

New Approaches for Online Control of Urban Traffic Signal Systems

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

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

Dissertation

von
Tobias Pohlmann
geboren am 07.06.1977
aus Mannheim

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	11. Mai 2010
Disputation am	06. September 2010

Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich
	Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

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

**Schriftenreihe
Heft 58**

Tobias Pohlmann

**New Approaches for Online Control
of Urban Traffic Signal Systems**

**SHAKER
VERLAG**

Aachen 2011

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

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

Copyright Shaker Verlag 2011

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9862-3

ISSN 1615-2948

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagungen

Ich bedanke mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich für die Betreuung dieser Doktorarbeit. Während meiner Zeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Leibniz Universität Hannover und am Institut für Verkehr und Stadtbauwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig hatte ich die Möglichkeit, in zahlreichen fachlichen Gesprächen von seinem Wissen zu profitieren. Zudem hat er von Anfang großes Vertrauen in mich gesetzt und mir bei der Bearbeitung diverser Forschungsprojekte viele Freiräume gelassen. Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze für die Übernahme des Koreferats. Ihm verdanke ich außerdem meine Tätigkeit im Bereich des Verkehrswesens, mit dem ich im Rahmen meines Bauingenieurstudiums an der TU Darmstadt erstmalig in seinen Vorlesungen in Berührung kam.

Bei meinen ehemaligen Kollegen an beiden Instituten bedanke ich mich für die kollegiale und angenehme Atmosphäre und die zahlreichen Gespräche, die mir wertvolle Anregungen lieferten. Großen Dank schulde ich auch Anike Biener, die mir als studentische Hilfskraft mit viel Einsatz und Engagement bei der Durchführung zahlreicher Simulationsstudien, der Auswertung von Daten, der Anfertigung von Diagrammen und diversen weiteren Aufgaben eine große Hilfe war.

Weiterer Dank gebührt Luisa Cuppone sowie Ruth und Klaus-Peter Schäfer, die sich die Zeit nahmen, die fertige Arbeit in sprachlicher Hinsicht zu lesen und zu korrigieren. Die Verantwortung für verbleibende Germanismen und sonstige Fehler liegt allein bei mir.

Meinen Eltern danke ich, dass sie es mir durch mein Studium ermöglichten, den Weg hin zur Promotion einzuschlagen. Ein besonderer Dank geht an meine Verlobte Alexandra Kretz für die große Unterstützung insbesondere in der stressigsten Zeit kurz vor Abgabe der Arbeit sowie für das Durchlesen und Auffinden weiterer Fehler.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens mit der Fördernummer FR 1670/4-1. Dieses Projekt finanzierte in den Jahren 2008 und 2009 meine Drittmittelstelle an der TU Braunschweig und führte zu der vorliegenden Doktorarbeit. Dr.-Ing. Klaus Meffert und allen weiteren Entwicklern des Java Genetic Algorithms Package danke ich für die Bereitstellung dieser kostenlosen Java-Bibliothek, die in dieser Arbeit erfolgreich zum Einsatz kam.

Abstract

Traffic signal control is one of the key factors in urban traffic control. It directly influences the quality of traffic flow. Besides fixed time and vehicle-actuated control, so called Adaptive Traffic Control Systems (ATCS) have been developed in the past. These systems control a set of connected intersections in a network and aim at optimizing traffic signal control in real-time by continuously adapting the signalization at the intersections to the currently detected or estimated traffic demand in the network. Improvements of traffic modeling techniques and of computer power promote further development of such sophisticated systems. In this thesis a new ATCS prototype has been developed and evaluated. The development has been motivated by recent research.

Based on a comprehensive overview of the state-of-the-art of science and technology of traffic signal control the remaining need for research has been derived, followed by an overview of the conceptual design of the new ATCS prototype. The prototype employs a centralized concept and uses an optimization interval of 15 minutes, i.e. every quarter of an hour signal timings of all signalized intersections are optimized on a central computer and sent to the local controllers where the traffic signals are controlled accordingly.

The first major task that has to be performed at each interval is to estimate the traffic demand of the next optimization interval. It is assumed that all lanes at all signalized intersections are equipped with vehicle detectors. Based on the detector counts of previous time intervals and on reference traffic demand patterns, a forecasting module estimates the detector counts of the next interval. In a next step, these counts are used as constraints for the estimation of the overall traffic demand in the whole network. This demand comprises Origin-Destination flows, traffic volumes on different routes and on all links of the network. The demand estimation module is based on previous research which built on information theory. The method has been implemented and further generalized to be applicable in the framework of an ATCS. After application of the two modules, an estimate of the upcoming traffic demand in the whole network is available which can be used for optimization of signal settings,

The next two modules of the ATCS perform an adjustment of cycle length and phase durations and an optimization of offsets. The first is done by implementing classic formulas for the calculation of fixed time signal plans. The module calculates a network-wide common cycle length in order to enable coordination of the intersections.

The main focus of the adjustment of signal settings to the currently estimated traffic demand has been on the model-based offset optimization. Offset optimization aims at establishing a good coordination of adjacent intersections in such a way that vehicles do not have to stop at each intersection but can travel in so called green bands. A macroscopic traffic flow model has been used to evaluate the effects of different offset combinations in terms of total delay. For each offset combination to be tested, a single run of the model has to be performed. Different optimization algorithms have been implemented, thereof two based on heuristic Genetic Algorithms. A third, deterministic algorithm has been developed in addition.

The last major object of research of this thesis was signal plan transition. At the beginning of each time interval, the new signal timings have to be implemented at each intersection. This requires application of an appropriate technique of signal plan transition that does not induce major disturbances of traffic flow. Based on the state-of-the-art of signal plan transition and on an additional simulation study a rather smooth transition technique has been identified which has been implemented in the framework of the ATCS prototype. It has been incorporated into the model-based offset optimization in order to consider the effects of signal plan transition directly during the optimization process.

Finally, a comprehensive microsimulation study has been performed to evaluate the performance of the ATCS prototype. The prototype has been applied to two networks in the city of Hanover, Germany. The results revealed that the prototype of the newly developed ATCS has some potential to improve travel times in a sub-network compared to an optimized fixed time signal control. However, the degree of this improvement depends on the network.

Zusammenfassung

In der städtischen Verkehrssteuerung spielt die Steuerung von Lichtsignalanlagen (LSA) eine entscheidende Rolle. Sie beeinflusst direkt die Qualität des Verkehrsablaufs. Neben Festzeit- und lokalen regelbasierten Steuerungen wurden in der Vergangenheit diverse Netzsteuerungsverfahren entwickelt. Diese steuern alle LSA in einem (Teil-)Netz und zielen darauf ab, die Signalisierung kontinuierlich an die aktuell geschätzte Verkehrsnachfrage anzupassen. Fortschritte in der Verkehrsmodellierung und eine Verbesserung der Computerleistungsfähigkeit ermöglichen die stetige Weiterentwicklung solcher Verfahren. In dieser Arbeit wurde ein neues Netzsteuerungsverfahren prototypisch entwickelt und evaluiert. Motiviert wurde diese Arbeit durch aktuelle Forschungsergebnisse.

Anhand einer umfassenden Literaturanalyse zum Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich netzweiter LSA-Steuerungen wurde der weitere Forschungsbedarf abgeleitet, gefolgt von einem Überblick über das Grundkonzept der neuen Netzsteuerung. Der Prototyp optimiert die Signalpläne der einzelnen LSA zentral alle 15 Minuten und sendet sie an die einzelnen Steuergeräte, wo sie entsprechend ausgeführt werden.

Die erste Hauptaufgabe, die alle 15 Minuten durchgeführt werden muss, ist eine Schätzung der Verkehrsnachfrage im nächsten Optimierungsintervall. Das Verfahren setzt voraus, dass sich auf den Fahrstreifen in den Zufahrten der einzelnen Knotenpunkte Fahrzeugdetektoren befinden. Basierend auf den Detektorzählwerten der vier vorangegangenen Zeitintervalle und auf Referenznachfragemustern schätzt das Prognosemodul die Detektorzählwerte des nächsten Zeitintervalls. Im nächsten Schritt werden diese geschätzten Zählwerte als Randbedingungen für eine netzweite Gesamtnachfrageschätzung verwendet. Die Gesamtnachfrage umfasst dabei die Verkehrsstärken verschiedener Quelle-Ziel-Beziehungen sowie die Verkehrsbelastungen auf unterschiedlichen Routen und auf allen Kanten im Netz. Das Nachfrageschätzmodul basiert auf vorangegangenen Forschungsarbeiten, die sich auf die Informationstheorie stützen. Die existierende Methode wurde umgesetzt und verallgemeinert, um sie im Rahmen der neuen Netzsteuerung verwenden zu können. Nach Ausführung der beiden Module liegt eine Schätzung der zu erwartenden netzweiten Verkehrsnachfrage im nächsten Zeitintervall vor, die für die Optimierung der Signalpläne genutzt werden kann.

Die nächsten beiden Module der Netzsteuerung passen die Umlaufzeiten, die Dauern der einzelnen LSA-Phasen und die Versatzzeiten der LSA an die aktuell geschätzte Verkehrsnachfrage an. Umlaufzeiten und Phasendauern werden über einen klassischen Ansatz zur Berechnung

von Festzeitsignalprogrammen justiert. Hierbei wird eine netzweit einheitliche Umlaufzeit gewählt, um eine nachfolgende Koordinierung der LSA zu ermöglichen.

Das Hauptaugenmerk der Signalprogrammanpassung lag auf der Versatzzeitoptimierung. Versatzzeiten werden dazu genutzt, die Signalprogramme der LSA eines Netzes so gegeneinander zu verschieben, dass der Verkehr das Netz möglichst ohne Halte passieren kann. Es wurde ein makroskopisches Verkehrsflussmodell verwendet, um die Auswirkungen unterschiedlicher Versatzzeitkombinationen auf die Wartezeiten im Verkehr abzuschätzen. Jede zu testende Versatzzeitkombination erfordert einen Durchlauf des Modells. Für die Optimierung wurden verschiedene Algorithmen umgesetzt. Zwei dieser Algorithmen basieren auf heuristischen Genetischen Algorithmen. Zusätzlich wurde ein drittes, deterministisches Verfahren entwickelt.

Ein letzter Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Berücksichtigung von Signalplanumschaltungen. Zu Beginn jedes neuen Zeitintervalls müssen die neu optimierten Signalpläne an allen LSA umgesetzt werden. Hierzu muss ein Umschaltverfahren zum Einsatz kommen, das möglichst keine Störungen im Verkehrsfluss verursacht. Basierend auf einer Literaturanalyse und einer Simulationsstudie wurde ein störungsarmes Umschaltverfahren identifiziert. Um Umschaltverluste direkt bei der Optimierung berücksichtigen zu können, wurde dieses Verfahren direkt in die Versatzzeitoptimierung integriert.

Schließlich wurde eine umfassende Mikrosimulationsstudie durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des neuen Netzsteuerungsverfahrens zu bewerten. Der Prototyp wurde in zwei Teilnetzen der Stadt Hannover angewandt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren die Reisezeiten im Vergleich zu einer optimierten Festzeitsteuerung reduzieren kann. Jedoch hängt der Grad der erreichten Verbesserung von den Randbedingungen des jeweiligen Netzes ab.

Contents

1	Introduction.....	1
1.1	Background	1
1.2	Objectives.....	2
1.3	Outline.....	3
2	State-of-the-art of science and technology.....	5
2.1	Overview	5
2.2	Fundamentals of traffic signal control.....	5
2.3	Fixed time control.....	7
2.4	Vehicle actuated control	8
2.5	Adaptive Traffic Control Systems	9
2.5.1	Basic principles	9
2.5.2	Examples of existing ATCS.....	10
2.5.3	Performance of existing ATCS.....	16
2.6	Genetic Algorithms in traffic signal control	18
2.6.1	Basic principles	18
2.6.2	Optimization of signal timings	18
2.6.3	Combination of traffic assignment and optimization of signal control.....	20
2.6.4	Microsimulation-based approaches	20
2.6.5	Online control	21
2.7	Cell Transmission Model in traffic signal control	22
2.7.1	Optimization of signal timings	22
2.7.2	Enhancements of the CTM	23
2.8	Remaining need for research and methodology.....	24

3 Fundamentals of this thesis.....	27
3.1 Overview	27
3.2 Conceptual design of the new ATCS prototype	27
3.2.1 Basic principles	27
3.2.2 Demand estimation	28
3.2.3 Optimization of signal timings	29
3.3 Setup of simulation environment	30
3.3.1 General information	30
3.3.2 Specifics of the network	30
3.3.3 Traffic demand	31
3.3.4 Signalization	33
3.4 Statistical evaluation	33
3.4.1 Assessment of the quality of estimation.....	33
3.4.2 Comparison of different control strategies	34
4 Macroscopic traffic flow model.....	37
4.1 Overview	37
4.2 Original Cell Transmission Model	37
4.2.1 Basic model characteristics	37
4.2.2 Basic model equations.....	38
4.2.3 Diverges.....	40
4.2.4 Merges	41
4.2.5 Sources and sinks.....	42
4.3 Extensions of the Cell Transmission Model	42
4.3.1 Enhancement of merging and diverging	43
4.3.2 Traffic signals.....	46
4.3.3 Permitted left-turns.....	46
4.4 Estimation of performance indicators.....	48
4.4.1 Total delay	48
4.4.2 Travel times	48
4.5 Implementation	49
4.6 Validation	49
5 Demand estimation	53
5.1 Overview	53
5.2 Forecasting of detector counts.....	53
5.2.1 Concept	53

5.2.2	Evaluation	55
5.2.3	Discussion and modification	58
5.3	OD matrix, route and link volume estimation	60
5.3.1	Concept	60
5.3.2	Graph representation of the network	61
5.3.3	Information Minimization model	62
5.3.4	Improvement of constraints for estimation	64
5.3.5	Elimination of inconsistent constraints	67
5.3.6	Elimination of redundant constraints	70
5.3.7	Integration of traffic assignment techniques	74
5.3.8	Complete process of estimation	80
5.3.9	Evaluation	82
5.4	Evaluation of combined forecasting and traffic volume estimation	89
6	Optimization of signal control settings	91
6.1	Overview	91
6.2	Adjustment of cycle length and phase durations	91
6.2.1	Fundamentals	91
6.2.2	Theoretical background	92
6.2.3	Algorithm	95
6.3	Offset optimization	98
6.3.1	Problem and approach	98
6.3.2	Genetic Algorithms	99
6.3.3	Parallel Genetic Algorithm	101
6.3.4	Serial Genetic Algorithm	105
6.3.5	Sequential Enumeration	106
6.4	Additional remark	107
7	Signal plan transition	109
7.1	Overview	109
7.2	State-of-the-art	110
7.2.1	Transition methods	110
7.2.2	Previous studies	112
7.3	Experimental study	113
7.3.1	Setup of simulation	113
7.3.2	Results	115
7.4	Implementation into the ATCS prototype	122

8 Evaluation	125
8.1 Overview	125
8.2 Hanover List network	125
8.2.1 Modifications of the original simulation setup	125
8.2.2 Optimization for exact demand	127
8.2.3 Optimization for estimated demand based on average detector counts	131
8.2.4 Real online optimization	134
8.3 Hanover Südstadt network	136
8.3.1 Simulation Setup	136
8.3.2 Optimization for exact demand	137
8.3.3 Optimization for estimated demand based on average detector counts	138
8.3.4 Real online optimization	139
8.4 Summarized findings	140
9 Summary and outlook	143
9.1 Summary	143
9.2 Outlook	146
References	149
List of figures	159
List of tables	161
List of abbreviations	163
Appendices	165
A Validation of the CTM by comparison with AIMSUN	166
B Theory and derivation of the Information Minimization model	175
C Elimination of inconsistent constraints (Intermediate steps of derivation)	187
D Detailed comparison of performance indicators	190
E Phases and phase changes of the test networks	243