

Kommunikationsdatenbasierte, dezentrale Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen

Von der
Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Christian Priemer
geboren am 27.09.1977
aus Hannover

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Eingereicht am 01. April 2010

Disputation am 05. August 2010

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

INSTITUT FÜR VERKEHR UND STADTBAUWESEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
UNIV.-PROF. DR.-ING. BERNHARD FRIEDRICH

**Schriftenreihe
Heft 57**

Christian Priemer

**Kommunikationsdatenbasierte, dezentrale
Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen**

**SHAKER
VERLAG**

Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9863-0

ISSN 1615-2948

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„All models are wrong. But some are useful.“

- George E.P. Box -

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Leibniz Universität Hannover sowie in der Folge des Institutswechsels am Institut für Verkehr und Stadtbauwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Bernhard Friedrich für sein Vertrauen in meine Fähigkeiten, den mir gewährten Freiheiten, der Möglichkeit zur Promotion und seinen wertvollen fachlichen Anregungen. Ein herzlicher Dank gilt auch Herrn Professor Fritz Busch von der Technischen Universität München für die Übernahme des Koreferats.

Bedanken möchte ich mich zudem bei meinen ehemaligen Mitarbeitern des ivh, die mich sowohl fachlich als auch persönlich in meinem Werdegang positiv beeinflussten. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle meinen alten Weggefährten Jannis Rohde und meinen Mentor Dr. Stephan Hoffmann.

Diese Dissertationsschrift wäre ohne das Vertrauen und die Unterstützung meiner Familie, insbesondere meiner zukünftigen Frau Isabel Obendorf, nicht möglich gewesen – vielen Dank!

Christian Priemer

Kurzfassung

Die Zunahme der Verkehrsnachfrage im motorisierten Individualverkehr in urbanen Ballungsräumen in Verbindung mit restriktiven Flächenressourcen führt zu vielfältigen Verkehrsproblemen, die sich in verlängerten Reisezeiten, Anzahl an Halten und erhöhten Emissionen widerspiegeln. Die Qualität des Verkehrsflusses innerhalb städtischer Netze wird wesentlich von der Güte der Lichtsignalsteuerungen beeinflusst. Eine Möglichkeit, den negativen Auswirkungen entgegenzuwirken, besteht daher in der netzweiten Optimierung von signalisierten Knotenpunkten. Vor diesem Hintergrund werden weltweit zunehmend modellbasierte Netzsteuerungsverfahren eingesetzt. Die genaue Ermittlung bzw. Abschätzung der Verkehrslage in den einzelnen Zufahrten ist dabei Grundvoraussetzung für jedes Steuerungsverfahren.

Technische Fortschritte in den Bereichen der drahtlosen Kommunikation und GPS-Lokalisierung ermöglichen neue Möglichkeiten für die Detektion von Fahrzeugen innerhalb signalisierter Zufahrten. In Zukunft wird, basierend auf dem IEEE Standard 802.11p, eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen untereinander und mit Infrastrukturelementen möglich sein. Damit wird ein neues Datenpotential geschaffen, welches im Rahmen von Lichtsignalsteuerungen genutzt werden kann, um den Verkehrsfluss innerhalb städtischer Straßennetze zu verbessern. Wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist die frühzeitige und kontinuierliche Detektion von kommunikationsfähigen Fahrzeugen in den Zu- und Abflüssen von Lichtsignalanlagen. Kontinuierlich übermittelte Positions- und Geschwindigkeitsdaten sowie ggf. Routeninformationen vom Fahrzeug zu einem Access Point an der Lichtsignalanlage (V2I-Daten) stellen einen signifikanten Informationsgewinn dar, der zur Optimierung von Steuerungsverfahren genutzt werden sollte.

Im Rahmen der vorgelegten Dissertationsschrift wurde ein azyklisches, dezentrales Steuerungsverfahren entwickelt, welches das neue Datenpotential an V2I-Daten nutzt und die Freigabezeitdauern entsprechend der augenblicklichen Verkehrsnachfrage in den einzelnen Zufahrten optimiert. Es erfolgt kein Austausch von Informationen zwischen benachbarten Knotenpunkten oder mit einer übergeordneten taktischen Ebene. Trotz des dezentralen Ansatzes können nachweislich Koordinierungs- und Priorisierungsstrategien mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren für Fahrbeziehungen oder einzelne Fahrzeuge umgesetzt werden. Die Steuerung jedes Knotenpunkts erfolgt phasenbasiert. Die Zuordnung von Signalgruppen zu Phasen, die Bestimmung von Zwischenzeiten sowie die einzelnen Phasenübergänge werden im Vorhinein planerisch festgelegt. Die Anzahl der möglichen Phasen und Varianten an Phasenübergängen ist nicht beschränkt. Zu jedem Optimierungsintervall von $\Delta t=5s$ werden anhand von V2I-Daten die ent-

stehenden Warteschlangen für jede Phasenkombination für einen Optimierungshorizont von $4\Delta t=20s$ prognostiziert. Entsprechend der formulierten Zielfunktion wird diejenige Phasenfolge ausgewählt, welche die Gesamtrückstaulängen am Knotenpunkt minimiert.

Wesentlichen Einfluss auf die Qualität der neuen Lichtsignalsteuerung hat der Anteil an kommunikationsfähigen Fahrzeugen im betrachteten Netz, die so genannte Penetrationsrate. Daher wurde eine Methode entwickelt und in das Verfahren integriert, die anhand von wenigen kommunikationsfähigen Fahrzeugen in der Warteschlange eine zuverlässige Schätzung der Rückstaulängen anhand von V2I-Daten sicherstellt. Im Zuge geringer Penetrationsraten sinkt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass ein kommunikationsfähiges Fahrzeug innerhalb der Warteschlange eintrifft, ehe die entsprechende Zufahrt mit nicht-kommunikationsfähigen Fahrzeugen überstaut ist. In der Folge entstehen Rückstaus in benachbarte Knotenpunkte, die zu einem netzweiten Verkehrszusammenbruch in Folge mangelnder Detektion führen können. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen des entwickelten Steuerungsverfahrens zusätzlich Daten von haltliniennahen Anforderungsschleifen in den Knotenpunktzufahrten verwendet. Hierdurch können zudem maximale Wartezeiten in den Nebenrichtungen überwacht und sichergestellt werden.

Das entwickelte Steuerungsverfahren wurde im Rahmen umfangreicher Simulationsuntersuchungen im Labor getestet. Als Wirkungsmodell dient der mikroskopische Verkehrsflussimulator AIMSUN NG (TSS, 2007). Die Modellierung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur sowie die Implementierung des neuen Steuerungsverfahrens (inkl. Methode zur Rückstauschätzung) erfolgt über die definierte, offene Schnittstelle AIMSUN API-Modul in der Programmiersprache C++. Als Referenzsteuerung dient eine mit TRANSYT-7F (HALE, 2005) optimierte Festzeitsteuerung.

Abstract

The control of the increasing traffic volumes in cities worldwide is one of the main challenges of traffic engineering even today and especially in the future. Only intelligent control strategies can reduce the negative impacts of congested urban networks like increasing travel times, increasing number of stops and therefore high pollutant emissions. Due to their role as bottlenecks within urban road networks, optimizing the traffic flow at signalized intersections is one of the key factors for reducing the mentioned impacts. Vehicle actuated control in urban networks requires information of the current and future traffic state as accurate as possible. Technical advances in wireless communication and GPS-location offer new meaningful options for vehicle detection at signalized intersections like the early and continuous detection of approaching vehicles within the communication range. Based on this, arrival patterns can be forecasted reliably for each approach and traffic signal control can be optimized even before vehicles arrive at the stop line. The ongoing development and standardization of the technical framework for sending and receiving information between vehicles and the infrastructure like traffic signals (V2I-communication) are considered.

The presented traffic control method takes advantage of the benefits of V2I-communication data. Major aim of the new control method is to react on the current traffic situation and to adjust the green time durations and phase sequence very quickly. Therefore the strategy is designed as decentralized and phase-based like traditional traffic signal control methods but operates without common parameters like cycle times, offsets or other fixed timings. Each discrete time interval of $\Delta t=5s$ the control algorithm forecasts the future queue length for the next 20s by analyzing the received vehicles position and speed data and determines the optimal green time duration and phase sequence in order to reduce the total queue length at each intersection. The presented strategy is designed for networks and considers real planning constraints like inter-green times for pedestrians. Despite of the decentralized concept, the new approach provides methods for priority strategies and to coordinate neighbouring intersections.

The quality of the new traffic signal control mainly depends on the number of vehicles equipped with communication devices with respect to the total number of vehicles, the so called penetration rate. Therefore, various penetration rates are modelled to obtain the impact factor exactly. To reduce quality loss due to low or mid penetration rates a method for queue length estimation is integrated in the control algorithm. Due to decreasing penetration rates the probability drops

that vehicles with communication devices reach the communication range before the approach is congested. Hence, additional data of loop detectors (located in front of the stop lines) are processed additionally to detect and to serve vehicles without communication devices especially in minor directions. In order to analyze the performance of the new signal control, the method is embedded in the simulation environment of the microscopic traffic simulator AIMSUN NG (TSS, 2007). For reference TRANSYT-7F (HALE, 2005) is used.

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik der Lichtsignalsteuerung	5
2.1 Grundbegriffe der Lichtsignalsteuerung	5
2.2 Steuerungsverfahren.....	7
2.2.1 Festzeitsteuerung.....	7
2.2.2 Verkehrsabhängige Steuerungen	7
2.3 Beispiele für Netzsteuerungsverfahren	10
2.4 Methoden zur Erfassung und Schätzung von Rückstaulängen.....	14
3 Fahrzeugkommunikation in städtischen Straßennetzen	19
3.1 Funktionsweise.....	19
3.2 Einsatzfelder von Fahrzeugkommunikation in Städten	21
3.3 Konzepte für Lichtsignalsteuerungen unter Nutzung von Kommunikationsdaten	26
3.4 Nutzen von Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikationsdaten für Lichtsignalsteuerungen	28
3.5 Erforderliche Penetrationsraten für ausgewählte Applikationen.....	29
3.6 Positionierungsverfahren.....	31
4 Optimierungsverfahren	33
4.1 Allgemeines.....	33
4.2 Heuristiken	35
4.2.1 Hill-Climbing Algorithmus	35

4.2.2	Genetischer Algorithmus.....	36
4.3	Exakte mathematische Verfahren.....	37
4.3.1	Vollständige Enumeration.....	37
4.3.2	Dynamische Programmierung.....	37
4.4	Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen basierend auf den Methoden der Vollständigen Enumeration und Dynamischen Programmierung.....	38
4.5	Wahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens.....	42
5	Konzept des dezentralen Steuerungsverfahrens.....	45
5.1	Zielsetzung.....	45
5.2	Formulierung des Verfahrens.....	45
5.3	Optimierungsverfahren und Zielfunktion.....	46
5.4	Systemarchitektur.....	48
5.5	Bausteine des Steuerungsverfahrens.....	51
5.5.1	Lokales Verkehrslagemodell.....	51
5.5.2	Lokales Wirkungsmodell.....	64
5.5.3	Lokales Steuerungsmodell.....	72
6	Testumgebung.....	75
6.1	Simulationsmodell.....	75
6.2	Simulationsumfang.....	76
6.2.1	Testnetz.....	76
6.2.2	Verkehrsnachfrage.....	78
6.2.3	Modellierung des Verkehrsflusses innerhalb signalisierter Knotenpunkte.....	78
6.2.4	Lichtsignalsteuerungen.....	80
6.2.5	Modellierung der Fahrzeug-Infrastruktur Kommunikation.....	83
6.2.6	Modellierte Szenarios.....	84
7	Simulationsergebnisse.....	87
7.1	Bewertungsmethodik.....	87
7.2	Nachfrageszenario 1: Konstante Verkehrsnachfrage.....	87
7.2.1	Netzweite Betrachtung.....	88
7.2.2	Kantenfeine Betrachtung.....	94
7.3	Nachfrageszenario 2: Dynamische Schwankungen in der Verkehrsnachfrage.....	100
7.3.1	Netzweite Betrachtung.....	101
7.3.2	Kantenfeine Betrachtung.....	105
7.4	Fazit.....	109

8 Zusammenfassung und Ausblick	111
8.1 Zusammenfassung	111
8.2 Ausblick	115
Literatur	117
Abbildungsverzeichnis	123
Tabellenverzeichnis	127
Anhang	129
Verzeichnis des Anhangs	131