausgewählt wird. Dann müssen nämlich nicht nur die Fahrzeuge länger warten, die bereits auf den entsprechenden Zufahrten stehen. Es sind auch jene Fahrzeuge betroffen, die auf die bereits stehenden auffahren werden, bevor das Umschalten abgeschlossen und die Warteschlangen vollständig geleert worden sind. Die Zeit bis zur Leerung verlängert sich zusätzlich mit jedem neu hinzukommenden Fahrzeug. Besonders wichtig ist dieser Sachverhalt für die verzögerungsfreie Abfertigung von Fahrzeugkolonnen: Nur wenn eine Knotenzufahrt vor dem Eintreffen einer größeren Kolonne rechtzeitig geräumt ist, brauchen ihre sämtlichen Fahrzeuge nicht anzuhalten und neu zu beschleunigen. Mathematisch beruht das Antizipations-Verfahren auf einer Integral-Transformation der Detektor-Zeitreihen. Es leitet aus dem dynamischen Verkehrsgeschehen auf den Knotenzufahrten relevante Kenngrößen für das Optimierungs-Verfahren ab.

Optimierung

Ob ein Verkehrsstrom unverzüglich zu bedienen ist, hängt selbstverständlich auch davon ab, welche anderen zu ihm unverträglichen Ströme währenddessen warten müssen. Das Optimierungs-Verfahren entscheidet sich für die Verkehrsströme, mit deren Bedienung die geringsten Gesamtwarezeiten am jeweiligen Knotenpunkt entstehen. Andere Zielgrößen, die beispielsweise auch die Zahl der Halte berücksichtigen, sind ebenso denkbar. Anstatt aber jede mögliche Schaltkombination zu simulieren und zu bewerten, was aufgrund der enormen Komplexität selbst mit modernster Rechentechnik viel zu lange dauern würde, geht das Optimierungs-Verfahren einen anderen, eleganteren Weg. Es weist jedem Verkehrsstrom eine dynamische Priorität zu, d.h. eine Zahl, die angibt, wie dringlich dieser zu bedienen ist (Box 1). Grün bekommen die am höchsten priorisierten Ströme. Dass diese Art der Optimierung überhaupt möglich ist, wurde zwar schon



$n_1, n_2 \dots$ Warteschlangenlängen
 $q_1, q_2 \dots$ max. Abflussraten
 $\tau_1, \tau_2 \dots$ Zwischenzeiten

Gesamtwartezeit $1 \rightarrow 2 <$ Gesamtwartezeit $2 \rightarrow 1$ (1)

$$\tau_1(n_1 + n_2) + \frac{n_1}{q_1}(n_1/2 + n_2) + \tau_2 n_2 + n_2^2/(2q_2) < \tau_2(n_1 + n_2) + \frac{n_2}{q_2}(n_2/2 + n_1) + \tau_1 n_1 + n_1^2/(2q_1)$$
 (2)
$$\tau_1 n_2 + \frac{n_1}{q_1} n_2 < \tau_2 n_1 + \frac{n_2}{q_2} n_1$$
 (3)
$$\pi_2 := \frac{n_2}{\tau_2 + n_2/q_2} < \frac{n_1}{\tau_1 + n_1/q_1} =: \pi_1$$
 (4)
$$\pi_1 > \pi_2$$
 (5)

Bild 3: Mathematische Herleitung zur optimalen Priorisierung von Warteschlangen. Um zu entscheiden, welche der beiden Warteschlangen (links oben) als erste zu leeren ist, werden die jeweils insgesamt anfallenden Wartezeiten bilanziert (1). Man erhält eine Ungleichung (2), die sich kürzen (3) und umstellen (4) lässt. Nun hängt jede Seite der Ungleichung in charakteristischer Weise von den Zustandsgrößen nur einer Warteschlange ab. Der zugehörige Ausdruck lässt sich für die Spezifikation des Prioritätsindex heranziehen. Somit ist es optimal, die Warteschlange zuerst zu leeren, deren Priorität am größten ist (5). Dies gilt uneingeschränkt auch für Knotenpunkte mit mehr als zwei Warteschlangen. Die Herleitung für den allgemeinen Fall mit Fahrzeugankünften wird in Lämmer (2007); Lämmer u. Helbing (2008) angegeben.

vor vielen Jahrzehnten von Cox u. Smith (1961); Rothkopf u. Smith (1984) entdeckt. Aber erst in Kombination mit dem oben beschriebenen Antizipations-Verfahren, das die herannahenden Fahrzeugkolonnen in entscheidender Weise berücksichtigt, kann es überhaupt zur Verkehrsflussoptimierung herangezogen werden. Bildlich gesprochen gibt der Knotenpunkt dem stärksten „Druck“ der Verkehrsströme nach.

Stabilisierung

Das allein genügt jedoch nicht. Noch ist nicht auszuschließen, dass die lokale Optimierung unter Umständen Nebenströme vernachlässigt, weil die Wartezeiten-Einsparung durch deren Bedienung klein ist im Vergleich zu den Wartezeiten, die während dessen für die Hauptströme anfallen. Auch sind solche lokal optimierenden Systeme dafür bekannt, sich dynamisch aufzuschwingen und für das Gesamtnetzwerk besonders schlechte Lösungen zu erzeugen. Kumar u. Seidman (1990); Friedrich (2007); Lämmer (2009) diskutieren das Problem.¹ Die Regelungstheorie verwendet hierfür den Begriff Instabilität. Solche Fälle auszuschließen ist Aufgabe des Stabilisierungsverfahrens. Es besteht aus einem Zustandsbeobachter, der stabilitätskritische Zustände rechtzeitig erkennt, und einem Mechanismus, der gegebenenfalls zielgerichtet in die lokale Optimierung eingreift. Damit stellt es sicher, dass maximale Sperrzeiten nicht überschritten und alle Warteschlangen regelmäßig geleert werden. Dies kann auch bei hoher Verkehrsnachfrage garantiert werden. Erst bei solchen Verkehrsbelastungen, die auch keine Festzeitsteuerung mehr bewältigen kann, stößt die Selbst-Steuerung naturgemäß an ihre Grenzen. Diese Aussage konnte

¹ Simulationsvideos auf <http://stefanlaemmer.de/stability> demonstrieren, wie sich zwei benachbarte, vollverkehrsabhängig gesteuerte Knotenpunkte dynamisch aufschaukeln.

in Lämmer (2007) durch analytische Betrachtungen allgemeingültig belegt werden. Indem die Algorithmen der Selbst-Steuerung an jedem Knoten unabhängig voneinander die Regeln des Stabilisierungsverfahrens befolgen, wird das gesamte Netz stabilisiert.

2.4 Dynamisches Verhalten

Das Zusammenspiel dieser drei Bausteine hält die dynamische Entwicklung des Verkehrsgeschehens in gewünschten und sicherheitstechnisch geforderten Schranken. Zudem begünstigt es durch eine optimierte Phasenauswahl die Konvergenz zu Lösungen mit besonders geringen Wartezeiten für alle Verkehrsströme. Die entstehenden Schaltzeitpunkte und Phasenwechsel sind aufgrund der vollen Verkehrsabhängigkeit ebenso regulär oder irregulär wie der Verkehr selbst. Sich in unterschiedlichen Situationen unterschiedlich zu verhalten, darin liegt die besondere Stärke der Selbst-Steuerung.

Die Selbst-Steuerung ist nicht an Umlaufzeiten gebunden. Es ist lediglich sichergestellt, dass jeder Verkehrsstrom mindestens einmal innerhalb einer parametrierbaren Zeitspanne hinreichend lang bedient wird. Weil die lokale Optimierung bestrebt ist, alle Fahrzeugschlangen so schnell wie möglich aufzulösen, stellen sich deutlich kürzere und teils sogar kürzest mögliche Bedienfolgen ein. Für einfache analytisch zugängliche Szenarien konnte gezeigt werden, dass die Gesamtdauer der Bedienfolgen sogar gegen die theoretische Mindestumlaufzeit strebt - eine Lösung, die mit einer Festzeitsteuerung praktisch unerreichbar ist. Erst unter maximaler Auslastung, wenn die Verkehrsmenge keinen Spielraum für Optimierungen mehr zulässt, verhält sich die Selbst-Steuerung wie eine Festzeitsteuerung und schaltet in festen Zeitschritten von einer Phase zur nächsten.

Weil das Anhalten großer Fahrzeugkolonnen große Wartezeiten nach sich ziehen würde, entstehen dynamische Grüne Wellen im laufenden Betrieb bedarfsgerecht von selbst. So wie das Ausklügeln einer netzweit koordinierten Steuerung gelegentlich als „Schachspiel-Methode“ bezeichnet wird, so ist das Verhalten der Selbst-Steuerung eher mit „schnellem Fußball“ zu vergleichen.

Bei Fußgängerströmen geht die Selbst-Steuerung von einem konstanten virtuellen Zustrom aus. Dieser permanent anliegende „Druck“ (proportional zur verstrichenen Rotzeit) führt automatisch dazu, dass Fußgänger bei jeder größeren Lücken im Fahrzeugstrom Grün bekommen. Die Fahrzeuge des ÖPNV sind in der Zielfunktion mit einem größeren Faktor gewichtet. So kann es auch passieren, dass sich eine Straßenbahn einer Grünen Welle unterordnen muss, falls die entsprechende Fahrzeugkolonne groß genug ist.

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Bahnhof Dresden Mitte

Das Untersuchungsgebiet (Bild 4) umschließt den Bahnhof Dresden Mitte, der als Umsteigepunkt zwischen Nah- und Regionalverkehr eine tragende Bedeutung für den öffentlichen Personenverkehr hat: Fünf Straßenbahn- und zwei Buslinien durchfahren das Gebiet im 10-Minuten-Takt in jeweils beide Richtungen, seine Haltestellen werden täglich von ca. 21.300 Ein-, Aus- und Umsteigern frequentiert (Box 2). Hinzu kommt die CarGoTram, eine Güterstraßenbahn, die Bauteile des VW-Phaeton vom Güterverkehrszentrum (GVZ) zur Gläsernen Manufaktur befördert. Die Könnertitzstraße (1) ist Teil des Dresdner Innenstadt-Rings und führt mit der Anbindung an die Marienbrücke den elbquerenden Verkehr zwischen Alt- und Neustädter Seite. Die Weißeritzstraße (2) und in ihrer Verlängerung die Löbtauer Straße (3) bilden die Verbindung in die Stadtteile des Dresdner Süd-Westens. Über die Ost-West-Achse Schweriner Straße (4) / Schäferstraße (5) fließt der Verkehr vom Stadtzentrum zur Autobahnauffahrt Dresden-Altstadt

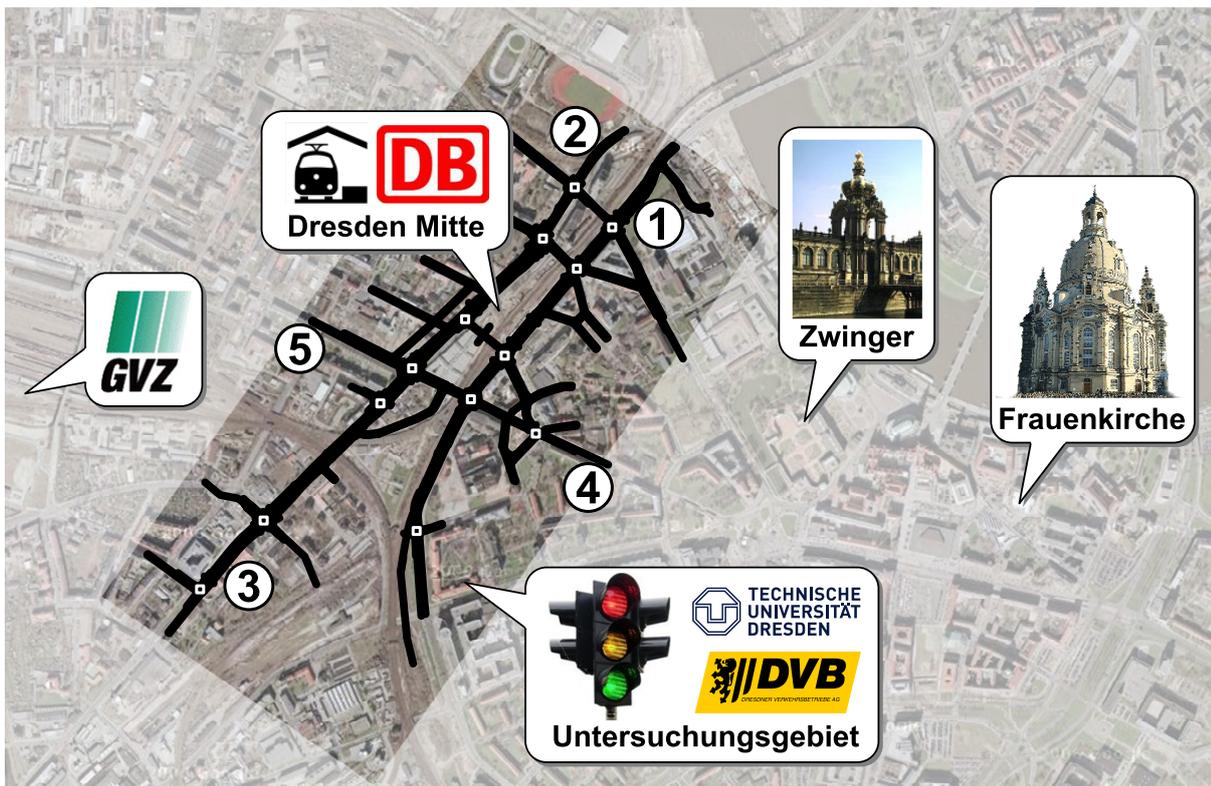


Bild 4: Das Untersuchungsgebiet im Westen der Dresdner Innenstadt mit den Hauptachsen (1) Könneritzstraße, (2) Weißeritzstraße, (3) Löbtauer Straße, (4) Schweriner Straße und (5) Schäferstraße. Die lichtsignalisierten Knotenpunkte sind durch Kästchen markiert. Das Gebiet umfasst eine Fläche von $0,8 \times 1,7$ km. Die Gesamtlänge aller Fahrspuren beträgt 23,9 km.

Der Verknüpfungspunkt Bahnhof Mitte wurde 2002 um- und ausgebaut. Heute nutzen allein am Halteplatz „Bahnhof Mitte“ ca. 13.000 Ein-, Aus- und Umsteiger die Verkehrsmittel des ÖPNV. Insgesamt finden hier täglich ca. 1.100 Abfahrten mit Verkehrsmitteln der DVB AG statt. Die Umlaufzeiten der Lichtsignalanlagen sind im Bereich Bahnhof Mitte mit 120 Sekunden (in den Spitzenstunden) vergleichsweise hoch und die Freigabefenster der ÖV-Signalgruppen sind fest definiert. In Verbindung mit der dichten Zugfolge entstehen somit pro Tag über 20 Stunden lichtsignalbedingte Verlustzeiten für die Verkehrsmittel der DVB AG. Die Pünktlichkeit der Verkehrsmittel im Bereich Bahnhof Mitte liegt derzeit bei unter 50%. Die Fahrzeitstreuung um die Fahrplanzeit von beispielsweise 3:00 min beträgt bis zu 200% (schnellste gemessene Fahrt 2:26 min, langsamste gemessene Fahrt 5:54 min). Es besteht dringender Handlungsbedarf bei der Optimierung der Steuerungstechnik der Lichtsignalanlagen, um die öffentlichen Linienverkehre zuverlässiger, pünktlicher, anschlussicherer und somit für die Nutzer attraktiver anbieten zu können.

Bild 5: Daten und Fakten zum ÖPNV-Bediengebiet Bahnhof Dresden Mitte (Quelle: DVB AG, Stand 2008).

und über die Flügelwegbrücke zum Einkaufszentrum Elbepark. Zur Hauptverkehrszeit muss das Streckennetz 4.700 Fahrzeuge je Stunde bewältigen. Mit dieser Verkehrsmenge und den dicht getakteten Bus- und Straßenbahnlinien konkurrieren zahlreiche Fußgängerströme. Insgesamt 68 Fußgängerquerungen liegen im Untersuchungsgebiet.

3.2 Eingesetztes Steuerungsverfahren

Die 13 lichtsignalisierten Knotenpunkte werden mit einer verkehrsabhängigen VS-PLUS-Steuerung koordiniert betrieben. Die gemeinsame Umlaufzeit beträgt tagsüber 100 Sekunden, in Spitzenstunden wird in einen 120-er Umlauf gewechselt, nachts in einen 75-er Umlauf. Alle Programme richten für die Kraftfahrzeugströme entlang der drei Hauptachsen ein System aus Grünen Wellen in jeweils beide Fahrtrichtungen ein. Die Bänder der Grünen Wellen sind als Rahmenprogramm projektiert und lassen daher nur geringe Verkehrsabhängigkeiten zu (Box 2). So sind die Freigabefenster, in denen ÖV-Fahrzeuge die Knotenpunkte passieren können, durch Rahmen festgelegt (maximal zwei im 120er Umlauf). Fußgänger erhalten ihre Freigabe quer zu den Hauptströmen nur auf Anforderung.

4 Vergleichende Untersuchung

4.1 Aufbau

Die Algorithmen der Selbst-Steuerung wurden als Java-Applikation implementiert. Diese liest während der Simulation über die COM-Schnittstelle zyklisch, hier alle zwei Sekunden, die Positionen der Fahrzeuge aus der laufenden Vissim-Anwendung aus, bringt die drei Funktionsbausteine aus Abschnitt 2.2 zur Ausführung und schreibt die für optimal befundene Signalgruppenkombination zu Vissim zurück (Bild 6). Für die Simulation mit VS-PLUS wurden die im originalen Streckennetz verwendeten Parametersätze herangezogen. Den nachfolgenden statistischen Auswertungen liegen Simulationen von jeweils einer Stunde Dauer zugrunde. Die Vergleiche beziehen sich auf die typische Verkehrsbelastung, für die die VS-PLUS-Steuerung (im Weiteren Original-Steuerung) eine Umlaufzeit von 100 Sekunden einrichtet. Simulationsvideos sind im Internet unter <http://stefanlaemmer.de/selfcontrol> abrufbar.

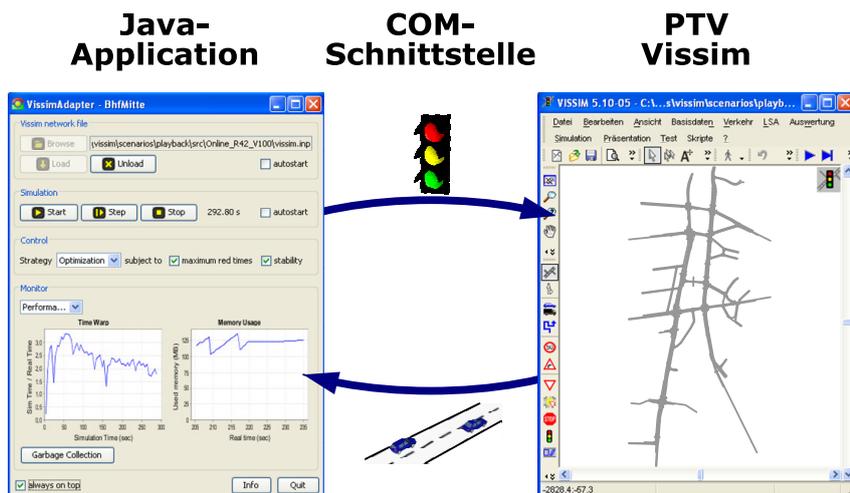


Bild 6: Die Selbst-Steuerung wurde als Java-Applikation implementiert (links), die zur Laufzeit über die COM-Schnittstelle (mitte) Fahrzeugpositionen und Signalgeber-Zustände aus der Vissim-Anwendung (rechts) ausliest bzw. zurückschreibt.

4.2 Verlustzeiten

Der erste Vergleich bezieht sich auf Verlustzeiten. Das ist die Summe der Zeiten, die alle Fahrzeuge einer bestimmten Verkehrsart aufgrund von Brems-, Halte- und Anfahrverlusten an Lichtsignalanlagen insgesamt später ihr Ziel erreichen bzw. später das Netz verlassen. Nicht-signalbedingte Verzögerungen wie Haltestellen-Aufenthaltszeiten gehen entsprechend nicht mit ein.

Bild7 bilanziert die Verlustzeiten für jede Verkehrsart. Mit der Selbst-Steuerung können insbesondere die Verlustzeiten für Straßenbahnen und Busse auf weniger als die Hälfte verringert werden. Aber auch die Kraftfahrzeugströme können von der Selbst-Steuerung profitieren. Für Fußgänger und Radfahrer wird als Qualitätsmaß ihre mittlere Rotzeit herangezogen. Ein Fußgänger, der bei Rot an einer Überquerung ankommt, muss durchschnittlich ein Drittel weniger lang auf Grün warten.

Dass sich die Selbst-Steuerung selbst gegen das System aus Grünen Wellen behaupten kann, ist mit dem flexiblen bedarfsgerechten Bedienkonzept zu erklären: Die auf den Hauptachsen zufließenden Fahrzeuge werden nicht am ersten Knotenpunkt aufgehalten und innerhalb vordefinierter Freigabefenster gebündelt weitergeführt. Stattdessen entstehen kleinere Kolonnen und folglich auch kleinere Verluste, falls diese im Bedarfsfall, z.B. für eine querende Straßenbahn, kurzzeitig aufgehalten werden. Diese grundsätzlich verschiedenen Ansätze werden durch die Gegenüberstellung der Fahrzeugtrajektorien in Bild 8 besonders deutlich.

4.3 Rotzeiten für Fußgänger

Fußgänger werden mit der Selbst-Steuerung bei jeder größeren Lücke im Fahrzeugstrom bedient, was sich in der Verteilung der Rotzeiten (Bild 9) widerspiegelt. Zweierlei ist ersichtlich: Erstens treten kürzere Rotzeiten häufiger auf, längere seltener. Zweitens sind die Rotzeiten zufälliger verteilt: Die Beobachtung, dass mit der Original-Steuerung beispielsweise Rotzeiten von 58 Sekunden äußerst selten, aber solche mit 59 Sekunden am häufigsten vorkommen, macht deutlich, dass sie zeitlichen Restriktionen unterliegt und sich nicht in vollem Maße an die Zufälligkeit des Verkehrs anpassen kann.

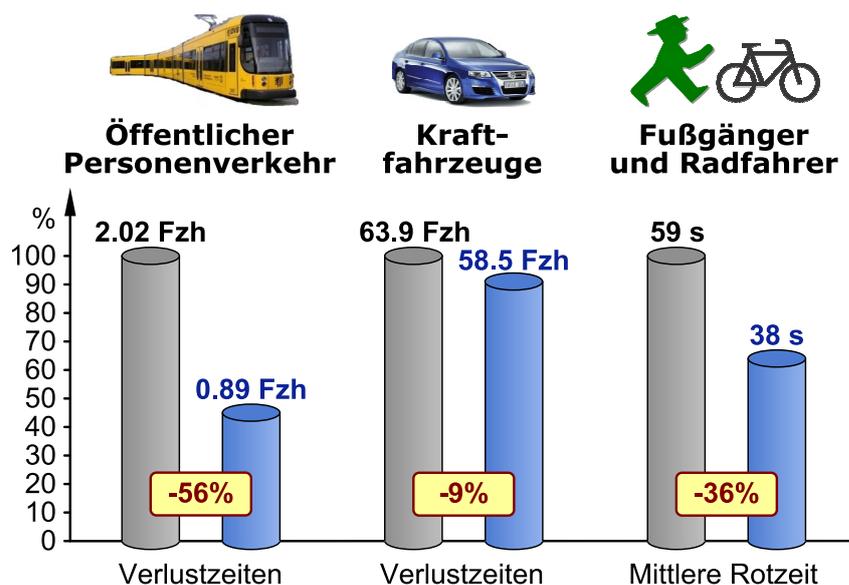


Bild 7: Im Vergleich zur Original-Steuerung (jeweils linker Balken) weist die Selbst-Steuerung (rechter Balken) deutlich geringere Verlustzeiten für alle Verkehrsarten auf.

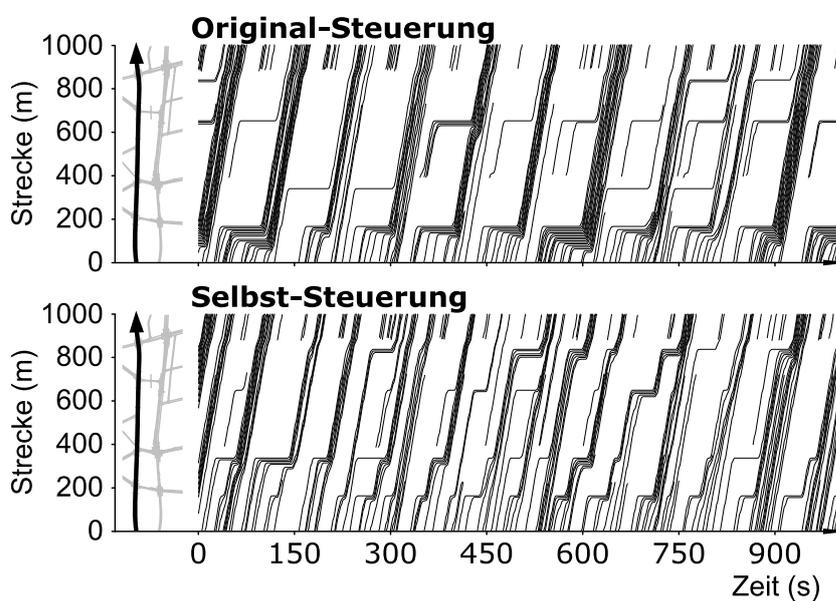


Bild 8: Fahrzeugtrajektorien (Fahrzeugpositionen über der Zeit aufgetragen) entlang der Könnertitzstraße in Richtung Süden. Die Original-Steuerung (oben) bündelt die zufließenden Fahrzeuge zu großen kompakten Kolonnen. Dagegen erlauben es die kleineren Kolonnen der Selbst-Steuerung (unten), die Konflikte mit Nebenströmen oder kreuzenden Straßenbahnen entlang der Strecke flexibler zu entscheiden.

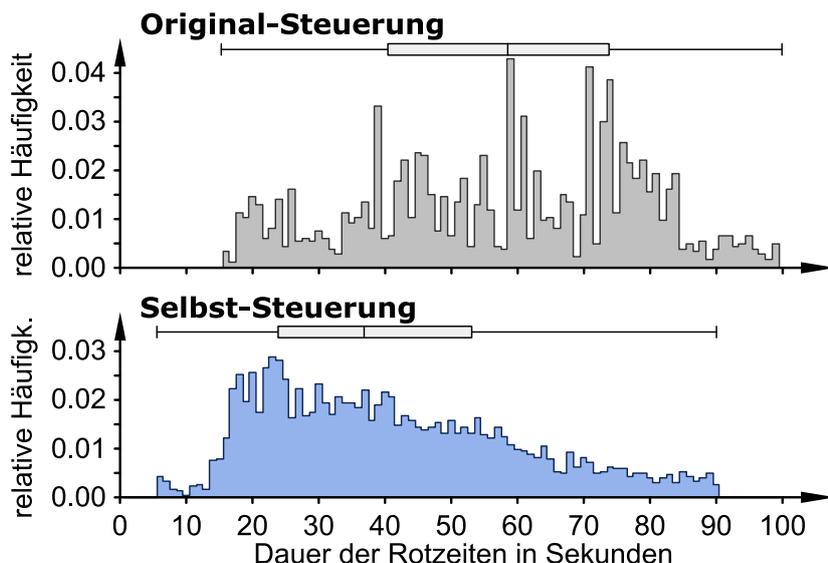


Bild 9: Verteilung der Rotzeit-Dauer an den Fußgänger-Querungen. Mit der Selbst-Steuerung (unten) treten kurze Rotzeiten häufiger auf, lange seltener.

4.4 Einfluss des Zufalls

Zufällig sind beispielsweise die Zeitpunkte, zu denen die Kraftfahrzeuge ins Streckennetz einfahren und ebenso die Haltestellen-Aufenthaltszeiten. Bild 10 zeigt die Ergebnisse von 24 Simulationläufen mit unterschiedlichen Start-Zufallszahlen. Jeder Punkt repräsentiert die Verlustzeiten bei Verwendung der Original- bzw. Selbst-Steuerung (horizontal bzw. vertikal). Die Streuung der Punkte in jeweiliger Richtung gibt an, wie empfindlich die Qualität der Steuerung vom Zufall abhängt. Besonders deutlich unterscheiden sich die beiden Verfahren für den ÖV (Bild 10 links). Mit der Selbst-Steuerung bleiben die Verlustzeiten in jedem Simulationslauf auf dem gleichen niedrigen Niveau. Dass sie mit der Original-Steuerung dagegen sehr weit streuen, hängt mit den festen Freigabefenstern zusammen: Kommt ein ÖV-Fahrzeug zufällig etwas später am Knotenpunkt an, muss es unter Umständen auf den nächsten Umlauf warten. Dabei kann es den Haltestellenbereich blockieren und andere ÖV-Fahrzeuge am Einfahren hindern. Im Unterschied dazu richtet die Selbst-Steuerung die Freigabezeiten unmittelbar am tatsächlichen Verkehrsgeschehen aus. Bei Bedarf werden kleinere Fahrzeugkolonnen gestoppt um einer Straßenbahn Vorrang zu gewähren. Mit der Selbst-Steuerung werden die Verlustzeiten für Straßenbahnen und Busse also nicht nur im Mittel, sondern auch in ihrer Varianz deutlich reduziert. Erstes wirkt positiv auf die mögliche Taktfolge, zweites auf die Pünktlichkeit.

4.5 Variation der Verkehrsstärken

Um zu klären, wie sich die Selbst-Steuerung bei anderen Verkehrsstärken verhält, zeigt Bild 11 den Verlauf der Verlustzeiten bei prozentualer Erhöhung der Kraftfahrzeug-Zuflüsse. Die Beobachtung, dass die Kurve für ÖV-Fahrzeuge unter Verwendung der Original-Steuerung nahezu konstant bleibt, ist wieder auf die festen Freigabefenster zurückzuführen. Aber auch mit der Selbst-Steuerung, bei der Straßenbahnen und Busse in Abwägung mit den anderen Verkehrsströmen bedient werden, variieren deren Verlustzeiten nur geringfügig. Die Verlustzeiten der Kraftfahrzeugströme haben mit beiden Steuerungsverfahren den gleichen charakteristischen, mit der Zuflussstärke überproportional ansteigenden Verlauf. Die bei der Bemessungsverkehrsstärke (0% Erhöhung) gemessenen Verlustzeiten-Einsparungen der Selbst-Steuerung

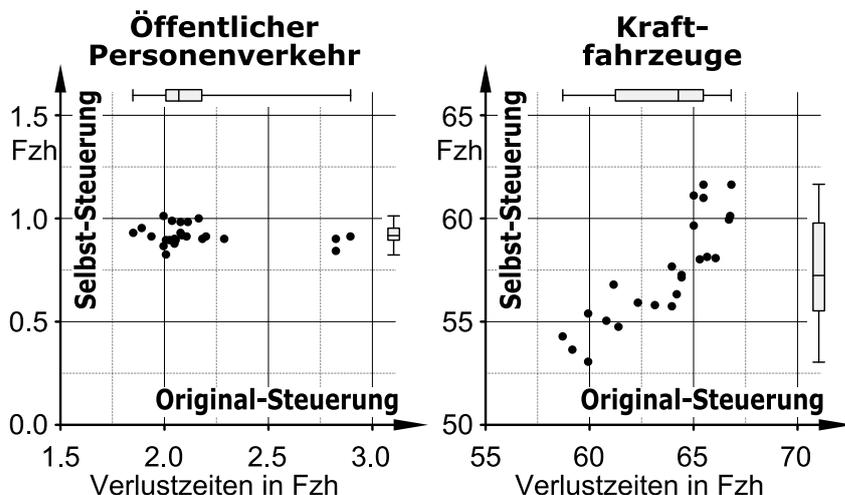


Bild 10: Verlustzeiten für ÖV (links) und Kraftfahrzeuge (rechts) in 24 Simulationsläufen mit unterschiedlichen Start-Zufallszahlen. Für den ÖV fällt die Streuung der Verlustzeiten unter Verwendung der Selbst-Steuerung (vertikal) deutlich geringer aus. Straßenbahnen und Busse fahren also nicht nur schneller, sie sind auch pünktlicher.

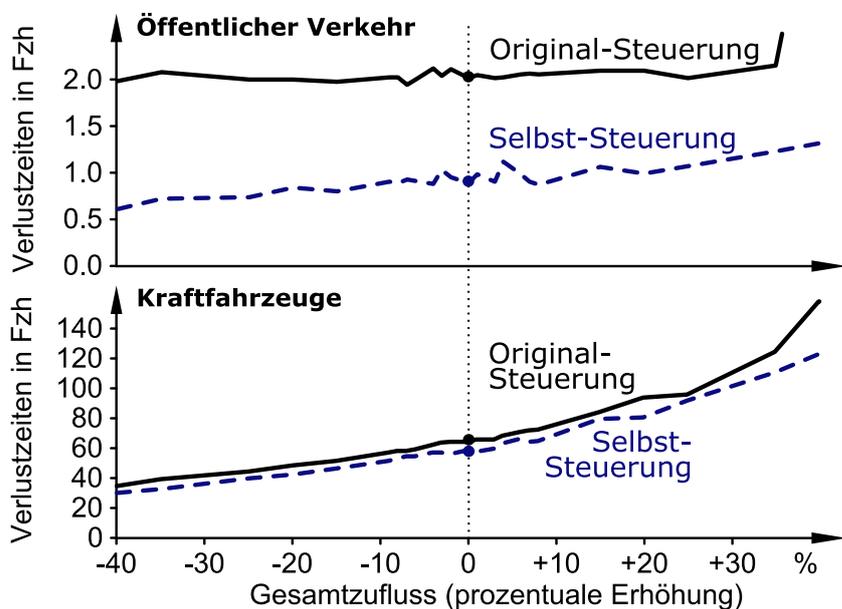


Bild 11: Verlustzeiten für ÖV- (oben) und Kraftfahrzeuge (unten) bei Erhöhung bzw. Verringerung der Kraftfahrzeug-Zuflüsse. Im gesamten Spektrum weist die Selbst-Steuerung deutliche Einsparungen auf.

finden sich im gesamten Spektrum wieder.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulationsstudie konnte am Beispiel des Straßennetzes um den Bahnhof Dresden Mitte erfolgreich zeigen, dass das regelungstechnische Konzept der Selbst-Steuerung einem realitätsnahen Test standhält. Unter der Annahme idealer Fahrzeugerkennung weist die neuartige vollverkehrsabhängige Selbst-Steuerung gegenüber der aktuell verwendeten netzweit koordinierten Steuerung deutliche Verbesserungen für alle Verkehrsarten auf (Bild 7). Straßenbahnen und Busse werden an den Knotenpunkten weniger lang aufgehalten, sie sind damit schneller und pünktlicher. Sogar die Kraftfahrzeuge fahren im Mittel zügiger durch das Netz, als wenn für sie Grüne Wellen eingerichtet werden. Fußgänger und Radfahrer bekommen bei jeder sich bietenden Gelegenheit Grün, sie müssen deutlich weniger lang warten. Den Verkehrsteilnehmern entfällt durch das Fehlen fester Umschaltzeitpunkte und fester Phasenfolgen zwar zunächst der Gewohnheitseffekt, stattdessen werden sie nun bedarfsgerechter, nachvollziehbarer und damit natürlicher bedient.

Ob ein Betreiber den zweiten Detektor je Verkehrsstrom bereitstellen kann, muss er gegen die offensichtliche Einsparung an Verlustzeiten und den Gewinn an Pünktlichkeit abwägen. Zusätzlich zählt aber auch die Qualität der Messungen, die bei gängigen Detektoren nicht immer einwandfrei ist wie u.a. Lehnhoff (2005) feststellt. Aber zum Ersten sorgt die hohe Flexibilität der Regelung dafür, dass Fehlprognosen oder Fehlentscheidungen unmittelbar ausgeregelt werden. Zum Zweiten stellt das Stabilisierungsverfahren (vgl. Absatz 2.3) sicher, dass sicherheitstechnische Vorgaben wie maximale Sperrzeiten selbst dann nicht verletzt werden, wenn keine Fahrzeuge detektiert wurden. Und bei Totalausfall eines Detektors kann der zugehörige Verkehrsstrom als virtueller Strom behandelt werden (vgl. Absatz 2.4). Damit bekommt er nicht nur hinreichend häufig Grün, sondern auch ausreichend lang. Zudem bleiben lokale Detektor-Störungen aufgrund des dezentralen Regelungsansatzes in ihrer Auswirkung lokal beschränkt.

In Vorbereitung auf einen Praxiseinsatz sind weiterführende Tests hinsichtlich unvollständiger Detektion und nicht-modellgetreuen Fahrverhaltens unerlässlich. Solche Tests sind durch weiterentwickelte Detektions-Verfahren, beispielsweise mit dynamischer Fehlerkorrektur mittels Fusion redundanter Messreihen, zu ergänzen. Des Weiteren ist zu untersuchen, wie sich andere Zielfunktionen, die neben der Gesamtwarzeit auch die Zahl der Halte oder den Kraftstoffverbrauch gewichten, auf die Qualität des Verkehrsablaufs auswirken.

Der regelungstechnische Ansatz der Selbst-Steuerung eröffnet einen neuen Zugang zur flexiblen bedarfsgerechten Organisation komplexer Straßenverkehrssysteme. Aufgrund der positiven Simulationsergebnisse ist eine Weiterentwicklung und die Vorbereitung auf einen Praxiseinsatz als sehr lohnenswert einzuschätzen. Verkehrswissenschaftlern und Wissenschaftlern anderer Disziplinen bietet der neue Zugang zahlreiche Anknüpfungspunkte für weiter- und tiefere Studien.

Literatur

- [Braun 2008] BRAUN, R.: *Ein echtzeitfähiger Evolutionärer Algorithmus zur netzweiten Optimierung der Lichtsignalsteuerung*, Technische Universität München, Diss., 2008
- [Brilon u. Wietholt 2008] BRILON, W. ; WIETHOLT, T.: Festzeitgesteuerte und verkehrsabhängige Koordinierungen. In: *Straßenverkehrstechnik* 9 (2008), S. 537–543
- [Busch u. Kruse 1993] BUSCH, F. ; KRUSE, G.: MOTION - Ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung und seine Erprobung in Rahmen des EG-Programms ATT. In: *Heureka!* 93 (1993), S. 79–93
- [Cox u. Smith 1961] COX, D.R. ; SMITH, W.L.: *Queues*. Methuen, 1961
- [Friedrich 2000] FRIEDRICH, B.: Steuerung von Lichtsignalanlagen, BALANCE - ein neuer Ansatz. In: *Straßenverkehrstechnik* 7 (2000), S. 1–44
- [Friedrich 2007] FRIEDRICH, B.: Großer Plan versus Dschungelprinzip. In: *Straßenverkehrstechnik* (2007), Nr. 9, S. 449
- [Hunt u. a. 1981] HUNT, P. B. ; ROBERTSON, D.I. ; BRETHERTON, R. D. ; WINTON, R. I.: SCOOT: a traffic responsive method of coordinating signals / Transport and Road Research Laboratory. Crowthorne, 1981 (1041). – Forschungsbericht
- [Kumar u. Seidman 1990] KUMAR, P. R. ; SEIDMAN, T. I.: Dynamic instabilities and stabilization methods in distributed real-time scheduling of manufacturing systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 35 (1990), Nr. 3, S. 289–298
- [Lämmer 2007] LÄMMER, S.: *Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken*, Technische Universität Dresden, Diss., 2007
- [Lämmer 2009] LÄMMER, S.: *Stabilitätsprobleme voll-verkehrsabhängiger Lichtsignalsteuerungen*. 2009. – Technische Universität Dresden
- [Lämmer u. a. 2007] LÄMMER, S. ; DONNER, R. ; HELBING, D.: Anticipative control of switched queueing systems. In: *The European Physical Journal B* 63 (2007), Nr. 3, S. 341–347
- [Lämmer u. Helbing 2008] LÄMMER, S. ; HELBING, D.: Self-Control of Traffic Lights and Vehicle Flows in Urban Road Networks. In: *Journal of Statistical Physics* (2008)
- [Lehnhoff 2005] LEHNHOFF, N.: *Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen*, Universität Hannover, Diss., 2005
- [Rothkopf u. Smith 1984] ROTHKOPF, M. H. ; SMITH, S. A.: There are no undiscovered priority index sequencing rules for minimizing total delay costs. In: *Operations Research* 32 (1984), Nr. 2, S. 451–456
- [Savkin u. Evans 2002] SAVKIN, A.V. ; EVANS, R.J.: *Hybrid Dynamical Systems*. Bosten : Birkhäuser, 2002
- [Steierwald u. a. 2005] STEIERWALD, G. ; KÜNNE, H.-D. ; VOGT, W.: *Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin : Springer, 2005