

# Selbst-gesteuerte Lichtsignalanlagen im Praxistest

Dr.-Ing. Stefan Lämmer  
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden  
E-Mail: traffic@stefanlaemmer.de

## Kurzfassung

Die gestiegenen Ansprüche an Mobilität und Umweltschutz verlangen nach neuen Ideen, wie innerstädtischer Straßenverkehr mit Hilfe von Lichtsignalanlagen geregelt werden kann. Da es sich angesichts der komplexen und variablen Einflüsse schwierig gestaltet, Straßennetze als Ganzes zu regeln, setzt die Selbst-Steuerung bei den einzelnen Netzknoten an. Sie signalisiert die auf einen Knoten zufließenden Verkehre so, dass eine gewichtete Summe aus modellbasiert geschätzten Wartezeiten und Stopps über die nächsten zwei Minuten minimal ist. Der Planer gibt keine Umlaufzeit oder Phaseneinteilung vor. Stattdessen benennt er die Randbedingungen in Form von Mindestgrün-, Mindestrot-, Zwischen- und Versatzzeiten, wählt Modellvarianten zur Ankunftsprognose aus und spezifiziert mit der Zielgewichtung die Anforderungen der Verkehre. Wann welcher Verkehrsstrom wie lange und mit welchen anderen gemeinsam Grün bekommt, entscheidet die Selbst-Steuerung in Abhängigkeit der aktuell erfassten Verkehrssituation sekundlich neu. Die Praxistauglichkeit dieses Ansatzes wurde an zwei Knotenpunkten auf der Dresdner Nord-Süd-Achse nachgewiesen. Der quantitative Vergleich mit einer verkehrsabhängigen VS-PLUS-Steuerung bestätigt das Potenzial der Selbst-Steuerung zur harmonischen ÖV-Priorisierung und dynamischen Kolonnenführung mit geringeren Wartezeiten für alle Verkehrsarten.

## Abstract

**Self-Controlling Traffic Lights – A Field-Trial.** The increasing demand for urban mobility and environmental protection require us to rethink, how urban traffic can be organized by the use of traffic lights. Since the influencing factors are complex and variable, it seems difficult to regulate road networks as a whole. The proposed self-control, instead, puts the focus at the individual nodes of the network. It signalizes the approaching traffic to each intersection such that a weighted sum of estimated delays and stops over the next two minutes is minimized. A planner does not have to choose cycle times or an order of signal phases. Instead, he lists the set of boundary conditions in terms of minimum-, maximum- and inter-green times, he selects models for the arrival anticipation, and he specifies the weights of the goal function as to meet the requirements of particular traffic streams. In consequence, green times result from a continuous re-optimization with respect to the actually detected and anticipated state of traffic. The practicality of this control method has been approved on two intersections on the north-south axis of Dresden. The quantitative comparison with a traffic-responsive VS-PLUS control confirms the potential of the self-controlling traffic lights, to achieve a harmonic Public Transport prioritization and a dynamic propagation of vehicle platoons with shorter wait times for all modes of transport.

## Stichwörter

Lichtsignalanlagen, voll-verkehrsabhängige Steuerung, innerstädtischer Verkehr, Optimierung

# 1. Einführung

## 1.1. Motivation

Innerstädtischer Verkehr ist komplex und der Anspruch, wie dieser zu organisieren und mit Hilfe von Lichtsignalanlagen zu regeln ist, wächst stetig. Zur Umsetzung von Umweltschutzziele und zur Steigerung der Lebensqualität wünschen sich Städte einen verlässlichen ÖPNV mit hoher Anschlussqualität. Gleichzeitig müssen die Orte einer Stadt auch mit anderen Verkehrsmitteln bzw. zu Fuß gut erreichbar sein. Ob eine Stadt Mobilität ermöglicht und gleichzeitig umweltfreundlich ist, hängt entscheidend davon ab, wie es an den Netzknoten gelingt, die unterschiedlichen Verkehre zu verflechten und ihre spezifischen Anforderungen zu harmonisieren.

Moderne Steuerverfahren stellen sich auf die Erreichung dieser Ziele ein, was daran zu erkennen ist, dass sie sich in Richtung der folgenden drei Trends entwickeln.

- **Reaktivität:** Die Zeitskala, auf die Steuerungen die Grünzeiten bedarfsgerecht an variable Nachfragen bzw. spontane Verkehrsereignisse anpassen, wird immer kleiner.
- **Flexibilität:** Die Zahl der Freiheitsgrade und damit der Spielraum der Möglichkeiten, um konkrete Verkehrssituationen bedarfsgerecht zu lösen, wird immer größer.
- **Dezentralisierung:** Lokale Knotensteuerungen werden immer umfassender mit Detektions-, Kommunikations- und Rechentechnik ausgestattet, um den Verkehr vor Ort noch präziser zu erfassen und möglichst fahrzeugfein zu regeln.

Offline geplante Festzeitprogramme können bestenfalls tageszeit- oder verkehrsabhängig ausgewählt werden. Dagegen führen verkehrsadaptive Verfahren ihre Regelgrößen von Umlauf zu Umlauf kontinuierlich nach. Klassischerweise werden die drei Parameter Umlaufzeit, Freigabezeitanteil und Versatz optimiert. Ein Verfahren, das diesen Ansatz exemplarisch verfolgt, ist SCOOT [1]. SCATS [2] geht noch einen Schritt weiter und bestimmt in Abhängigkeit der Verkehrslage, welche Netzknoten paarweise miteinander in Koordination treten. Hierarchische Netzsteuerungen, wie z. B. MOTION [3] oder UTOPIA / SPOT [4], verwenden unterschiedliche Zeitskalen: Auf der obersten Ebene werden alle 5 bis 15 Minuten strategische Rahmenpläne angepasst, innerhalb derer darunter liegende Ebenen auf lokale Verkehrsbedingungen operativ und taktisch reagieren können. Darüber hinaus können moderne Steuerungen bedarfsgerecht Phasen dehnen, einschieben oder tauschen. Die Phaseneinteilung und -abfolge selbst einer Optimierung zu unterziehen, gelingt beispielsweise in TRAVOLUTION [5] mit Genetischen Algorithmen. Mit regelbasierten Steuerungen kann der Verkehrsablauf auf lokaler Ebene innerhalb gewisser Rahmenvorgaben frei gestaltet werden. Hierzu können mit Hilfe zahlreicher Tools, wie z. B. VS-PLUS, LISA+ und Sitraffic Office, beliebig komplexe Entscheidungs- und Steuerungslogiken zur Signalprogrammabbildung realisiert werden. Diese Verfahren berechnen aus den mit Induktions-, Magnetfeld-, Video- und anderer Sensorik gewonnen Verkehrskenngrößen situations- und bedarfsgerechte Freigabezeiten. Die rechtzeitige Reaktion auf zufließende Verkehre setzt eine Vorausermittlung von Fahrzeugankünften voraus. Dies wird durch weiter stromaufwärts der Haltelinie befindliche Messquerschnitte oder durch die Vernetzung benachbarter Knotensteuerungen erreicht. Aktuelle Entwicklungen finden im Kontext Kooperativer Systeme [6, 7] statt, deren Ziel es ist, auch das Fahrverhalten einzelner Fahrzeuge in den Regelprozess einzubeziehen.

Gemein ist den hier erwähnten Verfahren, dass sie sich bei der Steuerung von Stadtnetzen am Leitbild der „Koordination“ orientieren und damit an der Idee festhalten, den Fahrzeugverkehr in Kolonnenform entlang vorab geplanter Grünbänder zu führen. ÖV, Radfahrer und Fußgänger fügen sich allerdings nur schwer in dieses Konzept ein. Zu unterschiedlich sind deren Geschwindigkeiten, zu variabel die Fahrgastwechselzeiten an Haltestellen und zu spontan das Fußgängeraufkommen. Diese nicht weniger wichtigen Verkehrsarten benötigen statt Grünbänder vielmehr eine bedarfsgerechte und flexible Einbindung in den Verkehrsablauf. Doch netzweit Kolonnen zu koordinieren und *gleichzeitig* flexibel auf lokale Anforderungen zu reagieren, ist methodisch schwer zu vereinen. Die Netzsteuerungen lösen diesen Zielkonflikt typischerweise, indem sie zuvorderst den Rahmen der

netzweiten Koordinierung optimieren, und erst nachgeordnet beispielsweise optionale oder variable Grünzeitfenster einbringen, um bei lokalen ÖV- oder Fußgängeranforderungen flexibel Phasen einzuschieben bzw. verlängern zu können [8]. Aber dieser Konflikt lässt sich auch auf umgekehrte Weise lösen, nämlich indem das lokale Verkehrsgeschehen an jedem einzelnen Knoten derart vorausschauend und flexibel abgewickelt wird, dass alle Verkehre im Netz davon profitieren. Diesen Weg geht die Selbst-Steuerung.

## **1.2. Grundidee**

Die Selbst-Steuerung ist die konsequente Umsetzung einer voll-verkehrsabhängigen, lokal optimierenden Lichtsignalsteuerung, die den Verkehrsablauf „von selbst“, d. h. „ohne Vorgabe eines Planers“, so gestaltet, dass eine gewichtete Summe aus modellbasiert geschätzten Wartezeiten und Stopps über die nächsten zwei Minuten minimal ist. Der Spielraum für Signalbildwechsel ist ausschließlich durch Mindestgrün-, Mindestrot-, Zwischen-, und Versatzzeiten begrenzt. Maximale Rotzeiten werden als weiche Randbedingung berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.3). So können Signalgruppen entsprechend ihrer Verträglichkeit beliebig miteinander kombiniert werden. Beispielsweise bekommt der Fußgänger das eine Mal gleichzeitig mit dem dazu (bedingt) verträglichen Linksabbieger Grün, das andere Mal mit der parallel geführten Straßenbahn. Auch soll eine herannahende Kolonne nicht stoppen müssen, nur weil die letzte Freigabe gerade erst dreißig Sekunden her ist. Die unterschiedlichen Verkehrsarten werden auf methodisch gleiche Weise berücksichtigt, lediglich mit spezifischer Gewichtung: So kann die Wartezeit eines Busses die mehrerer Pkw aufwiegen und der Stopp eines Fußgängers geringer gewichtet werden als das Anhalten und Neuanfahren eines Kraftfahrzeugs. Innerhalb der abgesteckten Randbedingungen und unter Maßgabe der Zielgewichtung entsteht der Verkehrsablauf aus der aktuell erfassten Situation heraus als Ergebnis der lokalen Optimierung. Dass trotzdem Kolonnen dynamisch durchs Netz geführt werden, ist kein Widerspruch, sondern die Konsequenz, wenn damit Wartezeiten und Stopps vermieden werden.

## **1.3. Theoretische Vorarbeit**

Die Grundidee der Selbst-Steuerung wurde erstmals als Dissertationsschrift [9] ausformuliert und anhand einfacher Testszenarien simulativ und teils auch analytisch erprobt. Wie dort gezeigt werden konnte, schöpft die Selbst-Steuerung großes Potenzial daraus, dass sie tendenziell weniger Grünzeiten ungenutzt verstreichen lässt und häufiger zwischen den Strömen hin- und herschaltet. Da auf zufällige Nachfrageschwankungen kapazitätsausgleichend reagiert werden kann, streben die mittleren Bedienfolgezeiten unter idealisierten Bedingungen sogar gegen die theoretische Mindestumlaufzeit.

Die prinzipielle Machbarkeit wurde in einer realitätsnahen Simulationsstudie an einem komplexen Teilnetz von Dresden nachgewiesen [10]. Im Vergleich zu einer VS-PLUS-Steuerung, die in derselben Simulationsumgebung optimiert wurde, konnten in dieser Studie die Verlustzeiten aller Verkehrsarten nicht nur im Mittel reduziert werden, sondern auch in ihrer Varianz. Diese wichtige Beobachtung bestätigt die These von Gier u. a. [11], dass verkehrsabhängige Steuerungen nachfragebedingte Fahrzeitschwankungen reduzieren können: Gerade deshalb, weil die Signalzeiten nicht feststehen, sondern bedarfsgerecht angepasst werden, erhöht sich die Zuverlässigkeit des Verkehrssystems. Ein anderes Ergebnis der Simulationsstudie war, dass sich aufgrund der geringeren Bedienfolgezeiten deutlich mehr und folglich kleinere Kolonnen als im Referenzfall durch das Netz bewegen. Fußgänger und Radfahrer profitierten davon mit häufigeren Freigaben, und für Busse oder Straßenbahnen brauchten weniger Fahrzeuge stoppen.

Was bislang nur nach akademischen Gesichtspunkten zu beurteilen war, wird in Kapitel 3 den Anforderungen der Praxis unterzogen. Kapitel 4 stellt die Ergebnisse des Praxistests vor, und Kapitel 5 diskutiert die Potenziale und Perspektiven zur Übertragung auf andere Straßennetze. Das folgende Kapitel skizziert zuvor das methodische Grundkonzept.

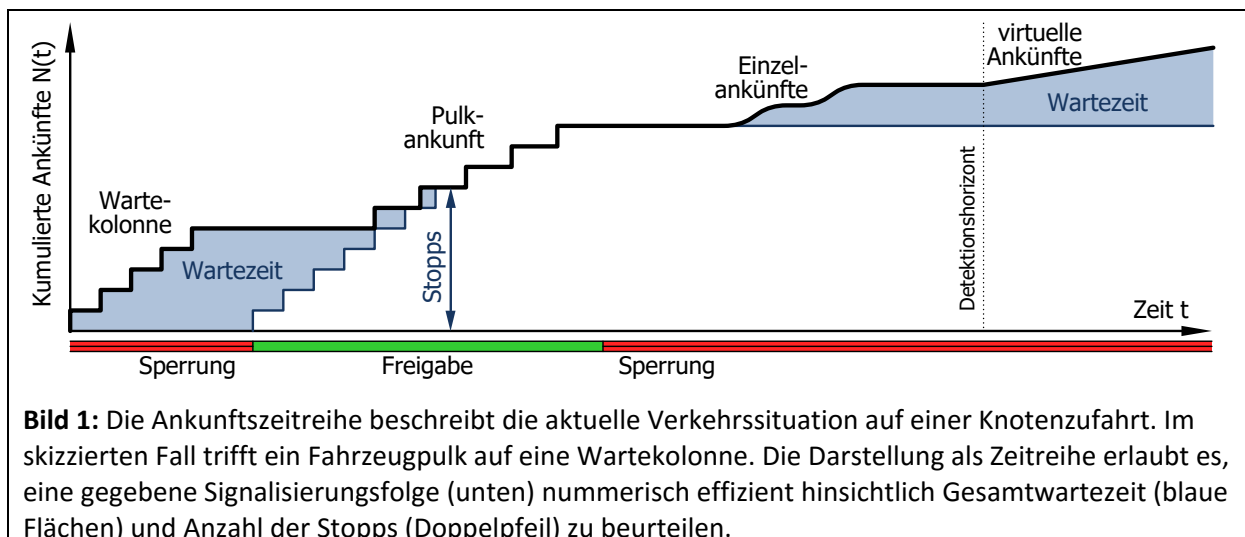
## 2. Methodik

Die Selbst-Steuerung realisiert das Paradigma einer multivariaten modellprädikativen Regelung: Auf der einen Seite steht ein mikroskopisches Modell zur Ankunftsprognose, das sich mit Detektionsimpulsen, Meldetelegrammen und anderen Erfassungsgrößen des aktuellen Verkehrsgeschehens fortlaufend aktualisiert und korrigiert. Auf der anderen Seite steht ein lokales Optimierungsverfahren, das sekundlich die beste Signalisierungsfolge auswählt und auf den Verkehr anwendet, womit sich der Regelkreis schließt.

### 2.1. Mikroskopische Ankunftsprognose

Von Art und Ort der Erfassung ist abhängig, wie exakt und wie weit im Voraus sich die Ankünfte auf den Knotenzufahrten prognostizieren lassen. Busse und Bahnen setzen üblicherweise eine Serie von Meldetelegrammen ab, und Fahrzeuge des MIV überfahren meist eine oder mehrere Induktionsschleifen nacheinander. Neben diesen Detektionsereignissen eignen sich auch andere Ereignisse, wie z. B. Abflüsse an Nachbarknoten oder Fahrgastwechsel an Haltestellen, um Fahrzeug- bzw. Fußgängerankünfte vorherzusagen. Zur konkreten Ankunftsprognose schätzt die Selbst-Steuerung für jeden Fahrstreifen eine eigene Zeitreihe  $N(t)$ , die angibt, wie viele Fahrzeuge (bzw. Fußgänger oder Radfahrer) innerhalb der nächsten  $t$  Sekunden die Haltelinie erreichen könnten. Bild 1 zeigt eine solche Zeitreihe. Eine Stufe bei  $t$  zeigt eine Ankunft in  $t$  Sekunden an. Wartekolonnen bzw. Pulkankünfte erkennt man an mehr oder weniger steilen Treppenverläufen, wobei die Treppenhöhe die Fahrzeugzahl angibt. In der Zeitreihe lassen sich auch unsichere Informationen abbilden. Falls die Fahrzeit beispielsweise bei weit entfernter Detektion breit streut, können anstelle der Treppenstufen auch die kumulierten Zufallsverteilungen überlagert werden. Bei fehlender oder unvollständiger Erfassung wird die Zeitreihe mit der virtuellen Zuflussrate fortgeschrieben bzw. überlagert.

Die Ankunftsprognose wird infolge eintretender bzw. ausbleibender Detektionsereignisse dynamisch aktualisiert. Dies geschieht mit Hilfe dreier Teilmodelle, je eins für den Zufluss, die Warteschlange und den Abfluss. Für jedes Teilmodell gibt es einen Katalog an Modellvarianten, aus dem im Zuge der Konfiguration je nach Verkehrsart und Detektionslage die für jeden Fahrstreifen treffendste ausgewählt und parametrisiert werden kann. Beispielsweise eignet sich für Fahrstreifen mit Querschnittsdetektoren (zu denen auch ÖV-Meldepunkte gehören) das Ketten-Zuflussmodell: Jedes Detektionsereignis meldet eine Ankunft, die entlang der Kette innerhalb plausibler Fahrzeitfenster weitergereicht wird. Dieses kann im einfachsten Fall mit einem Punkt-Warteschlangenmodell kombiniert werden: Die angenommene Zahl wartender Fahrzeuge erhöht sich mit jeder erwarteten Ankunft an der Haltelinie, und sie erniedrigt sich entsprechend eines Abflussmodells, beispielsweise mit jeder detektierten Überfahrt. Zur Korrektur von Fehldetektionen werden die Modelle mit unterschiedlichen Heuristiken ergänzt. Beispielsweise wird eine Warteschlange als geleert angenommen, sobald am Abflussdetektor eine untypisch große Grenzzeitlücke überschritten wird.



**Bild 1:** Die Ankunftszeitreihe beschreibt die aktuelle Verkehrssituation auf einer Knotenzufahrt. Im skizzierten Fall trifft ein Fahrzeugpulk auf eine Wartekolonne. Die Darstellung als Zeitreihe erlaubt es, eine gegebene Signalisierungsfolge (unten) numerisch effizient hinsichtlich Gesamtwartezeit (blaue Flächen) und Anzahl der Stopps (Doppelpfeil) zu beurteilen.

## 2.2. Lokale Optimierung

Die Ankunftszeitreihen erlauben eine verkehrsartübergreifende Bewertung möglicher Signalisierungsfolgen hinsichtlich Wartezeiten und Stopps. Das lokale Optimierungsverfahren tastet den Lösungsraum stichprobenartig ab und wendet die beste gefundene Lösung an. Dass diese ein globales Optimum darstellt, ist nicht garantiert. Die Selbst-Steuerung versucht, sich dem Optimum anzunähern, indem sie für den aktuell wahrscheinlichsten Verkehrszustand eine möglichst große Zahl an möglichst guten Lösungen erzeugt und bewertet. Zur Steigerung der numerischen Effizienz werden dabei u. a. folgende Prinzipien eingesetzt:

- Es werden von vorherein ausschließlich gültige Lösungen erzeugt. Sobald für eine Signalgruppe eine Freigabezeit gesetzt wurde, werden beispielsweise sofort die potenziellen Freigabefenster der dazu unverträglichen Signalgruppen gekürzt.
- Die Bereiche des Lösungsraums werden a-priori heuristisch bewertet. So werden manche Bereiche häufiger abgesucht, beispielsweise solche mit vollständiger Warteschlangenleerung und wenig ungenutzter Grünzeit.
- Die Tiefensuche im hinteren Teil einer Signalisierungsfolge wird abgebrochen, wenn bereits die Anfangsfolge schlechter bewertet ist als die bisher beste Gesamtfolge (Branch-and-Cut).

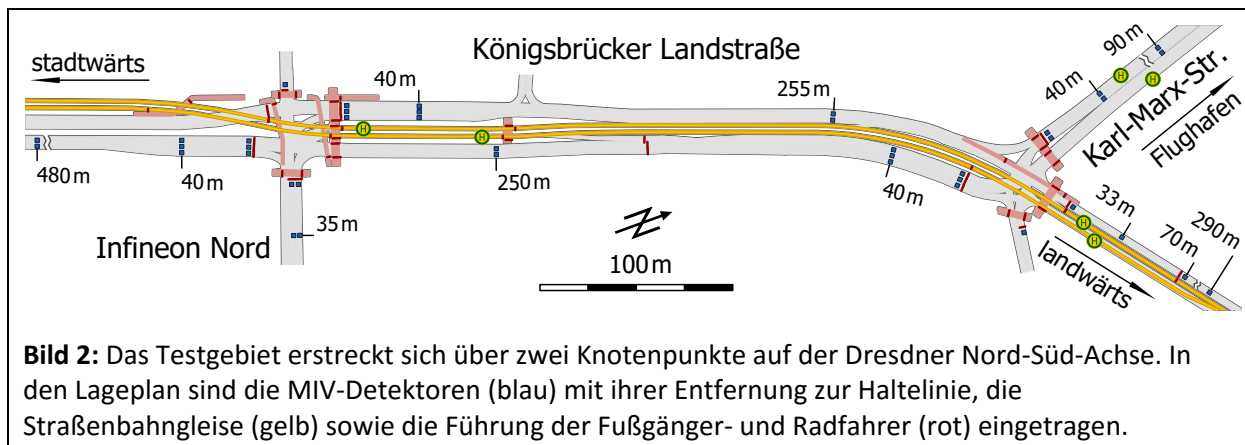
So spielt das Optimierungsverfahren die Varianten, ob beispielsweise wartende Linksabbieger noch vor einer dazu unverträglichen Kolonnenankunft Grün erhalten oder erst danach, selbständig durch und entscheidet sich für die mit bester Güte. Zuletzt sei noch auf drei Besonderheiten der Optimierung hingewiesen: (a) An einem Knoten mit vollständig zueinander unverträglichen Warteschlangen lässt sich die wartezeitoptimale Lösung direkt aus einem Prioritätsindex ableiten [12]. Unvollständige Warteschlangenleerung ist in diesem Fall niemals optimal. (b) Falls Signalgruppen jedoch miteinander kombiniert werden können, kann es unter Umständen wartezeitoptimal sein, eine Warteschlange im Zuge mehrerer Freigaben zu leeren [13]. (c) Aufgrund des beschränkten Horizonts kann eine lokale Optimierung zu besonders schlechten Lösungen führen, bei denen sich beispielsweise Warteschlangen gegenseitig aufschaukeln und immer länger werden. Ein lokales Stabilisierungsverfahren löst dieses Problem grundsätzlich [14]. Es ist der lokalen Optimierung im Sinne eines Supervisors übergeordnet und greift gegebenenfalls ein, um alle Ströme häufig und lange genug mit Grün zu versorgen.

## 3. Umsetzung

Die Selbst-Steuerung wird an zwei benachbarten Kreuzungen entlang der Königsbrücker Landstraße im Dresdner Norden prototypisch erprobt. Bild 2 zeigt das Testgebiet. Entscheidend für die Auswahl des Gebietes war einerseits, dass es in seiner Größe und Komplexität überschaubar ist, aber andererseits auch, dass dort viele teils komplizierte verkehrliche Besonderheiten vorliegen.

### 3.1. Verkehrliche Besonderheiten

Die Königsbrücker Landstraße verbindet den Dresdner Norden mit dem Stadtzentrum. Morgens bewegen sich zur Spitzenstunde ca. 900 Fahrzeuge stadtwärts, während ca. 500 aus der Stadt kommen. Knapp die Hälfte dieser Verkehrsmenge biegt aus der Karl-Marx-Straße ein bzw. in diese ab. Am Nachmittag dominiert der aus der Stadt kommende Verkehr und die Zahlen kehren sich um. Die Schichtwechsel in den Gewerbegebieten, von denen sich zahlreiche in direkter Nähe zum Untersuchungsgebiet befinden, verursachen ausgeprägte Wechsel der Verkehrslasten. Dies betrifft ebenso die Radfahrströme parallel zur Königsbrücker Landstraße sowie die Fußgängeraufkommen an den Haltestellen. Eine Straßenbahn- und zwei Buslinien verkehren tagsüber im 10- bzw. 20-Minuten-Takt. Die Bahngleise verlaufen entlang der Königsbrücker Landstraße teils neben, zwischen und auf den Richtungsfahrbahnen. Die Busse nutzen bis auf den Haltestellenbereich bei Infineon Nord die Fahrbahn. Diese Besonderheiten erfordern die Signalisierung eines Bahnübergangs, einer Busschleuse und zweier dynamischer Zeitinselschaltungen.



### 3.2. Technischer Aufbau

Die Selbst-Steuerung läuft an jeder der beiden Anlagen auf einem eigenständigen Industrie-PC (Beckhoff CX2030), der einseitig die Detektionsimpulse empfängt und ausgangseitig die aktuell berechneten Freigabezustände bereitstellt. Dieser ist an ein Siemens-Steuergerät (C940VP) angeschlossen, das diese Zustände sekundlich ausliest und nach erfolgreicher Gültigkeitsprüfung zur Signalgruppenansteuerung weiterleitet. Vor der Inbetriebnahme wurden insgesamt 14 Detektoren (12 Induktionsschleifen und 2 Magnetsensoren) nachgerüstet. Die ursprünglich vorhandenen Induktionsschleifen, die sich maximal 45 m vor den Haltelinien befinden, reichen zur rechtzeitigen Erfassung herannahender Fahrzeugkolonnen nicht aus. Hierfür sollte der Detektionshorizont größer als Mindestfreigabe- plus Zwischenzeit der konkurrierenden Ströme sein, d. h. typischerweise größer als 15 Sekunden in den Hauptrichtungen. Auf der anderen Seite erhöht sich mit dem Detektorabstand auch die Unsicherheit der Fahrzeitprognose. Die gewählten Entfernungen um 250 m haben sich als guter Kompromiss erwiesen.

### 3.3. Konfiguration

Die Konfiguration der Selbst-Steuerung ist gleichbedeutend mit einer strukturierten Beschreibung der Signalgruppen und der ihr zugehörigen Fahrstreifen. Während die Eigenschaften und Abhängigkeiten der Signalgruppen wie üblich u. a. durch Mindestgrün-, Mindestrot- und Zwischenzeiten festgelegt werden, stellt die Spezifikation der Fahrstreifen eine Besonderheit der Selbst-Steuerung dar. Auf dieser Ebene werden die Modellvarianten zur Ankunftsprognose ausgewählt (vgl. Abschnitt 2.1) sowie die Wartezeit- und Stoppgewichte eingestellt (vgl. Tabelle 1).

Verkehrsart	Wartezeitgewicht	Stoppgewicht
Pkw und Lkw	1 s	5 s/Stop
Bus	15 s	30 s/Stop
Straßenbahn	50 s	30 s/Stop
Fußgänger (Fahrbahnrand)	1 s	0 s/Stop
Fußgänger (Mittelinsel)	5 s	20 s/Stop
Radfahrer	1 s	10 s/Stop

**Tabelle 1:** Die fahrstreifenfeine Gewichtung von Wartezeiten und Stopps ist frei wählbar. Mit den angegebenen Werten wird erreicht, dass Straßenbahnen außer bei Anschlussgewährung keine Verzögerung erfahren, Busse kleinere Fahrzeugkolonnen dominieren und Fußgänger progressiv über Mittelinseln geführt werden.

Teilweise wurde die Gewichtung zusätzlich an Ereignisse gekoppelt, um z. Bsp. folgende Vorgaben zu realisieren:

- Fahrgast zur Haltestelle: Fordern Fußgänger an einer Furt an, die zu einer Haltestelle führt, so wird ihr Gewicht verfünffacht, wenn sich ein „ÖV-Fahrzeug im Haltestellenbereich“ befindet.
- Anschlusssicherung: Der vom Flughafen kommende Bus bringt in der Regel Fahrgäste, die in eine stadtwärtige Straßenbahn umsteigen möchten. Am Knoten vor der Umstiegshaltestelle wird das Gewicht der Straßenbahn auf null gesetzt, wenn sich ein „Bus in Annäherung“ befindet. Landwärts ist die Straßenbahn der Zu- und der Bus der Abbringer, weshalb hier der Bus bei einer „Straßenbahn in Annäherung“ warten muss.
- Warteschlangenräumung: Eine dynamische Zeitinsel (an der Haltestelle vor der Karl-Marx-Straße stadtwärts) hält den Kraftfahrzeugverkehr zurück und sichert dadurch den Fahrgastwechsel über die Fahrbahn. Doch schon bei „Annäherung einer Straßenbahn“ versucht die Selbst-Steuerung, eine gegebenenfalls im Haltestellenbereich befindliche Fahrzeugschlange zu räumen, indem sie ihr Gewicht verfünffacht.
- Wartezeitbegrenzung: Damit auch ein einzelnes Fahrzeug aus der Nebenstraße nicht zu lange bei Rot warten muss, wachsen die Wartezeitgewichte exponentiell mit der verstrichenen Wartezeit an. Der Wachstumsfaktor ist so gewählt, dass Wartezeiten größer als 90 s (maximal 120 s bei Verkehrsspitzen) praktisch nicht auftreten.

Des Weiteren werden die Fahrstreifen mit ungefähren Flussstärken versorgt, die verkehrsabhängig nachgeschätzt werden und bei Detektorausfällen als virtuelle Ströme herangezogen werden. Umlaufzeiten, Phaseneinteilungen oder explizite Ablauflogiken müssen – dem Grundsatz der Selbst-Steuerung folgend – nicht festgelegt bzw. entworfen werden.

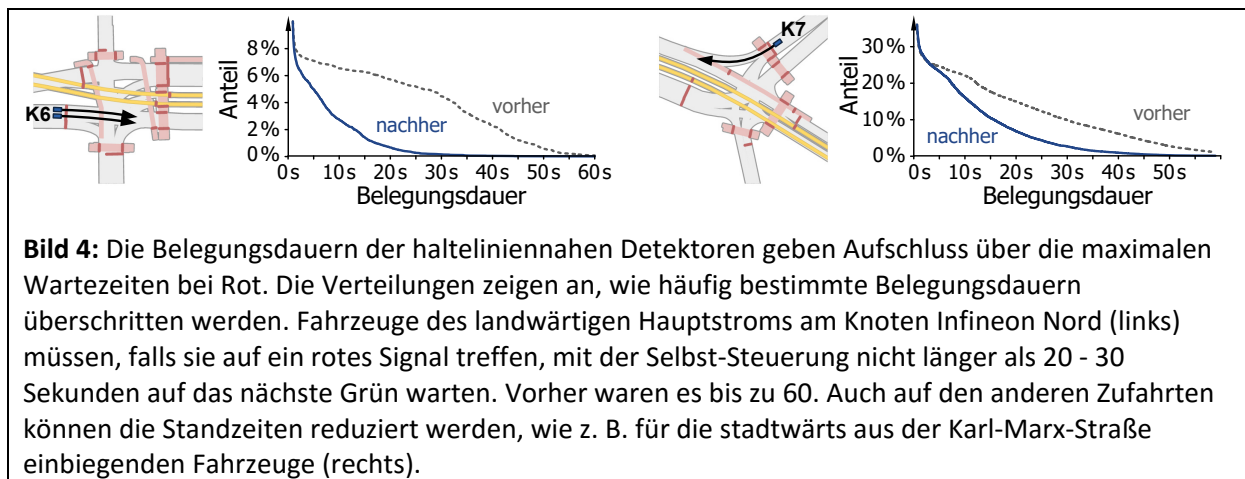
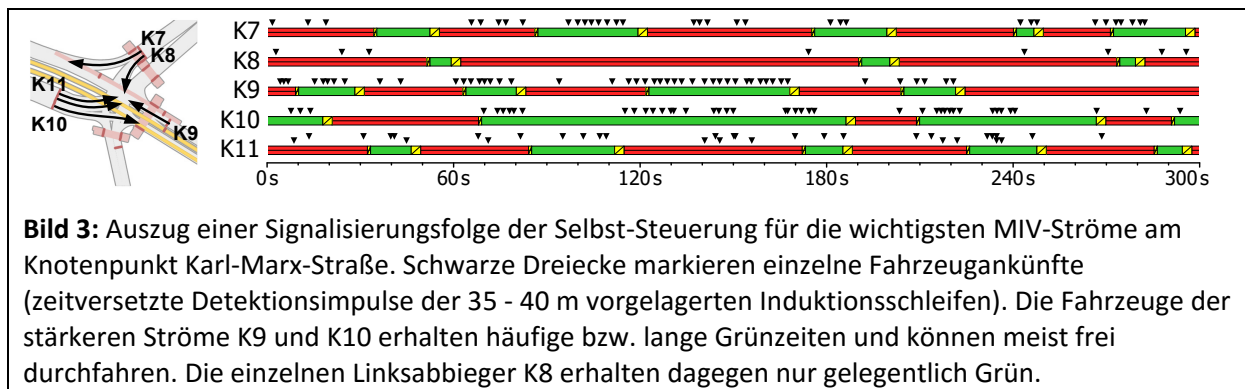
## 4. Ergebnisse

Ursprünglich wurden die beiden Anlagen mit einer verkehrsabhängigen VS-PLUS-Steuerung (Version 6.2.5) betrieben. Sie beruht auf tageszeitabhängigen Rahmenplänen mit 80 bzw. 100 Sekunden Umlaufzeit, die mit vier weiteren stadtwärts gelegenen Anlagen über gemeinsame Grünbänder in beide Richtungen koordiniert sind. Zur Bevorrechtigung der ÖV-Ströme sehen die Rahmenpläne für diese bis zu drei optionale Freigabezeitfenster je Umlauf vor. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen, wurden die VS-PLUS-Parameter vor der Erhebung von einem Ingenieurbüro auf Grundlage aktueller Nachfragedaten neu kalibriert und hinsichtlich des Verkehrsablaufs neu optimiert.

VS-PLUS und Selbst-Steuerung verfügen über unterschiedliche methodische Grundausstattungen. Beispielsweise bewertet VS-PLUS die Dringlichkeit der Verkehrsströme anhand sogenannter Prioritätswerte, die je nach Parametrierung infolge einer Wartezeitüberschreitung Zuschläge erhalten können. Im Unterschied dazu versucht die Selbst-Steuerung, die konkreten Ankunftsprofile quantitativ abzuschätzen. Damit kann sie unterscheiden, ob zwei oder zehn Fahrzeuge anfordern, und dies bei der Signalisierung explizit berücksichtigen. Auf der anderen Seite hat die Selbst-Steuerung kein stützendes Rahmenprogramm. Allein die Verkehrssituation bestimmt, welche Ströme wann und wie lange Grün erhalten.

### 4.1. Verkehrsablauf

Die Selbst-Steuerung wählt die Signalgruppenkombinationen und -abfolgen flexibel aus. Wie Bild 3 zeigt, passen sich die Freigabezeiten dadurch eng an die teils einzeln und teils als Kolonne ankommenden Verkehre an. Die anfänglichen Bedenken, dass die teils fehlerbehaftete Erfassung zu ungünstigen Signalbildwechseln mit zu kurzen Grünzeiten führt, können nicht bestätigt werden. Obwohl für die beiden Magnetsensoren (im Zufluss von K3) eine Erfassungsrate kleiner 70 % ermittelt wurde, werden größere Fahrzeugkolonnen sicher erkannt. Fehlmessungen werden dort von den halteliniennäheren Induktionsschleifen, die wesentlich genauer detektieren, zuverlässig korrigiert.



Auch die Bedenken, dass die Minimierung der mittleren Wartezeiten unter Umständen zu extrem langen Einzelwartezeiten führt, kann widerlegt werden: Die maximalen Standzeiten sind sogar deutlich gesunken, wie die Statistik der Belegungsdauern von haltelinien-nahen Detektoren in Bild 4 zeigt. Die Selbst-Steuerung versucht, ein bei Rot ankommendes Fahrzeug zeitnah in den Verkehrsablauf einzubinden. Vorher musste es auf die nächste planmäßige Freigabe im Umlauf warten.

## 4.2. Verkehrsqualität

Zur quantitativen Beurteilung der Verkehrsqualität wurden vor und nach Inbetriebnahme der Selbst-Steuerung (Mai bzw. November 2014) an je drei Werktagen (Di, Mi, Do) außerhalb der Schulferien über je drei Zeiträume (6:30 - 9:15, 12:30 - 14:30 und 15:45 - 18:30 Uhr) von 20 Messkräften Wartezeiten und Stopps erhoben. 30 Messfahrten pro Richtung ergänzten die Erhebung. Die verkehrliche Wirkung auf angrenzende Anlagen wurde nicht untersucht. Messaufbau und Auswertemethodik waren bei der Vorher- und Nachher-Erhebung identisch. Beide Male gab es weder Umleitungen oder andere Verkehrsbehinderungen im umliegenden Stadtgebiet, noch gab es außergewöhnliche Wetter-situationen. Trotzdem war die MIV-Verkehrsnachfrage während der Nachher-Untersuchung 10 % höher als vorher.

Die mittleren Wartezeiten der unterschiedlichen Verkehrsarten sind in Abbildungen 5 - 7 dargestellt. Dort sind für die in die Erhebung einbezogenen Verkehrsströme die über den gesamten Erfassungszeitraum aggregierten Ergebnisse der Vorher- und Nachher-Messung als graue bzw. blaue Balken gegenübergestellt. Die Breite der Balken skaliert mit der Verkehrsmenge.

Die Statistik in Bild 5 deckt sich mit der Beobachtung, dass Fußgängeranforderungen in der Regel innerhalb der nächsten größeren Lücke im kreuzenden Fahrzeugstrom bedient werden. Radfahrer fordern nur selten über die vorgesehenen Taster an, aber sie profitieren davon, dass die Selbst-Steuerung die parallel geführten Kraftfahrzeugströme, mit denen sie gleichzeitig signalisiert werden, tendenziell häufiger bedient.



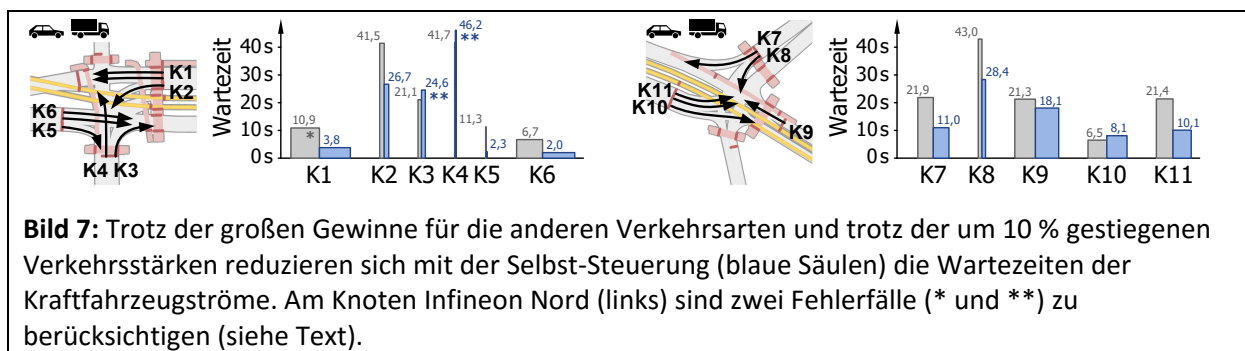
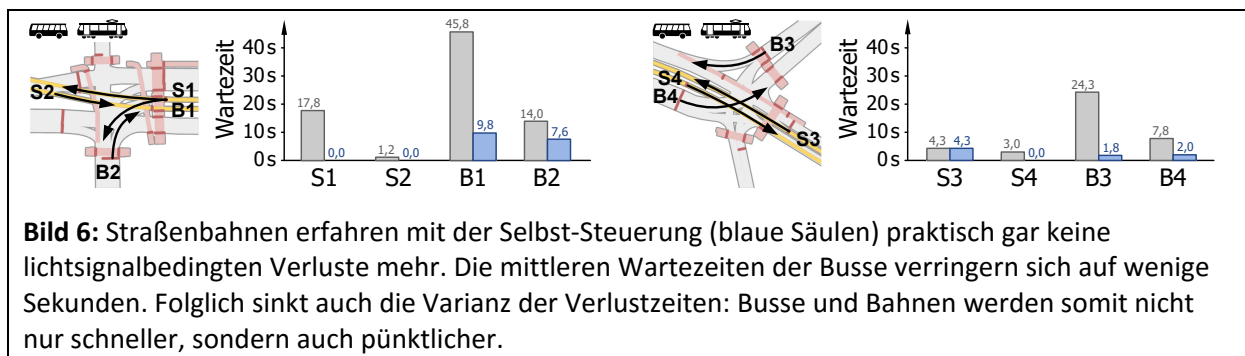
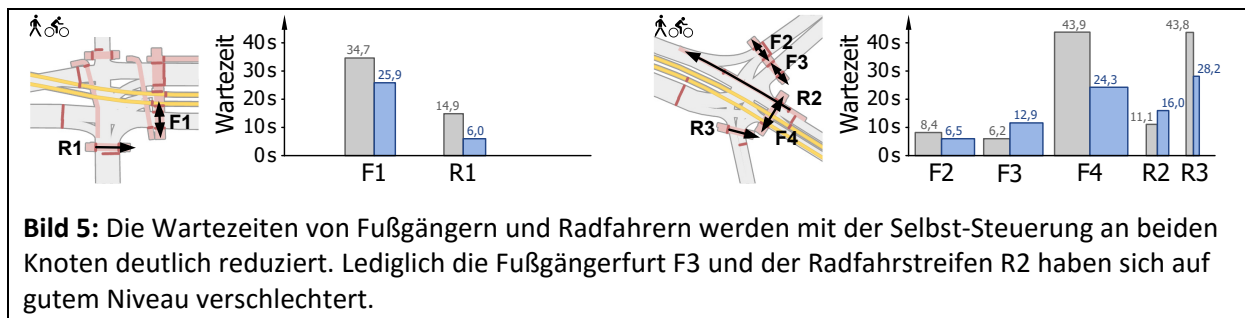
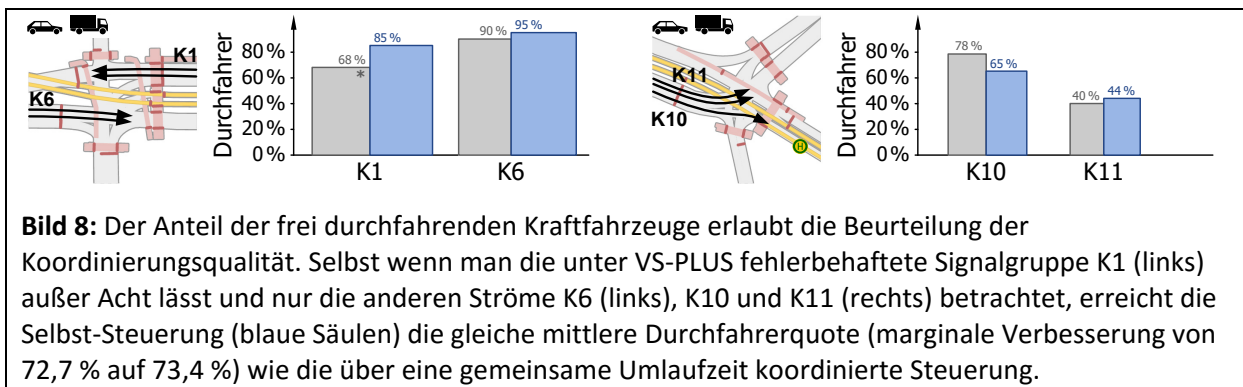


Bild 6 macht deutlich, dass es der Selbst-Steuerung auf außerordentliche Weise gelingt, den ÖV beinahe verlustfrei in den Verkehrsablauf zu integrieren. Hierin spiegelt sich einerseits die hohe Zielgewichtung (vgl. Tabelle 1) wider, mit der die Priorisierung des ÖV beabsichtigt war. Doch darüber hinaus offenbart sich in Bild 6 auch die Fähigkeit des Optimierungsverfahrens, vor Ankunft eines Busses oder einer Straßenbahn keine zwischenzeitintensiven Signalbildwechsel mehr zu starten, um tatsächlich freie Durchfahrten zu ermöglichen. Unmittelbar nach Abmeldung eines ÖV-Fahrzeugs schaltet die Selbst-Steuerung sofort wieder zu den anderen Strömen entsprechend ihrer Dringlichkeit um, was erklärt, warum diese Art der ÖV-Priorisierung nicht zwangsläufig zur Schlechterstellung der anderen Verkehre führen muss.

In Bild 7 ist zu sehen, dass auch für die Kraftfahrzeugströme Wartezeiteinsparungen zu verzeichnen sind. Dies ist das Resultat flexibler und bedarfsgerechter Signalbildwechsel, die jederzeit an die aktuelle Verkehrssituation angepasst sind. Bei wenig Verkehr sind kurze Bedienfolgezeiten zu beobachten, bei starker Auslastung dagegen lange Grünzeiten mit meist vollständiger Warteschlangenleerung. Auch Überlastszenarien wurden ausgewertet: In der Morgenspitze bilden sich am Zufluss von K9 (rechts) aufgrund der dynamischen Zeitinsel regelmäßig sehr lange Rückstaus. Vorher mussten 19 % der haltenden Fahrzeuge nochmals stoppen, mit der Selbst-Steuerung sind es nur noch 10 %. Zwei Fehlerfälle sind bei der Interpretation der Statistik für den Knotenpunkt Infineon Nord (links) zu berücksichtigen: (\*) Ein Fehler in der ÖV-Versorgung hatte unter VS-PLUS zu lange Rotzeiten für Strom K1 zur Folge. (\*\*) Der aus Infineon einbiegende Verkehr K4 und K5 war unter der Selbst-Steuerung zu schwach gewichtet. Beide Fehler wurden erst nachträglich behoben.

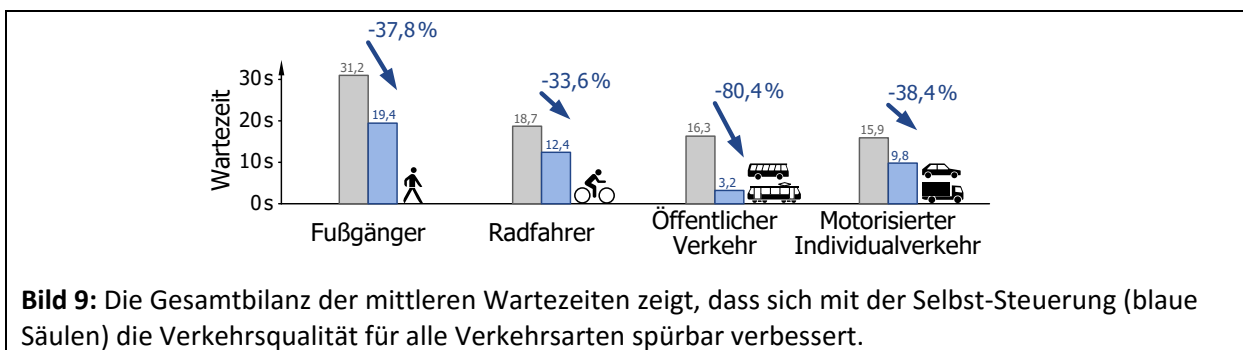


Zieht man die in Bild 8 gezeigten Durchfahrerraten mit hinzu, so lässt sich die Koordinierungsfähigkeit der Selbst-Steuerung beurteilen. Die aus der Stadt kommenden Kolonnen werden bei K6 (links) beinahe ohne Stopps durchgeleitet. Bei K10 (rechts) ist die Durchfahrerrate mit zwei Dritteln zwar immer noch hoch, aber aufgrund dessen, dass die Straßenbahn die Zeitinschaltung für den nachfolgenden Haltestellenbereich nun zu beliebigen Zeitpunkten aktivieren kann, geringer als vorher. Dagegen erfahren die Linksabbieger K11 (rechts) etwas mehr freie Durchfahrten als vorher. In stadtwärtige Richtung beginnt die Koordinierung aufgrund der unregelmäßigen Zuflüsse erst am Knotenpunkt Infineon Nord (links). Dort liegt die Durchfahrerrate bei K1 auf sehr hohem Niveau, aber ein Vergleich mit VS-PLUS ist aufgrund eines Fehlers (\*) nicht zulässig.

Beim Vergleich der anderen Ströme K6 (links), K10 und K11 (rechts) erreicht die dynamische Kolonnenführung die gleiche – und unter Einbeziehung der geringeren Wartezeiten sogar eine bessere – mittlere Koordinierungsqualität. Das Bemerkenswerte hierbei ist, dass die Koordinierung der beiden selbst-gesteuerten Knotenpunkte ausschließlich über den Verkehr selbst zustande kommt.

### 4.3. Gesamtbilanz

Bild 9 zeigt die Gesamtbilanz der mittleren Wartezeiten. Die großen Gewinne für alle Verkehrsarten rühren daher, dass die Selbst-Steuerung bereits vom methodischen Ansatz her alle an einem Knoten zulaufenden Verkehre in die Optimierung einbezieht: Fußgänger, Busse und Pkw sind gleichermaßen mit Stopp- und Wartezeitgewichten bewertete Größen, für die das Optimierungsverfahren gesamtheitlich die beste Lösung zu finden versucht. Wie hier zu sehen, gelingt durch die Abwägung der spezifischen Anforderungen in Form der Zielgewichtung die Beschleunigung des ÖV ohne Verschlechterung der anderen Verkehre.



## 5. Diskussion

Um zu beurteilen, inwieweit sich die positiven Ergebnisse des Praxistests an den beiden Verkehrsknoten im Dresdner Norden auf andere Straßennetze übertragen lassen, sind vielfältige Überlegungen und letztlich weitere Tests nötig. Grundsätzlich lässt sich aber feststellen, dass die Art und Weise, wie die Selbst-Steuerung mit der Komplexität des Verkehrs umgeht und auftretende Konflikte situativ zu lösen versteht, großes Potenzial zur Verkehrsverflüssigung bietet. Die Fähigkeit zur harmonischen ÖV-Priorisierung, zur dynamischen Kolonnenführung und zur Bewältigung einfacher Überlastszenarien konnte nachgewiesen werden. Die Grenzen des Ansatzes liegen also jenseits der hier untersuchten Knotenkomplexität und Verkehrssituationen, doch wo genau, ist noch zu prüfen. Im Folgenden sind einige Aspekte aufgelistet, die Anknüpfungspunkte und Ausgangsthesen für derartige Überlegungen bieten:

- Die Qualität einer auf Verkehrsdaten optimierenden Steuerung korreliert mit der Qualität der Datenerfassung. Weil die Selbst-Steuerung nur dann dynamisch Kolonnen führen kann, wenn die Zuflüsse hinreichend weit im Voraus erfasst werden, wurden im Untersuchungsgebiet 14 Detektoren nachgerüstet. Alternativ könnten benachbarte Anlagen lokal erhobene Verkehrsdaten miteinander austauschen, womit sich zusätzliche Detektoren unter Umständen erübrigen. Es bietet sich auch an, neuartige und hochauflösende Erfassungstechnologien (wie z. B. Video, FCD, C2X und Fußgängertracking) einzusetzen. Hierfür lässt sich der Katalog an Modellvarianten zur Ankunftsprognose erweitern.
- In engmaschigen oder übersättigten Straßennetzen können Rückstaus über vorgelagerte Knotenpunkte hinaus anwachsen und unter Umständen Querverkehre lahmlegen. Dies war im Untersuchungsgebiet nicht der Fall. Doch auch für diese Problemfälle gibt es effektive Lösungsansätze, wie z. B. das in [15, 16] vorgestellte selbst-organisierte Störfallmanagement, für deren Umsetzung die Selbst-Steuerung prädestiniert ist.
- Kreuzungsassistenten optimieren das Annäherungsverhalten einzelner Fahrzeuge an eine Kreuzung, was voraussetzt, dass dort die Rot- und Grünzeiten für eine gewisse Zeitspanne im Voraus bekannt sind. Bei der Selbst-Steuerung beträgt der Vorhersagehorizont ca. 5 – 15 Sekunden. Doch es wäre ohne Weiteres möglich, wie Santa u. a. [6] vorschlagen, einen zukünftigen Signalisierungszustand zu fixieren, sobald ein Fahrzeug eine daraus abgeleitete Empfehlung zum Abbremsen bzw. Beschleunigen erhalten hat.
- Aus Sicht der Verkehrsteilnehmer ist der Verkehrsablauf nicht mit Blick auf die Uhr vorherzusagen, wohl aber durch Beobachtung der Verkehrssituation: Drei Pkw halten an, damit der Bus frei durchfahren kann. Der Fußgänger wartet, solange eine Fahrzeugkolonne seine Furt passiert, und er bekommt sehr wahrscheinlich Grün, sobald die Straße wieder frei ist. Auf der anderen Seite ist nicht ausgeschlossen, dass sich ein bei Rot wartender Verkehrsteilnehmer darüber wundert, wenn ein anderer Verkehrsstrom bereits das zweite Mal Grün bekommt, oder dass es ihn überrascht, wenn er bereits dreißig Sekunden nach dem letzten Umschalten auf Rot schon wieder Grün bekommt. Gerade weil die Selbst-Steuerung die Verkehre so flexibel abwickelt, erfahren alle Verkehrsarten deutlich kürzere Wartezeiten. Dabei halten die Signalbildwechsel sämtliche in den Verkehrstechnischen Unterlagen festgelegten Sicherheitsvorgaben ein, was zu jeder Sekunde streng überwacht wird. Um die psychologische Wahrnehmung zu beurteilen, wäre eine systematische Beobachtung bzw. Befragung der Verkehrsteilnehmer wäre nötig.
- Aus Sicht des Betreibers hat die Selbst-Steuerung den Charakter einer „Black Box“, der er vertrauen muss, dass sie in jeder Situation das Richtige tut. Er kann mit der Zielgewichtung relativ einfach und genau einstellen, was ihm im Verkehrsablauf wie wichtig ist, doch die üblichen ablaufbestimmenden Parameter wie Umlaufzeiten oder Phasenabfolgen sind nicht vorgesehen. Gerade der Verzicht auf derartige Vorgaben ist der Grund für die hohe Flexibilität der Steuerung, und auch dafür, warum Morgen-, Mittags- und Nachmittagsverkehre keine gesonderte Konfiguration erfordern – ebenso wenig wie Umleitungsverkehre oder veränderte Nachfrageverteilungen.

Deshalb kann der Betreiber für selbst-gesteuerte Anlagen sogar einen geringeren Wartungsaufwand erwarten.

- Die Selbst-Steuerung eignet sich zur effektiven Umsetzung netzplanerischer Vorgaben. Für die Idee beispielsweise, die stadtweiten Verkehre auf strategisch ausgewählten Hauptachsen zu bündeln, eignen sich die Zielgewichte als direkte Stellgrößen. Unerwünschte Verkehre könnten – entsprechende Erweiterungen vorausgesetzt – gezielt gedrosselt werden, indem man deren Freigabe auf eine maximale Fahrzeugzahl je Minute beschränkt oder erst nach Ablauf einer Mindestwartezeit erfolgen lässt.

## 6. Zusammenfassung

Die Praxistauglichkeit der Selbst-Steuerung wurde an zwei Dresdner Verkehrsknoten nachgewiesen. Die Ergebnisse des Praxistests bestätigen die in vorausgegangenen Simulationsstudien aufgezeigten Potenziale zur harmonischen ÖV-Priorisierung und dynamischen Kolonnenführung. Anstatt ein Straßennetz als Ganzes zu koordinieren, verfolgt die Selbst-Steuerung den Ansatz, die Verkehrssituation an den einzelnen Netzknoten lokal zu erfassen und vor Ort konkret zu lösen. Im quantitativen Vergleich mit einer verkehrsabhängigen VS-PLUS-Steuerung erfahren Busse und Bahnen fast gar keine Verluste mehr, Fußgänger und Radfahrer warten ein Drittel weniger lang auf das nächste Grün, und der MIV profitiert mit geringeren Wartezeiten und gleich hoher Durchfahrersquote – obwohl die Verkehrsstärken unter der Selbst-Steuerung 10 % höher waren.

Die Selbst-Steuerung beruht auf einer simplen methodischen Grundstruktur: An jedem Knoten im Netz werden aus den verfügbaren Erfassungsgrößen mit Hilfe transparenter Modellbausteine Ankunftszeitreihen geschätzt, auf deren Basis ein leistungsstarkes Optimierungsverfahren bestmögliche Signalisierungsfolgen bestimmt. Die zu minimierende Zielgröße ist die gewichtete Summe aus Wartezeiten und Stopps über die nächsten zwei Minuten. Der Planer braucht nicht mehr auszuarbeiten, was in konkreten Situationen unter Beachtung aller komplexen Abhängigkeiten exakt geschehen soll. Stattdessen gibt er durch die Wahl der Zielgewichte vor, was ihm im Verkehrsablauf wie wichtig ist.

Die Selbst-Steuerung kann die komplexen Schwierigkeiten und Anforderungen realer Verkehrssysteme verlässlich lösen. Robuste Schätzmodelle gleichen fehlerhafte Messungen mit virtuellen Strömen aus und lassen fahrerindividuelle Streuungen bei Anfahrverzögerungen, Abstandsverhalten oder Reisegeschwindigkeiten innerhalb gewisser Grenzen zu. Auch bei der Signalgruppenansteuerung wurden spezifische Vorgaben umgesetzt, wie z. B. die RiLSA-konforme Freigabe bedingt verträglicher Ströme, die sichere Führung von Blinden über Mittelinseln, die Signalisierung eines Bahnübergangs sowie die Schaltung dynamischer Zeitinseln für Fahrgastwechsel an Haltestellen.

Mit diesen Ergebnissen bietet sich die Selbst-Steuerung als eine nachhaltige und skalierbare Lösung für den effizienten und wartungsarmen Betrieb von Lichtsignalanlagen unter realen Anforderungen und zur Erfüllung moderner Ansprüche an. Sie etabliert somit einen neuen Baustein für ein innovatives, leistungs- und zukunftsfähiges Verkehrsmanagement in Städten.

## Danksagung

Der Praxistest wurde durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG-Projekt Tr 1102/1-1) finanziell gefördert.

Besonderer Dank gebührt außerdem der Dresdner Verkehrsbetriebe AG, dem Straßen- und Tiefbauamt der Landeshauptstadt Dresden, der Siemens AG, der Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung sowie der Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr der TU Dresden.

Persönlich bedankt sich der Autor ganz herzlich bei Kathleen Tischler (TU Dresden), Frank Kirmse (DVB AG) und Swen Frühauf (Siemens AG) für die großartige Unterstützung.

## Literatur

- [1] Hunt, P. B. , Robertson, D. I., Bretherton, R. D., Winton, R. I. (1981) SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. Transport and Road Research Laboratory.
- [2] Lowrie, P. R. (1990) SCATS: A Traffic Responsive Method for Controlling Urban Traffic. Roads and Traffic Authority of New South Wales.
- [3] Busch, F., Kruse, G. (2001). MOTION for SITRAFFIC – A Modern Approach to Urban Traffic Control. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings. S. 61.
- [4] Turksma, S. (2001) An Overview of UTOPIA-SPOT Deployment in Northern Europe. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Transport Systems. Sydney.
- [5] Braun, R., Kemper, C., Weichenmeier, F. (2008). TRAVOLUTION – Adaptive Urban Traffic Signal Control with an Evolutionary Algorithm. Proceedings of the 4th International Symposium Networks for Mobility. Stuttgart.
- [6] Santa, C., Kath, J., Mathias, P., Schendzielorz, T. (2014). Potenziale kooperativer Lichtsignalsteuerung zur Steigerung der Verkehrseffizienz und -sicherheit. Straßenverkehrstechnik, Nr. 10, S. 676.
- [7] Gassel, C., Krimmling, J. (2013). Effects of Cooperative Traffic Signals on Tramway Operation. Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Dresden, Vol. 3, S. 301.
- [8] Steierwald, G. ; Künne, H.-D. ; Vogt, W. (2005). Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. Springer, Berlin.
- [9] Lämmer, S. (2007). Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken. Dissertation, TU Dresden.
- [10] Lämmer, S., Krimmling, J., Hoppe A. (2009). Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen - Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. Straßenverkehrstechnik, Nr. 11, S. 714.
- [11] De Gier, J., Timothy, M.G., Rojas, O. (2011). Traffic flow on realistic road networks with adaptive traffic lights. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P04008.
- [12] Lämmer S., Helbing, D. (2008). Self-Control of Traffic Lights and Vehicle Flows in Urban Road Networks. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P04019.
- [13] Lefeber, E., Lämmer, S., Rooda, J.E. (2008). Optimal control of a deterministic multiclass queuing system by serving several queues simultaneously. Systems and Control Letters, Nr. 60, S. 524.
- [14] Lämmer, S., Helbing, D. (2010). Self-Stabilizing Decentralized Signal Control of Realistic, Saturated Network Traffic. Santa Fe Working Paper, Nr. 10-09-019.
- [15] Lämmer, S., Treiber, M., Rausch, M. (2013). Inflow-regulating traffic light control to avoid queue-spillovers in urban road networks. Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Dresden, Vol. 3, S. 23.
- [16] Rausch, M. (2015). Ereignisorientierte Routenwahl in spontan gestörten Stadtstraßennetzen zur Anwendung eines selbstorganisierten Störfallmanagements. Dissertation, TU Dresden.