

Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 163

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right edge of the cover.

Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen

**Abgrenzung von Einsatzbereichen
von Grünen Wellen einerseits und
verkehrsabhängiger Steuerung
andererseits sowie Ableitung der
zweckmäßigen Einsatzkriterien**

von

Werner Brilon
Thomas Wietholt
Ning Wu

Ruhr-Universität-Bochum
Lehrstuhl für Verkehrswesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 163

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 77.477/2004

Abgrenzung von Einsatzbereichen von Grünen Wellen einerseits und verkehrsabhängiger Steuerung andererseits sowie Ableitung der zweckmäßigen Einsatzkriterien

Projektbetreuung
Birgit Hartz

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86509-753-8

Bergisch Gladbach, Dezember 2007

Kurzfassung – Abstract

Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden die verschiedenen Steuerungsverfahren einer Koordination untersucht. Dabei wurden im Schwerpunkt die festzeitgesteuerte Koordination, die verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan und die vollverkehrsabhängige Steuerung miteinander verglichen.

Zur Erfassung des Standes der Technik wurden Quellenanalysen durchgeführt. Zusätzlich fanden Expertengespräche statt, um auch Erfahrungen aus der Praxis in die Untersuchung einzubeziehen. Dabei stellte sich heraus, dass in der Fachwelt die Meinung vorherrscht, dass eine festzeitkoordinierte Steuerung nicht mehr dem Stand der Technik entspricht, da sie zu unflexibel ist.

Um die tatsächliche Wirkung der Steuerungsverfahren zu überprüfen, wurden zehn Straßenzüge durch empirische Messungen und Simulationen untersucht. Die auf den Straßenzügen in der Realität vorhandenen Steuerungen wurden in den Simulationsmodellen exakt nachgebildet und neue Steuerungen wurden entwickelt. Dadurch konnten umfangreiche Vergleiche zwischen vorhandenen und optimierten Steuerungen sowie zwischen verkehrsabhängigen und festzeitgesteuerten Koordinierungen angestellt werden. Die Bewertung der Verfahren erfolgte anhand eines Performance Index, der die Anzahl der Halte und die Wartezeiten in jeder Knotenpunktzufahrt des Netzes berücksichtigt.

Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass die verkehrsabhängige Steuerung keineswegs nur Vorteile gegenüber der Festzeitsteuerung hat. Es ergaben sich je nach Verkehrssituation sehr unterschiedliche Qualitäten der Steuerungsverfahren. In der Simulation wurde außerdem deutlich, dass eine vollverkehrsabhängige Steuerung ohne Rahmenplan nicht geeignet ist für die Steuerung eines Straßenzuges.

In den deutschen Richtlinien wird bisher kein Verfahren zur Bestimmung der Verkehrsqualität verkehrsabhängiger Steuerungen beschrieben. In dieser Untersuchung wurde zusätzlich zu den Simulationen ein theoretisches Verfahren zur Bewertung verkehrsabhängiger Steuerungen vorgestellt.

Aus den so gewonnenen Untersuchungsergebnissen wurden schließlich Kriterien für die Einsatzbereiche der verschiedenen Steuerungsverfahren entwickelt, die eine Entscheidungsfindung zukünftiger Planungsvorhaben erleichtern sollen.

Der Originalbericht enthält ein weiterführendes sehr umfangreiches Literaturverzeichnis sowie als Anhänge die verwendeten Fragenkataloge für Autofahrer und ÖPNV-Betriebe, die Ergebnisse der Teilnehmerbefragung sowie Mess- und Simulationsergebnisse. Auf die Wiedergabe dieser zusätzlichen Informationen wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf die weiterführende Literatur und die Anhänge wurden zur Information des Lesers im Berichtstext beibehalten.

Criteria for the scope of application of progressive signal systems and traffic-dependent controls

The intention of this project was to analyse several control methods for coordinated traffic signals. In this process, the comparison of fixed time, traffic-actuated, and fully vehicle-actuated signal control was the main focus.

To cover the state of the art in the coordination of traffic signals a literature review was conducted. Additionally experts from engineering consultants, administrations, and traffic signal suppliers were interviewed and provided valuable input based on their experience. In conclusion of the expert opinions it became obvious that the fixed time control is not considered as the state of the art any more due to the lack of flexibility in comparison to a traffic-actuated signal control.

To verify the actual effect of the signal control methods, ten roads were analysed using empirical measurements and microscopic simulations. The measurements were primarily used to calibrate the simulation models. The signal control settings that are used on the roads in reality were replicated in the simulation models and new signal control strategies were developed. Thereby numerous comparisons between existent and optimized coordination as well as between traffic actuated and fixed timed controls were drawn. The control

methods were validated using a performance index that includes the amount of stops and the delay in every approach of the intersections.

In the simulation numerous examples of various traffic flows and distributions were analyzed. The result of this analysis was that the traffic-actuated signal control is not the best option in every case. Depending on the specific traffic situation the quality of the control methods is differing. In the simulation it also became obvious that the fully vehicle-actuated signal control is not qualified for the control of coordinated streets.

Currently the German guidelines do not include a method to estimate the quality of a traffic actuated signal control. In this report a theoretic method to validate a traffic-actuated signal control is presented in addition to the simulation. With this method it is possible to estimate the mean green time of traffic actuated signal controls.

Based on this analysis, criteria for the application for the control methods have been developed. These criteria can serve as a decision making tool for future projects.

The original report contains an additional and very extensive bibliography, as well as the lists of questions used for drivers and local public transport companies, the results of the participant survey, as well as measuring and simulation results, as appendices. This additional information has not been included in this publication. It is available for insight at the Federal Highway Research Institute. References to additional literature and to the appendices have been retained in the report for the information of the reader.

Inhalt

1	Einleitung	7	6.1.1	Durchführung der GPS-Messungen	49
1.1	Steuerungsverfahren	7	6.1.2	Durchführung der Reisezeitenmessung	50
1.2	Aufgabenstellung und Ziel	9	6.1.3	Auswertung der GPS-Messungen	51
1.3	Methodik	10	6.2	Messungen auf der Königsallee (BO)	51
2	Literaturrecherche	11	6.2.1	Messaufbau	51
2.1	Überblick der Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen	11	6.2.2	Auswertung der GPS-Daten	52
2.2	Nutzen der fortgeschrittenen Lichtsignalsteuerung	20	6.3	Messungen auf dem Albersloher Weg (MS)	53
2.3	Beispiele der Anwendungen	22	6.3.1	Messaufbau	53
3	Verfahren zur Bewertung der Steuerungsmethoden	25	6.3.2	Auswertung der GPS-Daten	54
3.1	Methodik	25	6.4	Messungen auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße (D)	55
3.2	Kriterien der Bewertung	26	6.4.1	Messaufbau	55
4	Expertengespräche	27	6.4.2	Auswertung der GPS-Daten	56
4.1	Umfang der Expertengespräche	27	6.4.3	Reisezeitmessungen	57
4.2	Ingenieurbüros	27	6.5	Messungen auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)	57
4.3	Signalhersteller	30	6.5.1	Messaufbau	57
4.3.1	Mittelständisches Unternehmen	30	6.5.2	Auswertungen der Messergebnisse	58
4.3.2	Großer Signalhersteller	31	6.5.3	Reisezeitmessungen	58
4.4	Stadt Frankfurt	33	6.6	Erkenntnisse aus den Messungen	58
4.5	Regierungspräsidium Karlsruhe	36	7	Verkehrsteilnehmerbefragungen	59
4.6	Stadt Düsseldorf	38	7.1	Kfz-Verkehr	59
4.7	Fazit	40	7.2	ÖPNV	60
5	Beschreibung der Untersuchungsstrecken	41	7.3	Zusammenfassung	61
5.1	Albersloher Weg – Münster	42	8	Simulationsstudien	61
5.2	Königsallee – Bochum	43	8.1	Kalibrierung der Simulationsmodelle	62
5.3	Herner Straße – Bochum	44	8.1.1	Königsallee (BO)	62
5.4	Stader Straße – Buxtehude	45	8.1.2	Albersloher Weg-Nord (MS)	63
5.5	Hauptstraße/Eickeler Straße – Herne	46	8.1.3	Albersloher Weg-Süd (MS)	64
5.6	Lastring – Düsseldorf	47	8.1.4	Brehmstraße/Lindemannstraße (D)	64
5.7	Bonnstraße – Frechen	49	8.1.5	Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)	64
6	Messungen	49	8.2	Vergleich der vorhandenen Steuerungen mit den optimierten Festzeitsteuerungen	66
6.1	Methodik	49			

8.3	Vergleich der Festzeitsteuerung mit der verkehrsabhängigen Steuerung	68
8.3.1	Albersloher Weg-Nord (MS)	69
8.3.2	Albersloher Weg-Süd (MS)	71
8.3.3	Königsallee (BO)	71
8.3.4	Herner Straße (BO)	72
8.3.5	Stader Straße (BUX)	74
8.3.6	Hauptstraße (HER)	75
8.3.7	Hauptstraße/Eickeler Straße (HER) ..	76
8.3.8	Brehmstraße/Lindemannstraße (D) ..	77
8.3.9	Kettwiger Straße/Kruppstraße (D) ...	78
8.3.10	Bonnstraße (FRE)	79
8.4	Zusammenfassung	80
9	Bewertung der Steuerungs- verfahren nach Modell- berechnungen	82
9.1	Bewertung der verkehrsabhängigen Steuerung	82
9.2	Festzeitsteuerung nach PASSER-V	84
9.3	Zusammenfassung	85
10	Bewertung der Untersuchungs- ergebnisse	86
10.1	Steuerungsverfahren	86
10.1.1	Festzeitkoordinierung	86
10.1.2	Verkehrsabhängige Steuerung	86
10.1.3	Adaptive Steuerung	87
10.1.4	Vollverkehrsabhängige Steuerung ...	88
10.2	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	88
10.3	Ableitung der zweckmäßigen Einsatzkriterien	90
11	Zusammenfassung	91
12	Literatur	92

1 Einleitung

Lichtsignalanlagen prägen das Verkehrsgeschehen in den Städten. Bei dichter Knotenpunktfolge ist es sinnvoll, die Signalzeitenpläne benachbarter Knotenpunkte zu koordinieren. Die Reisezeiten für die Verkehrsteilnehmer gering zu halten und den Fahrkomfort zu erhöhen ist dabei das vorrangige Ziel. Außerdem kann die Qualität der Koordination den Energieverbrauch und die Schadstoffemissionen erheblich beeinflussen.

In früheren Zeiten galt eine festzeitgesteuerte „Grüne Welle“ als gute Koordinierungsstrategie. Mit den zunehmenden Möglichkeiten der elektronischen Steuerung haben sich verkehrsabhängige Signalsteuerungen mehr und mehr verbreitet. Von vielen Fachleuten wird der Verkehrsabhängigkeit koordinierter Steuerungen zunehmend Skepsis entgegengebracht. Das geht bis zu Befürchtungen, dass durch die aufwändige verkehrsabhängige Steuerung die Verkehrsqualität sogar zurückgehen kann. Auch in der Öffentlichkeit macht sich eine zunehmende Verärgerung über die Qualität von Signalsteuerungen breit. Vor diesem Hintergrund soll durch dieses Forschungsprojekt untersucht werden, durch welche Strategie koordinierte Signalsteuerungen besonders effizient ausgelegt werden können.

Mit heutiger Signaltechnik ist jede Signalgruppe – auch in einem komplexen Straßennetz – zu jeder Zeit (im Rahmen der sicherheitstechnischen Grenzen) ansteuerbar. Unterscheidungen nach der Signaltechnik sind deshalb nicht mehr zeitgemäß, allenfalls was die Planungs-, Herstellungs- und Betriebskosten angeht. Als wesentliches Kriterium für die Klassifizierung der Systeme wird die Möglichkeit der gezielten Optimierung der Steuerung zusammen mit den verwendeten Zielkriterien der Optimierung angesehen.

Ein anderes wesentliches Kriterium ist die Verfügbarkeit der jeweiligen Planungstechnik am deutschen Markt. Moderne Planungsverfahren sind an bestimmte Computerprogramme gebunden, über die nicht jeder Planer und Signalhersteller verfügt. Die Marktmacht der Anbieter sowie Grenzen im Urteilsvermögen bei Baulastträgern haben den deutschen Markt von verschiedenen Entwicklungen des weltweiten Wissens abgeschottet. Dabei sind in der Praxis vielfach überzogene Erwartungen an den Nutzen der Verkehrsabhängigkeit entstanden.

1.1 Steuerungsverfahren

Festzeitgesteuerte Grüne Welle

Die „Grüne Welle“ wird von Laien mit der Koordination von Lichtsignalanlagen im Straßenverkehr gleichgesetzt. Eine klassische „Grüne Welle“ ist eine Koordination der Signale längs einer Hauptverkehrsstraße. Dabei können die Fahrzeuge der durchgehenden Richtung ohne Halt durchfahren, wenn sie sich an der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit orientieren. Eine Koordination in beiden Fahrrichtungen zu erreichen ist angesichts wechselnder und meist geringer Knotenpunktstände sowie wechselnder Verkehrsstärken längs der Strecke nur in Ausnahmefällen möglich. Die Ein- und Abbieger werden bei der klassischen „Grünen Welle“ nicht oder nachrangig bedacht. Eine „Grüne Welle“ ist im Grundsatz mit einer Festzeitsteuerung verbunden. Eine klassische „Grüne Welle“ ist aus übergeordneter Sicht nur im Ausnahmefall und im erweiterten Sinne optimal. Wenn es überhaupt ein Optimierungsziel gibt, ist dies die Minimierung der Anzahl der Halte in Hauptrichtung verbunden mit der Erwartung, dass dies auch die durchgehenden Reisezeiten gering hält. Bei hoher Auslastung – erfahrungsgemäß jenseits von 85 % – funktionieren „Grüne Wellen“ nicht mehr im vorgesehenen Sinn. Der Rückgang der Geschwindigkeit wird mit zunehmender Belastung nicht mehr berücksichtigt und zeitweilige Stauerscheinungen werden unvermeidlich. Bei der klassischen „Grünen Welle“ wird dieser Zustand nicht bedacht. Ihre Vorteile sind: leichte Verständlichkeit für Bürger und Politiker und eine relativ leicht verständliche Planbarkeit. Trotzdem wird die klassische „Grüne Welle“ nicht mehr als ein erstrebenswerter Stand der Technik angesehen. Sie ist allerdings eine Art Referenzgröße, weil sie für jedermann verständlich ist.

Verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan

„Grüne Wellen“ sind mit unterschiedlichsten Schlagworten und Modebegriffen um verkehrsabhängige Elemente ergänzt worden („Signalprogramm Anpassung“). Mit der Entwicklung der Technik für die verkehrsabhängige Steuerung wurden verkehrsabhängige Eingriffe auch innerhalb von „Grünen Wellen“ angewandt. Dadurch werden gewisse Schwankungen des Verkehrsaufkommens aufgefangen oder Vorteile für einzelne Verkehrsteilnehmer oder Verkehrsarten geschaffen, wie beispielsweise eine verbesserte Bedienung für die

Fußgänger oder Bevorzugung von Fahrzeugen des ÖPNV. Diese Möglichkeiten reichen von geringfügigen örtlichen Eingriffen in Sondersituationen bis zur bedingungslosen Bevorzugung des ÖPNV. Je stärker diese Eingriffe sind, desto weniger verbleibt vom Prinzip der „Grünen Welle“. Bei der Anpassung der Grünzeit an kurzfristige Schwankungen des Verkehrsaufkommens wird die Verkehrsabhängigkeit meistens nur lokal, d. h. unabhängig von der Verkehrssituation der benachbarten Knotenpunkte, realisiert. In gewissem Umfang lassen sich die Vorteile der „Grünen Welle“ (starre, koordinierte Steuerung) und der kurzfristigen Anpassung der Grünzeiten an Schwankungen des Verkehrsaufkommens vereinbaren (atmende „Grüne Welle“). Bei einer zu weit gehenden Flexibilisierung der „Grünen Welle“ besteht die Gefahr, dass die Abstimmung der Grünzeiten zwischen den Knotenpunkten zerstört wird und die Vorteile der koordinierten Steuerung verloren gehen. Hierbei kann es vorkommen, dass die Nachteile, durch die Störung der Koordinierung, gegenüber den Vorteilen der Anpassung an Schwankungen des Verkehrsaufkommens überwiegen. Weil pragmatische Steuerverfahren (z. B. sog. Zeitlücken-Kriterien) in Deutschland überwiegen, findet keine wirkliche Optimierung statt. Das Ergebnis kann in hochbelasteten Zeiten schlechter werden als die Festzeitsteuerung. Zudem verlassen sich die Betreiber bedingungslos auf diese Steuerung, weil die Meinung vorherrscht, damit über eine besonders gute und sich selbst anpassende Lösung zu verfügen. Der Pflege- und Anpassungsbedarf wird in der Praxis meist verkannt. Die technische Realisierung dieser Steuerungsart ist relativ kostenintensiv.

Eine Klassifizierung dieser Eingriffe ist schwierig. Sie soll in diesem Projekt anhand der Literatur, der Angebote von Herstellern und anhand von Praxisbeispielen vorgenommen werden.

Vollverkehrsabhängige Steuerung

Eine konventionelle vollverkehrsabhängige Lichtsignalsteuerung passt sich durch Messung der relevanten Abbruchzeitlücken und nach einer vorgegebenen Logik automatisch an die gegebenen Verkehrsverhältnisse an. Sie ist nicht durch einen Rahmenzeitplan beschränkt, sondern ist in der Wahl der Freigabezeiten und Phasen frei. Die Koordinierung von vollverkehrsabhängigen Steuerungen kann theoretisch durch eine Steuerung mehrerer LSA durch eine Steuerungslogik erfolgen. So wird

die Verkehrssituation vor dem ersten Knotenpunkt erfasst und die Grünzeiten der folgenden Knotenpunkte werden festgelegt. Praktisch ist dies jedoch nur bei wenigen, dicht aufeinander folgenden Knotenpunkten möglich.

In dieser Untersuchung soll die Frage bearbeitet werden, ob einzeln gesteuerte vollverkehrsabhängige LSA automatisch eine Koordinierung produzieren können, wie es vereinzelt von Experten behauptet wird. Die Koordinierung dieser Steuerungen unterliegt jedoch verkehrlichen, geometrischen und umfeldbedingten Randbedingungen. So ist zum Beispiel die Erfassung eines Fahrzeugpulses nur bei einer ausreichenden Entfernung des Detektors zur Haltlinie zu realisieren.

Klassische netzweite Koordinierungen

Klassische netzweite Koordinierungen haben den Vorteil, eine systematische Optimierung anhand vorgegebener Zielkriterien (Summe aller Wartezeiten und aller Halte oder gewichtetes Mittel aus beiden) in das Verfahren der Koordinierung eingebracht zu haben. Die Planung gelingt nur durch ein komplexes Computerprogramm. Der klassische Vorreiter dieser Familie von Programmen ist TRANSYT mit allen Untervarianten (z. B. TRANSYT-7F in den USA oder TRANSYT-9 im Vereinigten Königreich) [PARK, 2000]. In diesen Programmen ist auch die Auflösung der Fahrzeugkolonnen erstmals realitätsnah in das Kalkül eingeflossen. Versuche, ein solches Programm (SIGMA) auch in Deutschland zu etablieren, haben sich nicht durchgesetzt. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass TRANSYT-optimierte Signalpläne i. Allg. keine für Kraftfahrer oder Außenstehende erkennbaren „Grünen Wellen“ ausbilden. Dennoch sind sie auf dem Festzeit-Niveau das Beste, was man aus Betreibersicht anbieten kann. Insofern ist eine qualitativ hochwertige TRANSYT-optimierte Festzeitsteuerung eine wesentliche Referenzgröße. Verkehrsabhängigkeiten sind erst dann gerechtfertigt, wenn damit die Zielkriterien besser erfüllt werden.

Eine über das gesamte Netz einer Stadt bearbeitete Gesamtoptimierung der Koordinierung wird in der Praxis vielfach nicht als erstrebenswertes Ziel angesehen. Gründe sind die Komplexität der Umsetzung und die geringe Wertschätzung in der Öffentlichkeit, aufgrund nicht gegebener Erkennbarkeit. Vielfach werden deshalb nur noch Koordinierungen eng begrenzter Teilnetze (z. B. eines Clusters von wenigen Knotenpunkten) angestrebt, mit

dem Ziel eines offensichtlich flüssigen Verkehrs bei gleichzeitiger Maximierung des Leistungsvermögens der Teilnetze, ein Konzept, das z. B. ganz gezielt in Zürich umgesetzt ist.

Vollverkehrsabhängige netzweite Steuerungen

Im Ausland sind vollverkehrsabhängige netzweite Steuerungen in einer Form entstanden, wie es sie in Deutschland nicht gibt. Die zugrunde liegenden Methoden sind nur begrenzt öffentlich zugänglich. Man kann sie nur anwenden, wenn man sie komplett erwirbt. Die britische Variante SCOOT [BRETHERTON, 1996] erzeugt eine dynamische TRANSYT-Optimierung. Dabei wird die Optimierung im laufenden Betrieb auf der Basis von Detektorzählungen vorgenommen. SCATS ist eine vergleichbare australische Lösung [LOWRIE, 1982]. Sie orientiert sich vor allem an der Maximierung des Durchsatzes des jeweiligen Knotenpunktes. Beide Systeme sind vor allem bei einem großflächigen Einsatz (z. B. ganzes Stadtgebiet) sinnvoll. Einsatzorte finden sich weltweit, allerdings nicht in Deutschland. Insofern ist eine Einbeziehung in diese Studie weder sinnvoll noch möglich.

Adaptive Steuerungen

In die gleiche Richtung wie die vollverkehrsabhängigen netzweiten Steuerungen zielen die so genannten adaptiven Systeme, wie sie mit den Programmen MOTION [BUSCH, 1996] und BALANCE [FRIEDRICH, 1996, 2000] in Deutschland entwickelt wurden.

Bei diesen Systemen wird die Verkehrssituation im gesamten gesteuerten Netz durch eine Datenerfassung von flächendeckend platzierten Detektoren genau beobachtet. Anhand dieser Daten wird online eine Modellrechnung durchgeführt, die eine Prognose über den Verkehrsablauf erstellt. Mit dieser Prognose ist der Verkehrsrechner in der Lage, durch einen Optimierungsalgorithmus die optimalen Signalzeiten an den Lichtsignalanlagen für die aktuelle Verkehrssituation zu ermitteln. Das Ziel ist es, die Wartezeiten, die Anzahl der Halte, die Staulängen oder die Reisezeiten zu minimieren. Die Bewertungskenngrößen können nach den Vorstellungen des Anwenders gewichtet werden.

Diese Systeme verfolgen nicht das Ziel einer netzweiten Gesamtoptimierung. Sie konzentrieren sich auf eine Verflüssigung des Verkehrsaufkommens in örtlich begrenzten Teilnetzen. Die adaptive

Steuerung ist durch den ADAC [ADAC, 2004] zu einem Modebegriff geworden, die bei Laien überzogene Erwartungen wecken. Allerdings wurden die Auswirkungen einer verkehrsadaptiven Steuerung auf die Verkehrsqualität des gesamten Netzes bisher noch nicht unabhängig bewertet. Die adaptiven Steuerungen sind wesentlich kostenintensiver als herkömmliche Steuerungsverfahren und es muss abgewogen werden, ob der Einsatz eines solchen Systems im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren einen wirtschaftlichen Nutzen bringt.

Die adaptive Steuerung wird aufgrund der hohen Komplexität in dieser Untersuchung nicht anhand von Fallbeispielen, sondern durch eine Literaturanalyse untersucht.

Optimales System

Jenseits der vorhandenen Strategien erscheint ein System als erstrebenswerte Vision, in dem eine realitätsnahe Berechnung der Verkehrsqualität des gesamten Netzes für alle denkbaren Steuerungsalternativen möglich ist. Mit flexibler Dynamik kann ständig ein definiertes Gesamtoptimum angestrebt werden. Darin sollten dann auch verkehrsabhängige Eingriffe der ÖPNV-Verkehrsmittel, auch bei bedingungslosem Vorrecht, mit in das Gesamtoptimum einbezogen werden.

1.2 Aufgabenstellung und Ziel

In Deutschland ist die festzeitgesteuerte Grüne Welle die meist verwendete Form für die Koordinierung von LSA. Zumindest prägt sie die grundsätzliche Denkweise über Koordinierungen. Sie ist deswegen Bezugspunkt für die hier untersuchten Alternativen. Dies sind vor allem verkehrsabhängige Eingriffe und vollverkehrsabhängige Steuerungen. Darüber hinaus werden adaptive Steuerungen durch eine Literaturanalyse in den Vergleich einbezogen.

Die Aufgabenstellung des Projektes wird so verstanden, dass unter den grundsätzlichen Koordinierungsmöglichkeiten die Vor- und Nachteile bei verschiedenen Einsatzfällen abgewogen werden. Im Ergebnis sollen Empfehlungen für grundsätzliche Einsatzkriterien gegeben werden und die erreichbaren Vorteile einer aufwändigeren Steuerungstechnik in realistischer Größenordnung quantitativ und möglichst leicht verständlich angegeben werden.

Die Untersuchung konzentriert sich auf die Steuerung der Lichtsignalanlagen eines Straßenzuges mit mehreren Knotenpunkten. Straßennetze auf einer größeren Fläche sind nicht Gegenstand der Analyse.

Folgende Fragen stellen sich:

- Unter welchen Rahmenbedingungen ist eine Grüne Welle gegenüber Einzelknotensteuerung sinnvoll?
- Unter welchen Rahmenbedingungen ist an Einzelknotenpunkten eine vollverkehrsabhängige Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung sinnvoll? Betrachtet werden hier in Deutschland übliche Steuerungsverfahren. Dies sind in erster Linie so genannte Zeitlückensteuerungen.
- Kann eine gut geplante vollverkehrsabhängige Steuerung automatisch zu einer Grünen Welle führen?
- Wie stark wird eine Grüne Welle durch verkehrsabhängige Anpassungen der Grünzeiten gestört?
- In welchem Maße wirken die Vorteile durch verkehrsabhängige Anpassungen der Grünzeiten in einer Grünen Welle?
- Ist es sinnvoll, Grüne Wellen mit verkehrsabhängiger Anpassung der Grünzeiten bei Schwankungen des Verkehrsaufkommens einzusetzen?
- Welche konkreten Einsatzbedingungen und Regeln für Entwurf und Betrieb sind empfehlenswert?
- Welcher Grad der Verkehrsabhängigkeit ist in bestimmten Situationen noch zweckmäßig oder zulässig?

Es existieren bereits umfangreiche Untersuchungen zu den ersten beiden Fragen. Sie sind demnach nicht Hauptgegenstand dieser Untersuchung. Die Erkenntnisse aus der Literatur sollen hierfür einbezogen und erweitert werden.

Um diese Fragen beantworten zu können muss zunächst ein einheitliches Bewertungssystem der festzeitgesteuerten und verkehrsabhängigen Koordinierungen festgelegt werden. Die folgenden Randbedingungen sind bei den Fragestellungen zu beachten.

- Lage der Knotenpunkte,
- Anteil der ab- und einbiegenden Verkehrsströme,

- Kolonnenauflösung,
- Länge der Grünzeiten,
- Versatz der Grünzeiten.

Das Ziel der Untersuchung ist es, Antworten auf die oben formulierten Fragen mit einer möglichst weit gehenden Ausrichtung an den Belangen der Praxis zu erarbeiten. Dabei soll vorhandenes Wissen (Ausland, Straßenverwaltung in Deutschland) so weit wie möglich gesammelt, strukturiert und dokumentiert werden. Zusätzlich werden eigene Untersuchungen des Auftragnehmers mit in diese Untersuchung einbezogen.

Das Gesamtziel ist es, einen belastbaren Stand des Wissens zu den Fragen des Entwurfs und des Betriebs von Grünen Wellen und der verkehrsabhängigen Steuerung der LSA für deutsche Verhältnisse zusammenzustellen. Dieser Wissensstand soll so weit aufbereitet werden, dass konkrete Entscheidungsgrundlagen für die Praxis zur Aufnahme in das deutsche Regelwerk (zukünftige Fassung des HBS und der RiLSA) formuliert werden. Offen gebliebene Fragen sollen klar identifiziert werden.

1.3 Methodik

Das Ziel der Untersuchung wurde erreicht durch:

- Aufarbeitung und strukturierte Darstellung des vorhandenen Wissens durch Literaturstudien.
- Erkundung des aktuellen Marktangebots und Expertengespräche mit Anbietern von Soft- und Hardware und mit Straßenverwaltungen.
- Untersuchung von Fallbeispielen. Die hier angewandten Methodiken werden in den folgenden Punkten beschrieben:
 - Definition von Bewertungskriterien (z. B. Wartezeiten, Reisezeiten im Netz, Anzahl der Halte, geschätzter Energieverbrauch; Wartezeiten für Fußgänger; Wartezeiten, Reisezeiten und Zuverlässigkeit für ÖPNV-Fahrzeuge). Es wurden diejenigen Kriterien ausgewählt, die als wesentlich angesehen wurden und die realistisch quantifizierbar sind.
 - Auswahl von Untersuchungsstrecken. Dabei wurden zunächst Strecken gewählt, für die dem Anbieter aus dem Consultingbereich vollständige Dokumentationen und VISSIM-Programmierungen vorliegen oder zur Laufzeit des Projek-

tes vorliegen werden. Weitere Strecken werden gezielt für dieses Forschungsprojekt ausgewählt, um einer Repräsentativität der Stichprobe nahezukommen.

- Für alle Beispiele wurden die Unterlagen der Signalsteuerung einheitlich dokumentiert.
- Für alle Beispiele wurde eine optimierte Festzeitsteuerung nach den Systemen
 - Grüne Welle (mit PASSER und AMPEL-K)
 - Flächenoptimierung (mit AMPEL-K)

entwickelt. Die Qualitätskriterien (Wartezeiten, Halte, Energieverbrauch) wurden nach einem einheitlichen System errechnet und als Referenzfall verwendet.

- Die Bezugspläne wurden mit dem Programm VISSIM simuliert. Die Qualitätsmaße wurden verglichen und – soweit möglich – mit den empirischen Qualitätsbefunden (siehe unten) abgeglichen.
- Die im jeweiligen Einzelfall real vorhandenen verkehrsabhängigen Eingriffe wurden in das VISSIM-Modell eingebaut. Die Wirkung der verkehrsabhängigkeit auf die Qualitätsparameter wurde von VISSIM ermittelt.
- In fünf der untersuchten Netze wurden Testfahrten nach strukturierten Fahrplänen und mit strukturierter Messwerterfassung über mehrere Stunden durchgeführt. An zwei Beispielen wurden auch Reisezeitmessungen mit der Kennzeichenmethode, d. h. einer weitgehend vollständigen Stichprobe, durchgeführt und analysiert.
- Am jeweiligen Ort mehrerer untersuchter Strecken wurden Befragungen der Kraftfahrer und Fußgänger (oder der Öffentlichkeit) mit begrenztem Stichprobenumfang durchgeführt. Erfragt wurden das Empfinden der Verkehrsqualität sowie Kriterien, die als wichtig angesehen wurden.
- Am jeweiligen Ort mehrerer untersuchter Strecken wurden die ÖPNV-Betriebe nach den Eindrücken und Mängeln der Signalsteuerungen sowie den Anforderungen befragt.
- Die Analyseergebnisse wurden zu praktisch anwendbaren und verallgemeinerungsfähigen Regeln aufgearbeitet. Es erfolgte eine Ermittlung des geschätzten Nutzens einer verkehrsabhängigen Steuerung im Vergleich zu einer Festzeitsteuerung.

2 Literaturrecherche

In der Literaturrecherche wurden insgesamt über 200 Quellen gesichtet. Das Ergebnis der Literaturrecherche wird im Folgenden nach zusammenhängenden Themenbereichen dargestellt.

2.1 Überblick der Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen

In den RiLSA [FGSV 1992, 2003] werden die Steuerungsverfahren übergeordnet in die makroskopische und die mikroskopische Steuerungsebene unterteilt. Aus der makroskopischen Ebene heraus werden, entweder zeitplan- oder verkehrsabhängig, die mikroskopischen Steuerungsverfahren aufgerufen. Dabei handelt es sich um Festzeitsignalprogramme, Signalprogrammanpassung (Freigabezeitanpassung, Phasentausch, Bedarfsphasenanforderung) und Signalprogrammbildung. Zu detaillierten Hinweisen auf die Steuerungsverfahren wird auf gängige Richtlinien (RiLSA, 1992, 2002 etc) hingewiesen.

WU (2005) hat in einer Untersuchung festgestellt, dass bei Einzelknotenpunkten die logikbasierte, zeitlückenorientierte Umsetzung der Steuerungen, die in Deutschland der Regelfall sind, zu einer Optimierung der Umlauf- und Grünzeit führt.

Neben der zurzeit schwerpunktmäßig in Deutschland eingesetzten verkehrsabhängigen logikbasierten Umsetzung der Steuerungsverfahren gewinnt zunehmend die modellbasierte (adaptive) Umsetzung der Steuerungsverfahren an Bedeutung. Erste Ansätze in dieser Richtung wurden mit dem Modell SCOOT [BRETHERTON, 1996] in Großbritannien entwickelt. In Deutschland konnte das von der Siemens AG entwickelte Verfahren MOTION seit den 90er Jahren erste Erfolge verzeichnen [BUSCH und KRUSE, 1993].

Einen umfassenden Überblick über bestehende Steuerungen gibt FRIEDRICH (1996, 2000). Darauf aufbauend stellt er das modellbasiert arbeitende Steuerungsverfahren BALANCE vor. Die Grundlage von BALANCE ist die modellbasierte Schätzung der Staulängen und Wartezeiten und die darauf basierende Entscheidung bezüglich der Bildung eines neuen Rahmensignalplans. Die Besonderheit von BALANCE liegt darin, dass der gewählte Modellansatz die Stochastik der Serviceraten berücksichtigt, wie dies auch von BROOKES und BELL (1991) empfohlen wird.

FRIEDRICH und FISCHER (2002) weisen darauf hin, dass in vielen Fällen als Nebeneffekt der Nahverkehrsbevorrechtigung eine Verschlechterung der Qualität für den nicht motorisierten Verkehr eintritt. Um dies zu vermeiden, ist bereits zu Beginn der Planung eine integrierte Betrachtung der verschiedenen Verkehrsteilnehmer vorzunehmen.

BRENNER et al. (1997) haben eine sehr umfangreiche Analyse der Sicherheit an mehreren Knotenpunkten, an denen teilweise während der Untersuchung ein Wechsel des Steuerungsverfahrens erfolgte, durchgeführt. Es wurden sowohl Unfalluntersuchungen als auch weiterführende Auswertungen, wie z. B. die Verkehrskonflikttechnik, vorgenommen. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass mit zunehmender Verkehrsabhängigkeit und Flexibilität ein sicherheitsfördernder Effekt eintritt, der im Wesentlichen auf der optimalen Anpassung der Signalisierung an den aktuellen Verkehrszustand beruht.

Es existieren andere modellbasierte Steuerungen, die auf genetischen Ansätzen, wie z. B. neuronalen Netzen beruhen. Für die Steuerungen, die auf den makroskopischen Modellen basieren, konnten in Simulationsstudien Verbesserungen im Vergleich zu einer herkömmlichen Steuerung (z. B. zeitleistungsgesteuert, ereignisgesteuert oder logikbasiert) nachgewiesen werden. Es zeichnet sich jedoch ab, dass die modell- und messwertbasierten Steuerungen beim Erreichen der Kapazität dazu neigen, ähnlich wie Festzeitsteuerungen zu reagieren [PARK et al., 2001; HUA und FAGHRI, 1995; RAHMAT et al., 2002; STEWART et al., 1998; SKABARDONIS et al., 1999; POORAN et al., 1997; VARIA und DINGHRA, 2004].

Hinsichtlich der erreichbaren Kapazität weisen GARTNER et al. (1995) darauf hin, dass häufig bereits mit verschiedenen Festzeitsteuerungen, die tageszeitabhängig optimiert sind, eine Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs erreicht werden kann. Insbesondere mit den ersten modellbasierten Ansätzen war die erreichte Qualität kaum noch zu übertreffen. Bei Verwendung moderner Umsetzungen der Steuerungsverfahren sollte beibehalten werden, dass die verwendeten Programme in einer makroskopischen (zumeist zeitplanabhängigen) Steuerungsebene für den jeweiligen Verkehrszustand optimiert ausgewählt werden.

Um den optimalen Zeitpunkt für die Umschaltung zu untersuchen, haben KUWAHARA und KOSHI (1990) die Signalprogramme über den ganzen Tag optimiert und die Lösungen in Gruppen zusammen-

gefügt, zwischen denen dann jeweils eine Umschaltung notwendig ist. Ein flexiblerer Ansatz wird von MUSSA und SELEKWA (2003) beschrieben. Grundlage des Verfahrens ist die Anwendung eines Rechenverfahrens, welches auf quadratischer Optimierung beruht.

Im Gegensatz dazu gibt es auch verschiedene Arbeiten, die eine Erhöhung der Kapazität bei Verwendung verkehrsabhängiger Steuerungen nachweisen. Dazu gehören z. B. auch JONGENOTTER und MONSMA (2002), die ein Steuerungsverfahren vorstellten, welches ohne die Vorgabe eines Rahmensignalplans unter Verwendung der Fuzzy-Logik sehr flexibel auf schwankende Verkehrsbelastungen reagieren kann.

KRONBORG und DAVIDDSON (1993) beschreiben unter anderem das Steuerungsverfahren LHOVRA, welches ohne die Definition von Phasen auskommt, also signalgruppenorientiert arbeitet. Das Steuerungsverfahren ermöglicht neben den „normalen“ Funktionen, wie z. B. der Bevorrechtigung von ÖPNV-Fahrzeugen oder der Freigabezeitanpassung, auch die verkehrsabhängige Verkürzung der Gelbzeiten.

Mit dem Ziel, die Realisierung einer verkehrsabhängigen Steuerung zu vereinfachen und die Fehleranfälligkeit zu verringern, wurde das standardisierte Steuerungsverfahren VS-Plus entwickelt. Dieses baut nicht auf der Einheit der Signalgruppen, sondern auf der Einheit der Verkehrsströme auf. Dabei muss jeder Verkehrsstrom einzeln detektiert werden. Weiterhin wird jedem Verkehrsstrom ein so genanntes Rahmensignal zugeordnet. Von besonderer Bedeutung ist die Einteilung der jeweils angemeldeten Verkehrsströme in Prioritätselemente, anhand derer sekundlich entschieden wird, welche Verkehrsströme zu- und ausgeschaltet werden [KAUL und ALBRECHT, 1994; ALBRECHT, 1994].

Es zeigt sich, dass für den ÖPNV eine gesonderte Erfassung der Fahrzeuge notwendig ist. Dies betrifft sowohl messwertbasierte als auch modellbasierte Umsetzungen der Steuerungsverfahren [DÜRR, 2002; SUNKARI et al., 1995; BELL und BROOKES, 1993]. Eine Analyse der Reisezeiten von Bussen in Hamburg [RUHNKE, 1993] hat ergeben, dass ohne die explizite Berücksichtigung der Busse bis zu 20 % der Reisezeiten durch Standzeiten an Lichtsignalanlagen entstehen. Daher müssen die Planer zu Beginn der Projektierung festlegen, welche Strategie verfolgt werden soll. Werden

bereits in der Phase der Planung die verschiedenen Zuständigkeiten einbezogen, können eventuelle Interessenskonflikte beteiligter Gruppen minimiert werden [ITS AMERICA, 2002].

OBERBERGER und COLLURA (1995) haben sich weit reichende Gedanken zu der Strategieentwicklung gemacht. In den meisten Fällen werden der Grad der Bevorrechtigung und die Mittel für dessen Erreichen von der Politik vorgegeben. Eventuell kann eine tageszeitliche Anpassung erfolgen oder es ergibt sich in der Steuerung, dass bei vermehrter Anforderung anderer Verkehrsteilnehmer auch die ÖPNV-Fahrzeuge größere Verlustzeiten in Kauf nehmen müssen.

Um die Verfügbarkeit der Steuerungsstrategie zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass die Detektoren zuverlässig funktionieren [HOFFMANN und GLATZ, 2002].

In England wird an Einzelknotenpunkten häufig das Steuerungsverfahren MOVA „Microprocessor Optimized Vehicle Actuation“ eingesetzt [VINCENT und PIERCE, 1988]. Die Steuerung basiert auf der zweifachen Detektion des Verkehrs auf jedem Fahrstreifen: Die so genannten X-Detektoren sind in einem Abstand von 35 m bis 55 m vor der Haltlinie und die IN-Detektoren in einem Abstand von 80 m bis 150 m (jeweils in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) angeordnet. Für koordinierte Knotenpunkte hingegen wird das Steuerungsverfahren SCOOT „Split, Cycle and Offset Optimisation Technique“ genutzt [BREThERTON, 1996]. Dieses basiert auf einer kontinuierlichen Erhebung der Verkehrsstärken im Straßennetz, die dann in einem Onlinemodell weiterverarbeitet werden. Damit ist einfach überprüfbar, ob Änderungen in der Steuerung zu einer Verbesserung führen würden.

PEARSON (2003) hat eine detaillierte Zusammenfassung über die Steuerungsverfahren abgegeben. Danach werden die Einsatzmöglichkeiten (Scope) der Steuerungsverfahren in drei Kategorien unterteilt: a) Einzelknotenpunkte (Individual Intersection Control), b) Hauptstraße (Arterial Control) und c) Netzsteuerung (Network Control). Die Steuerungsarten (Modes of Operation) werden gegliedert in Festzeitsteuerung (Pre-timed Operation), Koordinierung (Progression Schemes), verkehrsabhängige Steuerung (Actuated), Signalzeitenplanwahl (Traffic Responsive) und adaptive Steuerung (Adaptive Control Strategies (ACS).

Berechnung der Signalzeitenpläne

Einzelknotenpunkte

Für die Berechnungsverfahren für Lichtsignalanlagen an einzelnen Knotenpunkten wird auf die gültigen Richtlinien hingewiesen [RILSA, 1992, 2003; HBS, 2001].

Koordinierung der Grünen Welle

Die Koordinierung der Lichtsignalanlagen als Grüne Welle kann grundsätzlich manuell durchgeführt werden. Dabei wird zuerst die gemeinsame Umlaufzeit nach der Verkehrsstärke und nach der Lage der Knotenpunkte bestimmt. Die Abstände zwischen den vorhandenen Knotenpunkten und die progressiven Geschwindigkeiten beider Fahrtrichtungen spielen hierfür eine wichtige Rolle. Anschließend werden die erforderlichen Grünzeiten, die Versatzzeiten und die Vorlaufzeiten für die Hauptrichtungen berechnet. Ausgehend von dem am höchsten belasteten Knotenpunkt wird das Zeit-Weg-Diagramm grafisch konstruiert. Die Grünzeiten und Kapazitäten der Nebenrichtungen werden entsprechend angepasst und geprüft. Die manuelle Konstruktion der Grünen Welle ist ein iterativer, zeitaufwändiger Prozess.

Zur automatischen Erstellung werden in der Literatur folgende Verfahren angegeben:

- Dominanzverfahren nach SCHNABEL [SCHNABEL und LOHSE, 1997],
- Bandbreitenoptimierung nach BAAß (1985),
- Konstruktionsverfahren nach PITZINGER und SULZER (1985).

Dominanzverfahren nach SCHNABEL

Die Beschreibung des Verfahrens wurde in SCHNABEL und LOHSE (1997) angegeben. Eine vertiefende Erläuterung findet sich dort im Kapitel 2.2.10.2 „Berechnungsverfahren- Dominanzverfahren“, Seite 275 ff.

Bandbreitenoptimierung nach BAAß

Die Beschreibung des Verfahrens ist BAAß (1985) zu entnehmen. Ergänzend wurde auf eine Diplomarbeit zurückgegriffen, die sich mit der Weiterentwicklung des Verfahrens und dessen möglichem Einsatz im deutschen Markt beschäftigt [LÖNS, 1989].

Die Bandbreitenoptimierung unterstellt vereinfachend zweiphasige Knotenpunkte mit gleich großen Freigabezeiten in Fahrtrichtung, gleichen Entfernungen und gleichen Geschwindigkeiten in Fahrt- und Gegenrichtung.

In der Auswahl zur Ermittlung der besten Lösung werden zwei Möglichkeiten unterschieden:

- Branch-and-Bound-Algorithmus nach LITTLE,
- Interferenzalgorithmus nach BROOKS.

Beide Verfahren sind in BAAß (1985) ausführlich erläutert.

Konstruktionsverfahren nach PITZINGER und SULZER

Die Beschreibung dieses Verfahrens wurde PITZINGER und SULZER (1985) entnommen. Es handelt sich um das komplexeste der drei Verfahren. Zur Umsetzung des Verfahrens sind zahlreiche Bearbeitungsschritte unter Verwendung von Formeln und Nomogrammen notwendig. Nach Aussage des Verfassers ist eine numerische Berechnung ebenfalls möglich.

Die Lösung wird durch das Zusammenspiel von drei maßstäblichen Diagrammen erreicht:

- Geschwindigkeits-Weg-Diagramm,
- Umlaufzeit-Teilpunktabstand-Diagramm (Z-L-Diagramm),
- Zeit-Weg-Diagramm.

Im Verfahren nach PITZINGER wird mit vorher angenommenen Phasenfolgen gearbeitet.

Es zeigt sich, dass das Dominanz- und Bandbreitenverfahren nach BAAß zu besseren Ergebnissen führt als das ohnehin recht komplexe Verfahren nach PITZINGER und SULZER. Nachteile des Verfahrens nach BAAß sind die vereinfachenden Annahmen bezüglich der Lichtsignalsteuerung an den einzelnen Knotenpunkten (zweiphasige Abläufe, identische Knotenpunktabstände und Geschwindigkeiten in Richtung und Gegenrichtung). Sowohl bei BAAß als auch in der genannten Diplomarbeit sind zwar Lösungen für mehrphasige Steuerungen und für abweichende Abstände und Geschwindigkeiten aufgezeigt, aber dies erschwert den Bearbeitungsablauf und erfordert zusätzliche Berechnungsschritte.

Im englischsprachigen Raum wird oft das Verfahren MAXBAND für die Berechnung der Koordinierung eingesetzt [LITTLE und KELSON, 1980]. Die Grundversion des Verfahrens entspricht weitgehend dem nach BAAß. Das Verfahren MAXBAND ist im Rechenprogramm PASSER integriert [MESSETER et al., 1974]. In der letzten Version von PASSER II wurde das Verfahren MAXBAND so weiter entwickelt, dass mehr als zwei Phasen und Phasentausch möglich sind. Mit dem Programm PASSER II können auch Teilkoordinierungen berechnet werden.

Offline-Optimierungstools

Mit der Entwicklung der Computertechnologie haben Rechenprogramme die Handbücher und Merkblätter ersetzt, um die Signalzeitenpläne zu berechnen und zu optimieren. Diese mächtigen Rechenprogramme benutzen historische Daten und berechnen optimale Signalzeitenpläne und Zeit-Weg-Diagramme mit minimierter Wartezeit und Anzahl der Halte.

Urban Traffic Control Systems (UTCS, 1-GC)

Die erste Generation (1-GC) der UTCS ist ein zentralisiertes Steuerungssystem mit festen oder variablen Signalzeitenplänen. UTCS wurde von der Federal Highway Administration (FHWA) in den 1970er Jahren entwickelt. In der Online-Version der UTCS besteht auch die Möglichkeit, Grünzeiten verkehrsabhängig zu variieren (CIC) [PEARSON, 2003].

SOAP

SOAP führt eine makroskopische Analyse an Einzelknotenpunkten durch. Es berechnet die Umlauf- und Grünzeit bei Minimierung eines Performance Index. Input-Daten sind die Verkehrsstärke, der Lkw-Anteil, der Anteil der Abbieger und die Sättigungsverkehrsstärke. Output-Daten sind die Wartezeit, der Auslastungsgrad, die Rückstaulänge, der Kraftstoffverbrauch und die Anzahl der Halte [PEARSON, 2003].

AMPEL-K 4.0

AMPEL-K ist vergleichbar mit SOAP im deutschsprachigen Raum. Es können zusätzlich Zwischenzeitberechnung durchgeführt werden.

Traffic Network Study Tool (TRANSYT)

TRANSYT ist das am weitesten verbreitete Programm für die Signalberechnung. Die Originalversion wurde vom Transportation and Road Research Laboratory in England im Jahr 1968 entwickelt. TRANSYT wird normalerweise als Offline-Optimierungstool verwendet. Es kann aber auch online geschaltet werden. Dabei werden in einem Zeitraum von wenigen Minuten die Signalzeitenpläne optimiert und erneuert. TRANSYT ist ein makroskopisches, deterministisches Simulations- und Optimierungsmodell. Das Modell verlangt die Angabe der Verkehrsstärken und Abbiegebeziehungen. Das Programm optimiert die Grünzeiten und die Versatzzzeiten. Es wird iterativ eine Reihe von Optimierungs- und Simulationsschritten durchgeführt, bis die optimale Lösung gefunden ist. In TRANSYT wird auch der Effekt der Kolonnenauflösung berücksichtigt.

Für die USA wurde eine Spezialversion mit dem Namen TRANSYT-7F erstellt. TRANSYT-7F kann für die Berechnung und Bewertung von koordinierten Netzen oder Hauptstraßen mit bis zu 50 Knotenpunkten und bis zu 250 Strecken benutzt werden.

MAXBAND

MAXBAND ist ein Programm zur Optimierung der Grünbänder für koordinierte Hauptstraßen und dreieckige Netze. MAXBAND erzeugt Umlaufzeiten, Versatzzzeiten, progressive Geschwindigkeiten und Phasenfolgen, um die Gesamtbandbreite zu maximieren. Der Hauptvorteil von MAXBAND besteht in der Möglichkeit, verschiedene Umlaufzeiten und progressive Geschwindigkeiten zu produzieren. In MAXBAND wird der ÖPNV nicht berücksichtigt.

PASSER II

PASSER II (Version 80, 90 und 02) ist ein Programm zur Optimierung der Grünbänder für koordinierte Hauptstraßen. In einer modifizierten Version wird die Webster-Wartezeitformel für die Schätzung der Pulkeffekte eingesetzt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind die Umlaufzeit, die Phasenfolge, die Grünzeit, die Versatzzzeit und die progressive Geschwindigkeit, mit denen die Grünbänder in beiden Fahrtrichtungen maximiert werden. Der Vorteil des Programms ist die Flexibilität der variablen Umlaufzeit und der Bandbreite sowie die Berücksichti-

gung der Mehrphasigkeit für unterschiedliche Steuerungsstrategien. Angaben über Emissionen und Kraftstoffverbrauch werden nicht gemacht.

SIGOP

Das makroskopische Flussmodell SIGOP berechnet die Umlaufzeit, die Grünzeiten und die Versatzzzeiten in einem Netz. Dabei wird die Wartezeit minimiert. SIGOP kann bis zu 150 Knotenpunkte behandeln. Als Ergebnis werden das Zeit-Weg-Diagramm und statistische Daten entlang der Straßen ausgegeben. SIGOP kann bis zu vier Phasen modellieren [PEARSON, 2003].

Konventionelle verkehrsabhängige Steuerungsverfahren

Im Gegensatz zu den Offline-Modellen, die historische Daten benutzen und ein oder mehrere optimierte Signalzeitenpläne erzeugen, benutzen verkehrsabhängige Steuerungsverfahren Echtzeitdaten von Detektoren, um die Signalzeitenpläne an die aktuellen Verkehrsbedingungen anzupassen. In Deutschland werden derzeit schwerpunktmäßig verkehrsabhängige, logikbasierte Steuerungsverfahren eingesetzt. Ein typisches Beispiel ist das Verfahren PDM von der Firma Siemens, das auch in den RiLSA [FGSV, 1992, 2003] ausführlich dargestellt wird. Bei den konventionellen, verkehrsabhängigen Verfahren werden die Phasen und Phasenübergänge offline definiert und anschließend online anhand der Messdaten der Detektoren mit der Logik verknüpft. Als Messdaten können makroskopische Kenngrößen wie Verkehrsstärken oder Rückstaulängen verwendet werden. Es können aber auch mikroskopische Kenngrößen wie Zeitlücken oder Anforderungsimpulse verwendet werden. In der gängigen Praxis werden oft nur die Zeitlücken und Anforderungsimpulse an Detektoren gemessen und dann als Eingangsparameter für die Schaltlogik benutzt.

Adaptive verkehrsabhängige Steuerungsverfahren

Die adaptiven Steuerungsverfahren verwenden Echtzeitdaten von Detektoren, um eine permanente Optimierung der Signalzeitenpläne für eine Hauptstraße oder ein Netz zu berechnen. Dabei werden überwiegend makroskopische Daten verwendet. Dies bedeutet, dass Rückstau, Unfälle und Veränderungen der Verkehrssituation ohne Ände-

Kategorie	Konventionell	Adaptiv
Verkehrsmodell	nur ansatzweise, Vorauswahl	ja, alle Kenngrößen, aktuell und historisch
Steuerungsprinzip	„Reiz-Reaktions-Regler“	Optimierung („geschicktes Try and Error“)
Optimalität	nicht garantiert (Heuristik)	garantiert in Verfahrensgrenzen
Prognose	Nein	Ja
Verhalten bei Überlast	lokal \approx Festzeit, Netz: SP-Wechsel	dynam. Anpassung von SP, Split und Versatz
Koordinierung	statisch \approx hist. Durchschnittswerte	dynamisch \approx aktuelle Messwerte
Rechenzeitbedarf	Standard	etwas höher, aber ohne Probleme
Umsetzung von Zielen	indirekt, aufwändig, ungenau	direkt, einfach, transparent
Planungsschwerpunkt	Konstruktion der Logik \Rightarrow viel IT	Einstellung der Steuerung \Rightarrow wieder mehr VT
Nachvollziehbarkeit	theoretisch vorh., praktisch oft nicht	nicht analytisch, aber mit Werkzeugen
Fehlerrisiko	hoch, da Logik immer neu	gering, da Standard-Algorithmus
Komplexität, Netzgröße Grenze schnell erreicht	keine Grenze, Vorteile nehmen sogar zu	
„Abfallprodukte“	keine	höherwertige Verkehrsdaten, Simulation
Anforderungen Zentrale	Standard	OCIT-outstations V1.0, VT-Datenbank
Anforderungen LSA	Standard	Kompatibel zu allen LSA-Herstellern
Anbind. V-Management	i. W. nur über SP-Wechsel	vollständig und einfach über Zielfunktion
Verlustzeiten	oft hoch	Reduktion bis 40 %

Tab. 2.1: Unterschiede zwischen konventionellen und adaptiven Steuerungsverfahren [GEVAS, in ADAC, 2004]

rung an den Steuerungsanlagen berücksichtigt werden können.

Die Unterschiede zwischen konventionellen und adaptiven Steuerungsverfahren werden in Tabelle 2.1 erläutert [GEVAS, in ADAC, 2004].

MOTION (Method for the Optimization of Traffic Signals in Online controlled Networks) [ADAC, 2004]

Grundidee von MOTION ist es, die Vorteile von online optimierten „Grünen Wellen“, für die wichtigsten Verkehrsströme in einem Netz, mit der Flexibilität von unmittelbaren Reaktionen einer lokalen Steuerung an den Knotenpunkten zu verbinden. Um diese flexible Steuerung zu ermöglichen, werden Verkehrsdaten im Straßennetz gesammelt, vervollständigt und analysiert. Anhand der Analyse werden alle Komponenten der Signalprogramme, wie Umlaufzeit, Phasenfolge, Versatzzeiten und mittlere Grünzeitverteilung, für alle Knotenpunkte im Netz optimiert und neue Signalprogramme ermittelt.

Der erste Schritt innerhalb dieses Verfahrens umfasst die Datenerfassung und -aufbereitung. Im Wesentlichen werden Zählwerte und zeitliche (Detektor-)Belegungswerte verwendet, die für die verschiedenen MOTION-Module aufbereitet werden.

Der zweite Schritt ist die Verkehrsmodellierung und Analyse. Hier werden die verfügbaren Daten vervollständigt, um ein konsistentes Abbild der Verkehrssituation im Netz zu bekommen. Dann wird eine Prognose für das nächste Optimierungsintervall berechnet und die automatische Störfallerkennung durchgeführt.

Der dritte Schritt ist die Optimierung der Steuerungsvariablen für die Signalprogramme. Zunächst werden für alle Knotenpunkte Netzumlaufzeit und mittlere Grünzeitverteilung optimiert. Auf Basis der wichtigsten Verkehrsströme und mit Hilfe von modellierten Fahrzeugpuls wird dann ein Netz von Grünen Wellen konstruiert. Dabei werden Phasenfolge und optimale Versatzzeit mit Hilfe von Zielfunktionen aus Wartezeiten und Halten bestimmt.

Optimierungskriterien für MOTION sind also im Wesentlichen die Auslastungsgrade sowie die Wartezeiten und Halte in den einzelnen Zufahrten.

In einem vierten Schritt wird die Entscheidung getroffen, ob die aktuellen Signalprogramme angepasst werden müssen. Änderungen werden nur dann ausgeführt, wenn eine signifikante Verbesserung der Optimierungszielfunktion erreicht wird. Abhängig vom lokalen Steuergerät, vom Übertragungsverfahren und dem verwendeten lokalen Steuerungsverfahren werden die Signalprogramme entsprechend aufbereitet und zu den Geräten übertragen.

Diese Prozedur wird in einer bestimmten Zeitspanne (5, 10 oder 15 Minuten) wiederholt oder erfolgt ereignisorientiert. Innerhalb dieses Zeitintervalls arbeitet das lokale Steuerungsverfahren autonom und modifiziert das Signalprogramm aufgrund der lokalen Verkehrssituation und der Anforderungen einzelner Fahrzeuge, unter Berücksichtigung der durch die Zentrale vorgegebenen Rahmenbedingungen.

BALANCE und EON [KRUSE, GANSER, in STEIERWALD und MARTENS, 2003]

Die adaptive Netzsteuerung BALANCE (Balancing Adaptive Network Control Method) wurde im Rahmen der Forschungsprojekte Munich COMFORT und TABASCO erstellt.

BALANCE bearbeitet Steuerungsaufgaben mit einem Zeithorizont von 5-10 Minuten. Dadurch ist es möglich, die Verkehrssteuerung an längerfristige Änderungen in der Nachfrage und Störungen im Verkehrsablauf anzupassen.

Die in BALANCE verwendeten Optimierungsverfahren bauen auf einem makroskopischen Verkehrs- und Wirkungsmodell auf und verwenden als Eingangsgrößen gemittelte Messwerte. Der Nutzen entsteht hier in der netzweiten Erfassung von Verkehrsdaten und einer abgestimmten Optimierung der Steuerungen aller LSA im Netz, durch Anpassung des Steuerungsrahmens (LSA-Rahmensteuerung). Dieser Steuerungsrahmen belässt jedoch den einzelnen lokalen LSA-Steuerungen Freiheiten zur Anpassung an kurzfristige Schwankungen. Der erzeugte Steuerungsrahmen ist die Eingangsgröße der nachfolgend erläuterten multimodalen Netzsteuerung EON.

Durch die verkehrsabhängig aktualisierte Koordination der einzelnen Knotenpunktsteuerungen (dynamische Grüne Welle) konnte in Feldversuchen und Simulationsstudien gegenüber konventionellen Koordinierungen mit starr vorgegebenen Grünen Wellen eine Verringerung der IV-Verlustzeiten von 10-40 % nachgewiesen werden. Weiterhin sind die Daten der Verkehrs- und Wirkungsmodellierung von BALANCE, wie z. B. Wartezeiten, Staulängen oder Reisezeiten im Netz, für den Planer oder für andere Verfahren zugänglich und ermöglichen eine umfangreiche Analyse des aktuellen Verkehrszustands.

Die ereignisorientierte Netzsteuerung (EON) wurde erarbeitet, um auf mikroskopischer Ebene in Ergän-

zung zu BALANCE den Anforderungen einzelner Fahrzeuge gerecht zu werden. Um Bussen und Bahnen Vorrang vor dem Individualverkehr geben zu können, müssen diese selektiv als Einzelfahrzeuge erfasst und durch die Steuerung auf geeignete Weise bedient werden. Die ereignisorientierte Netzsteuerung berechnet die Auswirkungen von Steuerungsmaßnahmen in einem größeren Netzbereich, für einen erweiterten Entscheidungshorizont von ca. 100 Sekunden. EON ist ein verkehrsadaptives Verfahren, das die einzelnen Ereignisse sehr fein auf einzelne Fahrzeuge auflöst. Dieser mikroskopische Ansatz ermöglicht eine integrierte Bedienung aller Verkehrsarten und bietet folgende Vorteile:

- Verminderung der gesamten Verlustzeiten für alle ÖV-Fahrzeuge im Netz (ÖV-ÖV-Ausgleich),
- Berücksichtigung von fahrzeugspezifischen Daten des öffentlichen Verkehrs (z. B. Verspätungen und Besetzungsgrad),
- Anpassung von Freigabezeiten und Grünen Wellen für den Individualverkehr bei gleichzeitiger Bevorrechtigung von ÖV-Fahrzeugen (IV-ÖV-Ausgleich) in Echtzeit.

Die Vorteile der multimodalen Netzsteuerung EON kommen vor allem in hochbelasteten Netzbereichen mit einer Vielzahl von konkurrierenden Anforderungen zum Tragen. Als Beispiele sind hier sich kreuzende ÖV-Linien, Knotenpunkte mit gegenseitigen Behinderungen von IV und ÖV oder hochbelastete Netzbereiche mit kurzfristigen Wechseln von Anforderungen zu nennen.

BALANCE wurde in München als Teil des MOBILNET-Programms eingesetzt. Weitere Anwendungen in den Ballungsräumen Dresden, Frankfurt Rhein/Main, Köln, München und Stuttgart sind geplant.

Second Generation Control (2-GC)

Die zweite Generation (2-GC) der UTCS benutzt eine online Strategie. Diese Strategie verwendet die online gemessenen oder prognostizierten Daten, um die optimalen Signalzeitenpläne zu ermitteln. Der Optimierungsprozess kann alle 5 Minuten wiederholt werden. Um die Störung in der Übergangszeit zu vermeiden, werden die Signalzeitenpläne nur alle 10 Minuten neu berechnet. Das Programm enthält auch ein Modell für die Kurzzeitprognose und ein Modell zur Minimierung der Übergangszeit zwischen zwei Signalzeitenplänen [PEARSON, 2003].

Third Generation Control (3-GC)

Die 3-GC ist genauso wie die 2-GC ein vollverkehrsabhängiges Online-Steuerungsverfahren. Dieses Verfahren berechnet die Signalzeitenpläne bei Minimierung eines Performance Index für das ganze Netz. Für die Optimierung werden prognostizierte Verkehrsdaten verwendet. Im Gegensatz zur 2-GC kann in der 3-GC die Übergangszeit zwischen zwei Signalzeitenplänen auf 3-5 Minuten verkürzt und die Umlaufzeit variiert werden [PEARSON, 2003].

Distributed Intelligence Traffic Control System (DITCS)

DITCS ist ein Steuerungssystem, bei dem das Steuerungsgerät an Knotenpunkten normalerweise Festzeitsignalzeitenpläne benutzt, aber ggf. dynamisch die Grünzeiten nach den Verkehrsbedingungen ändern kann. DITCS sind isolierte Systeme, die „Real Time Adaptive“-Steuerungen anbieten. Das Zentralsystem sendet Synchronisationsimpulse, aber die meisten Funktionen werden innerhalb des Knotenpunktes durchgeführt. Das bekannteste DITCS-System ist das Sydney Coordinated Traffic Adaptive System (SCATS) [PEARSON, 2003].

SCATS (Urban Traffic Control System)

SCATS wurde vom New South Wales Department of Main Roads in Australien in den frühen 1970er entwickelt. SCATS ist ein dynamisches Steuerungssystem mit einer dezentralen Steuerungsarchitektur. Die Schlüsselemente wurden von LOWRIE (1982, 1989) dargestellt. SCATS erneuert die Umlaufzeit an Knotenpunkten unter Verwendung der Daten der lokalen Detektoren an den Haltelinien. SCATS erlaubt die Unterdrückung von Phasen, die nach der Verkehrslage nicht angezeigt werden sollen. Die Versatzzeiten zwischen den benachbarten Knotenpunkten sind vordefiniert, sie können aber angepasst werden, indem die Umlaufzeit und die progressiven Geschwindigkeiten geändert werden.

Split Cycle and Offset Optimisation Technique (SCOOT)

SCOOT ist ein zentralisiertes, rechnergestütztes Steuerungsmodell, das im Transportation Road Research Laboratory in Großbritannien in den frühen 80er Jahren entwickelt wurde. Es wird auch als On-

line-TRANSYT bezeichnet, weil die Optimierungsalgorithmen in beiden Systemen fast identisch sind. Das System arbeitet mit einer „Real Time Adaptive“-Steuerung. SCOOT verwendet Systemdetektoren, um online die Verkehrsflussdaten, die Reisezeit und den Auslastungsgrad zu bestimmen. Daraus werden die Rückstaulängen an Knotenpunkten prognostiziert. Um einen vordefinierten Auslastungsgrad (normalerweise 90 %) zu erhalten, werden die Grünzeiten und die Versatzzeiten verändert. Untersuchungen haben gezeigt, dass SCOOT am effektivsten ist, wenn die Verkehrsstärke in der Zufahrt unterhalb der Kapazitätsgrenze liegt und wenn die Entfernungen zwischen den Knotenpunkten kurz sind. Verkehrssysteme mit dem SCOOT-Steuerungsverfahren werden in Europa, Australien, Asien und seit kurzem auch in Nordamerika eingesetzt. SCOOT unterscheidet sich von TRANSYT hauptsächlich in den folgenden drei Punkten:

- Es misst die Verkehrsstärken in Echtzeit im Gegensatz zur Herleitung der Verkehrsstärken aus den Strömen, die aus den benachbarten Knotenpunkten zufließen.
- Es erneuert online die Rückstau- und Optimierungsberechnung kontinuierlich, im Gegensatz zu einer einmaligen Erneuerung.
- Es führt eine rekursive Optimierung der Signalzeitenpläne durch, im Gegensatz zu einer One-step-Optimierung.

Die Verkehrsmodelle von SCOOT und SCATS basieren auf einem Staumodell, in dem die Fahrzeuge an der Haltelinie vertikal aufgestapelt werden. Der Stau effekt auf den Strecken wird demnach nicht berücksichtigt.

Real-time Traffic Adaptive Signal Control System (RT-TRACS) [PEARSON, 2003]

1991 hat die US FHWA (United States Federal Highway Administration) einen Auftrag vergeben, ein „Real Time Adaptive“-Steuerungssystem zu entwickeln. Die Hauptanforderung an das System ist die effektive, schnelle Reaktion des Systems auf die kurzfristigen Änderungen der Verkehrsbedingungen. RT-TRACS enthält mehrere „Real Time“-Prototypen, die jeweils unter unterschiedlichen Verkehrs- und Geometriebedingungen optimal funktionieren. Wenn die Bedingungen es erfordern, kann RT-TRACS automatisch zu einer anderen Strategie umschalten. Folgende Eigenschaften sind für RT-TRACS vorgesehen:

- sowohl verteilte als auch zentralisierte Steuerungsmöglichkeit,
- dynamische Priorität für ausgewählte Strecken,
- Fähigkeit zur Interaktion mit dynamischen Verkehrsverteilungstools,
- verbesserte Leistungsfähigkeit in der Rückfallebene im Fall von fehlerhaften Detektoren,
- effektive Nutzung der vorhandenen Erfahrungen in „Real Time“-Steuerung.

Fünf Prototypstrategien wurden für die Anwendung des RT-TRACS-Programms entwickelt und evaluiert. Die FHWA hat fünf separate Aufträge vergeben, um diese Real Time-Prototypstrategien zu entwickeln. Diese Aufträge haben die University of Arizona, die University of Minnesota, die University of Massachusetts (Lowell)/PB Farradyne, die Wright State University of Ohio und die University of Maryland/University of Pittsburgh erhalten. Die Kaman Sciences Corporation ist verantwortlich für die Evaluierung dieser Prototypen mit Hilfe des CORSIM-Simulationsmodells. Im Jahr 1997 haben die FHWA und die University of Arizona ein Team gebildet, um einen der Prototypen, RHODES, zu entwickeln und ihn im Feldtest zu untersuchen. RHODES ist eine Version von RT-TRACS mit offener Architektur.

Drei der Prototypen, RHODES von der University of Arizona, OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) von der University of Massachusetts und RTACL von der University of Pittsburgh/University of Maryland, befinden sich bereits im fortgeschrittenen Entwicklungszustand. Simulationsstudien haben gezeigt, dass diese Prototypen signifikante Erhöhungen der Kapazität und Reduzierungen der Wartezeit produzieren.

UTCS-Strategie	Veränderung in % für die Reisezeit im Vergleich zum Referenzfall (Festzeitsteuerung)			
	Morgenspitze	Normalzeit	Abendspitze	Tagesdurchschnitt
1-GC (Arterial)	-2.6	-4.0	-12.2	NA
1-GC (Network)	-3.2	+1.9	-1.6	NA
2-GC (Arterial)	-1.3	-3.8	+0.5	-2.1
2-GC (Network)	+4.4	+1.9	+10.7	+5.2
3-GC (Arterial)	+9.2	+24.0	21	+16.9
3-GC (Network)	+14.1	-0.5	+7.0	+8.2

Tab. 2.2: Vergleich der Ergebnisse von UTCS-Steuerungsstrategien nach GARTNER et al. (1995)

Die Ergebnisse der Laborevaluierung von RHODES zeigen eine Reduzierung der Wartezeit, der Anzahl der Halte und des Kraftstoffverbrauchs in Höhe von jeweils 24 %, 9 % und 6 %, im Vergleich zu einer verkehrsabhängigen Steuerung bei gleicher Kapazität. Eine Hauptstraße in Reston, Virginia, mit 16 Knotenpunkten wurde für den Feldtest ausgesucht.

ATSAC (Automated Traffic Surveillance and Control) [PEARSON, 2003]

Basierend auf dem System UTCS hat die Stadt Los Angeles das Steuerungssystem ATSAC entwickelt. ATSAC ist eines der ältesten und fortgeschrittensten Verkehrsmanagementsysteme mit zentralisierter adaptiver Signalsteuerung. Das System verwendet Messsysteme mit Induktionsschleifen, Videoüberwachungssysteme, Signaloptimierungssoftware und Real-Time-Fernsteuerungen der Signalanlagen.

Außer den oben dargestellten Systemen werden in der Literatur noch viele andere Steuerungssysteme erwähnt, die mehr oder weniger aus den Verfahren SCOOT oder SCATS entwickelt wurden. Dies sind z. B. die Steuerungssysteme DRIVE und PRIMAVERA [FOX et al., 1995], SAPPORO [WILD, 1994], SPOT [KOSONEN und DAVIDSSON, 1994], UTOPIA, TASS, CLAIRE, PRODYN, COP, CRONOS, etc. Sie werden hier nicht ausführlich dargestellt.

Schlüsselergebnisse und Erfahrungen

Lichtsignalanlagen können viele Vorteile bei der Steuerung von plangleichen Knotenpunkten bringen. Es hat sich herausgestellt, dass die fortgeschrittensten Systeme anscheinend nicht immer die effektivsten sind. Demnach ist Vorsicht geboten bei der Installation von Steuerungssystemen, die kosteneffektiv sein sollen. Wichtig ist auch, dass der Ist-Zustand der vorhandenen Steuerungssysteme festgestellt werden muss, damit die Verbesserung solcher Systeme nachgeprüft werden kann. Wenn ein altes System festzeitgesteuert ist und durch eine adaptive Steuerung ersetzt wird, kann eine Verbesserung erwartet werden. Wenn aber das vorhandene System bereits an die Verkehrssituation angepasst ist, wird die Verbesserung geringer sein.

PEARSON (2003) zeigt, dass die einfachsten Methoden im Schnitt die besseren Ergebnisse liefern. Diese Aussage basierte auf aufwändigen Feldtests

in den 90er Jahren [GARTNER et al., 1995], in denen die drei Generationen der UTCS mit einem festzeitgesteuerten Standardsystem verglichen wurden (siehe Tabelle 2.2). Die 1-GC der UTCS hat in allen ihren verschiedenen Funktionsmodulen bessere Ergebnisse erbracht. Diese Ergebnisse demonstrieren, dass die 1-GC eine messbare Reduzierung der Reisezeit im Vergleich zu einem gut gewarteten Festzeitsystem produziert. In der 2-GC und der 3-GC der UTCS ist die Effektivität der Steuerungssysteme überwiegend von der Qualität der Kurzzeitprognose in der Verkehrsnachfrage abhängig. Die verkehrsabhängige Signalzeitenplanwahl ist im Allgemeinen besser als die zeitabhängige Signalzeitenplanwahl. Die Verbesserungen durch die Methode in der 2-GC sind gemischt, aber überall geringer als die in der 1-GC. Die 3-GC der UTCS war fast bei allen Verkehrssituationen ineffektiv und produzierte nur negative Ergebnisse. Im Gegensatz zur allgemeinen Vorstellung, bringt eine höhere Verkehrsabhängigkeit schlechtere Ergebnisse im Vergleich zur Festzeitsteuerung. Nähere Prüfungen haben gezeigt, dass die Erwartungen nicht erreicht wurden, weil die Modelle und Rechenprozeduren des Systems UTCS ungeeignet waren. Der Grund für den eingeschränkten Erfolg der adaptiven Steuerung wurde vermutet in

- der Fortpflanzung der Ungenauigkeiten in der Messung und in der Prognose der Verkehrsstärke. Deswegen kann das System nicht schnell genug auf die Änderung des Verkehrs reagieren,
- dem häufigen Wechsel der Signalzeiten, wodurch beträchtliche Wartezeiten verursacht werden,
- dem Zeitbedarf, den das Modell benötigt, um ein gutes Optimum zu berechnen.

2.2 Nutzen der fortgeschrittenen Lichtsignalsteuerung

Verbesserungen in der Lichtsignalsteuerung können sehr effektiv für die Staureduzierung im Verkehr sein. Sie bieten ein hohes Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vergleich zu anderen Methoden, die bei der Staureduzierung im Oberflächenverkehr eingesetzt werden [MEYER, 1997]. Lichtsignalanlagen brauchen nicht unbedingt immer auf dem aktuellen technischen Stand zu sein, um große Verbesserung im Verkehrsfluss zu realisieren. Eine einfache Verbesserung, z. B. die Koordinierung der Knoten-

punkte, die vorher eigenständig geschaltet wurden, kann bereits zu positiven Ergebnissen führen. Projekte in den USA zeigten [MEYER, 1997]:

- Durch die Verbindung früher unkoordinierter, festzeitgesteuerter Knotenpunkte mit einer neuen Optimierung der Signalzeitenpläne sowie ein zentralisiertes Steuerungssystem kann die Reisezeit um 10-20 % reduziert werden.
- Durch Installierung fortgeschrittener Computersysteme kann die Reisezeit im Vergleich zu koordinierten, festzeitgesteuerten Knotenpunkten mit alten Signalzeitenplänen um ca. 20 % reduziert werden.
- Durch Installierung fortgeschrittener Computersysteme kann die Reisezeit im Vergleich zu unkoordinierten, verkehrsabhängigen Steuerungssystemen (Traffic Actuated Controls) um 10-16 % reduziert werden.
- Durch Installierung fortgeschrittener Computersysteme kann die Reisezeit im Vergleich zu koordinierten, festzeitgesteuerten Knotenpunkten mit Grünzeitmodifikation um 8-10 % reduziert werden.
- Durch Optimierung der Signalzeitenpläne kann die Reisezeit in koordinierten, festzeitgesteuerten Systemen um 10-15 % reduziert werden.

Zusätzlich zur signifikanten Reduzierung der Reisezeit führt die Verbesserung der Lichtsignalanlagen auch zur Reduzierung der Anzahl der Halte, der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs. Das Texas Traffic Light Synchronization Grant Program II (TLS II) hat z. B. eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, der Wartezeit, der Anzahl der Halte um jeweils 13.5 % (20.8 Millionen Gallonen/Jahr), 29.6 % (22 Millionen Stunden/Jahr) und 11.5 % (729 Millionen Halte/Jahr) erreicht. Die volkswirtschaftliche Gesamtersparnis summierte sich näherungsweise zu \$ 252 Mio. im folgenden Jahr. Die Studie zeigte, dass für jeden Dollar, der für die Optimierung der Signalzeitenpläne ausgegeben wurde, 10 Gallonen Kraftstoff gespart werden [FAMBRO, 1995].

Ein aggressives Programm zur Neuo Optimierung der Signalzeitenpläne in Kalifornien zeigte ein Nutzen/Kosten-Verhältnis von 58 zu 1. In diesem Programm wurden 3.172 Signalanlagen verbessert. Eine Reduzierung der Wartezeit um 15 %, der Halte um 16 % und der Reisezeit um 7,2 % wurde er-

reicht. Der Nutzen durch ersparte Kraftstoffe ist ca. 18-mal so groß wie die Kosten des Programms [MEYER, 1997].

Eine andere Simulationsstudie zeigt, dass die Neuo-optimierung der Signalzeitenpläne die Reduzierung um 4,8 %, 2,2 % und 6,2 % der CO-, NOx- and HC-Emission erzielte. Gleichzeitig wurde die Verkehrsleistung um 6,2 % erhöht und die Wartezeit um 2,2 % reduziert [LU, 2002].

RAKHA et al. (2000) haben durch Messungen festgestellt, dass die Qualität der Koordinierung die Emissionen ebenfalls deutlich beeinflusst (siehe Bild 2.1).

Adaptive Steuerungsverfahren haben noch zusätzliche Vorteile, wie z. B. die verbesserte Sicherheit. Diese Verfahren können die Anzahl der Halte in koordinierten Systemen reduzieren und dadurch das Risiko von Auffahrunfällen vermindern. Im Vergleich zu vollständig optimierten, festzeitgesteuerten Systemen wurde in SCATS die Anzahl der Halte um bis zu 40 % reduziert [HICKS und CARTER, 2000]. Nach der Implementierung von SCATS wurde eine Reduzierung der Anzahl der Halte in Broward

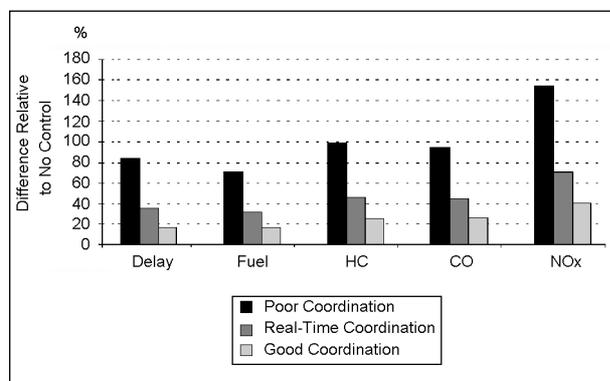


Bild 2.1: Einfluss der Steuerungsarten auf Wartezeit, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen nach RAKHA et al. (2000)

County, Florida, um 28 % und in Oakland County, Michigan, um 33 % erreicht. ATSC in Los Angeles hat die Anzahl der Halte um 41 % reduziert [HICKS und CARTER, 2000].

Ein anderer Vorteil der adaptiven Steuerungsverfahren ist, dass sie in der Lage sind, mit den Städten zu wachsen. Die „ITS deployment tracking database“ [OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1999] zeigt, dass nur noch in wenigen Gebieten die Signalanlagen neu berechnet werden. In der Tat haben die adaptiven Steuerungssysteme fast 75 % der Programmierarbeiten an Signalanlagen in den USA, die normalerweise immer wieder neu berechnet werden müssten, eliminiert [HICKS und CARTER, 2000]. Die meisten Ballungsgebiete verfügen nicht über die Ressourcen, um ihre Lichtsignalanlagen regelmäßig neu berechnen zu lassen. Mit adaptiven Steuerungssystemen entfällt diese Arbeit, da diese Systeme kontinuierlich neue Signalzeitenpläne eigenständig generieren. Dies ist besonders nützlich für Gebiete mit großem Wachstum, in denen die festzeitgesteuerten Signalzeitenpläne schnell veraltet sind.

KRUSE [siehe STEIERWALD und MARTENS, 2003] hat die Auswirkungen der adaptiven Steuerung in kleinen Straßennetzen in zwei Modellrechnungen veranschaulicht und wirtschaftlich bewertet. Es zeigt sich, dass die Reisezeit bei einem Straßennetz mit 30 Knotenpunkten um 10 % reduziert werden konnte. In einer zweiten Modellrechnung wurde der Kraftstoffverbrauch betrachtet. Bei demselben Straßennetz wurde ebenfalls eine Reduzierung um 10 % ermittelt.

MÜCK [siehe STEIERWALD und MARTENS, 2003] hat in einer Simulationsstudie festgestellt, dass durch die Installation des BALANCE-Systems die Verlustzeiten im System um bis zu 39 % reduziert werden konnten (siehe Bild 2.2).

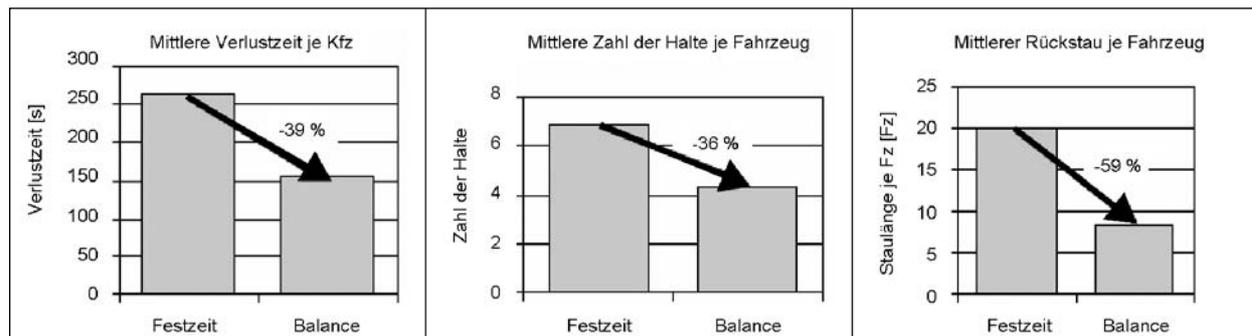


Bild 2.2: Nutzen von BALANCE nach MÜCK (2003)

2.3 Beispiele der Anwendungen

MOTION – Piräus (Griechenland)

Die Signalprogramm-Optimierung wird im Stadtzentrum von Piräus in einem Regelbereich mit 22 Knotenpunkten angewandt. Im von der EU geförderten Forschungsprojekt COSMOS (Congestion Management Strategies and Methods in Urban Sites) [BIELEFELDT, 1996] wurde das MOTION-System mit neuen Algorithmen zur Stau- und Störfallerkennung und zum Staumanagement erweitert. Zudem wurde das Lichtsignalsteuerungssystem mit einem Wechselwegweisungssystem (VMS-System) verknüpft, um die Autofahrer über die Verkehrssituation in Piräus zu informieren.

Das Ergebnis der Untersuchungen war, dass die Reisezeiten innerhalb des Regelbereichs um durchschnittlich 8 bis 14 % verkürzt werden konnten. Die verkehrsbedingten Emissionen konnten zwischen 10 und 17 % reduziert werden. Bei der Anzahl der ermittelten Staus ergab sich eine Reduzierung von 20 bis 30 % [KRUSE, 1999].

Es ergab sich, dass bei Verwendung der automatischen Störfallerkennung und gut abgestimmter Taktiken zur Stauminimierung die Reisezeiten um 8 % verringert werden konnten. Bei Ergänzung der „MOTION-Maßnahmen“ um entsprechende Meldungen des VMS-Systems, konnten Verbesserungen von 14 % bei den Reisezeiten erreicht werden.

Die Staus im Straßennetz konnten bei der Verwendung des Störfallmanagements von MOTION um 20 % reduziert werden. Bei gleichzeitiger Verwendung des Störfallmanagements und der Information der Verkehrsteilnehmer über Wechselverkehrszeichen konnte eine Reduktion der Staus um 30 % erreicht werden. Diese Ergebnisse wurden im Vergleich zur Standard-Implementierung von MOTION erreicht. Im Vergleich zur Vorher-Situation waren die Verbesserungen noch höher.

MOTION – Kopenhagen (Dänemark)

Das System in Kopenhagen umfasst einen Verkehrsrechner „MIGRA Central“ mit der MOTION-Signalprogramm-Optimierung sowie neun Lichtsignalanlagen im Stadtteil Valby. Aufgabe war es, ein adaptives System zu installieren, in dem die Verkehrsbelastung bei der Steuerung einen direkten Einfluss auf die Umlaufzeit, die Grünzeitverteilung, die Phasenfolge und die Versatzzzeit an den Knotenpunkten haben sollte.

Insbesondere wurde die Möglichkeit gefordert, dem ÖPNV einen größeren Einfluss bei der Netzoptimierung zu geben und zusätzlich eine lokale ÖPNV-Bevorzugung durchführen zu können. Zielkriterium für die Qualität des Systems war eine Verbesserung der Reisezeit des ÖPNV um 20 %, ohne eine Verringerung der Leistungsfähigkeit für den Individualverkehr zu bewirken.

In Verbindung mit der Inbetriebnahme des Systems haben die Betreiber (Kommune Kopenhagen und ÖPNV-Gesellschaft HUR) Vorher/Nachher-Analysen durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassten Reisezeitmessungen des ÖPNV und die verschiedenen Messwerte, die das MIGRA-Central-System zur Verfügung stellt, z. B. die Anzahl der gemessenen Fahrzeuge und die mittleren Geschwindigkeiten, sowie die Ergebnisse, die MOTION innerhalb der Optimierung protokolliert.

Eine Zusammenfassung dieser Analysen wurde im Sommer 2001 in Dänemark veröffentlicht [KNUDSEN et al., 2001]. Es wurde dabei in Feldversuchen ein Vergleich zwischen der Vorher-Situation und verschiedenen MOTION-Varianten durchgeführt. Mit Hilfe von Stoppuhren wurden folgende durchschnittliche Reduzierungen der Reisezeit von Bussen im Verhältnis zur Vorher-Situation (A) mit Festzeitprogrammen gemessen:

- MOTION mit lokaler Buspriorität (D):
16,7 % (morgens) und 26,8 % (nachmittags),
- MOTION mit zentraler Buspriorität (C):
8,9 % (morgens) und 10,3 % (nachmittags),
- MOTION Standard (B):
12,6 % (morgens) und 18,6 % (nachmittags).

Darüber hinaus wurde eine geringe Steigerung im Geschwindigkeitsniveau des gesamten Verkehrs in Valby erreicht. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Verbesserung der Reisezeiten für den ÖPNV den übrigen Verkehr nicht negativ beeinflusst hat. Aus der Evaluierung des Geschwindigkeitsniveaus geht hervor, dass folgende durchschnittliche Geschwindigkeitssteigerungen in Valby im Verhältnis zur Vorher-Situation (A) gemessen wurden:

- MOTION mit lokaler Buspriorität (D):
0,9 % (morgens) und 5,8 % (nachmittags),
- MOTION mit zentraler Buspriorität (C):
5,4 % (morgens) und 6,1 % (nachmittags),
- MOTION Standard (B):
2,1 % (morgens) und 1,4 % (nachmittags).

„Insgesamt konnten von der Kopenhagener Kommune und dem HUR (Hovedstadens-Udviklings-Rad-Entwicklungsrat der Hauptstadt) generell positive Erfahrungen mit dem Gebrauch des MOTION-Systems in Valby gemacht werden. Bis jetzt ist MOTION ein System gewesen, das, nach einer Einführungsperiode, stabil gelaufen ist und das mit den jeweiligen relevanten Programmen den ganzen Tag im Einsatz ist. Dazu kommt, dass das System in hohem Grad zukunftsicher ist, da MOTION sich automatisch an eventuelle Änderungen im Gebiet anpassen wird – ohne Eingreifen der Kopenhagener Kommune oder von HUR“ [KNUDSEN et al., 2001].

MOTION – Graz (Österreich)

Die Stadt Graz installierte in den Jahren 2000 und 2001 ein neues Verkehrsrechnersystem [HÖPFL, 2000]. Insgesamt wurden 135 Lichtsignalanlagen in die neue Netzsteuerung integriert. In diesem System wurden die beiden Steuerungsverfahren MOTION und TASS jeweils für mehrere verschiedene Regelbereiche parallel installiert. Die adaptive Netzsteuerung wurde dabei schrittweise implementiert mit am Ende ca. 75 Knotenpunkten, die von MOTION in 6 Regelbereichen gesteuert werden. Alle verfügbaren Varianten von MOTION kommen dabei zum Einsatz, d. h. die modellbasierte Signalprogrammabewertung und -auswahl sowie die Signalprogrammoptimierung. Mit diesem Steuerungsverfahren sollten in den wichtigsten Koordinierungseinheiten des Straßennetzes die Versatzzzeiten der Grünen Wellen verkehrsabhängig optimiert und die Freigabezeiten der Lichtsignalanlagen mittels Signalprogrammbildung dem aktuellen Verkehrsaufkommen angepasst werden. Zur Erfassung der aktuellen Verkehrssituation wurden insgesamt 150 Detektorschleifen in den Straßen installiert. Dabei wurden unterschiedliche Schnittstellen zwischen MOTION und den verschiedenen Steuergeräten und lokalen Steuerungsverfahren verwendet.

In den letzten Jahren wurden darüber hinaus MOTION-Projekte in Odense (Dänemark, ca. 30 Knotenpunkte in 3 Regelbereichen), Stuttgart (Deutschland, ca. 30 Knotenpunkte in 4 Regelbereichen), Prag (Tschechien, ca. 20 Knotenpunkte in 1 Regelbereich) umgesetzt. Weitere Einsätze in Dortmund (Deutschland), Athen (Griechenland), Abu Dhabi (VAE), Budapest (Ungarn) sind in Vorbereitung.

Los Angeles, CA, Automated Traffic Surveillance and Control (ATSAC)

Mit seiner großen Population und der autoabhängigen Stadtform hatte Los Angeles extrem große Stau-Probleme zu bewältigen. Die Situationen an den großen Aktivitätszentren, z. B. Sportarenen und Flughafen, die großes und nicht vorhersehbares Verkehrsaufkommen generieren, sind besonders kritisch. Um diesen Problemen zu begegnen, hat die Stadt Los Angeles ATSAC entwickelt. Das System wurde zuerst im Gebiet um das Olympiastadion installiert. Es basiert ursprünglich auf der Steuerungssoftware der UTCS von der FHWA und wurde von dem Ingenieurbüro JHK & Associates implementiert. Das System setzt sich aus Induktionsschleifen, Überwachungskameras, Signaloptimierungssoftware und Echtzeitfernsteuerung der Signalanlagen [DAHLGREN et al., 1996] zusammen.

ATSAC hat großen Erfolg bei der Reduzierung der Stausituation sowohl im ganzen System als auch für Sonderveranstaltungen erreicht. Seit der Implementierung des Systems konnte der Stau um das Olympiastadion nach einem großen Konzert innerhalb einer Stunde aufgelöst werden. Im Vergleich dazu benötigte die Stauauflösung vorher zwei Stunden [DAHLGREN et al., 1996]. Außerdem wurde festgestellt, dass die Anzahl der Halte um 20 %, die Reisezeiten um 13 %, der Kraftstoffverbrauch um 12,5 % und die Schadstoffemission um 10 % reduziert wurden. Das Kosten/Nutzen-Verhältnis lag bei 9,8 zu 1. Das System hat sich in weniger als einem Jahr ausgezahlt [ROWE, 1990].

Oakland County, Michigan, Faster and Safer Travel through Traffic Routing and Advanced Controls (Fast-Trac)

Fast-Trac integriert Verkehrsmanagement mit dem adaptiven Steuerungssystem SCATS als Kern. Mit seinem SCATS-System weist Oakland County viele Besonderheiten auf: Es war die erste adaptive Verkehrssteuerung in den USA, die erste SCATS-Anwendung in der westlichen Hemisphäre und die erste Anwendung von Videoverarbeitung mit SCATS. Oakland County benutzte die Datenerfassung durch Video anstelle von Induktionsschleifen aus mehreren Gründen. Videokameras können für jede Oberflächen- und Wetterbedingung installiert werden. Das ist ein wichtiger Vorteil in Bezug auf das Klima in Michigan. Außerdem kann eine Videokamera mehrere Fahrstreifen überwachen, wäh-

rend eine konventionelle Induktionsschleife nur auf einem Fahrstreifen installiert werden kann.

Fast-Trac war in mehreren Bereichen sehr erfolgreich. Die Anzahl der Unfälle an Risikoknotenpunkten wurde um 89 %, die Anzahl der Schwerverletzten an den gleichen Knotenpunkten um 100 % reduziert. Die Reisezeit für die Pendler wurde im Schnitt um mehr als 40 Stunden im Jahr reduziert [GRAVAT, undatiert].

Insgesamt hat das Programm die Reisegeschwindigkeit in der Spitzenstunde um 19 % erhöht und die Unfälle signifikant reduziert. Es wurde geschätzt, dass eine Reduzierung der Anzahl der Halte um ein Drittel, der Auffahrunfälle und der CO₂-Emission um 12 % erreicht wurde [TRAVELING WITH SUCCESS, undatiert].

Anaheim, California, Field Operations Test (FOT) [MOORE et al., 1999]

Als ein Teil des von der US-Bundesregierung finanzierten Anaheim Advanced Traffic Control System Field Operations Test (FOT) wurde von der Firma Siemens die Version 3.1 des SCOOT-Systems in einem Teilgebiet der Stadt Anaheim installiert. Vom Herbst 1994 bis zum Frühling 1998 wurde eine Untersuchung durchgeführt, in der das SCOOT-System mit dem vorherigen UTCS- System verglichen wurde, das seinerzeit als Stand der Technik betrachtet wurde.

Entgegen den Erwartungen wurde festgestellt, dass das SCOOT-System keine Verbesserungen gegenüber dem Verfahren UTCS gebracht hat. Das SCOOT-System produzierte zwar an einigen Knotenpunkten niedrigere Wartezeit an anderen Stellen aber auch höhere Wartezeiten. Die Verbesserung der Wartezeiten belief sich auf weniger als

5 %. In den Fällen der Verschlechterung wurde die Wartezeit um mehr als 10 % erhöht.

Es gab mehrere Probleme, die zum schlechten Abschneiden des SCOOT-Systems führten. Unter anderem wurde von SCOOT die Kurzzeitprognose aus Detektorendaten stromaufwärts des betrachteten Knotenpunktes erstellt. Die Detektoren in Anaheim waren näher als gewöhnlich an den Knotenpunkten installiert und sie konnten demnach SCOOT keine vollständige und genaue Information über die Verkehrsbedingung geben [MOORE et al., 1999].

Das schlechte Abschneiden von SCOOT in Anaheim sollte nicht als Fehler des Steuerungssystems in sich betrachtet werden. Es zeigt aber die hohe Sensibilität in der Implementierung und die Wichtigkeit der Feldtests und der Bewertung des Systems.

Andere Anwendung in den USA

Die „ITS Deployment Tracking Database“ hat über acht weitere Anwendungen (siehe Tabelle 2.3) der adaptiven Steuerungen berichtet. Zusätzlich zu den acht Anwendungen wurden während der Literaturrecherche zwei weitere Anwendungen gefunden: Broward County, Florida, und Newark/Wilmington, Delaware.

Die Reduzierung der Reisezeit durch die adaptiven Steuerungen in ausgewählten Gebieten ist in der Tabelle 2.4 dargestellt.

Nach der ITS Deployment Tracking Database werden in den USA im Jahr 2005 weitere fünf Anwendungen installiert. Weltweit werden zurzeit mehr als 100 Anwendungen von SCOOT installiert. SCATS wird in neun Ländern verwendet.

City/County	System	Number of Intersections
Los Angeles, CA	ATSC	1170
Oakland County, MI	SCATS	350+
Hennepin County, MN	SCATS	71
Arlington, VA	SCOOT	65
Minneapolis, MN	SCOOT	60
Anaheim, CA	SCOOT	20
Durham, NC	SCATS	unknown

Tab. 2.3: Ausgewählte Anwendungen von adaptiven Steuerungen in den USA [OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1999]

Location	System	Benefits realized
Broward County, FL	SCATS	Delay reduced by up to 42%, travel time reduced by up to 20%
Oakland County, MI	SCATS	Delay reduced by 6,6%, with an average of 7,8%
Newark, DE area	SCATS	Travel time reduced by up to 25%
Los Angeles, CA	ATSC	Delay reduced by 44%, travel time reduced by 13%
Minneapolis, MN	SCOOT	Delay reduced by up to 19% during special events

Tab. 2.4: Beispiele der realisierten Reduzierung von Warte- und Reisezeiten in den USA

3 Verfahren zur Bewertung der Steuerungsmethoden

3.1 Methodik

Bewertung durch den Performance Index

Koordinierte Lichtsignalsteuerungen werden in den Richtlinien (HBS 2001) nur mit dem Anteil der Halte in der koordinierten Hauptrichtung bewertet. In dieser Untersuchung wurde jedoch nicht nur die koordinierte Hauptrichtung, sondern auch sämtliche Nebenrichtungen betrachtet. Es wurde also die Verkehrsqualität des gesamten Netzes ermittelt. Dadurch können die Vorteile, die die verkehrsabhängigen Steuerungen durch ihre Flexibilität haben sollen, bewertet werden. Außerdem wird nicht nur die Anzahl der Halte, sondern auch die Wartezeit in der Bewertung berücksichtigt.

Die Verkehrsqualität der verschiedenen Steuerungsverfahren wurde mit dem Performance Index (siehe Kapitel 3.2) ermittelt, der dem TRANSYT-Verfahren entlehnt wurde. Der Sinn dieses Performance Index liegt darin, einen einzigen Wert zu erhalten, der die Qualität der Steuerung des Straßenzuges vergleichbar macht. In diesem Wert werden die bewertungsrelevanten Kenngrößen aller Streckenabschnitte eines Straßenzuges zusammengefasst.

Messungen

Zur empirischen Bewertung der Steuerungsmethoden, die in der Praxis angewendet werden, wurden fünf Untersuchungsstrecken ausgewählt. Ein Straßenzug (Königsallee) ist festzeitgesteuert, während die restlichen vier (Münster, Düsseldorf) verkehrsabhängig gesteuert sind. Zur Messung der Eingangsparameter wurden Verkehrszählungen mit Videokameras durchgeführt. Die Kameras wurden an den wichtigsten Knotenpunkten des Straßenzuges installiert. Dabei wurden der erste und letzte Knotenpunkt und zwei weitere hochbelastete Knotenpunkte aufgezeichnet. Bei der Messung in Münster wurden die Videokameras in den Messfahrzeugen installiert, so dass die Verkehrsstärke nach der „Floating Car“-Methode geschätzt werden kann. In Münster wurden zusätzlich Detektordaten während der Messfahrten erhoben. Die Messdaten wurden teilweise durch historische Verkehrszählungen ergänzt.

Die Planungsunterlagen aller Untersuchungsstrecken lagen vor. Dadurch konnten die Steuerungs-

parameter nachvollzogen werden. Anhand dieser Unterlagen wurden die Steuerungen in der Simulation realitätsgetreu nachgebildet.

Die Wirkungsparameter der Steuerungen wurden durch Messfahrzeuge erfasst. Auf jedem Straßenzug wurden zehn Messfahrzeuge eingesetzt, die den Straßenzug nach festgelegten Routen befuhren. Die Messfahrzeuge wurden mit GPS-Empfängern und Notebook-Rechnern ausgestattet. Diese Methode erlaubt eine Aufzeichnung der Position der Fahrzeuge in einem 1-Sekunden-Takt. Aus diesen Daten wurden die Reisezeit, Wartezeit und die Anzahl der Halte der Messfahrzeuge bestimmt.

Die gewählte Messmethodik ermöglichte auch den ADAC-Test, bei dem die Anzahl der Halte vor jedem Knotenpunkt aufgezeichnet wurde. Die Aufzeichnung der Fahrt mit dem GPS-Empfänger erlaubte auch eine Auswertung der Halte vor dem Knotenpunkt. Daraus wird das Koordinierungsmaß nach HBS 2001 berechnet.

Simulation

Die Messfahrten auf den fünf Straßenzügen deckten nur einen Teil der gesamten Untersuchung ab. Die Straßenzüge konnten in keinem Fall bei verschiedenen Steuerungen befahren werden. Durch den Einsatz eines Simulationsprogramms wurden jedoch verschiedene Varianten der Steuerungen auf einem Straßenzug miteinander verglichen. Außerdem konnten noch weitere Straßenzüge untersucht werden, ohne dass zusätzliche Messfahrten durchgeführt werden mussten. Ein weiterer Vorteil einer Simulation sind die Auswertemöglichkeiten, die in der Praxis in diesem Umfang nicht realisierbar sind.

Insgesamt wurden in der Simulation zehn Straßenzüge untersucht. Zur Simulation wurde das Simulationsprogramm VISSIM ausgewählt, das in Deutschland in der Praxis sehr verbreitet ist und sich bewährt hat. Eine Kalibrierung der Simulation erfolgte anhand der Daten der Messungen.

Expertengespräche

Es wurden umfangreiche Gespräche mit Experten auf dem Gebiet der koordinierten Signalsteuerung geführt. Dabei wurden Gesprächspartner aus Ingenieurbüros, den Verwaltungen und den Signalherstellern befragt. Durch die Gespräche konnten repräsentative Eindrücke zum aktuellen Stand der Technik in Deutschland gesammelt werden.

Verkehrsteilnehmerbefragungen

Um auch den subjektiven Eindruck der Kfz-Führer mit in die Bewertung der Steuerungen einzubeziehen, wurden an den Untersuchungsstrecken Umfragen durchgeführt. Die Umfragen wurden jeweils an einer Tankstelle, die an dem untersuchten Straßenzug liegt, durchgeführt. So wurde der fließende Verkehr nicht gestört und es konnte eine Vielzahl an regelmäßigen Benutzern des Straßenzuges befragt werden. Insgesamt wurden in Bochum, Münster und Düsseldorf 301 Kfz-Führer befragt.

Zusätzlich wurden auch die ÖPNV-Betriebe befragt, damit auch die Qualität der Steuerung aus Sicht des ÖPNV bewertet werden kann.

3.2 Kriterien der Bewertung

Die Steuerungsverfahren der Lichtsignalanlagen können

- verkehrstechnisch,
- monetär,
- ökologisch,
- politisch,

bewertet werden. Im Rahmen der Untersuchung steht die verkehrstechnische Bewertung im Vordergrund. Für die verkehrstechnische Bewertung können folgende Kriterien als sinnvoll angesehen werden:

- Wartezeiten (MIV, ÖV und FG),
- Reisezeiten im Netz (MIV, ÖV),
- Anzahl der Halte (MIV, ÖV),
- geschätzter Energieverbrauch (MIV),
- Zuverlässigkeit für ÖPNV-Fahrzeuge (ÖV).

Anhand dieser Kriterien können Verkehrsqualitäten der untersuchten Steuerungsverfahren beurteilt und der Nutzen der Verfahren ermittelt werden. In die Bewertung fließen schließlich nur die Wartezeiten und Halte ein. Die Reisezeiten und Wartezeiten hängen unmittelbar zusammen und die Zuverlässigkeit der ÖPNV-Fahrzeuge lässt sich auch durch die Wartezeit bestimmen. Der geschätzte Energieverbrauch wird durch die Gewichtung der Kenngrößen Wartezeit und Anzahl der Halte berücksichtigt.

Die Ermittlung der Verkehrsqualität richtet sich nach den Kriterien und Maßzahlen, die zu erfassen sind. Daher ist es erforderlich, zunächst die verkehrstechnischen Ziele zu beschreiben, die mit der Signalsteuerung erreicht werden sollen.

Es wird die Zielstruktur nach Tabelle 3.1 verwendet. Das Mess- und Auswertekonzept richtet sich nach dem Zielkonzept.

Unter der Vielzahl der denkbaren und zu ermittelnden Parameter ist eine Maßzahl (oder eine geringe Anzahl von Maßzahlen) zu definieren, die in entscheidender Weise die Qualität der Steuerung und der Koordinierung zum Ausdruck bringt. In Anleh-

Oberziel	Detail-Ziel	Kriterium
Verkehrsqualität im Kfz-Verkehr (Pkw und Lkw)	Kurze Reisezeiten für den durchgehenden Kfz-Verkehr Kurze Reisezeiten für Kfz-Verkehr, die nur partiell die koordinierte Strecke benutzen Bequemlichkeit der Fahrt im Kfz-Verkehr geringe Beeinträchtigungen ökologischer Aspekte	Summe der Reisezeiten getrennt nach Pkw und Lkw bei der Fahrt über die gesamte Strecke (oder Mittelwert pro Fzg) Summe aller Reisezeiten für alle Kfz, die die Hauptstraße – auch in Abschnitten – befahren einschl. der Wartevorgänge auf der jeweiligen Querstraße (oder Mittelwert pro Fzg) Anzahl der Haltevorgänge pro durchgefahrenes Kfz in einer Zufahrt des Knotenpunktes im Zuge der Hauptstraße Anzahl der Haltevorgänge beim Befahren der gesamten Strecke Schätzwert für Kraftstoffverbrauch und Emissionen (Mehrverbrauch gegenüber freier Fahrt) Lärmimmissionen an ausgewählten Punkten
Kurze Reisezeiten für Radfahrer	Kurze Wartezeiten für Radfahrer bei der Überquerung jedes Knotenpunktarms	Summe aller Wartezeiten bei der Überquerung des Knotenpunktarms, Mittelwert pro Radfahrer
Kurze Reisezeiten für Fußgänger	Kurze Wartezeiten für Fußgänger bei der Überquerung jedes Knotenpunktarms	Summe aller Wartezeiten bei der Überquerung des Knotenpunktarms, Mittelwert pro Fußgänger
Kurze Reisezeiten für Linienbusse	Einhaltung des Fahrplans Kurze Wartezeiten für Linienbusse an jeder Haltelinie	Abweichungen vom Fahrplan, die in der Untersuchungsstrecke verursacht werden (Häufigkeit + Ausmaß) Reisezeit der Linienbusse für die gesamte Strecke Anzahl der signalbedingten Halte Signalbedingte Wartezeiten

Tab. 3.1: Zielsystem für die Untersuchung

nung an international übliche Bewertungsverfahren (TRANSYT) wird dafür der so genannte Performance Index nach Gleichung [3-1] verwendet:

$$PI = \left(G_W \cdot \sum W_{i,z} \cdot Q_{i,z} \cdot g_i \cdot g_z + G_H \cdot \sum H_{i,z} \cdot Q_{i,z} \cdot g_i \cdot g_z \right) \quad [3-1]$$

mit:

PI = Performance Index [-]

G_W = Gewicht der Wartezeiten [-]

$W_{i,z}$ = Summe der Wartezeiten pro Stunde für Fahrzeuge der Art z auf dem Knotenpunktarm i [s]

g_i = Gewicht der Strecke i [-]

g_z = Gewicht der Wartezeiten für Fahrzeuge der Art z [-]

G_H = Gewicht der Halte [-]

$H_{i,z}$ = Summe der Anzahl von Halten pro Stunde für Fahrzeuge der Art z auf dem Knotenpunktarm i [-]

$Q_{i,z}$ = Verkehrsstärke der Fahrzeuge der Art z auf dem Knotenpunktarm i [-]

Die Bewertungsparameter zur Bewertung mit dem Performance Index wurden in Abstimmung mit der Betreuungsgruppe gewählt. Die Gewichte G_W und G_H wurden nach Vorgaben aus der Literatur [SCHNABEL, 2001] festgelegt. Der Kraftstoffverbrauch einer Wartezeit von 60 s entspricht somit einem Halt. Die verschiedenen Strecken wurden mit dem Faktor 1 bewertet, da durch die unterschiedlichen Verkehrsbelastungen der Knotenpunktarme schon eine Gewichtung eingeht. Die Gewichte für die verschiedenen Fahrzeugarten wurden nach ihrem durchschnittlichen Belegungsgrad gewählt. Der Kfz-Verkehr wurde mit einem durchschnittlichen Belegungsgrad von 1,2 Personen festgelegt. Die Belegungsgrade der ÖPNV-Fahrzeuge wurden für jeden Straßenzug bei den Verkehrsbetrieben erfragt und entsprechend gewählt. Die Fußgänger und Radfahrer wurden in der Bewertung der Koordinierung nicht berücksichtigt, da die Verkehrsqualität dieser Verkehrsarten für die Koordinierung nicht relevant ist. Die Fußgänger und Radfahrer wurden jedoch in den Steuerungen der einzelnen LSA im üblichen Maße beachtet.

Um den Performance Index auf ein einheitliches Maß zu bringen, wird er nach Gleichung [3-2] durch

die Summe über $Q_{i,z}$ multipliziert mit g_z dividiert. Dadurch können auch Verkehrszustände unterschiedlicher Verkehrsbelastungen miteinander verglichen werden.

$$PI_{\text{gesamt}} = \frac{PI}{\sum Q_{i,z} \cdot g_z} \quad [3-2]$$

Bei der Verwendung des Performance Index in der o. g. Definition ist zu beachten, dass eine Reduzierung des Performance Index eine Erhöhung der Verkehrsqualität bedeutet. Der Performance Index hat als Absolutwert keine Bedeutung. Er gewinnt seinen Nutzen aus dem Vergleich mehrerer Alternativen.

4 Expertengespräche

4.1 Umfang der Expertengespräche

Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, ein umfassendes Bild über den derzeitigen Stand der Technik bei der Planung von Koordinierungen zu erhalten. Zu diesem Zweck wurden Gespräche mit Experten aus Praxis und Verwaltung in ganz Deutschland geführt. Es wurden Gesprächspartner aus Ingenieurbüros, Verwaltungen und von Signalherstellern zu dem Thema der Koordinierung von Lichtsignalanlagen befragt.

4.2 Ingenieurbüros

Für die Expertengespräche wurden zwei Ingenieurbüros ausgewählt, die über umfangreiche Erfahrung in der Planung und Koordinierung von Lichtsignalanlagen im In- und Ausland verfügen. Beide Büros haben eine besondere Reputation für den Entwurf verkehrsabhängiger Steuerungen. Eines ist schwerpunktmäßig in Westdeutschland tätig, während das andere deutschlandweit und international arbeitet. Beide Büros haben zusammen über 4.000 LSA und mehrere hundert Koordinierungen geplant. Zu den Auftraggebern zählen vornehmlich mittlere und größere Städte in Deutschland. Die Ansprechpartner waren zu einem offenen und ausführlichen Gespräch bereit.

Koordinierungsverfahren

Grüne Wellen mit Festzeitkoordinierungen werden von den befragten Ingenieurbüros als nicht mehr zeitgemäß angesehen. Das erstrebenswerte

Steuerungsverfahren ist eine verkehrsabhängige Steuerung. Als Gründe dafür werden genannt:

- Wenn die Knotenpunkte nicht im Teilpunktabstand liegen, nutzen die klassischen Grünen Wellen die mögliche Kapazität nicht aus. Deswegen ist es zweckmäßig, bei geringer Auslastung der Hauptrichtung, den Nebenstrom gegenüber der klassischen Grünen Welle zu bevorzugen und den Hauptstrom gegebenenfalls in seiner zügigen Führung zu unterbrechen.
- Es treten bei hoher Auslastung einer Lichtsignalanlage in den einzelnen Zufahrten während der einzelnen Umläufe Schwankungen der Verkehrsbelastung auf. Die nicht genutzte Grünzeit einer in einem Umlauf schwächer ausgelasteten Zufahrt kann bei flexibler Verteilung einer anderen stärker belasteten Zufahrt zur Verfügung gestellt werden. Die sich dadurch ergebenden freien Potenziale verbessern die Nutzung der vorhandenen Leistungsfähigkeit, da Leistungsverluste verringert werden, die bei starrer Grünzeitverteilung unvermeidlich sind.
- Die Verkehrsabhängigkeit erhöht die Verkehrssicherheit im Zuge koordinierter Strecken, da Fahrzeuge bei nicht ausgelasteten Grünzeiten, aufgrund der möglichen Grünzeitanpassung, weniger häufig bei einem Signalwechsel eintreffen.

Die Grundlage für eine verkehrsabhängige Koordination bildet jedoch bei beiden Ingenieurbüros ein Rahmenplan, der auf einer Festzeitsteuerung beruht. Je nach Belastungssituation werden Programme unterschiedlicher Länge eingesetzt. Häufig werden Umlaufzeiten von 60 s (Schwachlast), 75 s (Tagesperverkehr) und 90 s (Spitzenverkehr) gewählt. Da man aber bei der zunehmenden Komplexität der Knotenpunkte und der Höhe der Belastung mit 90 s Umlaufzeit nicht immer auskommt, werden auch Spitzenprogramme mit bis zu 120 s Umlaufzeit geplant. Für die meisten Anlagen werden 3 bis 5 Grundprogramme entworfen.

Durch Koordinierungszeitpunkte werden feste Grünzeiten (Kerngrünzeiten) für die koordinierten Signalgruppen festgelegt und so notwendige Mindestgrünbandbreiten (= Dauer der Grünzeit in der Grünen Welle) garantiert. Je nach Bedarf kann der Verkehr im Zuge der koordinierten Strecke die Freigabe durch aktive Grünzeitverlängerung über eine Zeitlückensteuerung bis zum Koordinierungszeitpunkt des spätesten Grünendes verlängern.

Es werden Steuerungslogiken entwickelt, die über Umschaltungen in jeweils andere Phasen entscheiden. Zusätzlich dazu sind Phasenübergangspläne zu definieren. Die Anzahl der Phasen kann sehr groß sein. Es werden teilweise bis zu 35 Phasen definiert.

Die untergeordneten Verkehrsströme können nur auf Anforderung freigegeben werden. Liegen keine Anforderungen vor, bleibt die Anlage im Ruhebild „Haupttrichtung Grün“ stehen. Bei einer Anforderung wird zunächst nur die vorgegebene Mindestgrünzeit geschaltet. Sie kann durch Zeitlückensteuerung so lange verlängert werden, wie es der späteste Beginn der Hauptrichtung erlaubt.

Die eingesetzten Koordinierungsgeschwindigkeiten liegen im Bereich der zulässigen Geschwindigkeit. Häufig ist zur Sicherstellung der Koordination ein „Vorlauf“ (ein früherer Grünbeginn als durch das Grünband erfordert) notwendig. Durch diese Maßnahme wird Einbiegern die Möglichkeit gegeben, sich vor Ankunft des Pulks in Bewegung zu setzen.

Vielfach wird von dem Kunden verlangt, dass nur eine Umlaufzeit für alle Rahmenpläne vorgesehen ist. Die dabei in den Nebenverkehrszeiten entstehende Verkehrsqualität wird für ausreichend gehalten, weil dann längere Grünzeiten oder Mehrfach-Anwürfe geschaltet werden können.

„Alles-Rot-Sofort-Grün“ ist eine übliche Steuerungstechnik. Sie ist allerdings wegen der vielen notwendigen Detektoren relativ teuer. Probleme mit dieser Steuerungstechnik sind bei beiden Ingenieurbüros an keiner Stelle bekannt geworden. Vielfach wird aber auf die Ruhestellung „Grün für die Hauptrichtung“ zurückgegriffen.

ÖPNV

Bei den Planungen eines Ingenieurbüros werden die Fahrzeiten im ÖPNV nicht anhand ihrer Mittelwerte geschätzt. Stattdessen werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Fahrzeiten und die Haltezeiten zwischen den Knotenpunkten angesetzt und als Zufallsgrößen betrachtet. Auf diese Weise gibt es an jeder Haltelinie eine Verteilungsfunktion der erwarteten Ankunftszeiten für das ÖPNV-Fahrzeug. Die Software gestattet es auch, die Sequenzen für den Individualverkehr als Folge von ÖPNV-Eingriffen einzuschätzen. Durch die Vorplanung des Koordinierungsgerüsts mit Hilfe der hauseigenen Software gelingt es, die Konflikte zwischen den

Anforderungen des IV und des ÖV in der Koordination so gering wie möglich zu halten.

Unvermeidbare Eingriffe des ÖPNV werden nach Möglichkeit kompensiert. Dies geschieht teilweise auch, bevor das ÖPNV-Fahrzeug am Knotenpunkt ankommt und seine Grünzeit ohne Verzug erhält. Bahnen werden bereits über größere Entfernungen, z. B. 400 m, angemeldet. Das bedeutet, dass eine Reaktionszeit von etwa 30 Sekunden zur Verfügung steht. Diese langfristige Voranmeldung wird teilweise auch über einen anderen Knotenpunkt hinweg durchgeführt. Auf diese Weise ist es möglich, das Signalprogramm auch schon vor Ankunft der Bahn entsprechend zu verändern. Dabei können sowohl Phasen-Folgen als auch einzelne Phasen in ihrer Zusammensetzung verändert werden. Dadurch gelingt es, solche Verkehrsströme, die von dem Eingriff der Bahn besonders stark betroffen wären, vorzuziehen und noch vor Ankunft der Bahn freizugeben und wieder anzuhalten. Auf diese Weise werden die Leistungsverluste sowie die Wartezeiten für den Individualverkehr und die Fußgänger reduziert.

Koordinierte verkehrsabhängige Steuerung mit variablen Umlaufzeiten

Seit einigen Jahren wird neben der koordinierten verkehrsabhängigen Steuerung mit festen Umlaufzeiten auch eine koordinierte verkehrsabhängige Steuerung mit variablen Umlaufzeiten geplant. Ihr Einsatzbereich sind Verbände von zwei zu koordinierenden Lichtsignalanlagen, die in geringem Abstand voneinander stehen, aber nicht in ein größeres System eingebunden sind. Häufig wird die Technik zum Beispiel bei Autobahnanschlussstellen angewandt.

Die Lichtsignalanlagen können aufgrund des geringen Abstandes voneinander durch eine verkehrsabhängige Steuerung mit variabler Umlaufzeit koordiniert werden. Sie sind durch ein Steuerkabel miteinander verbunden, über das sie Zustandmeldungen austauschen können. Der Knotenpunkt mit der höchsten maßgeblichen Belastung bestimmt jeweils die Umlaufzeit.

Zur Synchronisation „warten“ die beiden Lichtsignalanlagen in einer Phase aufeinander, bis an beiden Knotenpunkten beide koordinierte Richtungen freigegeben worden sind. Nach Grünbeginn der koordinierten Richtungen werden die Zuflüsse an der jeweils in Fahrtrichtung ersten Lichtsignalanlage verkehrsabhängig bedient. Die Grünzeit der „Zu-

fluss-Signalgruppen“ endet regulär aufgrund von vorgegeben Kriterien (maximale Grünzeit, Zeitlücke, Wartezeit gesperrter Richtungen). Die Freigabezeiten der Signalgruppen für den Abfluss, d. h. der Signalgruppen an der in Fahrtrichtung jeweils zweiten Lichtsignalanlage, werden erst nach Ablauf von Versatzeiten beendet. Die Versatzeiten beziehen sich auf das Grünende der jeweils zugehörigen „Zufluss-Signalgruppe“.

Mit dieser Steuerung wird der Stauraum zwischen den Anlagen für die Einbieger aus den untergeordneten Zufahrten freigehalten. Außerdem wird ein zweifacher Halt im System vermieden. Nach Freigabe der untergeordneten Richtungen werden beide Knotenpunkte in der „Haupttrichtung“ erneut synchronisiert. Um einen zu frühen Start der Zufluss-Signalgruppen zu vermeiden, kann ihre Freigabe so lange verzögert werden, bis die Nachbaranlage meldet, dass dort die Freigabe des Abfluss-Signals unmittelbar bevorsteht.

Bei dieser koordinierten Steuerung wird auf eine Ruhestellung „Alles-Rot“ oder „Haupttrichtung Dauergrün“ verzichtet. Es kommt daher zu einem ständigen Signalumlauf mit wechselnden Umlaufzeiten. Auch bei dieser Steuerung bilden die ausgearbeiteten Festzeitsteuerprogramme die Basis. Sie führen immer zu einer koordinierten Signalregelung, solange beide Lichtsignalanlagen in Betrieb sind.

Vollverkehrsabhängige Steuerungen

Auch bei mehreren hintereinander gelegenen Lichtsignalanlagen mit vollverkehrsabhängiger Einzelsteuerung wurde bei stärkerem Verkehr in der Haupttrichtung vereinzelt beobachtet, dass sich aufgrund des Verkehrsaufkommens trotz der fehlenden Koordination in der Haupttrichtung eine Grüne Welle einstellt. Dies wird für möglich gehalten, wenn sehr viele Detektoren eingerichtet werden. In der Stadt Aalen/Württemberg sind solche Steuerungen bereits ausprobiert worden. Die dafür benötigte Steuerungssoftware ist jedoch extrem aufwändig und daher ist diese Lösung eher teuer. Man hält es also grundsätzlich für möglich, dass sich gute Koordinierungen auch automatisch ergeben, wenn die Knotenpunkte einzeln, aber besonders feinfühlig verkehrsabhängig gesteuert werden.

Adaptive Steuerung

Hinsichtlich der adaptiven Steuersysteme herrscht eine gewisse Skepsis vor. Alle Systeme benötigen

außerordentlich viele Detektoren. Dadurch werden sie sehr teuer. Es ist bisher nicht ausreichend aufgezeigt worden, inwieweit die so genannten adaptiven Systeme den logikbasierten Systemen überlegen sind. Zu den adaptiven Systemen wird im Einzelnen angemerkt:

- SCOOT:
Es liegen Erfahrungen mit ausländischen Anwendungen vor. Daraus entsteht der Eindruck, dass SCOOT nicht zuverlässig funktioniert. Selbst wenn nur wenige der Detektoren ausgefallen sind, kommen Schaltzustände zustande, die offensichtlich unsinnig sind.
- MOTION:
Eine Anwendung ist aus Köln bekannt.
- BALANCE:
Die Anwendung aus München ist aus der Literatur bekannt. BALANCE wird jedoch eher für ein ungebräuchliches System gehalten.

Insgesamt verfolgt man die Entwicklung hinsichtlich der so genannten adaptiven Systeme mit großer Aufmerksamkeit.

Einsatz von Simulationen

Beide Ingenieurbüros nutzen mehr oder weniger intensiv Simulationsprogramme zur Prüfung der Planung. Von beiden Ingenieurbüros wird dafür das Simulationsprogramm VISSIM verwendet. Dabei legt man Wert auf besonders lange Simulationsdauern. Dadurch sollen auch relativ selten eintretende Steuerungszustände entdeckt werden. Für diese Simulationen wird die verfügbare Computerhardware ständig, z. B. nachts, eingesetzt. Die Simulationsergebnisse von VISSIM werden dann anschließend statistisch untersucht. Diese Art der Analyse ist ein ganz wesentlicher Bestandteil der Qualitätssicherung für die Planungsarbeit an Lichtsignalanlagen.

4.3 Signalhersteller

Im Rahmen dieses Projektes wurden Expertengespräche mit zwei Signalherstellern geführt. Eines dieser Unternehmen ist ein mittelständisches Unternehmen das andere der weltweit größte Signalhersteller.

4.3.1 Mittelständisches Unternehmen

Das Kerngeschäft des Unternehmens stellen die Lichtsignalanlagen dar. Die Signalmasten, Signal-

geber und die notwendigen Detektoren werden von Zulieferern dazugekauft. Die Steuergeräte und Verkehrsrechner werden vom Unternehmen selbst entwickelt. Bau und Wartung der Lichtsignalanlagen werden schließlich komplett von dem Unternehmen selbst durchgeführt.

Hardware

Für die Signalgeber werden standardmäßig 40-Volt-LED-Signalscheiben verwendet. Die Erkennbarkeit dieser Signalgeber ist besser und Ausfälle der Lampen sind nicht mehr möglich. Außerdem tritt kein Phantomleuchten mehr auf. Vereinzelt werden jedoch noch alte Signalgeber, die nicht auf der LED-Technik beruhen, von den Kunden verlangt, um ein einheitliches Signalbild in der gesamten Stadt zu haben.

Zur Fahrzeugdetektion werden Schleifen- oder Videodetektoren verwendet. Die neuere Entwicklung geht zu den Videodetektoren, da diese kostengünstiger sind. Bei Wartungs- und Reparaturarbeiten können diese Detektoren wesentlich einfacher und kostengünstiger erneuert werden. Außerdem bieten die Kameras den Vorteil, dass die Detektionsfelder größer als bei Schleifendetektoren realisierbar gewählt werden können. Bei diesen Detektoren sind bisher keine Probleme hinsichtlich der Erfassung der Fahrzeuge bekannt. Auch stehende Fahrzeuge werden ohne Probleme erfasst.

Die Steuergeräte sind so aufgebaut, dass bei Erreichen einer neuen Entwicklungsstufe nur die CPU ausgetauscht werden müssen. Der sonstige Aufbau der Steuergeräte ist seit ca. 15 Jahren derselbe. Im Moment sind die alten Geräte, die ausgetauscht werden müssen, ca. 15-20 Jahre alt.

Im Allgemeinen wird die Frage nach der Verkehrstechnik nicht mehr als das Hauptproblem der zukünftigen Entwicklung angesehen. Die Kommunikationsgeräte zwischen LSA und Verkehrsrechner nehmen eine immer wichtigere Rolle ein. Es können z. B. Probleme auftreten, wenn die LSA eines Straßenzuges von verschiedenen Herstellern erstellt wurden. So können dort die Bezugszeitpunkte der Steuerungen verschieden sein und eine Koordinierung könnte zerstört werden.

Die Verwendung der standardisierten Schnittstellen nach OCIT wird als sehr wichtig und zukunftsweisend angesehen. Alle Geräte zur Steuerung der LSA können dadurch einheitlich mit dem Verkehrs-

rechner vernetzt werden. Dies stellt auch die Grundlage für die adaptiven Steuerungen dar.

Durchführung der Planung von LSA

Das Unternehmen hat eine eigene Abteilung für die Planung von Lichtsignalanlagen. In der Regel werden jedoch die Planungen von Ingenieurbüros durchgeführt. Diese werden dann vom Signalhersteller nur noch in die Steuergeräte eingespeist. Man ist jedoch auch in der Lage, die komplette Signalsteuerung von der Planung bis zum Bau zu liefern.

Programmdateien nach dem Verfahren VS-Plus oder TL werden direkt in die Steuergeräte eingelesen. Planungen, die mit einer anderen Software erarbeitet wurden, werden anhand der gelieferten Steuerungslogiken für die Steuergeräte neu programmiert.

Koordinierungsverfahren

Es wird nicht als sinnvoll erachtet, eine vollverkehrsabhängige Steuerung zur Koordinierung eines Straßenzuges zu verwenden. Vereinzelt kommt es jedoch vor, dass mehrere (höchstens drei) vollverkehrsabhängige Steuerungen durch vernetzte Steuergeräte geschaltet werden. Dadurch wird eine Koordinierung dieser Knotenpunkte auch bei vollverkehrsabhängiger Steuerung erreicht. Diese Art der Steuerung kann, wenn sie so vom Kunden geplant wurde, umgesetzt werden.

Hinsichtlich der Koordinierungsverfahren besteht keine eindeutige Präferenz der Verkehrsabhängigkeit oder der Festzeitsteuerung. Die Wahl der Steuerungsart ist in der Regel vollständig dem Kunden überlassen. Man ist jedoch der Meinung, dass die Festzeitsteuerung unter Volllast die günstigere Lösung darstellt. Bei der Festzeitsteuerung ist es jedoch notwendig, verschiedene Programme bei sich ändernden Verkehrsbelastungen zu schalten, während eine verkehrsabhängige Steuerung selbstständig darauf reagiert. Der verkehrsabhängigen Steuerung wird unter schwacher Verkehrsbelastung ein Vorteil gegenüber der Festzeitsteuerung eingeräumt.

Zur Planung von Koordinierungen wird die Planungssoftware VS-Plus oder LISA+ verwendet.

Die gute Verkehrstechnik und der Aufwand der Steuerungslogik müssen in einem ausgewogenen Verhältnis stehen. Eine zu komplizierte Logik schränkt die Nachvollziehbarkeit stark ein und ist anfälliger für Fehler.

Verkehrsabhängige Steuerungen und Festzeitsteuerungen können gleichermaßen in den Steuergeräten umgesetzt werden. Die verkehrsabhängige Steuerung erfordert jedoch einen ungleich höheren Arbeitsaufwand, da die Steuerungen vollständig programmiert werden müssen. Außerdem muss diese Steuerung ausgiebig geprüft werden, um mögliche Fehler in der Programmierung zu entdecken und einen einwandfreien Ablauf zu garantieren.

Adaptive Steuerungen

Den modernen Entwicklungen in der LSA-Steuerung steht das Unternehmen offen gegenüber. So wurde vor fünf Jahren eine Entwicklungsabteilung gegründet, die sich mit der Entwicklung von neuen Steuerungsmöglichkeiten beschäftigt. Dabei nehmen die adaptiven Steuerungen eine wichtige Rolle ein. Erste Erfahrungen mit den adaptiven Steuerungen wurden bereits in einer deutschen Stadt und in der Schweiz gesammelt. Dort wurde die adaptive Netzsteuerung nach dem Prinzip von BALANCE installiert. Für diese Steuerung wurde der Verkehrsrechner von dem Unternehmen geliefert. Über eine Schnittstelle werden die Daten zwischen BALANCE und dem Verkehrsrechner ausgetauscht. Der Verkehrsrechner überträgt schließlich die von BALANCE berechneten Schaltzustände an die LSA. Dieser Entwicklung in der LSA-Steuerung steht man positiv gegenüber. Der tatsächliche Nutzen, den die adaptive Steuerung bringt, ist allerdings nicht bekannt.

Bewertung der Qualität von Lichtsignalanlagen

Die Qualität der Lichtsignalsteuerung wird vereinzelt durch die Simulation mit VISSIM überprüft. Außerdem steht dem Kunden in den Verkehrsrechnern ein Tool zur Bewertung der Steuerung zur Verfügung. Davon wird allerdings selten Gebrauch gemacht. Die verkehrsabhängigen Steuerungen werden vor der Anwendung grundsätzlich durch eine Softwareprüfung auf den korrekten Ablauf der Steuerungslogik und Sicherheitsmängel geprüft. Der Auftraggeber nimmt schließlich das Steuergerät durch eine Softwareprüfung ab.

4.3.2 Großer Signalhersteller

Im Rahmen des Projektes fand am 15.02.07 ein Expertengespräch mit zwei Vertretern des Unternehmens statt. Dabei waren der Produktmanager der adaptiven Steuerung und ein Vertreter der Planungsabteilung anwesend.

Allgemeines

Durch die langjährige Präsenz auf den Weltmärkten verfügt dieses Unternehmen sowohl bei der Verkehrsregelung wie auch bei Leitsystemen über umfangreiches internationales Know-How und erprobte technische Plattformen.

Das Geschäftsgebiet (eingebettet in den Unternehmensbereich Industrial Solutions and Services) konzentriert sich dabei vor allem auf die Segmente Verkehrsregelung, Verkehrsleittechnik, Verkehrstelematik und Parken, mit Ausrichtung auf das Lösungs- und Anlagengeschäft.

Auf dieser Basis werden wirtschaftliche und technische Lösungen, zugeschnitten auf Anforderungen und Aufgaben einzelner Länder, Regionen oder Ballungsräume, angeboten. Weltweit sind 2.400 Mitarbeiter im Einsatz.

Planung von Lichtsignalanlagen

Das Unternehmen bietet im gesamten Bundesgebiet die verkehrstechnische Planung von Lichtsignalanlagen an. Dabei wird die gesamte Bandbreite, von der Grundplanung bis zur Planung von komplexen Verkehrsmanagementsystemen, abgedeckt. Dazu zählen auch die Umsetzung und Implementierung in die entsprechenden Systeme. Planungsdaten können auch von einem Ingenieurbüro oder einer Behörde geliefert werden.

Die Zwischenzeitenberechnung wird bei dem Unternehmen ausschließlich nach dem Vier-Augen-Prinzip durchgeführt. Anhand der Verkehrsbelastungsdaten werden die Rahmenbedingungen der Lichtsignalanlagen festgelegt. Bei einer Festzeitsteuerung wird hieraus der Signalzeitenplan erstellt. Die verkehrsabhängige Steuerung wird durch standardisierte Bausteine für die Steuerungslogik entwickelt.

Die verkehrsabhängige Steuerung wird in der Regel durch eine Simulation mittels des Simulationsprogramms VISSIM überprüft. Die Steuerungslogiken können direkt vom Verkehrsingenieurarbeitsplatz über einen Compiler als Grundlage in VISSIM eingelesen werden, sodass dort ohne zusätzliche händische Dateneingabe exakt der Steuerungsablauf offline abgebildet wird. Anhand verschiedener Protokoll- und Überwachungsmöglichkeiten können ungewollte Steuerungszustände aufgefunden und überarbeitet werden. Außerdem können alle Logikzweige durch

manuelle Aktivierung der Detektoren geprüft werden. Aufgrund von Makroaufzeichnungen ist es möglich, standardisierte Prüfläufe durchzuführen.

Koordinierungsverfahren

Die reine Festzeitsteuerung einer Koordinierung wird nicht mehr als Stand der Technik angesehen. In Zeiten geringer Verkehrsbelastung ist die Wartezeit für den Querverkehr unnötig hoch. In Zeiten der Belastungsänderungen kann die Festzeitsteuerung nicht auf die Verkehrssituation reagieren. Es wird festgestellt, dass Auftraggeber normalerweise nicht mehr nach reinen Festzeitsteuerungen verlangen.

Eine verkehrsabhängige Steuerung bringt in den meisten Fällen Vorteile gegenüber der Festzeitsteuerung. Die verkehrsabhängige Koordinierung wird so geplant, dass Kerngrünzeiten vorhanden sind, die am Grünbeginn und -ende je nach Bedarf verschoben werden. In Schwachlastzeiten wird dadurch eine Verbesserung der Qualität des Querverkehrs erreicht. Bei hoher Belastung können vorhandene Reserven von hochbelasteten Signalgruppen ausgenutzt werden und Leistungssteigerungen erreicht werden. Außerdem kann dadurch eine hohe Belastung schneller abgebaut werden. Sind alle Verkehrsströme gleichmäßig hochbelastet läuft die verkehrsabhängige Steuerung als Festzeitsteuerung ab.

Die Komplexität einer verkehrsabhängigen Steuerung ist stark von den Rahmenbedingungen und Kundenvergaben abhängig. Oft reichen kleine verkehrsabhängigkeiten aus, um Qualitätssteigerungen zu erreichen. Bei zu großem Einfluss der verkehrsabhängigen Steuerung (hohe Freiheitsgrade) ist die Gefahr einer Störung in der Koordinierung gegeben. Außerdem darf der Einfluss des Autofahrers nicht unterschätzt werden. Dieser stellt sich mit seiner Fahrweise auf die Koordinierung ein. Variieren die Grünzeiten auf dem Straßenzug nun zu stark, ist die Begreifbarkeit für den Autofahrer nicht mehr gegeben. Dies würde negative Auswirkungen auf die Koordinierung haben.

Planung von Koordinierungen

Für die Planung von Koordinierungen sind die Knotenpunktabstände, Verkehrsbelastungen, Verkehrsbeziehungen und maßgeblichen Knotenpunkte entscheidend. Bei einer verkehrsabhängigen Steue-

rung und einer Festzeitsteuerung wird zunächst gleichermaßen eine starre Koordinierung als Grundlage geplant. Die Koordinierungsgeschwindigkeiten orientieren sich an der zulässigen Geschwindigkeit und werden in der Regel abgemindert zur zulässigen Geschwindigkeit gewählt. Dies hat den Grund, dass die zulässige Geschwindigkeit in der Realität nicht erreicht wird und so auch die Einbieger berücksichtigt werden. Inzwischen werden zur Findung der optimalen Versatzzeiten teilweise auch Optimierungsverfahren eingesetzt. Im Verkehrsingenieurarbeitsplatz des Unternehmens ist bereits ein Optimierungsmodul für die Grüne-Welle-Bearbeitung integriert. In Ruhestellung (d. h. keine Anforderung) besteht die Möglichkeit einer zyklischen Steuerung oder die Hauptrichtung wird in Ruhestellung auf Dauergrün geschaltet.

Bei der Planung von Koordinierungen müssen sämtliche Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden. So kann eine Neuplanung z. B. dazu führen, dass Fußgänger nicht mehr sofort auf Anforderung Grün bekommen, sondern auf das dafür vorgesehene Zeitfenster warten müssen.

Adaptive Steuerungen

Das Unternehmen bietet ein adaptives System zur Steuerung der Lichtsignalanlagen eines Straßennetzes an.

Die adaptive Steuerung optimiert die Lichtsignalanlagen eines Verkehrsnetzes online aufgrund gezählter Verkehrsbelastungen. Die Verkehrsbelastungen werden durch Detektoren im Netz gezählt. Anhand eines Verkehrsflussmodells, das auf den Ankunftsverteilungen der Fahrzeuge beruht, werden die Steuerungen für die ermittelte Verkehrssituation optimiert. Die Optimierung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die Umlaufzeiten und Signalzeiten der Knotenpunkte optimiert. Im zweiten Schritt werden schließlich die Versatzzeiten angepasst. Zielfunktion bei der Optimierung sind die Wartezeiten und die Anzahl der Halte, die vom Anwender gewichtet werden können. In 15-Minuten-Intervallen kann ein neu optimierter Steuerungsstatus geschaltet werden.

Um spezielle Kundenwünsche zu berücksichtigen, kann die Koordinierung mit Versatzzeitbedingungen versehen werden. Durch diese hat der Planer die Möglichkeit, Aspekte der konventionellen Zeit-Weg-Planung auch bei der Optimierung der Grünen Wellen einzubringen.

4.4 Stadt Frankfurt

Am 16.12.05 fand ein Gespräch mit Vertretern des Ordnungsamtes der Stadt Frankfurt in deren Diensträumen statt. Gegenstand des Gesprächs sind die Erfahrungen und die Praxis zur Signalplanung innerhalb der Stadt Frankfurt.

Zuständigkeiten

In Frankfurt ist das Ordnungsamt mit seinem Sachgebiet Verkehrsregelung zuständig für die Planung der Lichtsignalanlagen, für die verkehrsrechtliche Anordnung, für den Bau, den Betrieb, die Instandsetzung und die Instandhaltung der verkehrstechnischen Einrichtungen. Zu diesen verkehrstechnischen Anlagen gehören Lichtsignalanlagen, Verkehrsrechner, Parkleitsystem, Wechselverkehrszeichenanlagen und Info-Schilder. Dies ist verknüpft mit der Planung und Anordnung der StVO-Beschilderung und der Genehmigung von Baustellen. D. h.: Alle Aufgaben im Rahmen von § 45 StVO werden im Ordnungsamt zusammengefasst. Diese Art der Zuständigkeitsregelung findet sich in vergleichbarer Weise nur noch in den Städten Stuttgart und Berlin. Dabei ist das Ordnungsamt zugleich der Ansprechpartner für die Bevölkerung hinsichtlich der Durchführung der oben genannten Aufgaben.

Das Ordnungsamt legt auch Wert darauf, dass seine Mitarbeiter an maßgeblicher Stelle in Fachgremien vertreten sind, wie z. B. dem AA 3.3 (Verkehrsbeeinflussung innerorts), OCA-Arbeitsgruppen (Definition der OCIT-Schnittstelle) und dem DIN-Ausschuss 0832. Weiterhin wird bei der Betreuung verschiedener Forschungsprojekte auch außerhalb der Stadt Frankfurt mitgewirkt z. B. DIM (Düsseldorf in Motion).

Das Ordnungsamt ist im Moment für 780 Lichtsignalanlagen im Stadtgebiet von Frankfurt zuständig. Dies umfasst alle Signalanlagen auf der Gemarkung Frankfurt mit Ausnahme einiger Anlagen im Flughafenbereich, die in der Baulast von FRA-PORT sind. Die Stadt Frankfurt betreut auch Anlagen, die in der Baulast des ASV Frankfurt sind (d. h. Baulast Land). Von diesen 780 Anlagen sind ca. 230 Anlagen einzelne isoliert liegende Anlagen. Zu diesen besteht auch kein Datenzugang. Neuerdings sind fünf Anlagen über Mobiltelefon erreichbar. Falls sich das bewährt, soll diese Datenverbindung auch zu anderen Anlagen aufgebaut werden. Der Rest der Anlagen wird zentral gesteuert. Dazu gehört vor allem die Übermittlung von Umschalt-

wünschen und Betriebszustandsmeldungen. Die einzelnen Programme werden in erster Linie über eine Zeitautomatik, d. h. hier eine Jahresautomatik, eingeschaltet.

Insgesamt werden grundsätzlich fünf Umlaufzeiten vorgesehen, diese sind:

- 120 s auf zwei Straßenachsen in der Spitzenzeit,
- 90 s als generelle Umlaufzeit für Spitzenbelastungen,
- 72 s für Schwachlastprogramme,
- 60 s wenn dieses realisierbar ist,
- 45 s wird geschaltet, für Fußgänger, sofern dies möglich ist.

ÖPNV-Bevorrechtigungen

ÖPNV-Bevorrechtigungen gibt es an ca. 170 Anlagen. Diese sind nach und nach seit den 90er Jahren realisiert worden. Die Finanzierung der Einrichtung erfolgt zum wesentlichen Teil über Zuwendungen nach GVFG und FAG. Alle Beschleunigungsmaßnahmen beziehen sich immer auf gesamte Linien, nicht auf einzelne Knotenpunkte.

Eine einseitige Steuerungs- oder Priorisierungsphilosophie besteht nicht. Dies bedeutet: Extreme (z. B. Bahn erhält immer sofort Grün) werden nicht angewandt. Stattdessen wird jeweils knotenpunktspezifisch die bestmögliche Lösung gesucht. Dabei muss auch oft bedacht werden, dass sich die ÖPNV-Fahrzeuge gegenseitig an einer sofortigen Durchfahrsmöglichkeit hindern. Maßgebend ist die Wartezeit der ÖPNV-Fahrzeuge. Im Allgemeinen wird angestrebt, das jeweils zuerst anmeldende Fahrzeug verlustzeitfrei über den Knotenpunkt zu bringen. Sofern dicht darauf ein zweites Fahrzeug folgt, werden Verlustzeiten hingenommen, weil beide Fahrzeuge ohnehin nicht gleichmäßig im Pulk in der folgenden Strecke fahren können. Sofern sich an einem Knotenpunkt zwei konkurrierende koordinierte Richtungen kreuzen, erhält jede Richtung eine Freigabe in jedem Umlauf.

Der Nutzen der Koordinierung ist durch Testfahrten auf der Linie 34, die über 17 Kilometer und an 47 Signalanlagen verläuft, sehr eindrucksvoll unter Beweis gestellt worden. Man hat eine Testfahrt mit zwei aufeinander folgenden Bussen, die im normalen Linienbetrieb unterwegs waren, durchgeführt. Der erste Bus mit normaler Ausrüstung und Be-

schleunigung ist pünktlich ans Ziel gelangt. Der zweite Bus fuhr unbeschleunigt, d. h., man hat seine Kommunikationswege mit dem Steuersystem unterbrochen. Dieser Bus hatte am Ende seiner Fahrt ca. 20 Minuten Verspätung.

Es wird nochmals betont: ÖPNV-Priorisierung wird immer linienbezogen durchgeführt und selbstverständlich beim Neubau von Signalanlagen angeordnet, wenn ÖPNV vorliegt.

Durchführung der Planung

Das Amt gibt bei jeder Planung den Lageplan vor (Lage der Signalmaste, Signalgeber und Detektoren, einschließlich der Taster für Fußgänger und der Signalausstattung für Blinde, sowie die Beschilderung und Markierung). Außerdem führt das Amt die Berechnung der Zwischenzeiten durch und es prüft diese. Es stellt außerdem einen Signalzeitenplan für Festzeitsteuerung auf. Danach wird die Planung der Verkehrsabhängigkeit durchgeführt. Dies wird teilweise vom Amt bearbeitet, teilweise werden diese Arbeiten ausgeschrieben und an ein Ingenieurbüro vergeben. Durch moderne Planungs- und Steuerungstechniken ist es möglich, diese beiden Arbeitsschritte von verschiedenen Stellen ausführen zu lassen. Maßgeblich dafür ist die Steuerungssoftware VS-Plus.

Bei einer verkehrsabhängigen Steuerung sind die Parameter im Rahmen von VS-Plus festzulegen. Außerdem ist eine Funktionsprüfung mit Hilfe des Simulationsprogramms VISSIM durchzuführen. In einzelnen Fällen kommt zur reinen Funktionsprüfung mit VISSIM auch eine Überprüfung auf die erreichte Verkehrsqualität zum Einsatz.

Für die Planung von Signalanlagen wird zu 100 Prozent das System VS-Plus eingesetzt. Durch dieses System können für die Planung, die Software der Steuerung und die Steuergeräte selbst unterschiedliche Auftragnehmer zum Einsatz kommen. Als Folge davon sind die Kosten zurückgegangen.

Signal-Hardware

In Frankfurt sind Signalanlagen mit einem Baujahr zwischen 1959 und heute im Einsatz. 261 Anlagen stammen aus der Zeit von vor 1985. Dies bedeutet, dass der Großteil der Signalanlagen erst nach 1985 gebaut worden ist. Seit ca. drei Jahren ist auch eine Mischung der Hardware-Hersteller möglich geworden. Dies wird durch die Schnittstelle OCIT er-

möglichst. Die älteren Steuerungsrechner stammen von der Firma Siemens, während der neue Rechner von der Firma Stoye stammt. Für die Signalanlagen sind Geräte von Siemens, Stoye, Stührenberg, Signalbau Huber, Dambach und AVT im Einsatz.

Pflege der Signalzeitenpläne

Nach der Inbetriebnahme von Signalanlagen wird eine intensive Beobachtung der Verkehrssituation durchgeführt. Daran beteiligen sich nach aller Erfahrung auch die Bürger und die Ortsbeiräte. Innerhalb der ersten vier Wochen werden Signalzeitenpläne durch das beauftragte Ingenieurbüro angepasst. Dies gehört mit zu ihrem Leistungsumfang. Über die Jahre hinweg findet keine systematische Pflege statt. Vielmehr wird in die Steuerung eingegriffen, wenn besondere Ereignisse vorliegen oder wenn Qualitätsmängel bekannt werden.

In Frankfurt ist eine Verkehrsleitzentrale (Kurt-Schumacher-Straße) eingerichtet. Diese ist zwischen 5.30 Uhr und 20.00 Uhr mit drei bis vier Personen besetzt (sonntags nicht). In dieser Leitzentrale laufen Fehlermeldungen der Signalanlagen zusammen, die Signalanlagen können von hier aus in andere Programme umgeschaltet werden. Die Verkehrssituation wird über insgesamt 40 Videokameras kontrolliert. Durch die Steuerzentrale werden auch Infotafeln im Stadtgebiet angesteuert (siehe dazu www.mainziel.de).

Angewandte Koordinierungstechniken

Frankfurt richtet an einigen Haupteinfallstraßen Pfortneranlagen ein. Deren Kapazität richtet sich nach dem schwächsten Glied im nachfolgenden Straßennetz. Diese Pfortneranlagen können auch bei Störungen im Netz in entsprechend geringer dosierende Programme umgeschaltet werden.

Ausgangspunkt jeder Koordinierung ist eine klassische Grüne Welle. Diese Grüne Welle wird in Frankfurt mit einem Computerprogramm entworfen, das auf einer eigenen Entwicklung aus den 80er Jahren beruht. Eine möglichst gute Lösung wird dadurch gefunden, dass VISSIM eingesetzt wird und mit Hilfe der Simulation eine möglichst gute Funktionsfähigkeit durch „Versuchen und Korrigieren“ erreicht wird.

Alle neuen Anlagen werden verkehrsabhängig modifiziert. Es wird das Grünband aus der Grünen

Welle vorgegeben. Dabei können bei den einzelnen Phasen Grünbeginn und Grünende modifiziert werden. Dies wird von dem System VS-Plus bei den so genannten Anforderungsrahmen realisiert.

Die Konsequenzen aus der Signalsteuerung auf die Qualität des Verkehrsablaufs werden nicht nach einem besonderen System oder einer besonderen Theorie berechnet. Die Qualität wird jedoch kontrolliert mit Hilfe des Simulationsprogramms VIS-SIM.

Koordinierte Anlagen werden durchweg nicht verkehrsabhängig gesteuert. Ausnahmen dafür können allenfalls im Rahmen von Baustellen etc. bestehen.

Die so genannten adaptiven Verfahren werden bisher nicht angewandt. Man ist in dieser Sache jedoch mit Kollegen aus anderen Städten in Kontakt. Dabei wird berichtet, dass sehr viele Parameter bei den adaptiven Verfahren zu justieren seien. Man hält sich auch für die Zukunft die Option offen, in adaptive Verfahren einzusteigen. Dies kommt insbesondere dann in Betracht, wenn die integrierte Gesamtverkehrsleitzentrale eingerichtet ist.

Bei allen Planungen wird als Koordinierungsgeschwindigkeit im Allgemeinen die zulässige Geschwindigkeit verwendet. Nur wenn offensichtlich in einzelnen Abschnitten die zulässige Geschwindigkeit praktisch nicht zu realisieren ist, wird darauf bei der Planung Rücksicht genommen. Eine Kolonnenauflösung wird bei der Planung nicht bedacht.

Insgesamt ist man mit der bisherigen Praxis in Frankfurt sehr zufrieden. Die Erfahrungen damit sind durchweg gut (siehe oben genannten Bericht über ÖPNV-Priorisierung).

Die Planung in Frankfurt verläuft – wie bereits ausgeführt – vollständig nach VS-Plus, d. h. mit Hilfe standardisierter Verfahren.

Einflüsse von außen auf die Signalplanung

Hinsichtlich der Gerichtsfestigkeit der Signalplanung werden keine Probleme gesehen. Hier ist die Vorgehensweise nach VS-Plus nicht anders zu beurteilen als andere Steuerungsverfahren. Der Ausschluss feindlichen Grüns wird durch das Steuergerät sichergestellt. Streiffälle können allenfalls entstehen durch Situationen, in denen ein bestimmtes Signalbild mangels Nachfrage nicht erschienen ist. Diese Ungewissheit besteht im Nachhinein aber bei allen verkehrsabhängigen Steuerungen.

Selbstverständlich gibt es gewisse Einflüsse der Politik. So gibt es durchaus einzelne Eingaben aus politischen Kreisen an die Signalsteuerung. Darauf wird in jedem Einzelfall eingegangen. Die Erfahrungen sind durchweg so, dass die Vorgaben von Seiten der Verwaltung letztlich Bestand haben. Dies liegt auch daran, dass die Qualität der Planung innerhalb der Stadt Frankfurt ein sehr hohes Image hat.

Auch seitens der Presse werden im Einzelfall Berichte und Kritiken zur Signalplanung veröffentlicht. In diesen Fällen wird auch in jedem Einzelfall entgegengetreten. Sofern die Kritik unberechtigt ist, kann die Verwaltung im Allgemeinen ihre Position auch dort positiv vertreten.

4.5 Regierungspräsidium Karlsruhe

Im Rahmen der für das Projekt vorgesehenen Interviews mit Behörden wurde ein Gespräch mit dem Regierungspräsidium Karlsruhe, Abteilung Straßenbau, durchgeführt.

Zuständigkeitsbereich

Das RP Karlsruhe ist im Regierungsbezirk Karlsruhe zuständig für Bundesautobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen und deren Neu- und Ausbau. Nicht zuständig ist das RP für Straßen auf dem Gebiet von Gemeinden mit mehr als 50.000 Einwohnern. Hier ist die Unterhaltung des Bestandes mit allen dazugehörigen Arbeiten die Aufgabe der Gemeinden.

Koordinierte Lichtsignalanlagen gibt es im Zuständigkeitsbereich in verschiedenen Ortsdurchfahrten, wie z. B. in Rastatt (B 3/B 36), in den Ortsdurchfahrten Schwetzingen, Mühlacker, Dossenheim, Schriesheim sowie teilweise in Bruchsal. Vor der kürzlich durchgeführten Verwaltungsreform in Baden-Württemberg war das RP Karlsruhe für einen größeren Bereich zuständig und hat daher auch ausführliche Erfahrungen. Im derzeitigen Zuständigkeitsbereich des RP Karlsruhe befinden sich 399 Lichtsignalanlagen. Davon sind 231 (58 %) koordiniert. 168 Signalanlagen sind als Einzelanlagen geschaltet.

ÖPNV-Bevorrechtigung

Erfahrungen mit ÖPNV-Bevorrechtigung bestehen im Bereich von Schriesheim und Dossenheim auf

der B 3 zwischen Heidelberg und Weinheim. Hier sind ca. 15 LSA mit einer Straßenbahnbevorrechtigung (OEG-Linie) ausgestattet. Weiterhin gibt es an der neuen Ortsumgehung Karlsruhe-Wolfartsweiher im Zuge der B 3 ÖPNV-Bevorrechtigungen für Busse der Stadtwerke Karlsruhe.

Durchführung der Planung von Lichtsignalanlagen

Das anzuwendende Steuerungsverfahren (im Sinne der RiLSA) legt die zuständige Behörde in Zusammenarbeit mit dem planenden Ingenieurbüro fest. Die Planung wird jedoch vollständig an Ingenieurbüros vergeben. In keinem Falle wird die Planung an die Hersteller von LSA vergeben. Die verkehrstechnische Abnahme der Signalanlagen wird ebenfalls durch das planende Ingenieurbüro durchgeführt. Diese haben früher auch die elektrotechnische Abnahme durchgeführt. Diese entfällt heute im Hinblick auf die DIN/VDE 0832

Hardware

Die ältesten noch vorhandenen Anlagen stammen aus dem Ende der siebziger Jahre. Es gibt noch einige wenige EST-Anlagen der Firma Siemens. Diese führen keine Zwischenzeitüberwachung durch. Der größte Teil der vorhandenen Lichtsignalanlagen ist jedoch jünger als 15 Jahre und entspricht damit vollständig den aktuellen Sicherheitsanforderungen.

Pflege der Lichtsignalzeitenpläne

Das RP Karlsruhe führt in seinem Zuständigkeitsbereich an den LSA regelmäßig Verkehrszählungen durch. Außerdem werden die Pläne (unter anderem Lagepläne, Beschilderung, Markierung) der Knotenpunkte regelmäßig aktualisiert, sodass das RP Karlsruhe durchweg sowohl über die Situation vor Ort als auch über die Verkehrsbelastungen auf aktuellem Stand informiert ist. Anhand dieser Aktualisierungen werden von Ingenieurbüros Überprüfungen der Signalsteuerung durchgeführt. Diese führen auch zu Überarbeitungen der Signalzeitenpläne. Es ist angestrebt, derartige Überprüfungen wenigstens alle fünf Jahre durchzuführen. Dieses Ziel wird weitestgehend erreicht.

Koordinierungstechniken

Vollverkehrsabhängige Steuerungen im Zusammenhang mit einer Signalkoordinierung gibt es nur

an zwei Knotenpunkten. Angewandt werden so genannte „Atmende Grüne Wellen“. Diese umfassen jeweils zwei bis drei Knotenpunkte. Dafür wird ein so genannter Grundrahmenplan hergestellt. Einzelne Grünphasen können dann verkehrsabhängig verlängert werden. Dies führt zu unterschiedlich großen Umlaufzeiten für alle beteiligten Knotenpunkte. Die Umlaufzeiten liegen zwischen 50 und 150 Sekunden. Bei dieser Art der Koordinierung ist es normal, dass nur eine Hauptrichtung koordiniert wird, während die Gegenrichtung mit den verkehrsabhängig erzeugten Signalzeitenplänen auskommen muss. Die Veranlassung der entsprechenden Grünphasenverlängerung wird durch einzelne, dafür festgelegte Induktionsschleifen vorgenommen. Diese Art der Steuerung wird an 71 Knotenpunkten durchgeführt, das sind 18 % des Bestandes.

Eine Besonderheit ist die Koordinierung der B 3/ B 36 in Rastatt. Einzelne Knotenpunkte mit besonders hoher Belastung (z. B. Knotenpunkt mit der Murgtalstraße B 462) werden nicht koordiniert, sondern verkehrsabhängig gesteuert. Ansonsten wird die Koordinierung innerhalb der Ortsdurchfahrt über acht Knotenpunkte als Festzeitsteuerung durchgeführt. Dabei kann an einzelnen Knotenpunkten eine Anpassung der Grünzeiten verkehrsabhängig durchgeführt werden. Es ist denkbar, dass dabei die in der Festzeitsteuerung vorgesehene Koordinierung beeinträchtigt wird.

Feste Umlaufzeiten werden an insgesamt 123 Anlagen geschaltet. Innerhalb der einzelnen Programme können kleinere Verkehrsabhängigkeiten vorgesehen sein. Wegen der Umschaltproblematik (Kapazitätsverluste während des Umschaltvorgangs) werden im Allgemeinen nur vier Festzeitprogramme bereitgehalten (zwei Leistungsprogramme, z. B. Morgenspitze und Abendspitze; ein Mittellastprogramm; ein Schwachlastprogramm).

Bei den meisten Koordinierungen werden die Einzelknotenpunkte nachts vollverkehrsabhängig geschaltet. Dabei wird im Allgemeinen als Ruhestellung Grün für die Hauptrichtung geschaltet. Diese Art der Vollverkehrsabhängigkeit würde bei extremer Schwachlast zu einer automatischen Koordinierung führen, weil bei wenig Querverkehr die Hauptrichtung durchgehend auf Grün gestellt ist. Ansonsten wird bezweifelt, ob durch eine vollverkehrsabhängige Steuerung automatisch eine gute Koordinierung erzeugt wird.

Die Schalttechnik „Alles-Rot-Sofort-Grün“ wird nur noch vereinzelt angewandt. Sie hat sich nicht be-

währt, weil sie Kraftfahrer zu einer Fahrweise im Sinne von „russisches Roulette“ veranlasst hat; das heißt, sie sind mit unverminderter Geschwindigkeit auf die Rot anzeigende Signalanlage zugefahren, in der Erwartung, dass sie auf Grün springen würde. Dies hat zu schweren Unfällen geführt.

Erfahrungen mit adaptiver Steuerung liegen nicht vor. Daran besteht auch kein vorrangiges Interesse. Man legt vor allem Wert darauf, dass die Steuerungszustände von der verantwortlichen Stelle erkennbar sind. Eine Steuerungstechnik, bei der die Verantwortung von der Behörde an einen Computer übergeht, wird sehr skeptisch betrachtet und sie kommt vorerst nicht zum Einsatz.

Beurteilung der Koordinierungsverfahren

Eine eindeutige Präferenz für eine der denkbaren Möglichkeiten besteht nicht. Die Diskussion ergibt folgende Statements:

Die beste Lösung ist eine Festzeitsteuerung mit regelmäßiger Pflege der Signalzeitenpläne.

Die verkehrsabhängigen Ergänzungen sind im Wesentlichen ein Zugeständnis an die technischen Möglichkeiten der Steuerung. Ob sie Verbesserungen erbringen, ist nicht nachzuvollziehen.

Es besteht die Vermutung, dass eine verkehrsabhängige Signalsteuerung mit Rahmenzeitplan Verbesserungen bringt, weil eine Aktualisierung von Festzeitsteuerungen nicht ständig möglich ist und weil die Festzeitsteuerung eventuelle Sondersituationen nicht erfasst.

Verkehrsabhängige Elemente werden auch deswegen vorgesehen, weil aufgrund der großen Entfernungen der Signalanlagen von der Dienststelle nicht alle Anlagen in ständigem Kontakt mit einer Zentrale sind. Außerdem können die Signalisierungszustände und eventuelle verkehrliche Probleme nicht immer erkannt werden. Durch neuere technische Möglichkeiten (GSM-Verbindung zu allen Signalanlagen) wird ein ständiger Kontakt der Zentrale mit allen Signalanlagen auch über große Entfernungen in Zukunft für möglich gehalten. Dann würde die Präferenz auf eine Festzeitsteuerung gerichtet sein.

Die Präferenzen werden teilweise auch aus der Öffentlichkeit vorgegeben. Bei der Anlage von Lichtsignalanlagen werden in der Öffentlichkeit Induktionsschleifen und Verkehrsabhängigkeiten verlangt.

Insofern stehen die Zeichen auch aus politischer Richtung eindeutig auf Verkehrsabhängigkeit.

Fußgängerdruckknöpfe werden in erster Linie an Anlagen vorgesehen, die extrem schwach vom Fußgängerverkehr beaufschlagt werden. In diesen Fällen will man vermeiden, dass durch wenig benutzte Fußgängerfurten die Kapazität im Kraftfahrzeugverkehr beeinträchtigt wird. Bei stärker von Fußgängern beanspruchten Knotenpunkten, werden Fußgänger-Anforderungs-Druckknöpfe eher als eine Benachteiligung der Fußgänger angesehen.

Koordinierungsgeschwindigkeiten

Die Koordinierungsgeschwindigkeit ist durchweg die zulässige Geschwindigkeit. Als zulässige Geschwindigkeit kommen in Betracht: 50 km/h, 60 km/h (nur an ganz wenigen Anlagen) und 70 km/h. Bei relativ großen Knotenpunktabständen außerorts wird die zulässige Geschwindigkeit durchgehend auf 70 km/h begrenzt.

Berechnungsverfahren für die Koordinierung

Die bei der Planung der Signalanlagen angewandten Techniken der Koordinierung bleiben den Ingenieurbüros überlassen. Insofern wird auch nicht geprüft, ob eine Kolonnenauflösung bedacht wird. Die eingesetzten EDV-Planungs-Programme werden nicht vorgegeben. Ebenfalls wird kein Einfluss auf einen rechnerisch nachgewiesenen Qualitätsstand bei der Koordinierung genommen. Die einzige Kontrolle sind grafische Grünbänder, die von den Ingenieurbüros in ihren Planungsunterlagen bereitgestellt werden müssen. Diese Grünbänder werden nach der ersten Einstellung der Signalanlagen aufgrund örtlicher Erfahrungen justiert. Dabei fließen dann naturgemäß auch Fragen der Kolonnenauflösung ein.

Standardisierung von Verkehrsabhängigkeiten und Koordinierungen

Standardisierungen (zum Beispiel im Sinne von VS-Plus) werden bisher nicht eingesetzt und sie werden auch nicht erwünscht. Die Behörde will stets Zugriff auf die Entscheidungen innerhalb der einzelnen Steuerungsverfahren behalten. Sie ist dazu gezwungen, weil vielfach im Falle von Unfällen die entsprechenden Schalttechniken und Schaltzustände während des Unfalls nachgewie-

sen werden müssen. Insofern ist es unverzichtbar, wenn schon nicht der konkrete Schaltzustand zum Unfallzeitpunkt fest angegeben werden kann, dass wenigstens die Schaltlogik konkret dargelegt werden kann.

4.6 Stadt Düsseldorf

Im Rahmen der Expertengespräche wurde am 12.02.2007 ein Gespräch mit einem Vertreter des Amtes für Verkehrsmanagement der Stadt Düsseldorf geführt.

Zuständigkeit

Das Amt für Verkehrsmanagement ist mit sämtlichen Aufgaben zu den Bereichen Planung, Bau und Betrieb von Lichtsignalanlagen betraut. Es ist in sechs Abteilungen unterteilt, die sich mit den folgenden Bereichen beschäftigen.

Abteilung 1:	Verwaltung, Haushalt,
Abteilung 2:	Verkehrsplanung,
Abteilung 3:	Straßenbau,
Abteilung 4:	Tunnel- und Brückenbau,
Abteilung 5:	Verkehrsregelung,
Abteilung 6:	Verkehrstechnik.

Für die Verkehrssicherheit ist die Abteilung 5 zuständig, wobei die Unfallstatistik von der Polizei geführt wird.

Die Stadt Düsseldorf betreibt derzeit ca. 600 Lichtsignalanlagen. Dazu kommen noch 40 Anlagen, die in die Zuständigkeit des Landesbetriebes fallen. Von diesen Anlagen werden 120 im Einzelbetrieb gesteuert, d. h., diese sind nicht an den Verkehrsrechner angeschlossen. Diese Anlagen liegen außerhalb des Innenstadtgebietes und haben keine weiteren LSA in unmittelbarer Umgebung.

Im gesamten Stadtgebiet sind ca. 400 LSA koordiniert. Die Koordinierung reicht dabei von zwei Anlagen bis zu Straßenzügen mit über 20 koordinierten Anlagen. Die koordinierten Fahrtrichtungen nehmen im gesamten Straßennetz (1.300 km) eine Strecke von 220 km ein.

Im rechtsrheinischen Teil Düsseldorfs ist die Umlaufzeit zu jeder Tageszeit einheitlich (ca. 90 % der LSA) auf 70 s festgelegt. Dadurch möchte man langen Wartezeiten der Kfz und der Fußgänger entgegenwirken.

Planung von Lichtsignalanlagen

Bis zum Jahre 2005 wurden die Planungen der Lichtsignalanlagen vollständig vom Amt für Verkehrsmanagement bearbeitet. Mittlerweile werden auch Aufträge an zwei Ingenieurbüros vergeben.

Die Planung wird dabei ausschließlich mit einer eigens entwickelten Planungssoftware erstellt. Diese Software beinhaltet einen vollständigen Ingenieurarbeitsplatz, der die Bearbeitung von Festzeitsteuerungen und verkehrsabhängigen Steuerungen ermöglicht. Das Prinzip dieser Software ist bewusst einfach gehalten. So können die Steuerungszustände sämtlicher Anforderungen durch einen Blick auf den Signalzeitenplan erfasst werden. Das Prinzip dieses Programms ist, dass zu bestimmten Abfragezeitpunkten die Anforderungen oder Zeitlücken an den Detektoren abgefragt werden und die Grünzeiten der Anforderung entsprechend angepasst werden.

Die Ingenieurbüros, die mit Planungen für die Stadt Düsseldorf beauftragt werden, haben dieses Programm zur Verfügung gestellt bekommen. Auf diese Weise sind sämtliche Planungen nach demselben System erstellt.

Signalhersteller werden von der Stadt Düsseldorf grundsätzlich nicht mit der Planung von LSA beauftragt. Das Verständnis der Planung und die vollständige Kontrolle sollen bei der Stadt bleiben und die Planung soll von der Bauausführung getrennt sein.

Die Pflege der Signalzeitenpläne wird nicht nach einem festgelegten Rhythmus durchgeführt. Bei einer Beanstandung oder besonderen Vorkommnissen werden die LSA jedoch geprüft. Nach Meinung der Verwaltung ist dies ausreichend, da die kritischen Knotenpunkte durch dieses Verfahren regelmäßig kontrolliert werden.

Hardware

Die ältesten im Moment vorhandenen Lichtsignalanlagen stammen aus den 1960er Jahren. Die Stadt Düsseldorf möchte bis 2010 alle vor 1980 gebauten LSA erneuern.

Neue Anlagen werden ausschließlich mit LED-Signalgebern ausgestattet. Diese haben einen günstigeren Stromverbrauch als herkömmliche Signalgeber. Es ist kein Lampenwechsel notwendig, die Ausschaltzeiten sind geringer und es kann nicht zu

Ausfällen kommen. Derzeit sind ca. 150 Lichtsignalanlagen mit LED-Signalgebern ausgestattet.

Für die Umsetzung der Planungen in den Steuergeräten sind die Signalhersteller zuständig. In den Steuergeräten selber wird das System VS-Plus verwendet. Da die Planungen in einer fest formalisierten Form durchgeführt werden, ist es auch vorstellbar, die von der Software erstellten Dateien direkt in das Steuergerät einzulesen. Dies ist im Moment jedoch noch nicht realisiert.

Angewandte Koordinierungsverfahren

Klassische festzeitgesteuerte Grüne Wellen kommen auf dem Stadtgebiet Düsseldorf nur vereinzelt vor. Wenn sie vorkommen, sind es nur kurze Koordinierungen von drei oder vier LSA.

In der Regel sind die koordinierten LSA von kleinen verkehrsabhängigen Eingriffen geprägt. Die Lichtsignalanlagen sind jedoch nicht wie bei einer Verkehrsabhängigkeit üblich mit einer Vielzahl von Detektoren in allen Fahrtrichtungen versehen. Es werden nur vereinzelt für ausgewählte Fahrzeugströme Detektoren installiert, um einzelne Anforderungen zu gewährleisten. Die Verkehrsabhängigkeit ist selten auf die Verlängerung der Grünzeit der Hauptrichtung ausgelegt. Im Normalfall sind z. B. Stauraumdetektoren der Linksabbieger vorhanden.

Die Komplexität der verkehrsabhängigen Steuerungen wird in Düsseldorf bewusst begrenzt, um jederzeit einen Überblick über die Steuerungszustände zu gewährleisten. Im Grunde orientiert man sich bei der Koordinierung sehr stark an einer festzeitgesteuerten Grünen Welle, lässt dabei aber einzelne kleine verkehrsabhängige Eingriffe zu. Die verkehrsabhängigen Eingriffe sind in Düsseldorf schon durch die Rahmenbedingung der kurzen Umlaufzeit von 70 s stark begrenzt.

Die Planung der Rahmenpläne für die Koordinierung beruht weniger auf einer mathematischen Optimierung der Versatzeiten als vielmehr auf der Erfahrung der Mitarbeiter. Die Kolonnenauflösung wird bei der Planung der Koordinierung nicht berücksichtigt.

Eine Ruhestellung der Signalanlagen gibt es nicht. Wenn keine Anforderungen vorliegen, wird der Rahmenplan ohne Modifikation ausgeführt.

Lichtsignalanlagen nach dem Prinzip „Alles-Rot-Sofort-Grün“ sind in Düsseldorf vorhanden. Aller-

dings sind dies Einzelanlagen, die nicht koordiniert sind.

In Düsseldorf wird außerdem sehr viel Wert darauf gelegt, dass den Fußgängern in jedem Umlauf eine Grünzeit angeboten wird. Fußgängeranforderungen werden nach Möglichkeit nicht verwendet.

Bewertung der Qualität von Koordinierungen

Es werden derzeit keine systematischen Qualitätsbewertungen von Koordinierungen durchgeführt. In naher Zukunft wird jedoch durch die Modernisierung von Steuergeräten und Verkehrsrechnern die Möglichkeit geschaffen, zentral eine Qualitätsbewertung der LSA-Regelung durch Messungen durchzuführen. Weiterhin wird die Möglichkeit geschaffen, durch Simulationen eine Bewertung der Qualität von Planungen vorzunehmen. Dann können Einzelknotenpunkte, aber auch Straßenzüge mit mehreren Knotenpunkten bewertet werden.

Adaptive Steuerung

Adaptive Steuerungen werden in Düsseldorf bisher noch nicht eingesetzt. Man steht diesem Verfahren für den Einsatz in Düsseldorf eher skeptisch gegenüber. In Düsseldorf ist die Umlaufzeit auf 70 s für das gesamte Stadtgebiet festgelegt, dadurch würde schon eine Anpassung des Rahmenplans durch die adaptive Steuerung nicht in Frage kommen. Dazu kommen die engen Knotenpunktabstände, die relativ wenig Spielraum für eine adaptive Steuerung lassen. Es gibt jedoch ein Teilnetz in Düsseldorf, in dem ein solches Steuerungsverfahren in den nächsten Jahren getestet werden soll. Bisher besteht aber auch noch Zweifel an dem tatsächlichen Nutzen dieser Steuerung, da bisher noch keine objektive Beurteilung einer solchen Steuerung bekannt ist.

ÖPNV

Die Straßenbahnen werden in Düsseldorf immer priorisiert. Im Allgemeinen werden Busse mit dem normalen Kfz-Verkehr gesteuert, vereinzelt sind jedoch Busschleusen vorhanden. Die Bevorrechtigung der Straßenbahnen ist nicht absolut, sondern berücksichtigt auch den Kfz-Verkehr. Die Koordinierung der Straßenbahnen wird parallel zur Koordinierung des Kfz-Verkehrs gesteuert. Für die Straßenbahnen ist ein Stadtfahrplan bindend. Durch diesen Plan werden die Fahrzeuge so ge-

steuert, dass sie an festgelegten Warteorten warten müssen, um dann einige Knotenpunkte in der Grünphase überfahren zu können. Auf einem ca. 2 km langen Streckenabschnitt ist eine absolute Bevorrechtigung der Straßenbahnen vorhanden. Die Fahrzeuge fahren dort allerdings auch auf einem eigenen Gleiskörper. Weiterhin gibt es an einzelnen nichtkoordinierten Knoten eine absolute Bevorrechtigung.

Einflüsse von außen auf die Signalplanung

Die politische Beeinflussung auf die Signalplanung ist in Düsseldorf sehr gering. Nur bei Unfällen (besonders mit Straßenbahnen) werden vereinzelt Forderungen der Politik gestellt. Die Beteiligung der Bürger an der Planung der Lichtsignalanlagen ist in Düsseldorf sehr rege. Es werden sehr häufig Anregungen oder Beschwerden eingereicht, die von der Behörde geprüft werden.

4.7 Fazit

Die festzeitgesteuerte Grüne Welle wird von vielen Experten nicht mehr als der Stand der Technik angesehen. Der verkehrsabhängigen Steuerung wird in vielen Anwendungsbereichen eine höhere Verkehrsqualität aufgrund der höheren Flexibilität unterstellt. Es wird jedoch auch deutlich, dass diese Meinung oft nicht durch eine objektive Bewertung belegt ist. Ein tatsächlicher Vergleich der Wirkung beider Verfahren wird in der Regel nicht durchgeführt. In der Praxis stellt sich meistens auch nicht die Frage nach einer Auswahl einer Steuerungsart, da viele Ausschreibungen nur für ein Steuerungsverfahren (gegenwärtig hauptsächlich verkehrsabhängige oder adaptive Steuerungen) verfasst werden. So kommt es zu keiner wirklichen Konkurrenz der Steuerungsverfahren.

Die verkehrsabhängige Steuerung wird von den meisten Experten als sinnvoll erachtet, wenn die verkehrsabhängigen Eingriffe maßvoll sind. Es wird auch deutlich, dass diese Steuerungen immer auf einem Rahmenplan beruhen, der (manuell oder durch eine Planungssoftware) wie eine Festzeitkoordinierung geplant wird.

Den neueren Entwicklungen in der Koordinierungstechnik, z. B. den adaptiven Steuerungsverfahren, stehen die meisten Experten offen gegenüber. Es wurden jedoch objektive Bewertungen der tatsächlichen Wirkung dieser Verfahren vermisst.

5 Beschreibung der Untersuchungsstrecken

Es wurden insgesamt zehn Straßenzüge untersucht. Die Strecken wurden in Zusammenarbeit mit Ingenieurbüros und Verwaltungen so ausgewählt, dass eine Vielfalt typischer Fälle von Koordinierungen erfasst wurde. Zugleich musste sichergestellt sein, dass die erforderlichen Planunterlagen zu beschaffen waren. Überdies wurde eine gewisse regionale Streuung angestrebt. Angesichts der geringen Anzahl von Untersuchungsobjekten und der bestehenden Möglichkeiten war eine Auswahl der Strecken nach einem zuvor definierten System nicht sinnvoll. Von allen Untersuchungsstrecken wurden die Grünbänder, die Lagepläne der Knotenpunkte und deren Signalpläne oder Schaltlogiken für diese Untersuchung zusammengetragen. Für die meisten Strecken sind die Verkehrsbelastungsdaten vorhanden. Für die Straßenzüge, deren Belastungsdaten nicht vorlagen, wurden diese während der Messung erhoben.

Die Planungsunterlagen sämtlicher Straßenzüge wurden einheitlich dokumentiert. Die Unterlagen wurden so zusammengestellt, dass sie leicht nachzuvollziehen sind und einen Überblick über die vorhandene Steuerung liefern.

Die Hauptaufgabe in dieser Untersuchung lag in der Abgrenzung der Einsatzbereiche von festzeitgesteuerten Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen mit Rahmenzeitplan. Die Untersuchung sollte sich möglichst eng an der Realität orientieren, deswegen wurden die in Tabelle 5.1 dargestellten real vorhandenen Straßenzüge betrachtet.

Festzeitgesteuerte Grüne Welle

Für drei Straßenzüge, die für diese Untersuchung ausgewählt wurden, lagen die Planungsunterlagen für die Festzeitsteuerung vor. Auf den anderen sieben Straßenzügen sind in der Realität verkehrsabhängige Steuerung vorhanden (siehe Tabelle 5.1). Diese Steuerungen beruhen jedoch in jedem Fall auf einem Rahmenplan, der als Festzeitsteuerung verwendet werden kann. In einem Fall (Königsallee) wurde eine festzeitgesteuerte Grüne Welle durch eine Messung untersucht. Alle anderen Straßenzüge wurden in der Simulation untersucht.

Zusätzlich zu den aus der Praxis vorliegenden festzeitgesteuerten Grünen Wellen wurden für jeden Straßenzug nach einem TRANSYT-Verfahren (AMPEL-K) optimierte Festzeitsteuerungen entwickelt. Es wurden jeweils die vorhandenen Signalzeitenpläne der Knotenpunkte verwendet und eine neue Optimierung für die koordinierten Hauptrichtungen und für das gesamte Netz entwickelt. Außerdem wurden die Signalzeitenpläne neu optimiert und auch dafür neue Optimierungen für die Hauptrichtung und das gesamte Netz erstellt.

Verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan

Für sieben der zehn untersuchten Straßenzüge lagen die real verwendeten verkehrsabhängigen Steuerungen vor (siehe Tabelle 5.1). Bis auf zwei Straßenzüge (Düsseldorf), auf denen vorwiegend der ÖPNV priorisiert ist, sind alle Steuerungen nach dem Prinzip der verkehrsabhängigen Steuerung mit Grünzeitmodifikation programmiert. Der Albersloher Weg in Münster wird zum größten Teil verkehrsabhängig gesteuert. Einzelne LSA sind aber auch

	Straßenzug	Stadt	Steuerung	Knotenpunkte
1.	Albersloher Weg-Nord	Münster	verkehrsabhängig mit Rahmenplan	11
2.	Albersloher Weg-Süd	Münster	verkehrsabhängig/Festzeit	13
3.	Königsallee	Bochum	Festzeit	9
4.	Herner Straße	Bochum	verkehrsabhängig mit Rahmenplan	8
5.	Stader Straße	Buxtehude	verkehrsabhängig mit Rahmenplan	9
6.	Hauptstraße	Herne	Festzeit	9
7.	Eickeler Straße	Herne	Festzeit	9
8.	Brehmstraße/Lindemannstr.	Düsseldorf	verkehrsabhängig mit Rahmenplan + ÖPNV-Priorisierung	8
9.	Kettwiger Straße/Kruppstraße	Düsseldorf	verkehrsabhängig mit Rahmenplan + ÖPNV-Priorisierung	9
10.	Bonnstraße	Frechen	verkehrsabhängig mit Rahmenplan	8

Tab. 5.1: Übersicht der Untersuchungsstrecken

festzeitgesteuert oder vollverkehrsabhängig gesteuert. Für die drei Untersuchungsstrecken, die ausschließlich festzeitgesteuert sind, wurden vom Auftragnehmer eigene Steuerungslogiken entwickelt, die sich an den Vorgehensweisen der Beispiele aus der Praxis orientieren.

Die Steuerungen beruhen in der Regel auf dem Prinzip der Grünen Welle mit Grünzeitmodifikation. Der Rahmenzeitplan orientiert sich an dem Grünband einer festzeitgesteuerten Grünen Welle. Die Grünzeiten können zu den Koordinierungszeitpunkten gedehnt oder verkürzt werden. Die Verfahren beruhen auf einer Zeitlückenabfrage der Detektoren. D. h., erst bei einer Zeitlückenüberschreitung, von im Normalfall 3 s, wird die Haupttrichtung abgebrochen. Erreicht eine Signalgruppe die maximal zulässige Grünzeit, wird sie sofort abgebrochen. Dieses Verfahren ermöglicht eine flexible Anpassung an kurzfristige Schwankungen in der Verkehrsbelastung.

Linienkoordination als Folge der vollverkehrsabhängigen Steuerung

Bisher sind Koordinierungen von Straßenzügen immer durch festgelegte Koordinierungszeitpunkte (Rahmenpläne) bestimmt. In diesem Projekt wurde an drei Beispielen untersucht, ob durch eine vollverkehrsabhängige Steuerung, die vollständig unabhängig von einem Rahmenzeitplan ist, automatisch eine Koordination erzeugt werden kann. Dazu wurde eine standardisierte Steuerungslogik verwendet, die für allgemeingültige Knotenpunkte angewendet werden kann. Dieses Steuerungsverfahren wurde durch Simulationen auf drei Straßenzügen untersucht.

5.1 Albersloher Weg – Münster

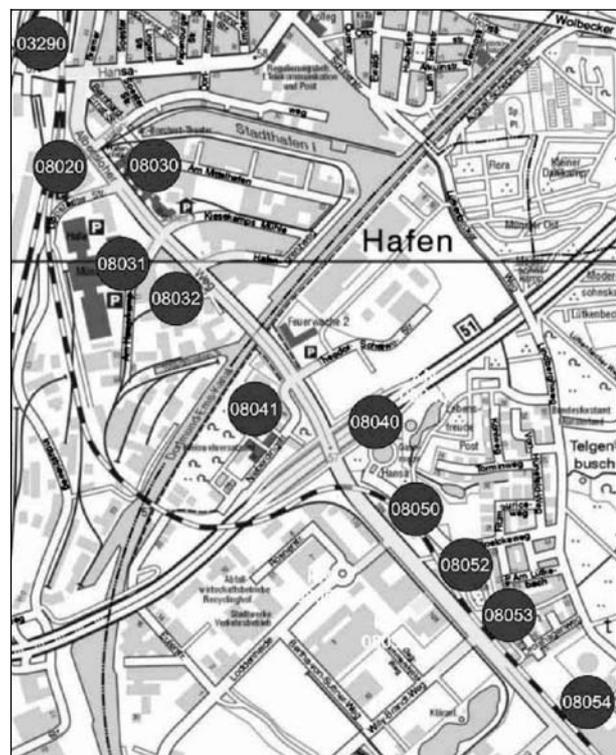
Der Albersloher Weg in Münster (MS) ist eine radiale Hauptverkehrsstraße, die von Gremmendorf in das Zentrum Münsters führt (siehe Bild 5.1 und 5.2). Der koordinierte Streckenabschnitt erstreckt sich über 6 km und umfasst 24 Knotenpunkte. Der Albersloher Weg befindet sich im Moment in der Modernisierung. Auf dem südlichen Teilstück sind teilweise noch alte festzeitgesteuerte Lichtsignalanlagen vorhanden. Der gesamte Straßenzug wurde im Jahr 2006 so modernisiert, dass zunächst alle Anlagen verkehrsabhängig geschaltet werden können. Als weitere Stufe der Entwicklung wird 2007 die adaptive Steuerung MOTION eingerichtet.

Die gesamte Strecke ist für eine Untersuchung zu umfangreich. Deswegen wird die Strecke in zwei Untersuchungsstrecken mit 11 und 13 Knotenpunkten aufgeteilt.

Nördliche Untersuchungsstrecke

Die Umgebung des nördlichen Teilstückes hat bis zur B 51 innerstädtischen Charakter. Südlich der B 51 bis zum Knotenpunkt Loddenheide befindet sich ein Gewerbegebiet (siehe Bild 5.1).

Der nördlichste Knotenpunkt (KP 03290) liegt am Hansaring, der unmittelbar an die Innenstadt grenzt. Die Koordination ist am KP 03290 auf die



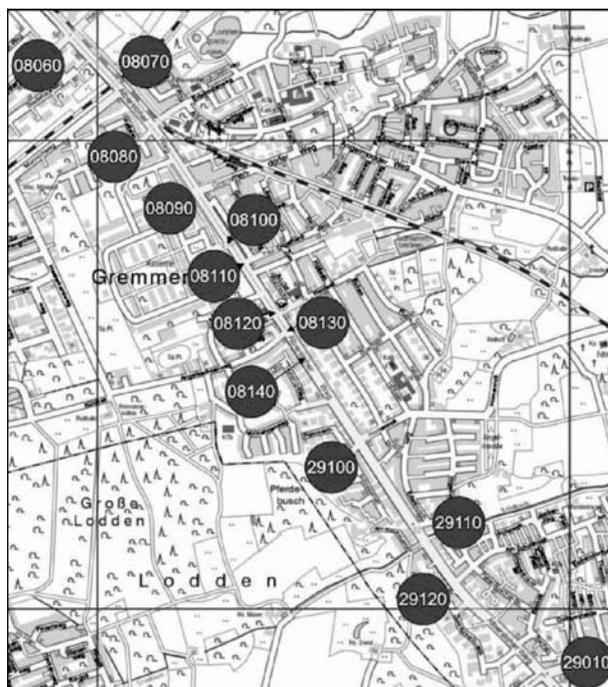
Knotenpunkte	Kreuzende Straße
03290	Hafenstraße
08020	Hafenweg
08030	Lippstädter Straße
08031	Am Haferkamp
08032	Hafengrenzweg
08041	Theodor-Scheiwe-Weg
08040	B 51
08050	Loddenheide (Ratio)
08052	Praktiker Baumarkt
08053	Willy-Brandt-Weg
08054	Martin-Luther-King-Weg

Bild 5.1: Knotenpunkte der nördlichen Untersuchungsstrecke des Albersloher Wegs

Rechtseinbieger ausgerichtet. Die Verkehrsbelastung ist hier, bedingt durch die unmittelbare Innestadtnähe, in allen Richtungen sehr hoch. In Fahrtrichtung Nord hat dieser Knotenpunkt, durch eine Busschleuse und eine Einmündung, drei dicht aufeinander folgende Haltelinien. Südlich des KP 03290 wechseln sich bis zum Knotenpunkt KP 08031 drei- und vierstreifige Straßenquerschnitte ab. Die Haltelinien der Lichtsignalanlagen haben einen Abstand von unter 150 m. Südlich des KP 08031 ist der Straßenquerschnitt bis zum KP 08040 vierstreifig. Für Abbieger sind hier zusätzliche Fahrstreifen vorhanden. Südlich des KP 08040 wird der Straßenquerschnitt wieder zweistreifig. Dieser

Streckenabschnitt stellt in der nachmittäglichen Spitzenstunde stadtauswärts eine Engstelle dar. Der Straßenquerschnitt des Streckenabschnitts vom KP 08050 bis zum KP 08054 ist zweistreifig, mit zusätzlichen Fahrstreifen für Linksabbieger. Kurz vor dem KP 08060 weitet sich der Querschnitt wieder auf vier Fahrstreifen auf.

Die meisten LSA des Straßenzuges sind verkehrsabhängig gesteuert. Lediglich ein Knotenpunkt (8053) ist festzeitgesteuert. Die Lichtsignalanlagen sind durch einen Rahmenzeitplan koordiniert. Die Planungsunterlagen der Steuerungslogiken liegen vor, sind jedoch so umfangreich, dass sie an einigen Stellen vereinfacht werden. Die grundsätzliche Funktionsweise bleibt jedoch erhalten.



Knotenpunkte	Kreuzende Straße
08060	Heumannsweg
08070	Münnichweg
08080	Erbdrostenweg
08090	Gremmendorfer Weg
08100	York-Kaserne
08110	Paul-Engelhard-Weg
08120	Heidestraße
08130	Angelsachsenweg
08140	Otto-Hersing-Weg
29100	Homannstraße
29110	Blaukreuzwäldchen
29120	Am Schütthook
29010	Osttor

Bild 5.2: Knotenpunkte der südlichen Untersuchungsstrecke des Albersloher Wegs

Südliche Untersuchungsstrecke

Die südliche Untersuchungsstrecke liegt in einem Wohngebiet (Bild 5.2). Im nördlichen Bereich führt sie entlang einer britischen Kaserne. In demselben Bereich befindet sich parallel zum Albersloher Weg eine Einkaufsstraße mit einigen Geschäften. Der Straßenzug umfasst 13 Knotenpunkte. Im Süden der Untersuchungsstrecke liegt auf der westlichen Seite ein kleines Gewerbegebiet. Die Stadtgrenze Münsters liegt am KP 29010. Südlich dieses Knotenpunktes ist keine Bebauung mehr vorhanden. Die Abstände der Haltelinien liegen auf diesem Streckenabschnitt zwischen 200 und 400 m.

Der Straßenquerschnitt ist vom KP 08060 bis zum KP 08130 vierstreifig und für Linksabbieger sind Abbiegefahrstreifen vorhanden. Südlich des KP 08130 ist der Straßenquerschnitt zweistreifig. Die drei letzten Lichtsignalanlagen (29100, 29110 und 29120) vor dem Knotenpunkt Osttor dienen lediglich zur Sicherung von Fußgängerfurten.

Die LSA 8070 bis 8130 sind verkehrsabhängig gesteuert und durch einen Rahmenzeitplan koordiniert. Die fünf südlichen LSA (8140 bis 29010) sind freilaufend verkehrsabhängig gesteuert. Sie sind vor der Modernisierung der Steuerung des Albersloher Weges nicht koordiniert.

5.2 Königsallee – Bochum

Die Königsallee führt aus dem Bochumer Innenstadtbereich in den Bochumer Süden bis an die Stadtgrenze nach Hattingen (siehe Bild 5.3). Der Straßenquerschnitt ist auf der gesamten untersuch-

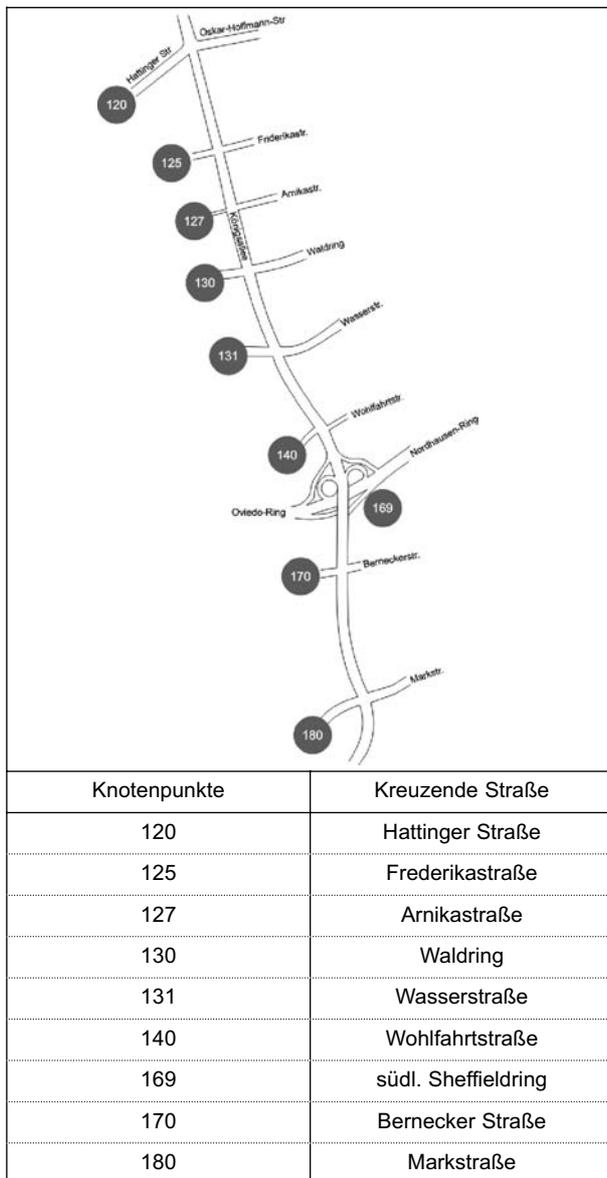


Bild 5.3: Knotenpunkte auf der Königsallee (BO)

ten Länge vierstreifig. Südlich des KP 127 sind die Richtungsfahrtstreifen durch einen Mittelstreifen getrennt. In die Untersuchungen einbezogen wurde der Straßenzug von der Hattinger Straße bis zur Marktstraße, der sich über 3 km Länge erstreckt. Auf der gesamten betrachteten Untersuchungsstrecke befinden sich acht koordinierte Knotenpunkte.

Im innenstadtnahen Bereich zwischen den Knotenpunkten 120 und 125 sind einige nicht signalisierte Einmündungen vorhanden. Zwischen den restlichen Knotenpunkten auf der Strecke treten nur vereinzelt nicht signalisierte Einmündungen auf. Diese Einmündungen sind bei dieser Untersuchung von untergeordneter Bedeutung, da sie relativ gering belastet sind. Die Knotenpunkte mit den höchsten

verkehrlichen Belastungen sind die Knotenpunkte 120, 131, 169 und 180.

Die Lichtsignalanlagen auf der Königsallee sind durch eine festzeitgesteuerte Grüne Welle koordiniert. Für alle Knotenpunkte stehen die Lage- und Signalzeitenpläne zur Verfügung. Außerdem ist das Zeit-Weg-Diagramm für die Koordinierung und eine Verkehrszählung an der Frederikastraße von 2002, zur Morgen- und Nachmittagsspitze, vorhanden.

Auf der Königsallee werden zwei Festzeitprogramme geschaltet. Das Programm für den Tag läuft von 5:30 Uhr bis 22:30 Uhr und das Programm für die Nacht von 22:30 Uhr bis 5:30 Uhr.

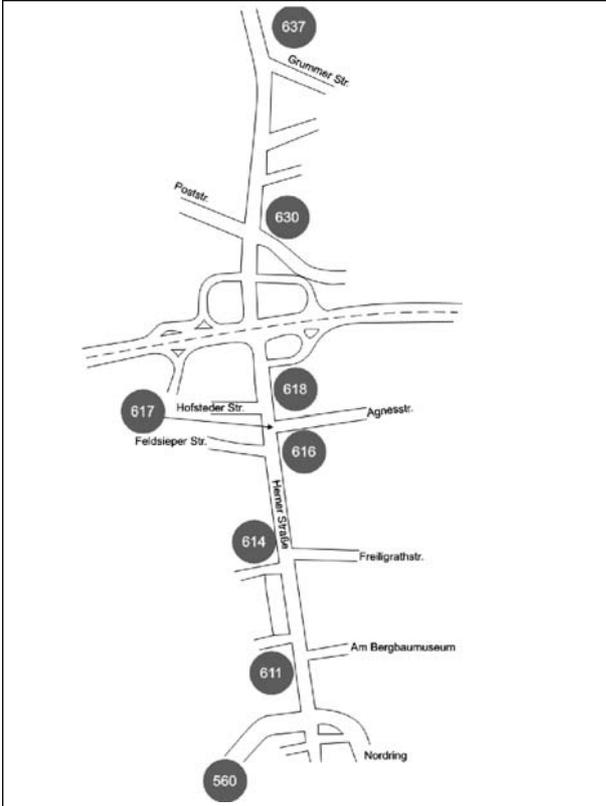
5.3 Herner Straße – Bochum

Die Herner Straße ist eine wichtige Nord-Süd-Achse und sie verbindet die Innenstadt von Bochum (BO) mit der Stadt Herne (siehe Bild 5.4). Außerdem erfüllt die Herner Straße eine wichtige Verbindungsfunktion, indem sie die Innenstadt mit der BAB 40 verbindet. Zwischen Nordring und BAB 40 ist der Querschnitt der Herner Straße zweistreifig. Die LSA sind verkehrabhängig gesteuert und durch einen Rahmenzeitplan koordiniert. Die Verkehrsbelastung ist auf der Herner Straße in Hauptverkehrsrichtung tagsüber sehr hoch, sodass die Grünzeit in Hauptverkehrsrichtung fast immer maximal ausgenutzt wird. Die Verkehrsbelastung aus der Nebenrichtung ist im Vergleich zur Hauptrichtung sehr gering.

Nördlich der BAB 40 ist der Straßenquerschnitt vierstreifig mit altem Ausbaustandard und die LSA sind noch nach einer alten festzeitgesteuerten Koordinierung geschaltet.

Für die Knotenpunkte der Herner Straße stehen die Lage- und Signalzeitenpläne und die Schaltlogiken zur Verfügung. Außerdem können Ergebnisse von Verkehrszählungen an der Hofsteder Straße, Poststraße, Freiligrathstraße und der Einfahrt und Ausfahrt der A 40 für die Untersuchung verwendet werden.

Die Knotenpunkte zwischen dem Nordring und der A 40 folgen sehr dicht aufeinander. Die Knotenpunkte sind jedoch ausschließlich Einmündungen. Teilweise werden zwei Einmündungen von einer LSA gesteuert. Nördlich der A 40 sind die Knotenpunktabstände wieder größer.

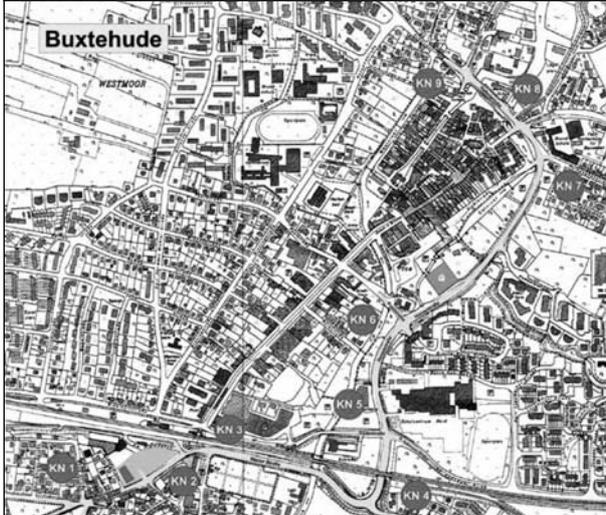


Knotenpunkte	Kreuzende Straße
560	Nordring
611	Am Bergbaumuseum
614	Freiligrathstraße
616	Feldsieper Straße
617	Agnesstraße
618	Hofsteder Straße
630	Poststraße
637	Grummer Straße

Bild 5.4: Knotenpunkte auf der Herner Straße (BO)

5.4 Stader Straße – Buxtehude

Die Untersuchungsstrecke (K 39) ist eine innerstädtische Umgehungsstraße (siehe Bild 5.5) in Buxtehude (BUX). Die Knotenpunkte sind im Moment koordiniert betrieben. Die Koordinierung wird durch eine festzeitgesteuerte Grüne Welle erreicht. Die Steuerung erfolgt wochentags durch drei Signalprogramme. Das Morgenprogramm läuft mit einer Umlaufzeit von 80 s von 5:30-9:00 Uhr. Das Tagesprogramm ist mit einer Umlaufzeit von 80 s von 9:00-15:00 Uhr geschaltet. Das Nachmittagprogramm läuft von 15:00-20:00 bei einer Umlaufzeit von 100 s.



Knotenpunkte	Kreuzende Straße
1	Café Port
2	Georgstraße
3	Am Kleinbahnhof
4	Brillenburgenweg
5	Hansestr./Gildestraße
6	Marie-Grothe-Straße
7	Halepaghenstraße
8	Hafenbrücke/Lange Straße
9	Estebürgerstraße/ Schützenhofweg

Bild 5.5: Knotenpunkte auf der Stader Straße (BUX)

Die Verkehrssituation auf der Umgehungsstraße ist derzeit unzureichend. Deswegen wurde ein Ingenieurbüro damit beauftragt, eine neue Signalplanung zu erstellen. Dabei stellte sich heraus, dass in der Festzeitsteuerung die Nebenrichtungen zu stark beeinträchtigt wurden. Für den gesamten Straßenzug wurde eine optimierte verkehrabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan entwickelt und durch Simulationen mit der vorhandenen Steuerung verglichen.

Die vorhandenen Planungsunterlagen und Ergebnisse werden mit Zustimmung der Stadt Buxtehude in dieser Untersuchung verwendet. Die Signalzeitpläne der Festzeitsteuerung und der verkehrabhängigen Planung, die Steuerungslogiken, die Lagepläne der Knotenpunkte, Verkehrsbelastungen und Zeit-Weg-Diagramme stehen zur Verfügung und werden in die Untersuchungen einbezogen. Außerdem wurde das VISSIM-Netzmodell dieses Streckenabschnittes von dem Ingenieurbüro zur Verfügung gestellt.

5.5 Hauptstraße/Eickeler Straße – Herne

Der Straßenzug Hauptstraße/Eickeler Straße verbindet die Stadtteilzentren Herne-Wanne und Herne-Eickel mit dem Stadtzentrum Bochum. Der Straßenzug ist als Landstraße L 644 klassifiziert und verläuft in Nordwest-Südost-Richtung. Er beginnt westlich des Hauptbahnhofes Wanne-Eickel, durchläuft den Stadtteil Herne-Eickel und endet an der Stadtgrenze zu Bochum. Der gesamte Straßenzug wird von der Straßenbahnlinie 306 befahren, die die Stadt Herne mit dem Stadtzentrum von Bochum verbindet. Die Straßenbahn hat teilweise keinen eigenen Gleiskörper und somit einen großen Einfluss auf den Individualverkehr.

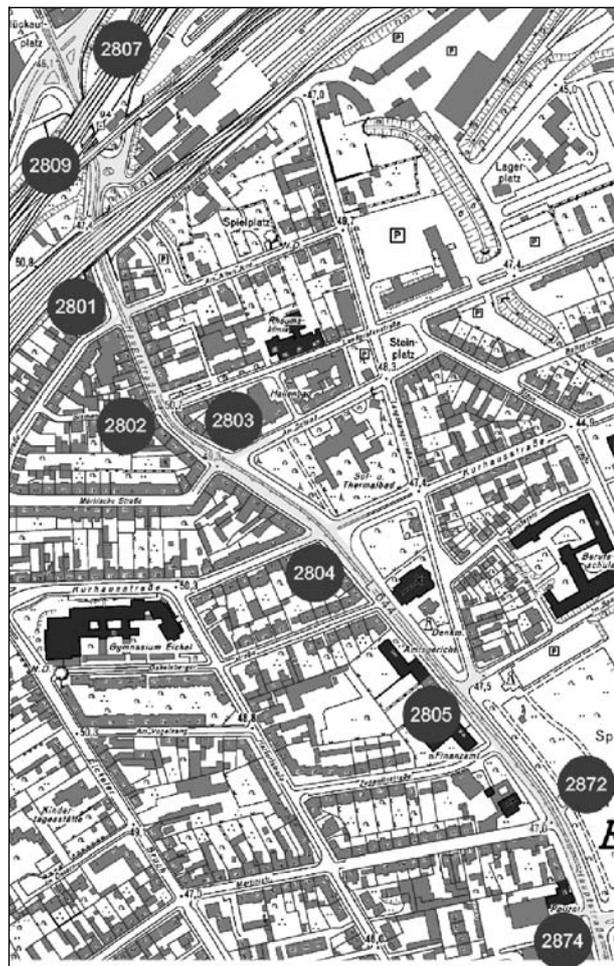
Der komplette Straßenzug befindet sich derzeit in einer Umbauphase. Als Grundlage dieser Untersuchung werden die Planungsunterlagen der Neuplanung verwendet. Die Knotenpunkte werden mit Detektoren ausgestattet, sodass eine verkehrsabhängige Steuerung geschaltet werden kann. Im Zuge dieser Neuplanung wurde auch eine neue festzeitgesteuerte Grüne Welle geplant. Die Koordinierung des gesamten Straßenzuges wurde in einer Diplomarbeit [KUHLMANN, 2005] mit der Planungssoftware P2 von Siemens entwickelt. Die Stadt Herne, bei der die Diplomarbeit bearbeitet wurde, verwendet zur Planung der Koordinierung diese Software. Die Signalzeitenpläne und Lagepläne der Knotenpunkte und das Grünband der Planung liegen vor.

Da der gesamte Straßenzug zu umfangreich für die Untersuchung ist, wird er in zwei Teilstücke unterteilt.

Teilstück Hauptstraße

Das nördliche Teilstück erstreckt sich über 1,2 km und umfasst neun Knotenpunkte (siehe Bild 5.6). Die Koordinierung des ersten Knotenpunktes 2807 ist auf die Linkseinbieger ausgerichtet. Dem Individualverkehr steht auf dem gesamten Streckenabschnitt ein Richtungsfahrstreifen zur Verfügung. Abbiegefahrstreifen sind nur an den Knotenpunkten 2807 und 2804 vorhanden.

Der Individualverkehr muss sich die Verkehrsfläche teilweise mit der Straßenbahn teilen. Auf dem Streckenabschnitt zwischen den Knotenpunkten 2807 und 2801 hat die Straßenbahn in nördlicher Fahrtrichtung einen eigenen Gleiskörper. Die



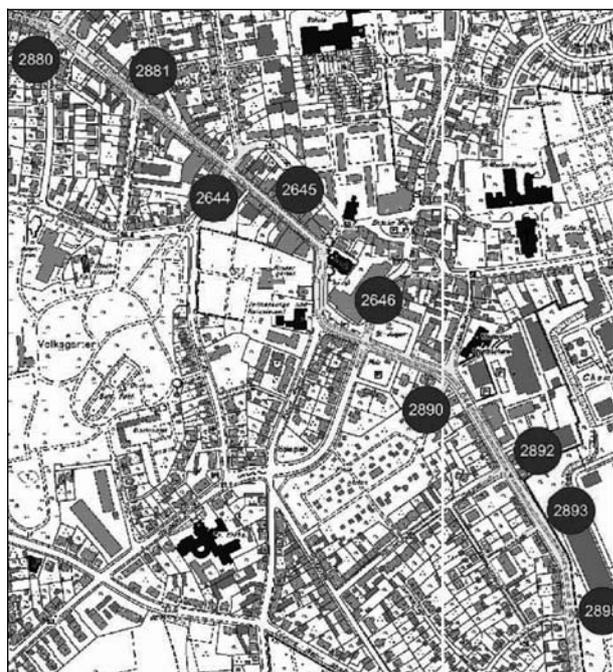
Knotenpunkte	Kreuzende Straße
2807	Berliner Straße
2809	Ulmenstraße
2801	Dürerstraße
2802	Landgrafenstraße
2803	Am Solbad
2804	Kurhausstraße
2805	Im Sportpark
2872	Martinstraße
2874	Heisterkamp

Bild 5.6: Knotenpunkte der Hauptstraße (HER)

Straßenbahn in südlicher Richtung fährt auf dem Kfz-Fahrstreifen. Vom KP 2801 bis zum KP 2803 benutzt die Straßenbahn in beiden Richtungen den Kfz-Fahrstreifen. Auf dem Streckenabschnitt zwischen den Knotenpunkten 2804 und 2874 hat die Straßenbahn einen eigenen Gleiskörper.

Teilstück Hauptstraße/Eickeler Straße

Das Teilstück Hauptstraße/Eickeler Str. erstreckt sich über 1,3 km und umfasst neun Knotenpunkte



Knotenpunkte	Kreuzende Straße
2880	Hirtenstr./Lessingstr.
2881	Hugenpoth
2644	Burgstraße
2645	Woolworth
2646	Auf der Wenge
2890	Rainerstr./Eickeler Str.
2892	Hannibalstr.
2893	Alfredstr.
2895	Saarlandstr.

Bild 5.7: Knotenpunkte der Hauptstraße/Eickeler Straße (HER)

(siehe Bild 5.7). Auf dem gesamten Streckenabschnitt steht dem Kfz-Verkehr ein Richtungsfahrestreifen zur Verfügung. Am Knotenpunkt 2892 ist ein Linksabbiegefahrstreifen vorhanden. Auf dem übrigen Straßenzug sind keine zusätzlichen Abbiegefahrstreifen vorgesehen.

Der Straßenbahnverkehr hat auf der südlichen Hälfte (2646 bis 2895) einen eigenen Gleiskörper. Auf der übrigen Strecke benutzt die Straßenbahn die Verkehrsfläche des Kfz-Verkehrs.

5.6 Lastring – Düsseldorf

Der Lastring in Düsseldorf (D) ist eine Tangentialstraße, die östlich der Innenstadt von Düsseldorf verläuft. Sie verbindet den Zubringer der A 52 mit der Innenstadt. Der Straßenzug ist in der Spitzenstunde und in den Schwachlastzeiten stark belas-

tet. Es ist ein hohes Verkehrsaufkommen in Haupt- und Querrichtung vorhanden.

Auf dem gesamten Straßenzug sind zweistreifige Richtungsfahrbahnen vorhanden. Außerdem befahren Straßenbahnen, die teilweise keinen eigenen Gleiskörper haben, den Straßenzug.

Die Lichtsignalanlagen sind verkehrsabhängig gesteuert. Die Verkehrsabhängigkeit konzentriert sich teilweise auf den ÖPNV. Es sind Rahmenzeitpläne vorhanden, die durch Anforderungen des ÖPNV an die Verkehrssituation angepasst werden. Außerdem sind Detektoren für den Kfz-Verkehr vorhanden, die die Signalzeiten verändern können. Die Lagepläne der Knotenpunkte, Signalzeitenpläne und Grünbänder der Planung liegen vor.

Die Koordinierung des Lastrings ist auf ca. der Hälfte der Strecke, zwischen der Grafenberger Allee und der Birkenstraße, unterbrochen. Deswegen wird der Lastring in zwei Untersuchungsstrecken aufgeteilt.

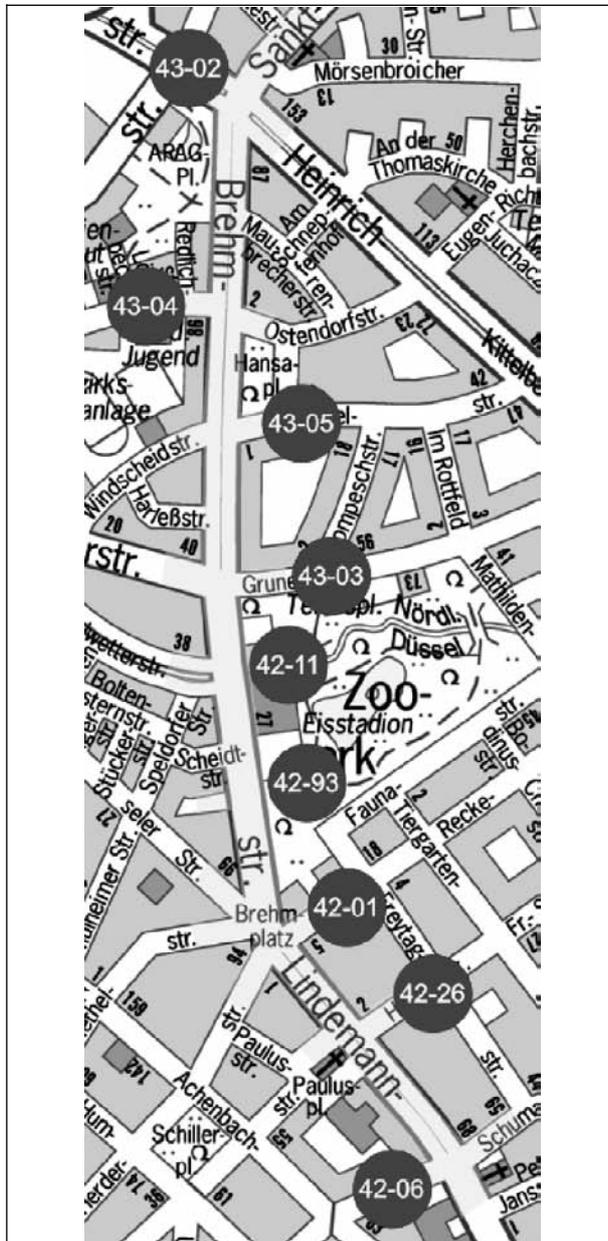
Brehmstraße/Lindemannstraße

Die Untersuchungsstrecke Lastring-Nord beginnt im Norden am Knotenpunkt 43-02 und verläuft dann über die Brehmstraße und Lindemannstraße bis zur Grafenberger Allee (siehe Bild 5.8). Der Straßenzug umfasst 10 Knotenpunkte und auf seiner gesamten Länge sind zweistreifige Richtungsfahrbahnen vorhanden. An den meisten Knotenpunkten ist das Linksabbiegen verboten. An den Knotenpunkten, an denen dies nicht der Fall ist, sind zusätzliche Abbiegefahrstreifen vorhanden.

Auf der Brehmstraße/Lindemannstraße ist eine verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan geschaltet. Die Verkehrsabhängigkeit bezieht sich hier in erster Linie auf die Bevorrechtigung des ÖPNV. Vereinzelt sind auf diesem Straßenzug auch Grünzeitverlängerungen, die einen Stau in den Zufahrten verhindern sollen, für den IV vorgesehen. Die Signalzeitenpläne unterliegen einer einheitlichen Umlaufzeit. Zu bestimmten festgelegten Abfragezeitpunkten werden Anmeldungen des ÖPNV oder Stauzustände des IV abgefragt. Bei einer positiven Abfrage wird der Signalzeitenplan zugunsten der Anforderung umgestellt.

Die Straßenbahn hat auf dem Streckenabschnitt zwischen den Knotenpunkten 43-02 und 43-03 einen eigenen Gleiskörper. Südlich davon liegen die Schienen der Straßenbahn auf der Verkehrs-

fläche des Kfz-Verkehrs. Zwischen den Knotenpunkten 42-01 und 42-06 ist auch ein eigener Gleiskörper vorhanden.

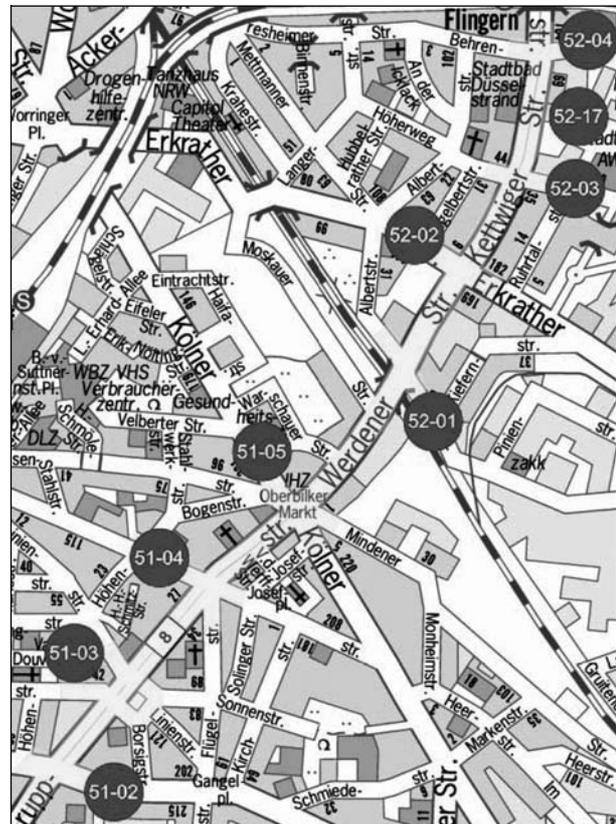


Knotenpunkte	Kreuzende Straße
43-02	Heinrichstraße
43-04	Lacombletstr.
43-05	Windscheidstr.
43-03	Gruenerstr.
42-11	Kühlwetterstr.
42-93	Haus-Nr. 16
42-01	Brehmplatz
42-26	Paulusplatz
42-06	Schumannstr.

Bild 5.8: Knotenpunkte des Straßenzuges Brehmstraße/Lindemannstraße (D)

Kettwiger Straße/Kruppstraße

Die Untersuchungsstrecke Lastring-Süd (siehe Bild 5.9) beginnt südlich der S-Bahn-Unterführung in Flingern und endet vor der S-Bahn-Unterführung am Volksgarten. Dieser Streckenabschnitt umfasst neun Knotenpunkte. Die Knotenpunkte sind ausnahmslos verkehrsabhängig gesteuert. Diese Verkehrsabhängigkeit bezieht sich hier jedoch ausschließlich auf den ÖPNV. Die Detektoren erfassen die Busse und Straßenbahnen und räumen ihnen Bevorrechtigungen ein. Vom Knotenpunkt 52-04 bis zum Knotenpunkt 52-02 ist für die Straßenbahn ein eigener Gleiskörper vorhanden. Südlich davon ist



Knotenpunkte	Kreuzende Straße
52-04	Behrenstraße
52-17	Stadtbad
52-03	Höherweg
52-02	Erkrather Str.
52-01	Albertstr.
51-05	Köln Str.
51-04	Ellerstraße
51-03	Linienstraße
51-02	Oberbilker Allee

Bild 5.9: Knotenpunkte des Straßenzuges Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)

teilweise ein eigener Gleiskörper vorhanden, die Straßenbahn benutzt hier aber auch, besonders auf den Fahrstreifen der Linksabbieger, die Verkehrsfläche des Individualverkehrs.

Die Abstände der Haltelinien der Knotenpunkte liegen auf diesem Streckenabschnitt zwischen 150 und 400 m. An einigen Stellen, besonders auf der Kruppstraße, muss damit gerechnet werden, dass Fahrzeuge in zweiter Reihe parken.

5.7 Bonnstraße – Frechen

Die Bonnstraße (L 183) in Frechen (FRE) verbindet die Städte Frechen und Hürth (siehe Bild 5.10). Der ausgewählte Straßenzug erstreckt sich von der Aachener Straße bis zur Bachemer Straße und enthält

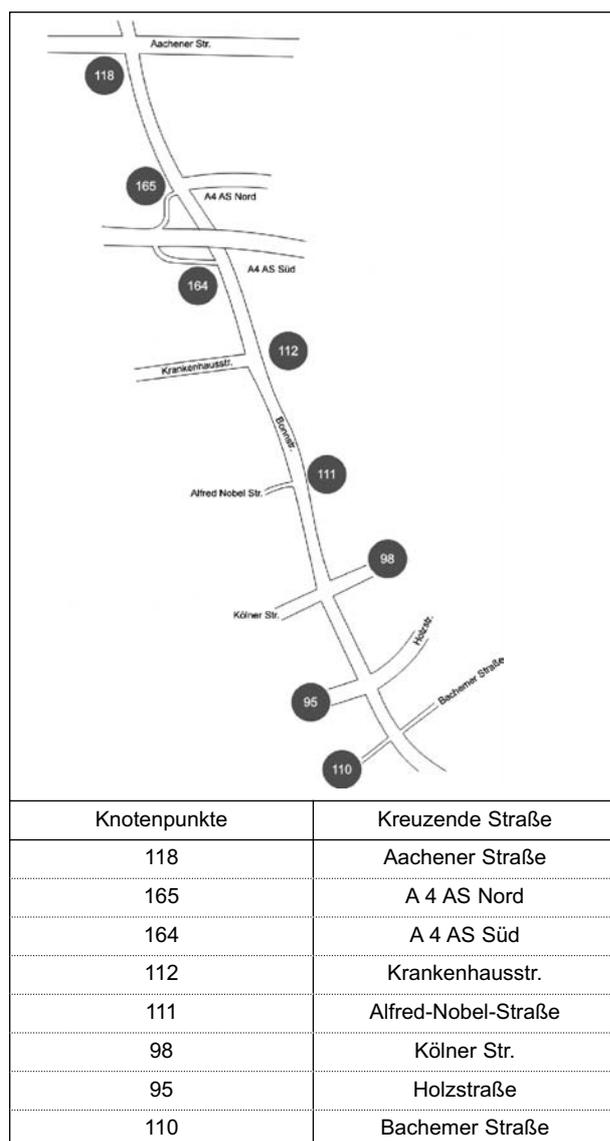


Bild 5.10: Knotenpunkte des Straßenzuges Bonnstraße (FRE)

acht lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte. Der Straßenzug erstreckt sich über 3,8 km. Er weist somit die größten Knotenpunktabstände der ausgewählten Untersuchungsstrecken auf. Der Straßenquerschnitt ist einstreifig. Die Zufahrten der Knotenpunkte 112, 165 und 118 sind jedoch auf zwei Fahrstreifen aufgeweitet.

Die Verkehrsbelastung ist auf dem Straßenzug in den Spitzenstunden in beiden Richtungen sehr hoch. Die Knotenpunkte 98 und 112 haben in dem derzeitigen Ausbauzustand ihre Leistungsfähigkeitsgrenzen erreicht. Im Juni 2006 wurde die neue Anschlussstelle der A 4 freigegeben, sodass hier mit einer Erhöhung des Durchgangsverkehrs auf dem Straßenzug zu rechnen ist. Die LSA dieses Straßenzuges sind verkehrabhängig gesteuert und durch einen Rahmenzeitplan koordiniert. Die Steuerungslogiken und die Koordinierung wurden von einem Ingenieurbüro entwickelt und wurden als Software zur Verfügung gestellt, sodass eine direkte Einbindung der Steuerungsdateien in das VIS-SIM-Simulationsmodell möglich war. Es werden somit im Simulationsmodell exakt die Steuerungen, die in Realität laufen, abgebildet.

6 Messungen

6.1 Methodik

6.1.1 Durchführung der GPS-Messungen

Die Testfahrten wurden auf fünf Straßenzügen mit zehn Fahrzeugen durchgeführt. Es handelte sich um Mietwagen verschiedener Fahrzeugklassen. Durch die unterschiedliche Größe und Motorisierung der Fahrzeuge wurde eine relativ breite Vielfalt an Testfahrzeugen erreicht. Die Messungen wurden nicht auf jedem der zehn ausgewählten Straßenzüge durchgeführt, da dies einen zu hohen Aufwand im Rahmen dieses Projektes bedeutet hätte. Die übrigen fünf Straßenzüge wurden jedoch durch eine Simulation untersucht.

Zur genauen Erfassung der Kinematik der Fahrzeuge wurde die GPS-Navigation zur Positionsbestimmung verwendet. Dadurch ist die lokale Datenerfassung lückenlos gewährleistet. Durch die Positionsbestimmung zu jeder Zeit können die Geschwindigkeiten, die Anzahl der Halte und die Verlustzeiten der Fahrzeuge bestimmt werden.

Zur Erfassung der GPS-Daten wurden die Messfahrzeuge jeweils mit einem Notebook-Rechner

und einem GPS-Empfänger ausgestattet. Für die Messfahrten in Münster wurden zusätzlich Videokameras, Videorekorder und Timecode-Generatoren installiert (siehe Bild 6.1).

Der GPS-Empfänger des Herstellers Navilock (Modell NL-202U) weist (laut Hersteller) eine Genauigkeit von 10 m in der horizontalen Messung auf. Der GPS-Empfänger wurde per USB-Anschluss an das Notebook angeschlossen und mit einem Magneten auf dem Dach der Fahrzeuge befestigt. Auf jedem Notebook war ein Programm installiert („GPS-Manager“), welches die Daten des GPS-Empfängers verarbeitet und in eine .log-Datei speichert. Diese .log-Datei liegt in Textform vor und kann später in einem Excel-Programm ausgewertet werden. Dabei kann zwischen verschiedenen Datensätzen ausgewählt werden. Die Datensätze entsprechen dem allgemeingültigen NMEA-Protokoll. Für die Messung wurde der Datensatz GPGGA ausgewählt, der alle für die Messung wichtigen Daten enthält. Die Uhrzeit, Längen- und Breitengrade der aktuellen Position und die Höhe über dem Ellipsoid werden in diesem Datensatz gespeichert. In einem anderen Datensatz kann zudem die aktuelle Geschwindigkeit gespeichert werden. Diese ist jedoch, wie sich bei vorhergehenden Testfahrten herausstellte, ungenau. Es treten teilweise hohe Abweichungen von der tatsächlichen Geschwindigkeit auf. Deswegen wird auf die Aufzeichnung der Geschwindigkeit verzichtet. Die Geschwindigkeit konnte bei der späteren Auswertung der Daten durch die Veränderung der Position in einem bestimmten Zeitabschnitt ermittelt werden.

Um ein realistisches Bild des Verkehrsablaufes zu erhalten, wurden die Fahrer angewiesen, sich in ihrer Fahrweise dem fließenden Verkehr anzupassen. Außerdem sollten sie an den Wendepunkten in unregelmäßigen Zeitabständen warten, um nicht

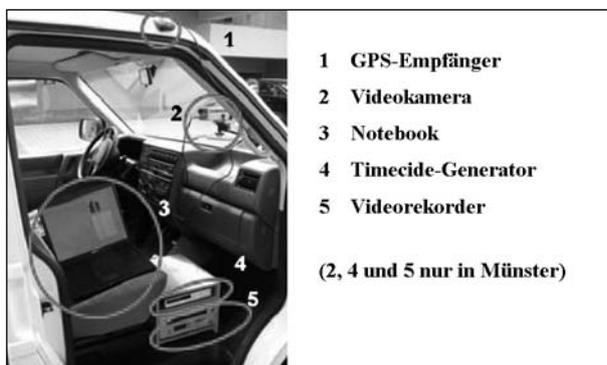


Bild 6.1: Darstellung des Messaufbaus in den Fahrzeugen

immer zum gleichen Zeitpunkt (bezogen auf die Umlaufzeit) am ersten Knotenpunkt anzukommen.

Parallel zu den Messfahrten und der Erfassung der kinematischen Kenngrößen der Messfahrzeuge wurde die Verkehrsbelastung auf den Untersuchungsstrecken aufgezeichnet. Die Verkehrsbelastung der Straßenzüge in Bochum und Düsseldorf wurde durch lokale Videoaufnahmen einzelner wichtiger Knotenpunkte erfasst. In Münster wurde die Floating-Car-Methode zur Schätzung der Verkehrsbelastung gewählt. Diese Schätzwerte wurden durch lokale Detektordaten ergänzt.

6.1.2 Durchführung der Reisezeitenmessung

Um einen Vergleich der Reisezeiten aus den GPS-Messungen mit einer möglichst vollständigen Stichprobe zu erhalten, wurden auf zwei Straßenzügen (Bremstraße/Lindemannstraße und Kettwiger Straße/Kruppstraße) Reisezeitmessungen durchgeführt. Zur Erfassung der Reisezeiten wurden die Kennzeichen der Fahrzeuge, die den Querschnitt passieren, mit Videokameras erfasst. Hierbei wurde für jeden Fahrstreifen der untersuchten Strecke eine Videokamera verwendet, um die Fahrzeuge eindeutig zu identifizieren (siehe Bild 6.2). Die Kennzeichen der Fahrzeuge wurden jeweils am Start- und Endquerschnitt der untersuchten Strecke erfasst.

Durch die Reisezeitenmessungen kann eine nahezu vollständige Stichprobe aller Fahrzeuge auf dem Straßenzug erfasst werden. Dadurch kann beurteilt werden, ob die begrenzte Anzahl der GPS-Messfahrten ausreicht, um die Gesamtheit der Fahrzeuge zu repräsentieren.



Bild 6.2: Videokamera und Zubehör zur Messung der Reisezeiten

6.1.3 Auswertung der GPS-Messungen

Die GPS-Empfänger zeichnen die Daten nach dem allgemeingültigen NMEA-Protokoll auf. Für die Messungen wurde der Datensatz GPGLA verwendet, der das in Bild 6.3 dargestellte Format besitzt.

Die aufgezeichneten GPS-Daten wurden mit einem Tabellenkalkulationsprogramm ausgewertet. Da die Daten in Textdateien gespeichert wurden, ist die Auswertung mit MS Excel ohne Probleme möglich. Es wurde ein Excel-Spreadsheet entwickelt, das es

```

$GPGLA,150757.199,5128.5211,N,00712.8939,E,1,07,1.1,154.5,M,47.5,M,0.0,0000*7
$GPGLA,150758.199,5128.5212,N,00712.8938,E,1,07,1.1,153.8,M,47.5,M,0.0,0000*7
$GPGLA,150759.199,5128.5214,N,00712.8938,E,1,07,1.1,153.0,M,47.5,M,0.0,0000*7
  
```

Erläuterung des Datensatzes:

0 = Datensatzbezeichnung
 1 = Uhrzeit
 2 = Breitengrad
 3 = Längengrad
 4 = Qualität der Messung
 5 = Anzahl der erfassten Satelliten
 6 = Genauigkeit
 7 = Höhe über Geoid (m)
 8 = Höhe über dem Ellipsoid (m)

Bild 6.3: Erläuterung des GPGLA-Datenformats

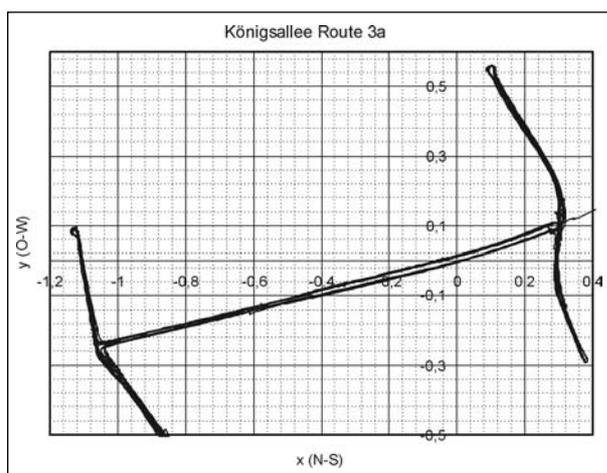


Bild 6.4: Fahrten eines Messfahrzeugs

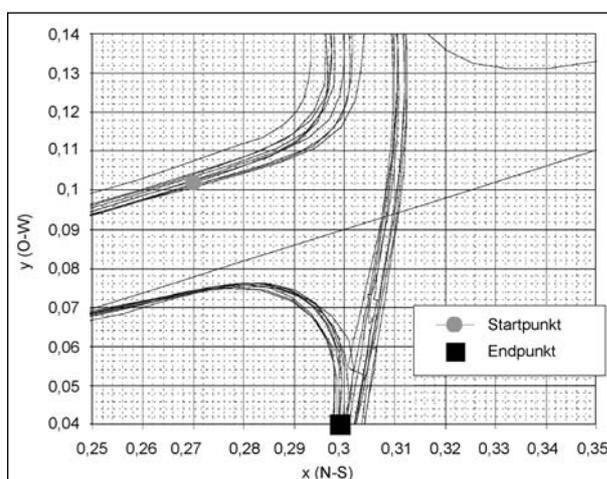


Bild 6.5: Start- und Endpunkt einer Messstrecke

ermöglicht, die Auswertungen weitgehend automatisiert ablaufen zu lassen.

Zunächst wurde die Position auf der Erdoberfläche durch eine Transformation der Längen- und Breitengrade in eine Ebene bestimmt. Der Höhenunterschied des Straßenzuges wurde dabei vernachlässigt. Das Ergebnis dieser Transformation sind die X- und Y-Koordinaten des Fahrzeugs in jeder Sekunde. Als Bezugspunkt wurde ein Mittelwert der Streckenkoordinaten gewählt. Ein Beispiel der transformierten Daten ist in Bild 6.4 dargestellt. Hier ist der Fahrtverlauf eines Messfahrzeugs während der Messungen zu sehen.

Die Koordinaten der Start- und Endpunkte der jeweiligen Untersuchungsstrecken werden manuell eingegeben, sodass die Daten der Fahrten an den Wendepunkten herausgefiltert werden können (Bild 6.5). Die restlichen Berechnungen laufen automatisch ab, müssen aber manuell überprüft werden, um Fehler auszuschließen. Als Ergebnis der Auswertungen können die Reisezeit, die Anzahl der Halte, die mittlere Geschwindigkeit, das Koordinierungsmaß und die Wartezeit ausgegeben werden. Die Start- und Endpunkte der bewertungsrelevanten Strecke werden immer nach dem folgenden Prinzip bestimmt:

Die Bewertung einer Strecke erfolgt, nachdem das Fahrzeug in den koordinierten Straßenzug eingefahren ist. Der Startpunkt der Messung liegt also hinter der ersten Haltelinie. Dadurch wird verhindert, dass zufällige Werte, wie die Wartezeiten oder Halte vor dem ersten Knotenpunkt, mit einbezogen werden. Diese Werte hängen von der Ankunftszeit der Fahrzeuge ab und sollten bei der Bewertung der Koordinierung nicht berücksichtigt werden.

Der Endpunkt wird hinter der letzten Haltelinie des koordinierten Straßenzuges positioniert. Bei dieser Art der Auswertung werden alle koordinierten Knotenpunkte erfasst. Der erste Knotenpunkt kann nicht als koordiniert bezeichnet werden, da die Fahrzeuge zufällig ankommen.

6.2 Messungen auf der Königsallee (BO)

6.2.1 Messaufbau

Auf der Königsallee wurden am 09.11.2005 von 16:00-18:00 Uhr und am 10.11.2005 von 7:00- 8:00 Uhr Messfahrten mit zehn Kfz durchgeführt. Sechs dieser Kfz wurden für die Messfahrten gemietet.

Vier Mietwagen entsprachen der Golfklasse und zwei Fahrzeuge waren Kleinwagen (Smart). Außerdem wurden drei Fahrzeuge der Mitarbeiter (Größe eines Opel Astra Kombi) und der Messbus des Lehrstuhls benutzt.

Auf der Königsallee wurden drei Kameras installiert, die die Verkehrsbelastung an den drei höchstbelasteten Knotenpunkten aufgezeichnet haben. Die drei ausgewählten Knotenpunkte (Hattinger Straße, Wasserstraße und Markstraße) liegen strategisch günstig am Anfang, in der Mitte und am Ende der Untersuchungsstrecke. Diese Kameras wurden durch zwei Kameras ergänzt, die hinter der Frontscheibe von zwei Messfahrzeugen angebracht wurden. Zusätzlich dazu liegt noch eine Verkehrszählung vom Knotenpunkt 125 (Frederikastraße) vom 26.09.2002 vor, die in die Untersuchung mit einbezogen wird. Anhand der vorhandenen Daten werden die Verkehrsbelastungen für die übrigen Knotenpunkte geschätzt. Die Verkehrsdaten aller Knotenpunkte, die auch für die Kalibrierung der Simulationsmodelle angenommen wurden, sind im Anhang 5 dargestellt.

Um einen vielfältigen Überblick über die fahrdynamischen Abläufe auf der koordinierten Untersuchungsstrecke zu erlangen, wurden verschiedene Routen befahren. Auf der Route 1 wurde die komplette Untersuchungsstrecke vom Knotenpunkt Hattinger Straße bis zur Markstraße in der koordinierten Richtung befahren. Für diese Route wurden fünf Messfahrzeuge verwendet.

Die Routen 2 und 3 wurden jeweils von zwei Fahrzeugen in unterschiedlicher Richtung befahren. Der Fahrtverlauf der Routen 2 und 3 ist im Anhang 4 dargestellt. Durch diese Routenwahl wurden nicht nur die Hauptrichtungen der koordinierten Straße, sondern auch die Ein- und Ausfahrer berücksichtigt, die nur partiell die Königsallee befahren.

6.2.2 Auswertung der GPS-Daten

Die Auswertung der Messung erfolgte nach dem oben beschriebenen Prinzip. Die bewertungsrelevanten Kenngrößen, die auf den oben beschriebenen Routen erfasst wurden, sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Die Messwerte spiegeln die erwarteten Er-

	Richtung: stadteinwärts						Richtung: stadtauswärts					
	Route 1		Route 2		Route 3		Route 1		Route 2		Route 3	
16:00-18:00 Uhr												
Anzahl der Knotenpunkte [-]	8		4		4		8		4		4	
Anzahl der Messfahrten [-]	45		17		16		47		18		16	
Reisezeit (μ σ) [min]	4,47	0,67	2,62	0,26	3,42	0,75	4,61	0,62	2,88	0,62	3,07	0,42
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	1,58	0,54	1,53	0,51	2,00	0,77	2,10	1,19	2,27	0,97	1,89	0,49
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	40,93		37,82		25,04		42,05		34,67		30,92	
Verlustzeit (μ) [min]	1,25		0,66		1,75		1,41		0,93		1,39	
Koordinierungsmaß [-]	0,8		0,62		0,34		0,81		0,72		0,66	
QSV nach HBS [-]	C		E		F		C		D		D	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	B		B		C		B		C		C	
7:00- 9:00 Uhr												
Anzahl der Knotenpunkte [-]	8		4		4		8		4		4	
Anzahl der Messfahrten [-]	67		17		16		62		21		19	
Reisezeit (μ σ) [min]	4,33	0,75	2,89	0,39	2,75	0,77	3,55	0,56	2,41	0,72	2,75	0,45
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	1,70	1,3	1,3	0,9	1,3	0,5	0,65	0,85	0,71	0,78	1,5	0,51
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	39,49		34,26		27,55		51,47		43,07		30,62	
Verlustzeit (μ) [min]	1,10		0,95		1,11		0,33		0,47		1,11	
Koordinierungsmaß [-]	0,75		0,5		0,46		0,92		0,86		0,66	
QSV nach HBS [-]	C		E		F		B		B		D	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	B		C		C		A		B		C	

Tab. 6.1: Auswertung der GPS-Daten der Königsallee (BO)

gebnisse wider. Bei höherer Verkehrsbelastung, wie z. B. in der Morgenspitze stadteinwärts, wurde die Koordinierung schlechter. Insgesamt ist jedoch zu erkennen, dass die Koordinierungsqualität auf der Königsallee in der koordinierten Hauptrichtung mindestens der Qualitätsstufe C nach dem HBS (2001) entspricht.

Die mittlere Reisegeschwindigkeit war auf allen Routen sehr hoch. Der Vergleich zwischen dem Bewertungsverfahren nach BRILON, SCHNABEL (2003) und dem Bewertungsverfahren des HBS (2001) zeigte, dass beide Verfahren sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Die Bewertungskriterien nach BRILON, SCHNABEL wurden für eine zulässige Geschwindigkeit von 60 km/h angewendet, da die Streckenabschnitte mit 50 und 70 km/h zulässiger Geschwindigkeit gleich lang sind. Bei der Bewertung nach den Reisegeschwindigkeiten stellt sich auf dem Straßenzug eine höhere QSV ein als nach der Bewertung der Halte. Die QSV liegt im Mittel um eine Stufe höher als beim Verfahren nach HBS (2001).

Zusätzlich zu den Messergebnissen bezogen auf die gesamten befahrenen Routen wurden die Streckenabschnitte zwischen den Haltelinien ausgewertet. Diese Auswertungen sind im Anhang 6 dargestellt.

6.3 Messungen auf dem Albersloher Weg (MS)

6.3.1 Messaufbau

Die Messungen auf dem Albersloher Weg wurden im Rahmen des Projektes „Evaluierung (Erfolgskontrolle und Bewertung) der Grünen Wellen im Zuge der Modellachse Albersloher Weg in Münster mittels Reisezeitmessung“ der Stadt Münster durchgeführt. Deshalb unterschied sich der Messaufbau von den Messungen in Bochum und Düsseldorf.

Zehn Messfahrzeuge wurden mit GPS-Empfängern und Notebooks ausgestattet. Zusätzlich dazu wurde in jedem Fahrzeug eine Kamera montiert. Diese Kameras wurden so justiert, dass der Gegenverkehr durch die Frontscheibe aufgezeichnet werden konnte. Die Videogeräte wurden außerdem mit Timecode-Generatoren ausgestattet, die eine synchronisierte Zeit auf allen Videoaufnahmen garantierten.

Die Videoaufnahmen wurden so ausgewertet, dass zwischen zwei aufeinander folgenden Haltelinien

die entgegenkommenden Fahrzeuge gezählt wurden. Gleichzeitig wurden die Überfahrzeiten der Haltelinien gespeichert. Nach Gleichung [6-1] kann somit die Verkehrsstärke geschätzt werden.

$$q = \frac{N}{t_a + t} \quad [6-1]$$

Mit:

N = Anzahl der Begegnungen

t_a = Reisezeit in Fahrtrichtung

t = mittlere Reisezeit der Fahrzeuge in der Gegenrichtung

Für die Anwendung im Simulationsmodell, in der die Verkehrsbelastungen möglichst genau dargestellt werden sollen, wurden die geschätzten Daten ergänzt. Die Stadt Münster führte Detektorzählungen an fünf Knotenpunkten und einem Querschnitt durch. Diese Daten wurden durch historische Daten von Verkehrszählungen einzelner Knotenpunkte ergänzt und ergeben somit ein ausreichendes Bild der Verkehrssituation. Die Verkehrsdaten, die in der Simulation angesetzt wurden, sind im Anhang 5 dargestellt.

Außerdem wurden von der Stadt Münster Messungen der Wartezeiten der Fußgänger an sämtlichen Knotenpunkten des befahrenen Straßenzuges durchgeführt. Zusätzlich stellten die ÖPNV-Betriebe Westfälische Verkehrsgesellschaft (WVG) und die Stadtwerke Münster telematische Daten ihrer Fahrzeuge im Messzeitraum zur Verfügung. Dadurch kann auch die Auswirkung der Steuerung auf den ÖPNV in die Untersuchung mit einfließen. Durch die Kombination aller Messungen ergibt sich ein relativ genaues Bild über die Verkehrssituation auf dem Albersloher Weg.

In Absprache mit der Stadt Münster wurden fünf verschiedene Routen für die Befahrung des Albersloher Wegs gewählt. Die Routen sind im Anhang 4 dargestellt.

Die Route 1 wurde von vier Messfahrzeugen befahren. Der gesamte Albersloher Weg vom Knotenpunkt Hansaring bis zum Knotenpunkt Osttor wurde dabei befahren. Die Fahrzeuge überquerten dabei 24 Knotenpunkte.

Die Routen 2a und 2b wurden jeweils von einem Messfahrzeug befahren. Hier wurde nur das nördliche Teilstück des Albersloher Wegs erfasst. Auf der Route 2a wurden sieben Knotenpunkte überquert.

Hier wurde eine starke Fahrtbeziehung zwischen der Innenstadt und der B 51 erfasst. Die Route 2b umfasst acht Knotenpunkte und repräsentiert die Fahrten von der Innenstadt in das Industriegebiet westlich des Albersloher Weges.

Route 3 stellt das südliche Teilstück des Albersloher Weges dar und wurde von drei Messfahrzeugen befahren. Die Fahrzeuge fuhren vom Knotenpunkt Loddenheide bis zum Knotenpunkt Osttor und überquerten somit 13 Knotenpunkte. Die Lichtsignalanlagen auf diesem Teilstück sind teilweise schon erneuert und verkehrsabhängig gesteuert. Einige Anlagen sind aber auch noch festzeitgesteuert.

Die Route 4 wurde von einem Fahrzeug befahren und erfasste eine starke Fahrtbeziehung aus dem Wohngebiet am Gremmendorfer Weg bis zur B 51. Auf diesem Streckenabschnitt wurden neun Lichtsignalanlagen überquert.

6.3.2 Auswertung der GPS-Daten

In Tabelle 6.2 und 6.3 sind die bewertungsrelevanten Daten, die bei der Auswertung der GPS-Daten

ermittelt wurden, dargestellt. Es wurden die Reise- und Verlustzeiten, die mittlere Reisegeschwindigkeit und die mittlere Anzahl der Halte ermittelt. Aus der Anzahl der Halte kann die QSV nach HBS (2001) bestimmt werden. Die QSV nach BRILON, SCHNABEL (2003) wurde für eine zulässige Geschwindigkeit von 60 km/h bestimmt, da die zulässigen Geschwindigkeiten von 50 und 70 km/h auf dem Straßenzug den gleichen Anteil haben. Die Daten der Morgen- und Abendmessung wurden jeweils für beide Messtage zusammengefasst.

Die Daten verdeutlichen, dass die Qualität der Koordinierung unter einer höheren Verkehrsbelastung leidet. So war die Verkehrsqualität am Morgen in der stadteinwärtigen Richtung geringer als am Abend. In Fahrtrichtung stadtauswärts verhielt sich die Qualität genau umgekehrt. Insgesamt wurde am Morgen auf der gesamten koordinierten Strecke in Richtung Süden die QSV C nach HBS (2001) erreicht. In Richtung Norden ergab sich die QSV D. In der nachmittäglichen Spitzenstunde ergab sich in südlicher Fahrtrichtung die QSV C, in nördlicher Richtung war die Koordinierung nach HBS wirkungslos (QSV E).

Morgens 7:00-9:00 Uhr	Richtung: Norden									
	Route 1		Route 2a		Route 2b		Route 3		Route 4	
Anzahl der Knotenpunkte [-]	24		7		8		12		8	
Anzahl der Messfahrten [-]	37		20		22		35		12	
Reisezeit (μ σ) [min]	11,45	2,16	2,85	0,89	3,64	1,10	6,04	0,86	3,66	0,54
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	6,65	3,30	2,05	0,91	3,09	1,20	3,83	2,04	2,17	0,87
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	31,44		27,06		26,43		33,25		34,75	
Verlustzeit (μ) [min]	5,40		1,41		1,86		3,15		1,68	
Koordinierungsmaß [-]	0,71		0,66		0,56		0,65		0,69	
QSV nach HBS [-]	C		E		F		C		D	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	B		B		C		B		C	
	Richtung: Süden									
	Route 1		Route 2a		Route 2b		Route 3		Route 4	
Anzahl der Knotenpunkte [-]	24		7		8		12		8	
Anzahl der Messfahrten [-]	38		19		24		40		12	
Reisezeit (μ σ) [min]	10,17	0,89	2,59	0,57	2,84	0,59	5,39	0,64	4,60	0,58
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	5,53	1,50	2,00	0,94	1,75	1,18	3,13	1,33	5,42	1,25
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	35,57		29,85		34,05		36,99		27,04	
Verlustzeit (μ) [min]	4,04		1,20		1,29		2,36		2,74	
Koordinierungsmaß [-]	0,76		0,67		0,75		0,72		0,23	
QSV nach HBS [-]	C		E		F		B		B	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	B		C		C		A		B	

Tab. 6.2: Auswertung der GPS-Daten auf dem Albersloher Weg (MS) in der Morgenspitze

Auf dem Albersloher Weg ist auffällig, dass die Reisegeschwindigkeit trotz schlechter Verkehrsqualität nach HBS (2001), also vieler Halte, relativ hoch ist. Auf den meisten Routen wurde nach BRILON, SCHNABEL (2003) eine höhere QSV erreicht als nach dem HBS (2001). Nach BRILON, SCHNABEL (2003) wurde höchstens die QSV D erreicht, während nach dem HBS (2001) die Qualität auf einigen Routen den Stufen E und F entsprach.

Die Messergebnisse in den einzelnen Knotenpunktzufahrten der koordinierten Hauptrichtung des Albersloher Wegs sind in Anhang 6 dargestellt.

6.4 Messungen auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße (D)

6.4.1 Messaufbau

Die Messungen auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße in Düsseldorf wurden am 16.05.2006 von 15:00 bis 17:00 Uhr durchgeführt. Hier wurde die Messung im Gegensatz zu den Messungen in Bochum und Münster außerhalb der

Spitzenstunde durchgeführt, da eine sehr hohe Verkehrsbelastung erwartet wurde, die eine funktionierende Koordinierung beeinträchtigt hätte. In Düsseldorf wurden zusätzlich zu den GPS-Messungen Reisezeitmessungen durchgeführt. Die Kameras zur Erfassung der Kennzeichen der Fahrzeuge wurden ca. 50 m hinter dem Knotenpunkt 43-02 aufgestellt. Der Endquerschnitt der Reisezeitmessung befand sich ca. 50 m vor dem letzten Knotenpunkt 42-06. Auf dem gesamten Straßenzug ist eine zulässige Geschwindigkeit von 50 km/h vorgeschrieben.

Zur Erfassung der Verkehrsbelastung an den Start- und Endquerschnitten wurden die Reisezeitmessungen verwendet. Die Daten wurden an diesen Querschnitten durch eine manuelle Zählung des Gegenverkehrs ergänzt. Zusätzlich dazu wurden die Knotenpunkte 43-03 und 42-01 mit Videokameras aufgezeichnet. Diese Knotenpunkte sind die beiden höchstbelasteten Knotenpunkte auf dem Straßenzug und liegen günstig auf dem Straßenzug verteilt. Durch Auswertung der Videobänder wurde die Verkehrsbelastung dieser Knotenpunkte be-

Nachmittags 16:00-18:00 Uhr	Richtung: Norden									
	Route 1		Route 2a		Route 2b		Route 3		Route 4	
Anzahl der Knotenpunkte [-]	24		7		8		12		8	
Anzahl der Messfahrten [-]	36		20		22		39		13	
Reisezeit (μ σ) [min]	10,61	1,11	3,14	0,71	3,67	0,85	5,72	0,70	4,24	0,68
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	5,69	1,87	1,65	0,86	2,77	0,92	3,28	1,23	3,46	1,05
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	33,94		24,59		26,18		26,18		30,00	
Verlustzeit (μ) [min]	4,80		1,68		2,03		2,03		2,21	
Koordinierungsmaß [-]	0,75		0,73		0,60		0,60		0,51	
QSV nach HBS [-]	C		D		E		E		E	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	C		D		C		C		C	
	Richtung: Süden									
	Route 1		Route 2a		Route 2b		Route 3		Route 4	
Anzahl der Knotenpunkte [-]	24		7		8		12		8	
Anzahl der Messfahrten [-]	35		20		24		45		12	
Reisezeit (μ σ) [min]	12,61	1,35	2,81	0,57	3,25	1,14	6,82	1,04	5,47	1,02
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	8,83	2,03	2,25	0,94	2,00	1,87	5,24	2,06	5,92	1,02
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	28,69		27,58		29,75		29,22		22,73	
Verlustzeit (μ) [min]	6,45		1,41		2,00		3,72		3,65	
Koordinierungsmaß [-]	0,62		0,63		0,71		0,52		0,15	
QSV nach HBS [-]	E		E		D		E		F	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	C		C		C		C		D	

Tab. 6.3: Auswertung der GPS-Daten auf dem Albersloher Weg (MS) in der Nachmittagsspitze

stimmt. Zusätzlich standen von einigen weiteren Knotenpunkten Daten historischer Verkehrszählungen zur Verfügung. Die Verkehrsbelastungen, die für den gesamten Straßenzug angenommen wurden, sind Anhang 5 zu entnehmen.

Für die GPS-Datenerfassung wurden zehn Messfahrzeuge verwendet. Diese wurden nach der o. g. Beschreibung mit Notebooks und GPS-Empfängern ausgestattet. Die Messfahrzeuge befuhren den Straßenzug nach den im Anhang 4 dargestellten Routen.

Die Route 1 wurde dabei von sieben Messfahrzeugen befahren. Auf dieser Route durchquerten die Fahrzeuge die Untersuchungsstrecke komplett in der koordinierten Richtung. Die Routen 2, 3 und 4 wurden jeweils von einem Messfahrzeug befahren. Auf diesen Routen wurde am letzten oder ersten Knotenpunkt die Koordinierungsrichtung nicht eingehalten.

6.4.2 Auswertung der GPS-Daten

In Tabelle 6.4 wird deutlich, dass auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße die Ver-

kehrqualität in Richtung Süden höher war als in nördlicher Richtung. Die mittlere Reisegeschwindigkeit war ca. 5 km/h höher und auch die Anzahl der Halte war geringer. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da der Verkehr nachmittags in Richtung Autobahnanschluss fließt und dort eine höhere Verkehrsbelastung herrscht.

Die Koordinierung auf diesem Straßenzug muss in nördlicher Fahrtrichtung nach dem HBS (2001) als unwirksam bezeichnet werden, da auf allen Routen die QSV E erreicht wird. Bei der Bewertung der Reisegeschwindigkeiten nach BRILON, SCHNABEL (2003) wurden die Qualitätsstufen C und D erreicht.

In südlicher Fahrtrichtung wurde auf allen Routen außer auf Route 2 die QSV C erreicht. Die Koordinierung ist in dieser Richtung also befriedigend wirksam. Die Qualitätsstufen nach BRILON, SCHNABEL (2003) lagen in südlicher Richtung eine Stufe über der Bewertung nach dem HBS (2001).

Die Verlustzeiten und Halte der einzelnen Knotenpunktzufahrten der koordinierten Hauptrichtung des Straßenzuges sind im Anhang 6 dargestellt.

15:00-17:00 Uhr	Richtung: Norden							
	Route 1		Route 2		Route 3		Route 4	
Anzahl der Messfahrten [-]	50		7		7		8	
Reisezeit (μ σ) [min]	4,30	0,91	4,07	0,69	4,28	0,62	4,44	1,01
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	3,40	1,67	3,57	1,51	4,43	1,51	4,63	1,51
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	25,49		26,09		27,84		24,40	
Verlustzeit (μ) [min]	2,36		2,19		2,18		2,53	
Koordinierungsmaß [-]	0,58		0,55		0,45		0,42	
QSV nach HBS [-]	E		E		F		F	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	C		C		C		D	
	Richtung: Süden							
	Route 1		Route 2		Route 3		Route 4	
Anzahl der Messfahrten [-]	50		8		7		7	
Reisezeit (μ σ) [min]	3,46	0,55	3,67	0,47	3,30	0,59	3,21	0,55
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	1,80	0,95	2,38	1,06	1,86	1,07	1,86	1,46
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	30,08		27,70		31,02		31,84	
Verlustzeit (μ) [min]	1,62		1,88		1,49		1,41	
Koordinierungsmaß [-]	0,78		0,70		0,77		0,77	
QSV nach HBS [-]	C		D		C		C	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	B		C		B		B	

Tab. 6.4: Ergebnisse der GPS-Datenerfassung auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße (D)

6.4.3 Reisezeitmessungen

Auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße wurden 711 Fahrzeuge durch die Reisezeitmessungen erfasst. Die mittlere Reisezeit für alle gemessenen Fahrzeuge beträgt 3,45 Minuten. Die mittlere Reisezeit auf demselben Streckenabschnitt ist für die Fahrzeuge der GPS-Messungen 3,46 Minuten. Die Reisezeitverteilung auf dem Straßenzug ist in der Reisezeitmessung und der GPS-Messung, wie in Bild 6.6 ersichtlich ist, sehr ähnlich.

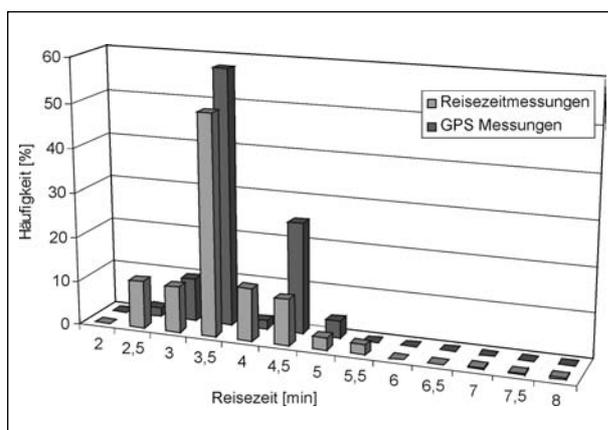


Bild 6.6: Reisezeitverteilung auf der Brehmstraße/Lindemannstraße (D)

6.5 Messungen auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)

6.5.1 Messaufbau

Die Messungen auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße in Düsseldorf wurden am 17.05.2006 von 9:30 bis 11:30 Uhr durchgeführt. Die GPS-Messungen und die Reisezeitmessungen wurden im selben Zeitraum durchgeführt. Die Kamerastandpunkte zur Kennzeichenerfassung befanden sich unmittelbar hinter dem Knotenpunkt 52-04, wodurch die Fahrzeuge in südlicher Fahrtrichtung erfasst wurden. Der Endquerschnitt der Reisezeiterfassung wurde aufgrund der örtlichen Gegebenheiten ca. 200 m hinter den letzten Knotenpunkt (51-02) der Untersuchungsstrecke gelegt. Auf dem Straßenzug ist eine zulässige Geschwindigkeit von 50 km/h vorgeschrieben.

Zur Erfassung der Verkehrsbelastung der Untersuchungsstrecke konnte die Reisezeitmessung verwendet werden. Da diese Messung nur die Fahrzeuge in einer Richtung aufzeichneten, wurden die Verkehrsbelastung am Start- und Endquerschnitt durch eine manuelle Verkehrszählung im Messzeitraum ermittelt. Zusätzlich wurden an den hochbelasteten Knotenpunkten 52-02 und 51-05 Videoka-

9:30-11:30 Uhr	Richtung: Norden									
	Route 1		Route 2		Route 3		Route 4		Route 5	
Anzahl der Messfahrten [-]	44		7		6		8		8	
Reisezeit (μ σ) [min]	4,65	0,94	4,99	0,77	4,56	1,38	4,72	0,39	4,48	0,83
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	3,59	1,78	4,86	2,14	4,17	2,40	4,00	0,93	4,50	2,32
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	25,17		23,35		25,53		25,08		26,17	
Verlustzeit (μ) [min]	2,58		2,93		1,29		2,63		2,41	
Koordinierungsmaß [-]	0,55		0,39		0,48		0,50		0,44	
QSV nach HBS [-]	E		F		F		E		F	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	C		D		C		C		C	
	Richtung: Süden									
	Route 1		Route 2		Route 3		Route 4		Route 5	
Anzahl der Messfahrten [-]	43		7		6		8		8	
Reisezeit (μ σ) [min]	4,04	0,65	4,29	1,61	4,16	1,65	3,86	0,49	3,50	0,45
Anzahl der Halte (μ σ) [-]	3,21	0,92	2,86	0,82	2,00	1,10	2,75	1,28	2,50	1,3
Reisegeschwindigkeit (μ) [km/h]	29,72		27,56		28,04		31,16		34,32	
Verlustzeit (μ) [min]	1,89		2,20		2,10		1,74		1,38	
Koordinierungsmaß [-]	0,60		0,64		0,75		0,66		0,69	
QSV nach HBS [-]	E		E		C		D		D	
QSV nach BRILON, SCHNABEL [-]	C		C		C		B		B	

Tab. 6.5: Ergebnisse der GPS-Datenerfassung auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)

meras installiert, die sämtliche Knotenpunkte aufzeichneten. Die Knotenpunkte liegen so auf der Strecke verteilt, dass zwischen ihnen etwa dieselbe Distanz liegt. Zusätzlich standen von einigen weiteren Knotenpunkten historische Daten von Verkehrszählungen zur Verfügung. Die Verkehrsbelastungen, die für den gesamten Straßenzug angenommen wurden, sind Anhang 5 zu entnehmen.

Für die GPS-Datenerfassung wurden zehn Fahrzeuge, die jeweils mit einem GPS-Empfänger und einem Notebook ausgestattet sind, verwendet. Es wurden insgesamt fünf verschiedene Routen von den Messfahrzeugen befahren. Auf der Route 1 befuhren die Messfahrzeuge in der koordinierten Richtung den Straßenzug in seiner gesamten Länge. Diese Route wurde von sechs Fahrzeugen befahren. Die Routen 2 bis 5 wurden jeweils von einem Messfahrzeug befahren. Diese Routen unterscheiden sich von der Route 1 dadurch, dass die Fahrzeuge am ersten und letzten Knotenpunkten nicht in der koordinierten Richtung ein- und ausfahren. Die Routen 2 bis 5 sind im Anhang 4 dargestellt.

6.5.2 Auswertungen der Messergebnisse

Die Tabelle 6.5 verdeutlicht, dass auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße die Verkehrsqualität in südlicher Richtung höher war. Dieses Ergebnis konnte erwartet werden, da das Verkehrsaufkommen in Richtung Stadtmitte morgens höher ist. In nördlicher Fahrtrichtung wurde auf allen Routen eine QSV von E oder F erreicht. Das bedeutet, dass die Koordinierung nach HBS (2001) auf diesem Straßenzug unwirksam war. In südlicher Fahrtrichtung erreichten drei Routen die QSV C und D. Auf zwei Routen wurde auch hier eine nicht ausreichende Verkehrsqualität erreicht. Eine dieser Routen ist die Route 1, die den größten Stichprobenumfang hat und die koordinierte Hauptrichtung darstellt.

Man kann also auf dieser Untersuchungsstrecke nach dem HBS (2001) von einer nahezu unwirksamen Koordinierung sprechen. Nach BRILON, SCHNABEL (2003) fällt die Verkehrsqualität jedoch, bei Betrachtung der Reisegeschwindigkeiten, in keinem Fall unter die Qualitätsstufe D und kann somit als ausreichend bezeichnet werden.

Die Messergebnisse der Knotenpunktzufahrten in der koordinierten Hauptrichtung auf den Straßenzügen in Düsseldorf sind im Anhang 6 dargestellt.

6.5.3 Reisezeitmessungen

Auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße konnten 371 Fahrzeuge am Start und Endquerschnitt eindeutig identifiziert werden. Die mittlere Reisezeit dieser Fahrzeuge betrug 4,00 Minuten. In der GPS-Messung wurde von den Messfahrzeugen eine mittlere Reisezeit von 4,04 Minuten erreicht. In Bild 6.7 ist die Reisezeitverteilung der GPS-Messungen und der Reisezeitmessungen dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Reisezeitverteilung aller Fahrzeuge und der Messfahrzeuge sehr ähnlich ist.

6.6 Erkenntnisse aus den Messungen

In den Ergebnissen der beiden Reisezeitverteilungen wird deutlich, dass die Anzahl der Messfahrten bei den GPS-Messungen ausreichend war, um die Gesamtheit aller auf dem Straßenzug verkehrenden Fahrzeuge zu repräsentieren.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Verkehrsqualität konnten bei einer festzeitgesteuerten Grünen Welle (Königsallee) erreicht werden. Dies lässt jedoch noch keinen Vergleich zwischen verkehrsabhängigen und festzeitgesteuerten Koordinierungen zu. Die Koordinierungsmöglichkeiten werden von Randbedingungen bestimmt, die auf jedem Straßenzug sehr verschieden sind. Ein Vergleich ist erst in der Simulation möglich. Hier können die Verkehrsqualität der verschiedenen Steuerungsverfahren auf einem Straßenzug und die Auswirkungen auf das gesamte Netz verglichen werden. Die Verkehrsqualität des gesamten Netzes wurde in den Messungen nicht ausreichend berücksichtigt, was jedoch mit vertretbarem messtechnischem Aufwand auch nicht möglich war.

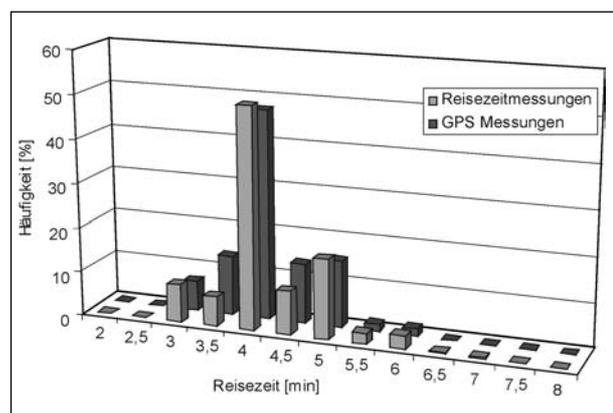


Bild 6.7: Reisezeitverteilung auf der Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)

In der Bewertung der Verkehrsqualität wurde deutlich, dass eine Bewertung der Koordinierung nach dem Qualitätskriterium des HBS (2001), die Anzahl der Halte, für die Belange dieser Untersuchung nicht ausreichend war. Auch gute Koordinierungen (Königsallee) erreichen nach dieser Bewertung nur eine Verkehrsqualität der Stufe C. Bei der Bewertung nach der Reisegeschwindigkeit auf den Straßenzügen nach BRILON, SCHNABEL (2003) war die Qualitätsstufe in der Regel höher als nach dem HBS (2001).

Für die Bewertung der Steuerungsverfahren in den Simulationen wird deshalb der Performance Index nach Kapitel 5.2 verwendet. Dabei werden sowohl die Verlustzeiten als auch die Anzahl der Halte aller im Netz verkehrenden Fahrzeuge berücksichtigt. Dadurch ist eine umfassende Bewertung der Verkehrsqualität gewährleistet.

7 Verkehrsteilnehmerbefragungen

7.1 Kfz-Verkehr

Die Verkehrsteilnehmerbefragungen wurden an denselben Straßenzügen durchgeführt, die bei den Messfahrten befahren wurden. Dazu wurden Fragebögen mit neun Fragen (siehe Anhang 1) zu dem Straßenzug und den Lichtsignalanlagen erstellt.

Am Straßenzug Königsallee (BO) wurde die Umfrage unter den Autofahrern am 10. und 11.01.2006 durchgeführt. Die Befragung fand auf der Fläche der Aral-Tankstelle an der Kreuzung Königsallee/Wasserstraße statt. Auf der Königsallee beteiligten sich 101 Personen an der Befragung.

Die Befragung am Albersloher Weg (MS) wurde am 04.05.2006 von 14:00-19:00 Uhr durchgeführt. Die Interviews fanden auf dem Gelände der Westfalen Tankstelle am Albersloher Weg statt. In Münster wurden 100 Personen befragt.

Am Lastring in Düsseldorf (Brehmstraße/Lindemannstraße und Kettwiger Straße/Kruppstraße) wurde die Verkehrsteilnehmerbefragung am 27.07.2006 auf dem Gelände einer TOTAL-Tankstelle durchgeführt. Auch in Düsseldorf konnten 100 Personen befragt werden.

Durch diese Art der Befragung wurde der Verkehrsablauf nicht gestört und die befragten Personen wurden nicht unnötig aufgehalten, da sie während

des Tankvorgangs befragt wurden. Die Umfragen wurden jeweils von zwei studentischen Hilfskräften durchgeführt. Es konnten insgesamt 301 Personen interviewt werden.

Die ausgewählten Untersuchungsstrecken sind wichtige Straßenzüge. Sie erfüllen in ihrem Umfeld eine bedeutende Funktion. Sie werden von über der Hälfte der befragten Personen täglich benutzt. In ihrer ganzen Länge werden sie jedoch nur von einem relativ geringen Anteil (5,10 und 25 %) der befragten Personen befahren. Die Verkehrsqualität auf der Königsallee wird von 95 % als gut bis gerade noch hinnehmbar bewertet. In Düsseldorf und Münster wird die Verkehrsqualität von 29 und 23 % der Befragten in die Kategorie mangelhaft eingestuft. Die Anzahl der Halte wurde auf allen Strecken als störender empfunden als hohe Wartezeiten. Die gesamten Ergebnisse der Befragungen sind im Anhang 3 dargestellt.

In den Bildern 7.1 und 7.2 ist ein Vergleich zwischen dem subjektiven Empfinden der Verkehrsteilnehmer und der tatsächlichen Verkehrsqualität dargestellt. In diesen Abbildungen ist der Zusammenhang zwischen den Wartezeiten/Halten und der Anzahl der überquerten Knotenpunkte dargestellt. Dabei werden die gemessenen Werte aller Knotenpunkte der Untersuchungsstrecken den geschätzten Werten gegenübergestellt.

In Bild 7.1 wird deutlich, dass die gemessenen Wartezeiten linear von der Anzahl der überquerten Knotenpunkte abhängen. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgerade beträgt 0,88. Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass von den Befragten kein Zusammenhang zwischen den Wartezeiten und der Anzahl der überquerten Knotenpunkte hergestellt wird. Die geschätzten Wartezeiten streuen ohne di-

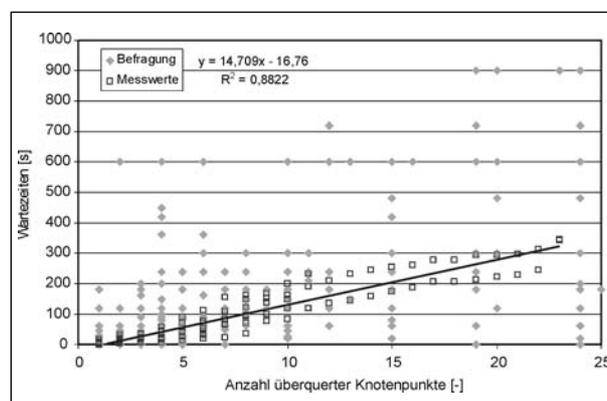


Bild 7.1: Relation der Wartezeiten zu der Anzahl der überquerten Knotenpunkte

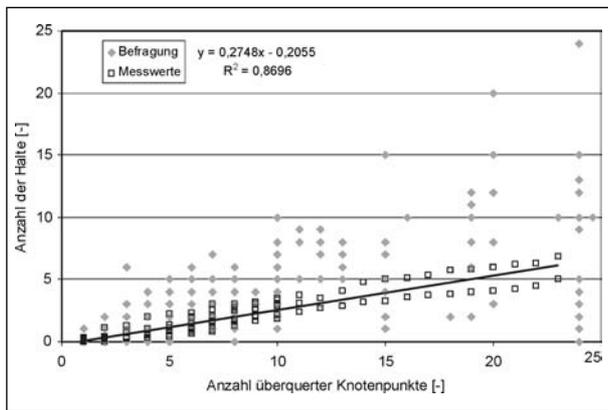


Bild 7.2: Relation der Anzahl der Halte zu der Anzahl der überquerten Knotenpunkte

rekte Relation zu den überquerten Knotenpunkten. Dies verdeutlicht, dass die Wartezeit für einen Autofahrer nur sehr schwer zu schätzen ist.

In Bild 7.2 ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Halte und der Anzahl der überquerten Knotenpunkte dargestellt. Die Relation der Halte zu der Anzahl der überquerten Knotenpunkte ist durch eine Regressionsgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,87 darstellbar. Die Werte der Befragungen weisen allerdings auch hier eine geringe Abhängigkeit auf.

7.2 ÖPNV

Es wurden vier ÖPNV-Betriebe zur Qualität der Lichtsignalsteuerung befragt. Gegenstand der Befragung waren die fünf Straßenzüge, die durch die Messfahrten untersucht wurden. Die Befragungen wurden anhand der Fragebögen, die im Anhang 2 dargestellt sind, durchgeführt. In diesen Fragebögen wurden folgende Fragen gestellt:

1. Wie viele von Ihren Linien befahren diese Straße?
2. Wie viele Knotenpunkte in dem Straßenzug werden befahren?
3. Wie oft muss nach Ihrer Erfahrung an LSA angehalten werden?
4. Wie lang muss insgesamt an LSA gewartet werden (Schätzung)?
5. Haben Sie die Möglichkeit, die Bewegung Ihrer Fahrzeuge zu verfolgen (Betriebsleitsystem)?
6. Beeinflussen Ihre Fahrzeuge die Verkehrshängigkeit der LSA (Anforderungsmöglichkeit)?

7. Werden die Fahrpläne oft durch die LSA beeinträchtigt?
8. Berücksichtigen Sie die Wartezeiten an LSA beim Erstellen der Fahrpläne?
9. Welche Qualität hat die Signalschaltung aus der Sicht des ÖPNV?
10. Nach welchen Kriterien bewerten Sie die Ampelschaltung?
11. Was ist für Sie schlimmer, wenn Ihre Fahrzeuge mehrere LSA auf einer längeren Hauptverkehrsstraße durchfahren?

In Münster gaben die Stadtwerke als Betreiber des städtischen ÖV (Linie 6) und die WVG (Westfälische Verkehrsgesellschaft) für den Regionalverkehr (Linie 30S) Auskunft. Die beiden Linien befahren den Albersloher Weg in ganzer Länge. Einige weitere Linien kreuzen den Albersloher Weg am nördlichen Ende.

In Bochum betreibt die Bogestra die Linien CE31 und 353, welche die Königsallee in der ganzen Länge befahren.

Der Lastring in Düsseldorf wird von sieben Linien befahren, die von der Rheinbahn betrieben werden. Der Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße wird von den Linien 706 und 708 befahren. Am Knotenpunkt Heinrichstraße kreuzen mehrere Linien den Straßenzug. Der Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße wird von den Linien 706 und 716 befahren. Am Knotenpunkt Oberbilker Markt queren mehrere Straßenbahnlinien den Straßenzug.

In Tabelle 7.1 wird deutlich, dass nur in einem Fall die Steuerung einer Richtung als zufrieden stellend angesehen wird. In allen anderen Fällen ist man mit der LSA-Steuerung nicht zufrieden. Zwei Betriebe geben Schätzungen der Wartezeiten und der Anzahl der Halte ab. Bei der Bewertung der Qualität einer LSA-Steuerung wird von den ÖPNV-Betrieben die Anzahl der Halte als wichtiger bewertet. Auf allen Straßenzügen, außer auf der Königsallee sind Anforderungsmöglichkeiten des ÖPNV vorgesehen. Außerdem verfügen alle ÖPNV-Unternehmen über ein Betriebsleitsystem, mit dem z. B. die Reisezeiten und Anzahl der Halte aufgezeichnet werden können.

			Albersloher Weg (MS)		Königsallee	Lastring
			Stadtverkehr	Regionalverkehr	(BO)	(D)
1	Anzahl der ÖV Linien	[-]	7	3	2	7
2	Anzahl der Knotenpunkte	[-]	23	23	9	19
3	Anzahl der Halte	[-]	11	/	4,5	/
4	Wartezeiten	[-]	20	/	50	/
5	Betriebsleitsystem	[-]	Ja	Ja	Ja	Ja
6	Anforderungsmöglichkeiten	[-]	Ja	Ja	Nein	Ja
7	Beeinträchtigung der Fahrpläne durch LSA	[-]	/	Ja	Nein	Ja
8	Berücksichtigung der Wartezeiten	[-]	Ja	Ja	Ja	Ja
9	Qualität der Signalschaltung	[-]	mangelhaft	Ri Nord: zufrieden stellend Ri Süd: mangelhaft	gerade noch hinnehmbar	gerade noch hinnehmbar
10	Kriterien der Bewertung	[-]	Wartezeit Halte	Halte	Wartezeit Halte	Wartezeit Halte
11	Bewertungsgrundlage	[-]	Halte	Halte	Halte	Wartezeit Halte

Tab. 7.1: Auswertung der Befragungen der ÖPNV-Betriebe

7.3 Zusammenfassung

Insgesamt kann festgehalten werden, dass das subjektive Empfinden der Verkehrsqualität durch die Kfz-Führer nicht die tatsächlich vorhandene Verkehrsqualität widerspiegelt. Die Einschätzung der Wartezeit ist für die Verkehrsteilnehmer besonders schwierig, da sie nicht durch eine obere Schranke begrenzt ist. Die Anzahl der Halte wurde von den Autofahrern meist geringer oder gleich der Anzahl der Knotenpunkte eingeschätzt. Es ergab sich jedoch auch hier kein linearer Zusammenhang zwischen Halten und der Anzahl der überquerten Knotenpunkte.

Die befragten ÖPNV-Betriebe waren in der Mehrzahl nicht mit der Verkehrsqualität der Lichtsignalsteuerung zufrieden. Es wurde deutlich, dass die entscheidende Grundlage für die Bewertung der Verkehrsqualität die Anzahl der Halte darstellt.

8 Simulationsstudien

Sämtliche Untersuchungsstrecken wurden mit dem mikroskopischen Simulationsprogramm VISSIM nachgebildet. Dies ermöglichte einen Vergleich der verschiedenen Steuerungsverfahren auf jedem Straßenzug.

Die Erstellung der Netzmodelle in VISSIM basiert auf den Lageplänen der Knotenpunkte. Die Lagepläne können als Hintergrunddatei in VISSIM geladen werden, sodass eine genaue Abbildung der

realen Knotenpunkte gewährleistet ist. Für die realitätsgetreue Nachbildung des Straßenzuges sind außerdem die Abstände der Haltelinien von Bedeutung. Diese können anhand der Grünbänder aus den Planungsunterlagen ermittelt und in der Simulation umgesetzt werden. Die nicht signalisierten Knotenpunkte, die keinen bedeutenden Einfluss auf den Verkehrsfluss haben, wurden in der Simulation nicht berücksichtigt.

Die Simulationsstudien wurden für die Steuerungsarten Festzeitsteuerung (FZ) und verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan (VA) auf allen Straßenzügen durchgeführt. Die Steuerungsart vollverkehrsabhängige Steuerung ohne Rahmenzeitplan (VVA) wurde in dieser Untersuchung ebenfalls bearbeitet. Die Simulationsmodelle von drei Straßenzügen (Königsallee, Stader Straße und Hauptstraße) wurden mit einer Steuerung dieser Art ausgestattet und in der Simulation untersucht.

Die realitätsnahe Umsetzung der Lichtsignalsteuerung in VISSIM ist für diese Untersuchung entscheidend. Festzeitsteuerungen sind problemlos in die Simulation übertragbar. Die verkehrsabhängigen Steuerungslogiken für sieben Untersuchungsstrecken lagen aus der Praxis vor. Diese Steuerungen wurden mit Hilfe des Programmmoduls VISVAP in der Simulation nachgebildet. In einem Fall wurden die für die Realität entwickelten Steuerungsdateien direkt in VISSIM eingespeist. Lediglich bei dem Straßenzug Albersloher Weg wurden Vereinfachungen in der Steuerung vorgenommen. Die Steuerungslogiken hatten teilweise einen Um-

fang von 50 Seiten, in denen viele Abfragen vorhanden waren die für diese Untersuchung nicht interessant sind (z. B. Feuerwehranforderungen). Die wesentlichen Programmstrukturen bleiben jedoch erhalten und garantieren einen realitätsnahen Ablauf. Drei Straßenzüge laufen in der Realität in einer festzeitgesteuerten Koordinierung. Für diese Straßenzüge wurden verkehrsabhängige Steuerungslogiken entwickelt. Diese Steuerungen basieren auf den Erfahrungen, die durch die vorhandenen Logiken der anderen Straßenzüge gesammelt wurden.

Die Mehrzahl der Steuerungslogiken beruht auf einer Abfrage von Zeitlücken und Anforderungen. Darauf basierend können die Grünzeiten verlängert oder Phasen übersprungen werden. Dabei wurde für jede Signalgruppe der früheste und späteste Grünzeitbeginn festgelegt. Die Detektoren liegen in dem Simulationsmodell in der Hauptrichtung jeweils 2 m und 30-40 m von der Haltelinie entfernt.

Auch für die Erstellung der Logik der vollverkehrsabhängigen Steuerung wurde ein einheitliches System verwendet. Dieses System beruht auf der Abfrage von Zeitlücken und Anforderungen. Es gibt keine Rahmenzeiten für die Grünzeiten, jedoch Minimal- und Maximalgrünzeiten der Signalgruppen.

Zur Bewertung der Verkehrsqualität auf den Straßenzügen wurden die Bewertungskriterien Verlustzeiten und Anzahl der Halte in der Hauptrichtung und der in Kapitel 5.2 dargestellte Performance Index (PI) verwendet. Bei der Verwendung des PI ist zu beachten, dass in der gewählten Definition die Reduzierung des PI eine Erhöhung der Verkehrsqualität bedeutet. Im PI wurden die Fahrzeugarten nach ihrem mittleren Besetzungsgrad gewichtet. Der Besetzungsgrad der Kfz im Individualverkehr wurde im Mittel mit 1,2 Personen/Fz angenommen. Der Besetzungsgrad der Straßenbahnen und Busse wurde für jeden Straßenzug beim ÖPNV-Betrieb erfragt.

8.1 Kalibrierung der Simulationsmodelle

Im ersten Schritt der Simulationsstudien wurden die Simulationsmodelle geeicht, indem die Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der empirischen Messungen verglichen wurden. Dafür wurden die Steuerungen, die während der Messfahrten aktiv waren, in der Simulation initialisiert. Es wur-

den fünf Straßenzüge durch empirische Messungen untersucht. Somit konnte die Kalibrierung auch nur für diese Straßenzüge durchgeführt werden. Für die restlichen Straßenzüge waren keine Messergebnisse vorhanden, sodass diese Simulationsmodelle basierend auf den kalibrierten Modellen eingestellt wurden. Für die Eichung der Simulationsmodelle wurden in der Simulation dieselben Routen ausgewertet, die bei den Messungen befahren wurden. Die Anfangs- und Endpunkte wurden an dieselben Stellen gelegt wie bei der Auswertung der Messdaten. Kleine Abweichungen in der Position der Messstellen können jedoch nicht vermieden werden. Um gleiche Bezugsgrößen in der Simulation und Messung zu erhalten, wurden die Bewertungskriterien je gefahrenem Kilometer dargestellt.

Zur Kalibrierung der Simulationsmodelle wurden die Reisezeiten und die Anzahl der Halte aus der Simulation mit den in der Realität gemessenen Werten verglichen. Um einen Rahmen der zu erreichenden Genauigkeit zu erhalten, wurden die 99%-Konfidenzintervalle der mittleren Reisezeiten und der Anzahl der Halte nach Gleichung [8-1] aus den Messwerten bestimmt. Außerhalb des Konfidenzintervalls liegende Simulationsergebnisse sind in den Tabellen 8.1 bis 8.5 fettgedruckt dargestellt.

$$\bar{x} \pm 2,58 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad [8-1]$$

Für sämtliche Untersuchungsstrecken wurden dieselben Fahrdynamikparameter gewählt, da es keine Erkenntnisse gibt, die eine Verwendung verschiedener Parameter auf den verschiedenen Straßenzügen rechtfertigen.

8.1.1 Königsallee (BO)

Die Lichtsignalanlagen auf der Königsallee sind durch eine festzeitgesteuerte Koordinierung gesteuert. Diese Steuerung ist genau so, wie sie in der Realität geschaltet ist, in das Simulationsmodell übernommen worden.

Die Verkehrsbelastungen und -beziehungen, die der Kalibrierung zugrunde lagen, sind aus den Messungen und historischen Daten ermittelt worden. Die Daten sind in Anhang 5 dargestellt.

In Tabelle 8.1 sind die Ergebnisse der Simulation den Messergebnissen gegenübergestellt. Die Simulationsergebnisse stimmen auf allen Routen ausrei-

chend genau mit den Messergebnissen überein. Lediglich auf der Route 3 stadtauswärts im Zeitraum von 7:00-9:00 Uhr liegen die Reisezeiten nicht im Konfidenzintervall. Diese Route weist aber nur einen geringen Stichprobenumfang auf, sodass diese Abweichung als nicht repräsentativ angesehen wird. Die Anzahl der Halte konnte auf zwei Routen nicht mit ausreichender Genauigkeit erreicht werden.

8.1.2 Albersloher Weg-Nord (MS)

Die Steuerungslogiken auf dem Albersloher Weg konnten nur unter Vereinfachungen umgesetzt werden. Die Logiken hatten einen Umfang von teilwei-

se über 50 Seiten je Knotenpunkt. Die wichtigsten Bestandteile der Logik wurden übernommen. Sonderzustände wie Feuerwehr- oder Bahnanforderungen, die während der Messungen nicht relevant waren, wurden nicht einbezogen. So konnte eine vereinfachte Steuerungslogik erstellt werden, die die wesentlichen Merkmale der vorhandenen Steuerung enthält. Die Koordinierungszeitpunkte der realen Steuerung wurden in der Simulation eingehalten. Die Verkehrsbeziehungen, die der Kalibrierung zugrunde liegen, sind dem Anhang 5 zu entnehmen.

In Tabelle 8.2 wird deutlich, dass hinsichtlich der Reisezeiten die Simulationsergebnisse ein sehr

	Richtung: stadteinwärts						Richtung: stadtauswärts						
	Route 1		Route 2		Route 3		Route 1		Route 2		Route 3		
	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	
7:00-9:00 Uhr													
mittlere Reisezeit	[min/km]	1,52	1,52	1,76	1,68	2,19	2,17	1,17	1,14	1,48	1,62	2,00	2,22
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	1,45-1,59		1,62-1,90		1,83-2,54		1,02-1,32		1,33-1,63		1,95-2,05	
Anzahl der Halte	[H/km]	0,66	0,91	1,2	1,41	1,52	1,60	0,22	0,21	0,35	0,43	1,08	1,17
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	0,59-0,73		1,02-1,42		1,16-1,88		0,07-0,37		0,00-0,71		0,85-1,31	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	0,46	0,38	0,56	0,46	0,98	0,88	0,11	0,19	0,28	0,42	0,81	0,83
mittl. Reisegeschwindigkeit	[km/h]	39,5	39,5	34,3	35,8	27,6	27,6	51,5	52,8	43,1	39,1	30,6	27,4
Koordinierungsmaß	[-]	0,75	0,64	0,5	0,43	0,46	0,45	0,92	0,92	0,86	0,83	0,66	0,59
16:00-18:00 Uhr													
mittlere Reisezeit	[min/km]	1,47	1,49	1,60	1,67	2,42	2,23	1,43	1,49	1,78	1,70	1,99	1,97
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	1,38-1,56		1,55-1,64		2,10-2,74		1,33-1,53		1,61-1,95		1,90-2,05	
Anzahl der Halte	[H/km]	0,52	0,56	0,9	1,14	1,81	1,76	0,51	0,58	0,68	1,00	1,01	1,04
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	0,39-0,65		0,58-1,28		1,58-2,04		0,42-0,60		0,41-0,95		0,79-1,23	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	0,41	0,39	0,40	0,49	1,22	0,95	0,36	0,41	0,58	0,59	0,66	0,77
mittl. Reisegeschwindigkeit	[km/h]	40,9	40,1	37,8	36,2	25,0	26,9	42,1	40,2	34,7	35,5	30,9	31,2
Koordinierungsmaß	[-]	0,80	0,78	0,62	0,54	0,34	0,39	0,81	0,77	0,72	0,60	0,66	0,64

Tab. 8.1: Vergleich der Messwerte und Simulationsergebnisse auf der Königsallee (BO)

	Richtung: Norden						Richtung: Süden						
	Route 1		Route 2a		Route 2b		Route 1		Route 2a		Route 2b		
	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	
7:00-9:00 Uhr													
mittlere Reisezeit	[min/km]	2,23	2,17	2,22	2,23	2,24	2,42	1,84	1,84	2,01	2,13	1,77	2,04
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	1,96-2,50		1,82-2,62		1,88-2,60		1,72-1,97		1,75-2,27		1,59-1,95	
Anzahl der Halte	[H/km]	1,49	2,01	1,71	2,24	1,77	2,36	1,06	1,30	1,55	2,43	1,01	1,81
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	1,19-1,79		1,02-2,40		1,09-2,45		0,85-1,27		0,00-2,26		0,34-1,68	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	1,18	1,17	1,22	1,08	1,22	1,33	0,82	0,71	1,01	1,09	0,73	0,89
mittl. Reisegeschwindigkeit	[km/h]	26,9	27,6	27,1	26,9	26,8	24,8	32,6	32,6	29,9	28,1	34,0	29,4
Koordinierungsmaß	[-]	0,69	0,61	0,63	0,57	0,60	0,49	0,78	0,74	0,67	0,74	0,77	0,76

Tab. 8.2: Vergleich der Messwerte und Simulationsergebnisse auf dem Albersloher Weg-Nord (MS)

reales Abbild der gemessenen Werte liefern. Die Reisezeiten aller Routen, außer Route 2b, liegen innerhalb des Konfidenzintervalls. Die Abweichung wird wegen des geringen Stichprobenumfangs auf dieser Route als nicht repräsentativ angesehen. Die Anzahl der Halte lässt sich auf diesem Straßenzug weniger gut treffen. Auf vier Routen wird die Anzahl der Halte in der Simulation überschätzt.

8.1.3 Albersloher Weg-Süd (MS)

Auf dem südlichen Teilstück des Albersloher Weges sind die Steuerungsverfahren der Lichtsignalanlagen im gemessenen Zustand uneinheitlich. Es sind sowohl FT, als auch VA- und VVA-Steuerungen vorhanden. Die fünf südlichen LSA unterliegen keiner koordinierten Steuerung mehr. Vier der fünf LSA sind Fußgängersignalanlagen, die nur auf Anforderung reagieren und keine feste Umlaufzeit oder Koordinierungszeit haben.

Die Steuerungslogiken wurden auch hier realitätsnah umgesetzt. Die Verkehrsbeziehungen und Verkehrsbelastungen des Straßenzuges sind im Anhang 5 dargestellt. In Tabelle 8.3 ist zu erkennen, dass auch auf diesem Straßenzug in der Simulation realistische Ergebnisse erreicht wurden. Auf sämtlichen Routen wurden die Messergebnisse hinsichtlich der Reisezeiten und der Anzahl der Halte sehr genau erreicht. Lediglich auf Route 1 in Richtung Norden liegt die Anzahl der Halte über dem oberen Grenzwert des Konfidenzintervalls.

8.1.4 Brehmstraße/Lindemannstraße (D)

Auf der Brehmstraße/Lindemannstraße ist in der Realität eine verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan geschaltet. Die Verkehrsabhängig-

keit bezieht sich hier in erster Linie auf die Bevorrechtigung des ÖPNV. Vereinzelt sind auf diesem Straßenzug auch Grünzeitverlängerungen, die einen Stau in den Zufahrten verhindern sollen, für den IV vorgesehen. Die Steuerungslogiken wurden exakt übernommen und im Simulationsmodell implementiert. Die Verkehrsbeziehungen und -stärken wurden durch Videoaufzeichnungen und historischen Daten ermittelt. Die Verkehrsdaten, die für den Straßenzug angenommen werden, sind in Anhang 5 dargestellt.

In Tabelle 8.4 wird deutlich, dass in der Simulation auf dem untersuchten Straßenzug realistische Ergebnisse erreicht werden konnten. Sowohl die Anzahl der Halte als auch die Reisezeiten der einzelnen Routen wurden ausreichend genau erreicht. Nur in einem Fall liegt die Reisezeit einer Route außerhalb des Konfidenzintervalls.

8.1.5 Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)

Die Lichtsignalanlagen auf der Kettwiger Straße/Kruppstraße sind verkehrsabhängig gesteuert und unterliegen demselben Verfahren wie der Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße. Die Steuerung ist durch einen Rahmenzeitplan koordiniert. Auf diesem Streckenabschnitt bezieht sich die Verkehrsabhängigkeit ausschließlich auf den ÖPNV. Für den IV sind keine Grünzeitverlängerungen vorgesehen. Auch die Steuerungslogiken dieses Straßenzuges konnten in der Simulation exakt nachgebildet werden.

Die Verkehrsbeziehungen und -stärken wurden in der Realität durch Messungen ermittelt. Diese Daten wurden durch historische Daten ergänzt und vervollständigt. Im Anhang 5 sind die für die Kalibrierung angenommenen Daten dargestellt.

	Richtung: Norden				Richtung: Süden				
	Route 1		Route 3		Route 1		Route 3		
	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	
7:00-9:00 Uhr									
mittlere Reisezeit	[min/km]	1,68	1,60	1,80	1,71	1,50	1,49	1,60	1,60
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	1,52-1,84		1,64-1,96		1,39-1,61		1,49-1,71	
Anzahl der Halte	[H/km]	0,78	1,11	1,11	1,10	0,71	0,79	0,97	0,98
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	0,54-1,02		0,85-1,37		0,58-0,84		0,81-1,13	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	0,64	0,41	0,76	0,40	0,45	0,29	0,52	0,40
mittl. Reisegeschwindigkeit	[km/h]	35,69	37,51	33,26	35,12	40,09	40,18	37,40	37,48
Koordinierungsmaß	[-]	0,78	0,68	0,69	0,68	0,80	0,77	0,73	0,72

Tab. 8.3: Vergleich der Messwerte und Simulationsergebnisse auf dem Albersloher Weg-Süd (MS)

Tabelle 8.5 zeigt, dass das Simulationsmodell des Straßenzuges realitätsgetreu eingestellt werden konnten. Die Reisezeiten und die Anzahl der Halte, die in der Realität gemessen wurden, konnte auch in der Simulation erreicht werden. Alle mittleren

Reisezeiten der Simulation liegen im Konfidenzintervall und nur auf einer Route überschreitet die mittlere Anzahl der Halte den oberen Grenzwert des Konfidenzintervalls.

15:00-17:00 Uhr		Richtung: Norden							
		Route 1		Route 2		Route 3		Route 4	
		Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim
mittlere Reisezeit	[min]	2,35	2,41	2,30	2,39	2,15	2,73	2,46	2,53
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	2,18-2,52		2,06-2,54		1,95-2,35		2,14-2,78	
Anzahl der Halte	[H/km]	1,86	1,83	2,02	1,98	2,23	2,44	2,56	2,21
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	1,53-2,19		1,18-2,86		1,49-2,97		1,80-3,32	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	1,29	1,24	1,24	1,22	1,10	1,46	1,40	1,33
mittl.Reisegeschwindigkeit	[km/h]	25,49	24,91	26,09	25,10	27,84	21,96	24,40	23,76
Koordinierungsmaß	[-]	0,58	0,56	0,55	0,55	0,45	0,42	0,42	0,48
		Richtung: Süden							
		Route 1		Route 2		Route 3		Route 4	
		Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim
mittlere Reisezeit	[min]	1,99	2,09	2,17	2,14	1,93	2,06	1,88	2,09
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	1,88-2,10		2,01-2,33		1,71-2,15		1,67-2,09	
Anzahl der Halte	[H/km]	1,03	0,99	1,40	1,19	1,09	0,99	1,09	0,95
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	0,83-1,23		0,83-1,97		0,48-1,70		0,26-1,92	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	0,89	0,63	1,11	0,67	0,88	0,60	0,83	0,71
mittl.Reisegeschwindigkeit	[km/h]	30,08	28,75	27,70	28,00	31,02	29,06	31,84	28,75
Koordinierungsmaß	[-]	0,78	0,77	0,70	0,72	0,77	0,78	0,77	0,78

Tab. 8.4: Vergleich der Messwerte und der Simulationsergebnisse auf dem Straßenzug Brehmstr./Lindemannstr. (D)

9:30-11:30 Uhr		Richtung: Norden									
		Route 1		Route 2		Route 3		Route 4		Route 5	
		Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim
mittlere Reisezeit	[min]	2,38	2,31	2,57	2,30	2,35	2,44	2,39	2,43	2,29	2,43
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	2,27-2,49		2,30-2,84		1,82-2,88		2,21-2,57		1,9-2,68	
Anzahl der Halte	[H/km]	1,84	2,07	2,50	1,91	2,15	2,67	2,03	2,36	2,30	2,36
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	1,61-2,07		1,22-3,78		0,33-3,97		1,75-2,31		0,00-3,61	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	25,2	26,0	23,4	26,1	25,5	24,6	25,1	24,7	26,2	24,7
mittl.Reisegeschwindigkeit	[km/h]	1,32	1,12	1,51	1,06	1,29	1,21	1,33	1,19	1,23	1,19
Koordinierungsmaß	[-]	0,55	0,43	0,39	0,51	0,48	0,31	0,50	0,40	0,44	0,40
		Richtung: Süden									
		Route 1		Route 2		Route 3		Route 4		Route 5	
		Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim	Real	Sim
mittlere Reisezeit	[min]	2,02	1,99	2,18	2,03	2,14	2,03	1,93	1,94	1,75	1,99
99%-Konfidenzintervall	[min/km]	1,97-2,07		1,6-2,76		1,48-2,8		1,71-2,15		1,55-1,95	
Anzahl der Halte	[H/km]	1,60	1,07	1,45	1,20	1,03	1,20	1,37	1,27	1,25	1,08
99%-Konfidenzintervall	[H/km]	1,04-2,16		0,38-2,52		0,55-1,51		0,76-1,98		0,70-1,80	
mittlere Verlustzeit	[min/km]	29,7	30,2	27,6	29,6	28,0	29,6	31,2	30,9	34,3	30,1
mittl.Reisegeschwindigkeit	[km/h]	0,97	0,59	1,12	0,63	1,08	0,63	0,87	0,34	0,69	0,62
Koordinierungsmaß	[-]	0,60	0,71	0,64	0,70	0,75	0,70	0,66	0,67	0,69	0,72

Tab. 8.5: Vergleich der Messwerte und der Simulationsergebnisse auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)

8.2 Vergleich der vorhandenen Steuerungen mit den optimierten Festzeitsteuerungen

Für jeden untersuchten Straßenzug wurden mit der Planungssoftware AMPEL-K nach dem TRANSYT-Verfahren optimierte Festzeitsteuerungen entwickelt. Diese neu erstellten Festzeitsteuerungen wurden zunächst mit den vorhandenen Festzeitsteuerungen verglichen. Sieben Straßenzüge sind in der Realität verkehrsabhängig gesteuert. Für diese Strecken lagen somit keine real geschalteten Festzeitsteuerungen vor. In diesen Fällen wurden die Rahmenpläne der verkehrsabhängigen Steuerung zum Vergleich herangezogen. Dabei darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass diese Steuerungen nicht als Festzeitsteuerung konzipiert sind, sondern in der Realität verkehrsabhängig angepasst werden.

Für jeden Straßenzug wurden zwei neue Optimierungen durchgeführt. Zuerst wurden die vorhandenen Signalzeitenpläne der einzelnen Knotenpunkte übernommen und neu koordiniert. Dies führte aber nur zu unwesentlichen Veränderungen in der verkehrlichen Wirkung.

In einem zweiten Schritt wurden für jeden Knotenpunkt optimierte Signalzeitenpläne erstellt und diese dann neu koordiniert. Die neu optimierten Koordinierungen wurden nach dem Prinzip der Streckenoptimierung und der Netzoptimierung entworfen. In der Streckenoptimierung wird die Koordi-

nierung für die Hauptrichtung des Straßenzuges optimiert. Die Netzoptimierung strebt einen optimalen Verkehrsablauf für das gesamte Netz an. Das heißt, es werden auch die aus der Nebenrichtung einfahrenden Fahrzeuge berücksichtigt

Auf dem Straßenzug Albersloher Weg-Süd ist in der Realität keine vollständige Koordinierung vorhanden. Hier sind die südlichen fünf Knotenpunkte freilaufend verkehrsabhängig geschaltet. In diesem Vergleich wurden deswegen nur die Simulationsergebnisse der strecken- und netzoptimierten Steuerungen aufgeführt.

In Tabelle 8.6 sind die Verlustzeiten, die Anzahl der Halte und der Performance Index (PI) des gesamten Straßennetzes dargestellt, die sich aus der Simulation mit VISSIM ergeben haben. Außerdem sind die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes (QSV) nach dem HBS (2001) und nach BRILON, SCHNABEL (2003) dargestellt. Die vorhandene Festzeitsteuerung wurde mit der strecken- und der netzoptimierten Festzeitsteuerung verglichen.

Auf vier Straßenzügen konnte nach dem Bewertungsmaß des HBS (2001) durch die Optimierung eine Verbesserung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufes erreicht werden. Auffällig ist, dass nur bei sechs der 30 Koordinierungen eine höhere Qualitätsstufe als D erreicht wurde. Nach dem HBS (2001) wurde also auf den meisten Straßenzügen keine zufrieden stellende Koordinierung erreicht. Die QSV nach BRILON, SCHNABEL (2003) wurde auf fünf Straßenzügen durch die Optimierung ge-

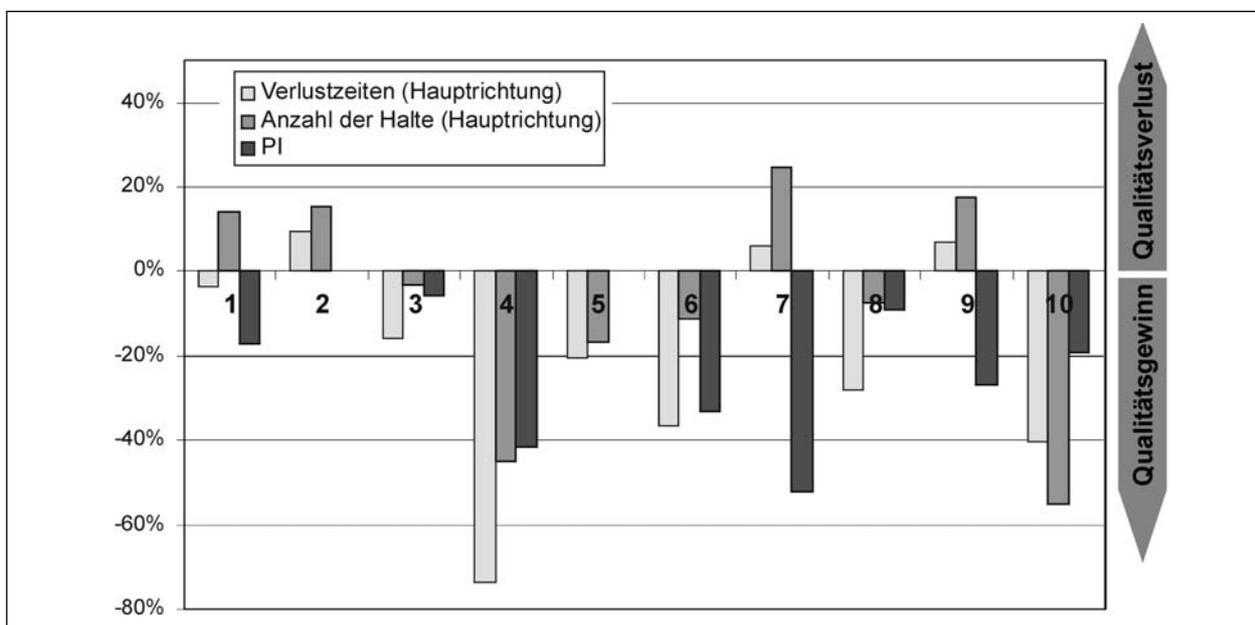


Bild 8.1: Veränderung der Verkehrsqualität bei Einsatz einer optimierten Steuerung im Vergleich zur vorhandenen Steuerung

steigert. Auf den übrigen Straßenzügen wurde nach der Optimierung dieselbe QSV erreicht. Die mittleren Reisegeschwindigkeiten sind trotz eines niedrigen Koordinierungsmaßes so hoch, dass nur bei einer Koordinierung (Hauptstraße) die QSV D erreicht wurde. Die übrigen Koordinierungen wiesen eine höhere Qualitätsstufe auf.

In Tabelle 8.6 wird außerdem deutlich, dass die beiden Optimierungsvarianten (Netzoptimierung und Streckenoptimierung) in ihrer Wirkung ihrem Optimierungsziel entsprechen. So ist die Koordinierungsqualität in der Hauptrichtung bei der strecken-

optimierten Steuerung, bis auf eine Ausnahme, höher als bei der Netzoptimierung. Durch die Netzoptimierung wurde in den meisten Fällen jedoch keine weitere Steigerung der Verkehrsqualität im Gesamtnetz erreicht.

In Bild 8.1 wird die Verkehrsqualität der vorhandenen Steuerung mit der verkehrlichen Wirkung einer optimierten Steuerungsvariante verglichen. Zum Vergleich wurde die Steuerungsvariante gewählt, die die höhere Verkehrsqualität im Gesamtnetz, also den niedrigeren Performance Index, bringt. Es ist die prozentuale Veränderung der Verlustzeiten

Straßenzug	Steuerung	Richtung 1		Richtung 2		PI [-]	k [-]	QSV nach HBS [-]	mittl. Reise- geschw. [-]	QSV nach BRILON, SCHNABEL [km/h]	
		Verlust- zeit [s]	Halte [-]	Verlust- zeit [s]	Halte [-]						
1	Albersloher Weg-Nord (MS)	vorh. FZ	171,0	4,8	55,1	1,3	51	0,69	D	33,9	C
		Streckenopt	110,1	3,2	107,8	3,8	42	0,65	D	33,0	C
		Netzopt	124,5	3,5	96,0	3,5	44	0,65	D	33,1	C
2	Albersloher Weg-Süd (MS)	Streckenopt	80,2	4,3	109,4	4,8	42	0,62	E	36,3	B
		Netzopt	91,5	5,3	115,8	5,2	42	0,56	E	35,4	B
3	Königsallee (BO)	vorh. FZ	42,6	0,7	78,2	3,1	56	0,76	C	45,0	B
		Streckenopt	39,9	1,3	71,1	2,5	54	0,77	C	45,5	B
		Netzopt	46,8	1,7	54,8	2,0	53	0,77	C	44,9	B
4	Herner Straße (HER)	vorh. FZ	13,2	0,5	183,6	3,3	61	0,73	D	32,5	B
		Streckenopt	2,8	0,2	48,7	1,8	36	0,85	B	41,7	A
		Netzopt	26,0	1,2	74,9	2,3	36	0,75	C	36,5	B
5	Stader Straße (BUX)	vorh. FZ	189,2	3,7	93,9	2,7	68	0,60	E	29,1	C
		Streckenopt	138,5	2,9	87,1	2,4	68	0,67	D	31,2	B
		Netzopt	125,3	2,8	138,8	2,8	69	0,66	D	29,0	C
6	Hauptstraße (HER)	vorh. FZ	111,0	4,1	74,9	3,0	58	0,56	E	23,7	D
		Streckenopt	59,9	3,6	58,2	2,8	39	0,61	E	29,3	C
		Netzopt	65,6	2,9	65,4	3,8	38	0,58	E	27,9	C
7	Eickeler Straße (HER)	vorh. FZ	52,5	2,9	59,2	2,2	81	0,68	D	30,8	B
		Streckenopt	63,4	3,5	55,2	2,8	39	0,60	E	30,6	B
		Netzopt	58,9	3,7	59,6	2,8	40	0,59	E	30,3	B
8	Brehmstraße/ Lindemann- straße (D)	vorh. FZ	72,6	1,9	133,4	3,3	49	0,68	D	26,9	C
		Streckenopt	76,7	2,6	90,5	2,9	42	0,66	D	28,9	C
		Netzopt	67,3	1,9	80,5	2,9	45	0,70	D	30,1	B
9	Kettwiger Straße/ Kruppstraße (D)	vorh. FZ	66,5	2,1	139,8	4,4	82	0,60	E	29,4	C
		Streckenopt	91,9	3,3	111,7	3,9	64	0,55	E	28,9	C
		Netzopt	105,9	3,7	114,8	3,9	60	0,53	E	28,0	C
10	Bonnstraße (FRE)	vorh. FZ	278,0	5,7	91,1	1,5	77	0,49	E	37,1	B
		Streckenopt	114,0	1,7	106,7	1,5	62	0,77	C	43,3	A
		Netzopt	141,2	3,7	159,7	3,4	68	0,49	E	37,6	B

Tab. 8.6: Verkehrsqualität bei vorhandener Festzeitsteuerung (vorh. FZ) und optimierter Festzeitsteuerung

und Halte, summiert über beide Hauptrichtungen, und des PI des gesamten Netzes bei Einsatz einer optimierten Festzeitsteuerung dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die optimierte Festzeitsteuerung auf den meisten Straßenzügen zu einer Verbesserung der Verkehrsqualität, d. h. zur Reduzierung des PI, geführt hat. Auf acht Straßenzügen konnte die Verkehrsqualität des gesamten Netzes deutlich gesteigert werden.

Außerdem wird in Bild 8.1 deutlich, dass der Performance Index des gesamten Netzes nicht unbedingt mit der Verkehrsqualität der koordinierten Hauptrichtung im Zusammenhang steht. So sind auf den Straßenzügen Eickeler Straße (Straßenzug Nr. 7) und Kettwiger Straße/Kruppstraße (Straßenzug Nr. 9) die Verlustzeiten und Halte in der koordinierten Hauptrichtung gestiegen, während der Performance Index reduziert werden konnte. Auf beiden Straßenzügen sind, in der vorhandenen Steuerung, einzelne Zufahrten des Querverkehrs nicht ausreichend bemessen. Dadurch wird der gesamte PI derart beeinflusst, dass trotz besserer Qualität in Hauptrichtung für das gesamte Netz eine schlechtere Qualität entsteht.

Die erreichte Verbesserung der Verkehrsqualität ist auch dadurch zu erklären, dass die Optimierung mit den gleichen Verkehrsbelastungen durchgeführt wurde, wie sie dann auch in der Simulation verwendet wurden. Somit ist die Optimierung exakt auf die Anwendung in der Simulation ausgerichtet, während den vorhandenen Koordinierungen möglicherweise andere Verkehrsdaten zugrunde lagen.

8.3 Vergleich der Festzeitsteuerung mit der verkehrsabhängigen Steuerung

Die Unterschiede in der Verkehrsqualität, der Festzeitsteuerung (FZ) und der verkehrsabhängigen Steuerung mit Rahmenzeitenplan (VA) wurden durch umfangreiche Simulationsstudien erarbeitet. Die Rahmenzeitpläne der verkehrsabhängigen Steuerungen stellten beim Vergleich jeweils die Festzeitkoordinierung dar. So wird nur der Unterschied in der Verkehrsqualität betrachtet, der tatsächlich durch die Verkehrsabhängigkeit entsteht.

Für drei Straßenzüge (Königsallee (BO), Stader Straße (BUX) und Hauptstraße(HER)) wurde außerdem eine vollverkehrsabhängige Steuerung (VVA) entwickelt. Dieses Steuerungsverfahren wurde im Vergleich mit den anderen Steuerungsverfahren bewertet.

Für diese Simulationen werden die Steuerungen aus Tabelle 8.7 verwendet. Für sechs Straßenzüge lagen Rahmenzeitplan und Steuerungslogiken aus der Praxis vor, sodass diese direkt miteinander verglichen werden konnten. Die Straßenzüge in Herne und die Königsallee (BO) sind festzeitgesteuert. Für diese Untersuchungsstrecken wurden neue Steuerungslogiken entwickelt, die durch einen Rahmenzeitplan (die vorhandene Festzeitkoordinierung) koordiniert sind.

Der Straßenzug Albersloher Weg-Süd ist nur teilweise koordiniert. Fünf LSA sind hier freilaufend verkehrsabhängig gesteuert. Diese LSA wurden durch eine Erweiterung des Rahmenplans in die

		vorhandener Rahmenplan	vorhandene Steuerungslogik	eigener Rahmenplan	eigene Steuerungslogik	VVA-Steuerung
1	Albersloher Weg-Nord	X	X			
2	Albersloher Weg-Süd	+ Ergänzung	+ Ergänzung			
3	Königsallee	X			X	X
4	Herner Straße	X	X			
5	Stader Straße	X	X		X	X
6	Hauptstraße			X	X	X
7	Eickeler Straße			X	X	
8	Brehmstraße/Lindemannstraße	X	X			
9	Kettwiger Straße/Kruppstraße	X	X			
10	Bonnstraße	X	X			

Tab. 8.7: In der Simulation verwendete Steuerungen

Koordinierung einbezogen. Es wurden für diese LSA neue verkehrabhängige Steuerungen entwickelt, deren Koordinierungszeitpunkte am Rahmenplan orientiert sind.

Zur Untersuchung des Verhaltens der beiden Steuerungsverfahren wurden die Straßenzüge unter verschiedenen Verkehrssituationen beobachtet. Der Grundzustand der Verkehrsbelastung waren die Verkehrsdaten der Spitzenstunde, die in den Messungen oder durch historische Verkehrszählungen gesammelt wurden. Diese Belastungen wurden für die Entwicklung der Koordinierungen verwendet und liegen der Kalibrierung zugrunde. In den folgenden Simulationen wird dieser Verkehrszustand als 100 % bezeichnet. Die Verkehrsdaten der einzelnen Straßenzüge sind im Anhang 5 dargestellt.

Diese Verkehrsbelastung stellt nur einen Ausschnitt der möglichen Belastungen dar. Deswegen wurden die Verkehrsbelastungen variiert. Die vorhandenen Verkehrsdaten wurden dabei um 50 % reduziert und erhöht. Sollte eine Erhöhung der Verkehrsbelastung bis 150 % nicht möglich sein, wurde bis zur maximal möglichen Belastung simuliert. Dabei wurde die Verkehrsbelastung konstant, über eine Simulationsdauer von zwei Stunden, generiert. Bei diesen Simulationen wurden die Verkehrsbelastungen aller Zuflüsse im gleichen Verhältnis geändert.

Um auch eine Verschiebung der Verkehrsbeziehungen zu berücksichtigen, wurden gesondert nur die Verkehrsbelastungen der Hauptrichtung und der Nebenrichtungen verändert. Dabei wurden die am ersten und letzten Knotenpunkt des Straßenzuges in Koordinierungsrichtung einfallenden Ströme als Hauptrichtung angenommen. Die nicht veränderten Zuflüsse blieben, soweit nicht anders angegeben

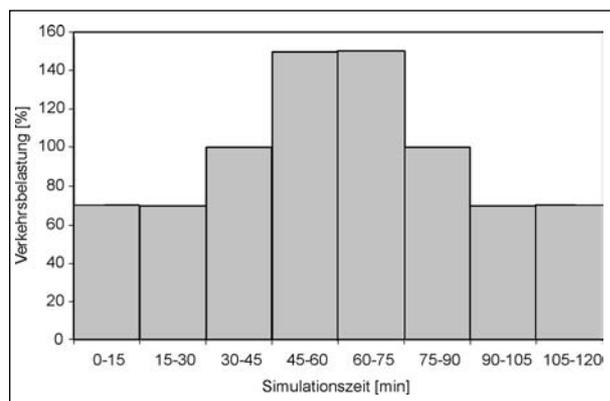


Bild 8.2: Beispiel der Änderung der Verkehrsbelastung in der Spitzenstunde

auf einem Niveau von 100 %. Bei diesen Simulationen wurde der PI jeweils für die gesamte Simulationsdauer ausgewertet.

Außerdem wurde eine Spitzenstunde simuliert. Dabei wurde die Verkehrsbelastung nach Bild 8.2 während eines Simulationslaufes von zwei Stunden variiert. Es wurde eine Vorlaufzeit bei schwacher Verkehrsbelastung simuliert. Anschließend wurde die Verkehrsbelastung über eine Zwischenstufe gesteigert und schließlich wurde der Straßenzug über einen Zeitraum von 30 Minuten sehr hochbelastet. Die Belastung baute sich nach dem überlasteten Zeitraum wieder stufenweise ab. So wurde eine realistische Abbildung einer Spitzenstunde dargestellt. Der Performance Index wurde schließlich in 15-Minuten-Intervallen ausgewertet, um die verkehrliche Wirkung der Steuerungsverfahren in den verschiedenen Belastungszuständen vergleichen zu können.

8.3.1 Albersloher Weg-Nord (MS)

Das Teilstück Nord des Albersloher Weges ist durchgehend verkehrabhängig gesteuert. Die einzelnen LSA dieses Straßenzuges sind durch einen Rahmenplan koordiniert. Wie in Kapitel 8.1.2 beschrieben, wurden Vereinfachungen der Steuerungslogiken vorgenommen, um eine Umsetzung zu gewährleisten. Der Rahmenplan der verkehrabhängigen Steuerung (VA) wurde als Festzeitsteuerung (FZ) für den Vergleich der beiden Steuerungsarten herangezogen. Der Besetzungsgrad der ÖPNV-Fahrzeuge wurde nach den Angaben der ÖPNV-Betriebe mit 44 Personen/Fzg im Mittel angenommen.

In Bild 8.3 und 8.4 wird deutlich, dass sich die VA- und die FZ-Steuerung in ihrer verkehrlichen Wirkung, bei gleichmäßiger Erhöhung der Verkehrs-

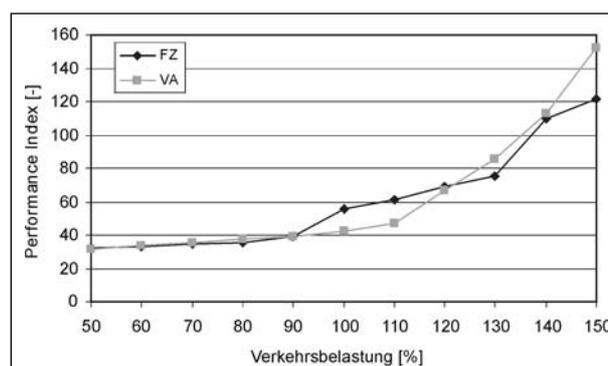


Bild 8.3: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Albersloher Weg-Nord)

stärken aller Richtungen, erst ab einer Verkehrsbelastung von 100 % unterscheiden. Bei niedriger Verkehrsbelastung ist der PI annähernd gleich. Bei einer Belastung von 100-110 % reduziert die Verkehrsabhängigkeit den PI um ca. 23 %. Im stark belasteten Bereich (130-150 %) ist jedoch der PI der FZ-Steuerung niedriger. In Bild 8.4 ist zu sehen, dass die Unterschiede in der Verkehrsqualität im Wesentlichen durch den IV verursacht werden. Die Verkehrsqualität des ÖV unterscheidet sich in beiden Steuerungsverfahren nur unwesentlich. Unter hoher Belastung wirkt sich die Zufahrt von der B 51 auf den Albersloher Weg negativ aus, da hier in der VA-Steuerung besonders viele Fahrzeuge ins System kommen.

Die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte in der Hauptrichtung liegen bei der VA-Steuerung deutlich über den Werten der FZ-Steuerung (siehe Anhang 7).

Der Vorteil der verkehrsabhängigen Steuerung auf dem Albersloher Weg zeigt sich bei der Simulation einer ungleichmäßigen Änderung der Verkehrsbelastung. Bei Änderung der Verkehrsbelastung in der

Hauptrichtung und konstanter Belastung im Querverkehr (Bild 8.5) zeigt sich, dass die VA-Steuerung eine Verminderung des PI von 12 bis 28 % bewirkt. Auch bei konstanter Belastung in Hauptrichtung und Änderung der Verkehrsstärke in Querrichtung wird in einem Bereich von 90-130 % eine deutliche Reduzierung des PI erreicht (siehe Bild 8.6).

Bei der Simulation einer Spitzenstunde (siehe Bild 8.7) liegt die Verkehrsqualität in der Simulationszeit von 0 bis 60 Minuten ungefähr auf demselben Niveau. Im hochbelasteten Intervall (60-90 min) ist die Verkehrsqualität der FZ-Steuerung höher. In der Phase des Belastungsabbaus (90-120 min) wirkt sich die Verkehrsabhängigkeit jedoch positiv auf die Verkehrsqualität aus. Der PI wird hier um 22 und 40 % verringert.

Unter gleichmäßiger Änderung der Verkehrsstärken ergeben sich auf dem Albersloher Weg-Nord keine Vorteile durch die VA-Steuerung. Bei Änderung der Verkehrsbeziehungen und im Belastungsabbau wirkt sich die Verkehrsabhängigkeit jedoch positiv auf die Verkehrsqualität aus.

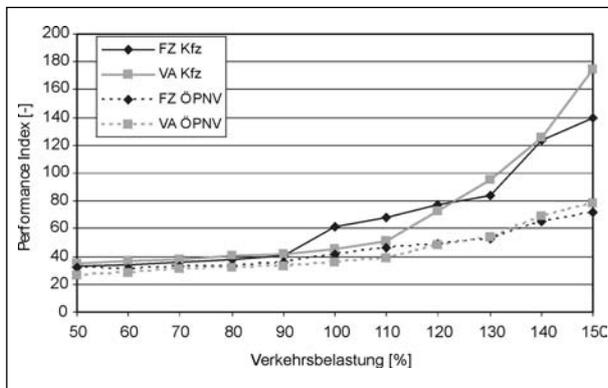


Bild 8.4: Performance Index des IV und ÖV bei Änderung der Verkehrsbelastung (Albersloher Weg-Nord)

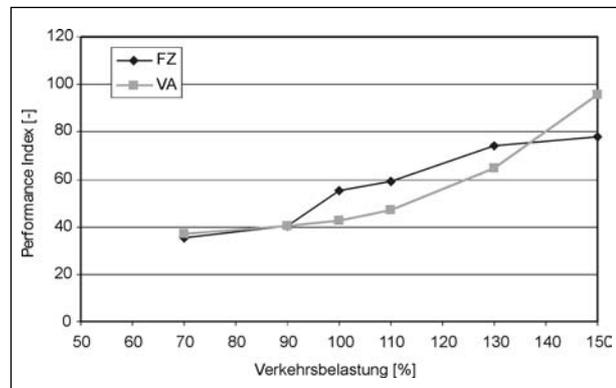


Bild 8.6: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung in der Nebenrichtung (Albersloher Weg-Nord)

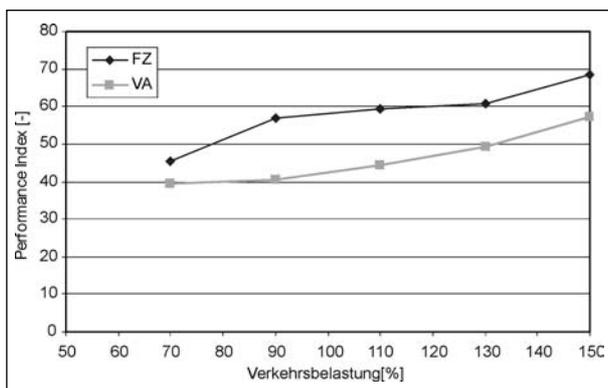


Bild 8.5: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung in der Hauptrichtung (Albersloher Weg-Nord)

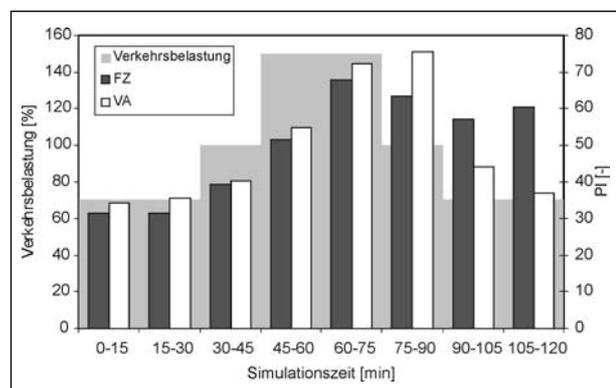


Bild 8.7: Performance Index in 15 min Intervallen bei Simulation einer Spitzenstunde (Albersloher Weg-Nord)

8.3.2 Albersloher Weg-Süd (MS)

Das VISSIM-Simulationsmodell wurde von der Stadt Münster zur Verfügung gestellt. Es kann unverändert für diese Untersuchung verwendet werden. Das Teilstück Süd des Albersloher Wegs ist nicht durchgehend koordiniert. Die südlichsten fünf LSA sind freilaufend verkehrabhängig gesteuert. Um eine einheitliche Steuerung für den Vergleich zwischen FZ- und VA-Steuerung zu erhalten, wer-

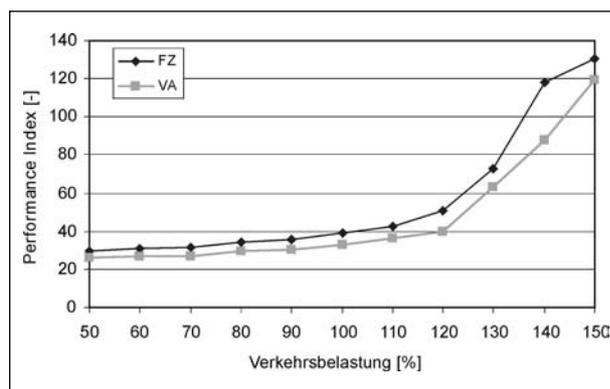


Bild 8.8: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Albersloher Weg-Süd)

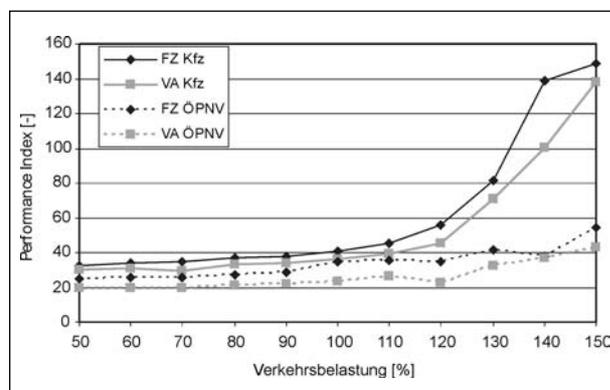


Bild 8.9: Performance Index des IV und ÖV bei Änderung der Verkehrsbelastung (Albersloher Weg-Süd)

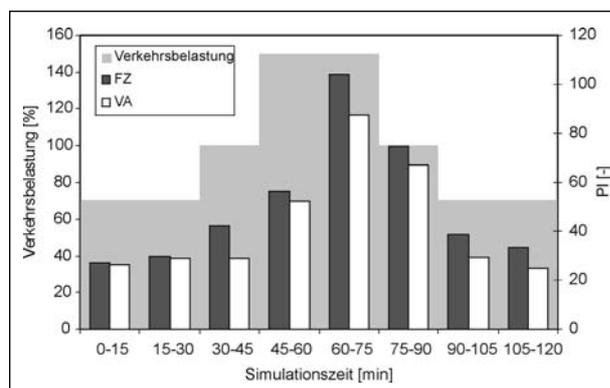


Bild 8.10: Performance Index in 15-Min-Intervallen bei Simulation einer Überlastung (Albersloher Weg-Süd)

den auch diese LSA mit in die vorhandene Koordination eingebunden. Für die übrigen, bereits koordinierten LSA wird der Rahmenplan als Festzeitkoordination für den Vergleich verwendet. Auf dem Albersloher Weg-Süd wurde ein mittlerer Besetzungsgrad der Busse mit 44 Personen angesetzt. Basierend auf diesem Besetzungsgrad wurde der Performance Index errechnet, der in Bild 8.8 dargestellt ist. Es wird deutlich, dass der PI der VA-Steuerung bis zu einer Verkehrsbelastung von 110 % um 12 bis 15 % geringer ist als der PI der FZ-Steuerung. Bei einer höheren Belastung steigert sich diese Reduzierung auf 15 bis 25 %. Bei gesonderter Betrachtung des IV und des ÖV (Bild 8.9) ist zu erkennen, dass die Verkehrsabhängigkeit dem ÖPNV eine konstante Steigerung der Verkehrsqualität um ca. 20 % bringt. Der Kfz-Verkehr wird besonders bei hoher Belastung durch die Verkehrsabhängigkeit begünstigt.

Bei Änderung der Belastungen in der Hauptrichtung bewirkt die Verkehrsabhängigkeit eine Reduzierung des PI um 3 bis 22 %. Die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte in der Hauptrichtung können um bis zu 25 % gesenkt werden. Bei Änderung der Verkehrsbelastungen in der Querrichtung wird eine Reduzierung des PI um 11 bis 16 % erreicht. Auch die Verlustzeiten und Halte werden durch die Verkehrsabhängigkeit gesenkt (siehe Anhang 8).

In der Simulation einer Spitzenstunde wirkt sich die Verkehrsabhängigkeit auf dem Albersloher Weg-Süd in jedem Zeitintervall positiv auf die Verkehrsqualität aus (siehe Bild 8.10). Die Reduzierung des Performance Index durch die VA-Steuerung variiert von 3 bis 30 %. Die Verkehrsabhängigkeit wirkt sich auf die Verkehrsqualität des IV und des ÖV positiv aus.

8.3.3 Königsallee (BO)

Das VISSIM-Netzmodell der Königsallee wurde vom Auftragnehmer erstellt. Die Grundlage dafür waren die Lagepläne der Knotenpunkte und die Signalplandaten, die von der Stadt Bochum zur Verfügung gestellt wurden. Der mittlere Besetzungsgrad der Busse wird mit 25 Personen angesetzt. Dies entspricht den Erfahrungen der Boge-stra auf diesem Streckenabschnitt.

Die Koordination auf der Königsallee ist nach dem Verfahren festzeitgesteuerte Grüne Welle geschaltet. Um eine Vergleichsmöglichkeit zu schaffen, wurden verkehrabhängige Steuerungslogiken ent-

wickelt, die als Rahmenplan die vorhandene Festzeitkoordinierung verwenden.

Bei Variation der Verkehrsbelastung über den gesamten Simulationszeitraum konnten keine deutlichen Unterschiede im PI der Steuerungsverfahren VA und FZ ermittelt werden (siehe Bild 8.11). Die verkehrsabhängige Steuerung bringt leichte Verbesserungen ab einer Verkehrsbelastung über 110 %. In der Haupttrichtung zeigt sich bei der FZ-Steuerung ein starker Anstieg der Verlustzeiten und Halte in Fahrtrichtung Nord (siehe Anhang 9) ab einer Verkehrsbelastung von 140 %, der sich geringfügig im PI niederschlägt.

Auf der Königsallee wurde zusätzlich die vollverkehrsabhängige Steuerung ohne Rahmenzeitplan (VVA) untersucht. In Bild 8.11 wird deutlich, dass dieses Steuerungsverfahren zu einer deutlich geringeren Verkehrsqualität im Gesamtnetz führt. Ebenso sind die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte in der koordinierten Haupttrichtung deutlich höher als bei den Steuerungen, die durch einen Rahmenzeitplan koordiniert sind (siehe Anhang 9).

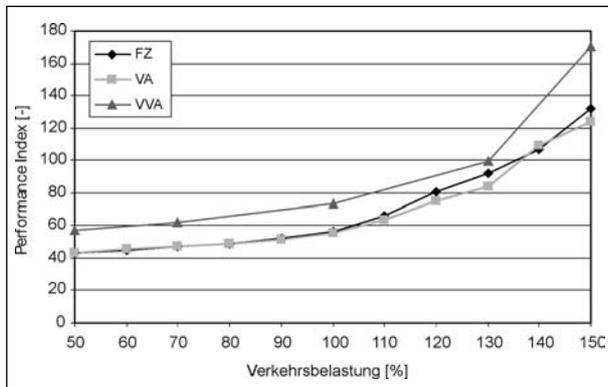


Bild 8.11: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Königsallee)

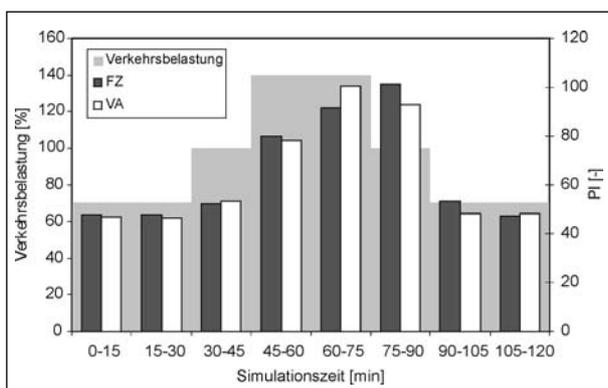


Bild 8.12: Performance Index in 15-Min-Intervallen bei Simulation einer Überlastung (Königsallee)

Auch bei ausschließlicher Änderung der Verkehrsbelastung in Haupttrichtung oder den Nebenrichtungen ergeben sich keine deutlichen Unterschiede im Performance Index und den Verlustzeiten und Halten bei den Steuerungsverfahren VA und FZ. Die Auswertungen dazu sind im Anhang 9 dargestellt.

In Bild 8.12 sind die Simulationsergebnisse bei veränderlicher Verkehrsbelastung im Simulationszeitraum dargestellt. Es zeigt sich, dass die Verkehrsqualität beider Steuerungsverfahren in den schwach belasteten Intervallen (0-45 min und 105-120 min) annähernd gleich ist. Im Intervall der Belastungssteigerung (60-75 min) produziert die verkehrsabhängige einen ca. 10 % höheren PI. Im höchstbelasteten Intervall (75-90 min) und im Zeitbereich des Belastungsabbaus (90-105 min) reduziert die VA-Steuerung den PI um ca. 9 %.

Auf der Königsallee zeigt sich, dass die VA-Steuerung im Vergleich zur FZ-Steuerung in den Zeiträumen der hohen Belastung und des Belastungsabbaus Vorteile erzeugt. Bei konstanter Belastung über den gesamten Simulationszeitraum ist die Verkehrsqualität beider Steuerungen annähernd gleich.

8.3.4 Herner Straße (BO)

Die Herner Straße wurde in einer Diplomarbeit [PAßGANG, 2006] untersucht. In dieser Arbeit wurde das VISSIM-Netzmodell der Herner Straße erstellt. Die Koordinierung der Herner Straße wurde in der Diplomarbeit durch die Entwicklung und den Vergleich zahlreicher Steuerungsvarianten untersucht.

Das Simulationsmodell wird für die weitere Untersuchung übernommen. In diesem Vergleich wird die aktuell vorhandene verkehrsabhängige Steuerung

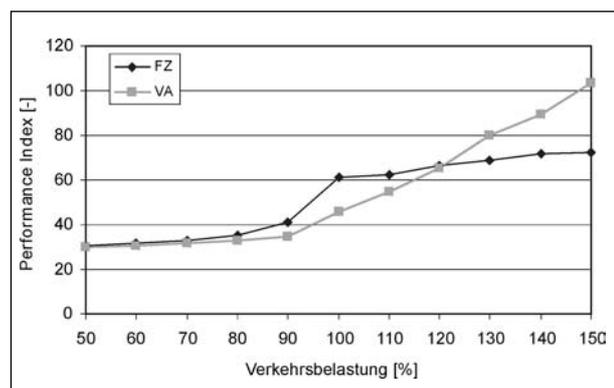


Bild 8.13: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Herner Straße)

rung verwendet, deren Rahmenzeitplan die Festzeitsteuerung für den Vergleich darstellt. Die nördlichsten zwei LSA sind in der Realität festzeitgesteuert. In der o. g. Diplomarbeit wurden für diese LSA verkehrsabhängige Steuerungen entwickelt, deren Koordinierungszeitpunkte durch die Festzeitkoordinierung bestimmt sind.

Bei einer Verkehrsbelastung unter 80 % erzeugen beide Steuerungsverfahren eine ähnliche Verkehrsqualität (Bild 8.13). Bei Variation der Verkehrsbelastung von 90 bis 120 % ist der PI der verkehrsabhängigen Steuerung niedriger. Bei einer höheren Belastung kehrt sich dieses Verhältnis um und die FZ-Steuerung produziert die besseren Ergebnisse. Die schlechteren Ergebnisse der VA-Steuerung sind darin begründet, dass durch die Verkehrsabhängigkeit am ersten Knotenpunkt mehr Fahrzeuge Eingang ins System finden als bei der Festzeitsteuerung. Die stark belasteten Fahrtrichtungen, die in den Straßenzug einbiegen, fordern Grünzeitverlängerungen an. Dadurch wird zwar die Verkehrsqualität dieses Knotenpunktes gesteigert, der

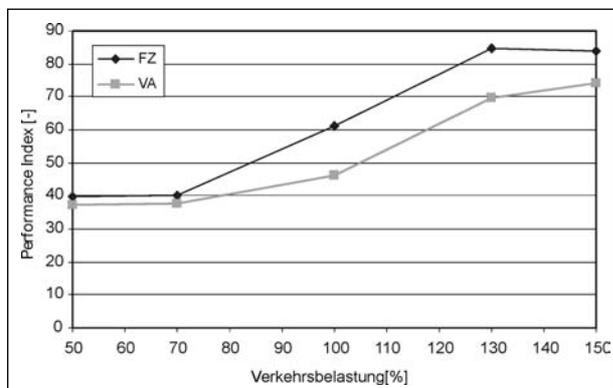


Bild 8.14: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung in der Haupttrichtung (Herner Straße)

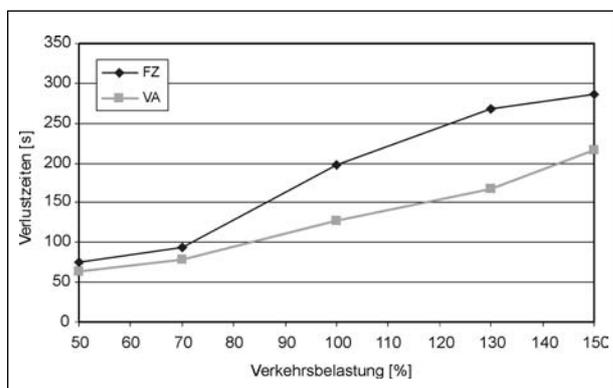


Bild 8.15: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung in den Nebenrichtungen (Herner Straße)

gesamte Straßenzug wird jedoch durch das höhere Verkehrsaufkommen in nördlicher Richtung benachteiligt. Bei Verschiebung der Verkehrsbeziehungen reduziert die Verkehrsabhängigkeit den Performance Index deutlich.

In Bild 8.14 und 8.15 wird deutlich, dass bei ausschließlicher Änderung der Verkehrsbelastung in Haupttrichtung oder den Nebenrichtungen die Verkehrsabhängigkeit in jedem Fall den niedrigeren PI aufweist. Der PI wird um 5-25 % reduziert. Auch die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte in den Haupttrichtungen werden durch die Verkehrsabhängigkeit reduziert (siehe Anhang 10).

In Bild 8.16 sind die Simulationsergebnisse bei veränderlichen Belastungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Verkehrsqualität beider Steuerungsarten in der Überlastung und im schwach belasteten Intervall nahezu gleich ist. In den Intervallen, in denen sich die Verkehrssituation ändert (45-60 min und 75-105 min) ist der PI bei der VA-Steuerung jedoch wesentlich geringer als bei der Festzeitsteuerung.

Auf der Herner Straße konnten besonders bei ungleichmäßiger Veränderung der Verkehrsbelastung durch die verkehrsabhängige Steuerung Vorteile in der verkehrlichen Wirkung erreicht werden. Wenn sich nur die Belastungen in Haupttrichtung oder den Nebenrichtungen ändern, ist die Verkehrsqualität der VA-Steuerung in jedem Fall höher. Bei gleichmäßiger Erhöhung der Verkehrsstärken in allen Richtungen ergeben sich Nachteile bei der Verkehrsabhängigkeit unter hohen Belastungen. In der Simulation einer Spitzenstunde konnten Vorteile der VA-Steuerung in den Zeiträumen der Änderung der Belastungen festgestellt werden.

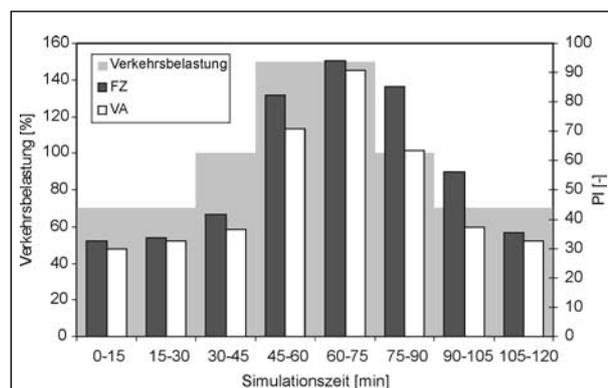


Bild 8.16: Performance Index in 15-Min-Intervallen bei Simulation einer Überlastung (Herner Straße)

8.3.5 Stader Straße (BUX)

Das Simulationsmodell der Stader Straße in Buxtehude wurde von einem Ingenieurbüro im Rahmen einer Untersuchung des Straßenzuges erstellt. Die Steuerungslogiken der verkehrsabhängigen Steuerung wurden den Planungsunterlagen entnommen und in VISSIM umgesetzt. Die verkehrsabhängige Steuerung beruht in der Planung auf einer optimierten Festzeitkoordinierung, die für diesen Vergleich übernommen wurde.

Die Verkehrsbelastungen der Spitzenstunde, die den Planungen zugrunde liegen, sind bereits so hoch, dass eine Steigerung auf 150 % nicht möglich ist. Die Verkehrsbelastungen werden bis 120 % erhöht, da bei einer höheren Belastung der Verkehr völlig zum Erliegen kommt. Eine Besonderheit auf diesem Straßenzug ist, dass die Verkehrsbelastungen der in die Hauptrichtung einbiegenden Ströme sehr hoch sind.

In Bild 8.17 wird deutlich, dass die Performance-Indizes der VA- und FZ-Steuerungen bis zu einer Belastung von 90 %, bei gleichmäßiger Erhöhung

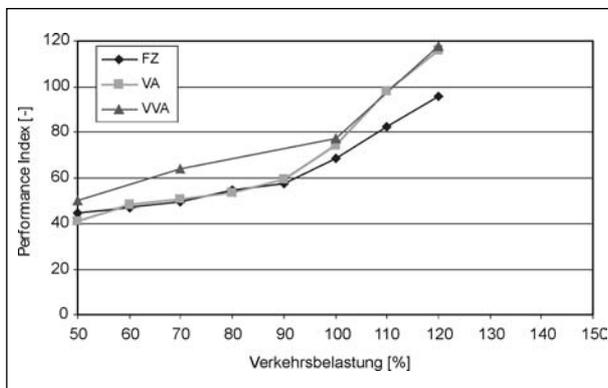


Bild 8.17: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Stader Straße)

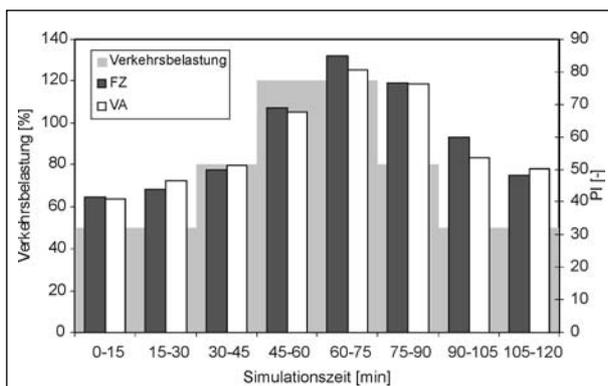


Bild 8.18: Performance Index in 15-Min-Intervallen bei Simulation einer Überlastung (Stader Straße)

in allen Richtungen, einen ähnlichen Verlauf nehmen. Bei einer höheren Belastung jedoch wird der PI der VA-Steuerung schlechter als bei der FZ-Steuerung. Die VVA-Steuerung wirkt sich bei schwacher Verkehrsbelastung (unter 90 %) negativ auf die Verkehrsqualität aus. Bei einer hohen Belastung ist der PI jedoch auf einem ähnlichen Niveau wie bei der VA-Steuerung. Die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte in der koordinierten Hauptrichtung sind beim Verfahren VVA deutlich höher als bei den anderen Steuerungsverfahren.

Auf der Stader Straße zeigen sich die Nachteile einer verkehrsabhängigen Steuerung, wenn sie zu sehr auf die Hauptrichtung ausgelegt ist. Der höhere PI unter hohen Verkehrsbelastungen resultiert hauptsächlich aus der Benachteiligung der einbiegenden Verkehrsströme. Diese haben auf dem Straßenzug eine hohe Bedeutung und deswegen wirkt sich eine schlechtere Qualität dieser Verkehrsströme besonders auf die Qualität des gesamten Netzes aus.

Die Qualität der koordinierten Richtung ist unter schwacher Verkehrsbelastung bei dem Verfahren VA geringer als bei der FZ-Steuerung. Dies resultiert allerdings in einer ebenso guten Verkehrsqualität im gesamten Netz. Bei höherer Verkehrsbelastung fordert die koordinierte Hauptrichtung mehr Grünzeit und steigert ihre Qualität im Vergleich zur FZ-Steuerung. Gleichzeitig nimmt jedoch die Verkehrsqualität im gesamten Netz im Vergleich zur FZ-Steuerung ab (siehe Anhang 11).

Dies wird auch bei Änderung der Verkehrsbeziehungen deutlich. Hier wird durch die VA-Steuerung eine höhere Qualität in koordinierter Richtung erreicht. Die gesamte Verkehrsqualität des Straßennetzes ist jedoch bei der Festzeitsteuerung höher (siehe Anhang 11).

Bei der Simulation einer Spitzenstunde (siehe Bild 8.18) wird deutlich, dass die verkehrsabhängige Steuerung nur in zwei Intervallen eine Verbesserung gegenüber der FZ-Steuerung bringt. Im höchstbelasteten Intervall von 60-75 min ist der PI der VA-Steuerung 5 % geringer als bei der FZ-Steuerung. Im Intervall von 90-105 min bringt die VA-Steuerung eine Verbesserung von 10 %. In den gering belasteten Intervallen ist der PI der beiden Steuerungsarten annähernd gleich.

8.3.6 Hauptstraße (HER)

Das VISSIM-Netzmodell wurde in einer Studienarbeit bei der Stadt Herne [OLDACH, 2005] erstellt. Die Festzeitkoordinierung des Straßenzuges wurde in einer Diplomarbeit [KUHLMANN, 2005] erarbeitet. Da die Stadt Herne mit der Planungssoftware P2 arbeitet, wurde auch die Festzeitkoordinierung damit entwickelt. Für den Vergleich der Festzeitsteuerung mit der verkehrsabhängigen Steuerung wurde allerdings eine optimierte Festzeitsteuerung mit AMPEL-K als Rahmenplan zugrunde gelegt. Diese Festzeitsteuerung brachte eine wesentlich höhere Verkehrsqualität als die mit P2 geplante Steuerung (siehe Tabelle 8.6). Aufbauend auf den so festgelegten Koordinierungszeitpunkten wurden verkehrsabhängige Steuerungslogiken entwickelt, die sich an den gebräuchlichen Steuerungen orientieren.

Zur Bestimmung des Performance Index wurden bei dem ÖPNV-Betrieb die durchschnittliche Besetzung der Fahrzeuge pro Fahrt erfragt. Als mittleren Werte werden für die Straßenbahnen 14 Personen und für die Busse 25 Personen angesetzt.

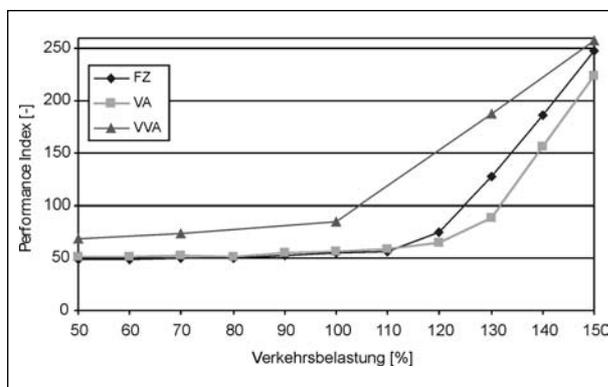


Bild 8.19: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Hauptstraße)

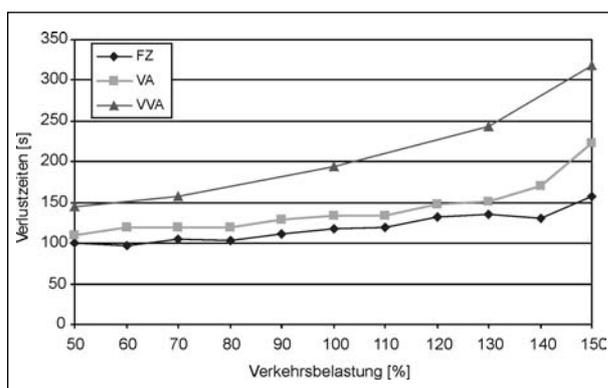


Bild 8.20: Verlustzeiten in Hauptrichtung bei Änderung der Verkehrsbelastung (Hauptstraße)

In Bild 8.19 ist zu sehen, dass der PI der Steuerungsverfahren VA und FZ bis zu einer Verkehrsbelastung von 110 % nahezu identisch verläuft. Der PI steigt im schwach belasteten Bereich nur unwesentlich an. Bei einer höheren Belastung liegt der PI der Festzeitsteuerung 10 bis 30 % über dem PI der verkehrsabhängigen Steuerung. Das Steuerungsverfahren VVA bringt eine deutlich geringere Verkehrsqualität als die beiden anderen Steuerungsverfahren. Lediglich im Bereich der Überlastung (150 %) ist der PI auf einem Niveau mit der FZ-Steuerung.

Bild 8.20 verdeutlicht, dass sich die Verlustzeiten in Hauptrichtung gegensätzlich zu dem PI des gesamten Straßenzuges verhalten. Die Verlustzeiten in Hauptrichtung liegen bis zu einer Belastung von 120 % beim Verfahren VA um ca. 10-15 % höher als beim Verfahren FZ. Bei höherer Belastung steigt diese Differenz auf 29 und 41 %. Die VVA-Steuerung erzeugt deutlich höhere Verlustzeiten als die anderen untersuchten Verfahren.

Bei Änderung der Belastungen in den Nebenrichtungen zeigt sich ein leichter Vorteil der VA-Steuerung unter hohen Belastungen. Bei Änderung der Belastung in Hauptrichtung zeigt sich beim PI kein wesentlicher Unterschied in der Wirkung der Steuerungsverfahren. Bei beiden Simulationen liegen die Verlustzeiten in Hauptrichtung beim Verfahren VA ca. 10-15 % über denen der FZ-Steuerung. Bei der Anzahl der Halte in der Hauptrichtung ergeben sich für beide Steuerungsverfahren keine nennenswerten Unterschiede (siehe Anhang 12).

Die Simulation der Spitzenstunde (Bild 8.21) zeigt, dass die Verkehrsqualität beider Steuerungsverfahren in den meisten Intervallen auf demselben Niveau ist. In einem Intervall (75-90 min) reduziert die Verkehrsabhängigkeit den PI um 9 %. Hierbei han-

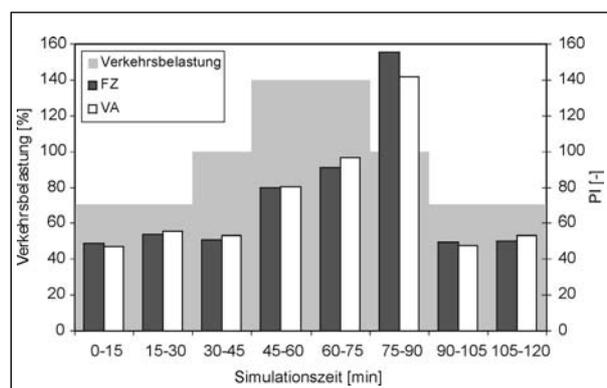


Bild 8.21: Performance Index in 15-Min-Intervallen bei Simulation einer Überlastung (Hauptstraße)

delt es sich um den am stärksten belasteten Zeitraum. In den schwach belasteten Zeiträumen ist die Qualität beider Steuerung gleich.

Sowohl bei konstanter Änderung der Belastung als auch in der Simulation der Spitzenstunde ergibt sich auf der Hauptstraße eine höhere Verkehrsqualität der VA-Steuerung unter einer hohen Verkehrsbelastung. Bei schwacher Belastung ist die Wirkung der Steuerungsverfahren auf die Verkehrsqualität annähernd gleich.

8.3.7 Hauptstraße/Eickeler Straße (HER)

Auch das Simulationsmodell des Straßenzuges Hauptstraße/Eickeler Straße wurde in der o. g. Studienarbeit [OLDACH, 2005] erstellt. Die Festzeitkoordinierung wurde wie auf der Hauptstraße in einer Diplomarbeit [KUHLMANN, 2005] entwickelt. Auf diesem Straßenzug führte die in AMPEL-K optimierte Festzeitsteuerung zu einer besseren Verkehrsqualität (siehe Tabelle 8.6). Deswegen wurde für den Vergleich der VA- und FZ-Steuerung die optimierte Festzeitkoordinierung als Rahmenplan gewählt.

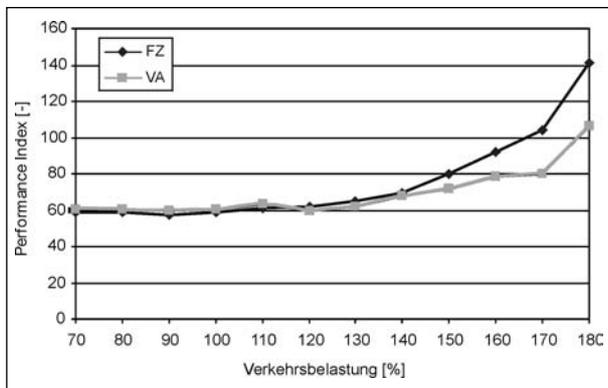


Bild 8.22: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Hauptstr./Eickeler Str.)

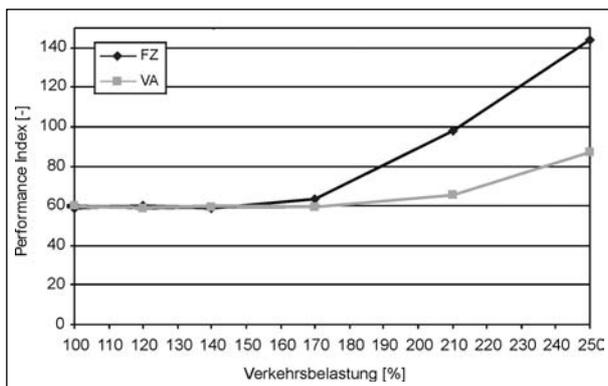


Bild 8.23: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung in Haupttrichtung (Hauptstr./Eickeler Str.)

Der Besetzungsgrad für die ÖPNV-Fahrzeuge wird genau so wie in Kapitel 8.3.6 gewählt, da dieser Wert vom ÖPNV-Betrieb für den gesamten Straßenzug angegeben wurde.

Bei der Simulation verschiedener Verkehrsbelastungen wird deutlich, dass der Straßenzug noch deutliche Reserven in der Kapazität hat. Deswegen wird die Verkehrsbelastung schrittweise bis auf 180 % erhöht. Dabei ist festzustellen, dass die VA- und FZ-Steuerungen bis zu einer Belastung von 110 % die gleiche Verkehrsqualität erzeugen (siehe Bild 8.22). Bei höherer Verkehrsbelastung wird der PI durch die Verkehrsabhängigkeit stark reduziert. Der Verlauf der Verlustzeiten und Halte in der Haupttrichtung ist annähernd parallel, die VA-Steuerung weist jedoch geringfügig bessere Werte auf (siehe Anhang 13).

Bei verschobenen Verkehrsbeziehungen ergibt sich auf der Hauptstraße/Eickeler Straße ein ähnliches Bild. Bei schwacher Belastung ist die Verkehrsqualität beider Steuerungen auf einem ähnlichen Niveau. Bei starker Belastung wird der PI durch die VA-Steuerung deutlich reduziert (Bild 8.23). Bei Änderung der Verkehrsbelastung in Haupttrichtung reduziert die Verkehrsabhängigkeit die Verlustzeiten und Halte in Haupttrichtung bei hoher Belastung. Ein ähnlicher Zusammenhang zeigt sich auch bei ausschließlicher Änderung der Nebenrichtungen (siehe Anhang 13). Auch hier werden die Verlustzeiten und Anzahl der Halte durch die Verkehrsabhängigkeit reduziert.

Die Simulation der Spitzenstunde (Bild 8.24) bestätigt, dass die Verkehrsabhängigkeit im hochbelasteten Zeitraum (Intervall 60-75 min) eine Reduzierung des PI bewirkt. Der PI wird um über 30 % reduziert. Aber auch in den Übergangszeiträumen (Intervalle 45-60 und 75-90 min) zeigt sich ein Vor-

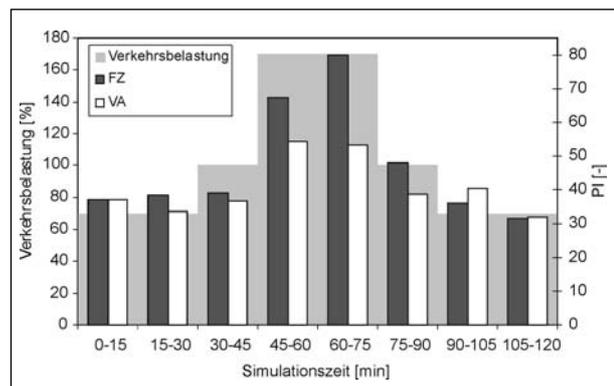


Bild 8.24: Performance Index in 15-Min-Intervallen bei Simulation einer Überlastung (Hauptstr./Eickeler Str.)

teil der VA-Steuerung. In den schwach belasteten Intervallen ist die Verkehrsqualität beider Steuerungsverfahren annähernd auf gleichem Niveau. Auf dem Straßenzug Hauptstraße/Eickeler Straße zeigt sich, dass die Verkehrsabhängigkeit besonders bei hoher Verkehrsbelastung Vorteile gegenüber der Festzeitsteuerung bringt. Bei schwacher Verkehrsbelastung erzeugen beide Steuerungsverfahren eine ähnliche Verkehrsqualität.

8.3.8 Brehmstraße/Lindemannstraße (D)

Der Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße wird durch eine verkehrsabhängige Steuerung gesteuert, die durch einen Rahmenzeitplan koordiniert ist. Die Steuerungslogiken wurden im Simulationsmodell, den Planungsunterlagen entsprechend, umgesetzt. Die Steuerung ist auf eine ÖPNV-Priorisierung ausgelegt. An den meisten Knotenpunkten sind aber auch Verlängerungen für den IV oder Stauabfragen vorgesehen. Die in der Simulation geschaltete Festzeitsteuerung ist der Rahmenplan, der in der Realität geschaltet würde, wenn keine Anforderungen vorhanden sind. Nach

den Angaben der Rheinbahn wurden für den mittleren Besetzungsgrad aller Straßenbahnen auf diesem Straßenzug 78 Personen pro Fahrzeug angesetzt. Um die Auswirkungen der ÖPNV-Priorisierung auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße zu verdeutlichen, werden die Performance-Indizes des IV und ÖV getrennt dargestellt.

In Bild 8.25 und 8.26 ist zu erkennen, dass sich sowohl beim gesamten PI als auch beim PI der Fahrzeugarten kein wesentlicher Unterschied in der Verkehrsqualität beider Steuerungsverfahren zeigt. Beim ÖV ist eine höhere Schwankung des PI in der VA-Steuerung unter schwacher Belastung zu beobachten. Dies ist allerdings durch die zufälligen Schwankungen und die sehr geringe Anzahl an Fahrzeugen zu erklären. Bei ausschließlicher Änderung der Verkehrsbelastung der Nebenrichtungen stellt die VA-Steuerung bei schwacher Belastung die ungünstigere Variante dar (siehe Bild 8.27). Bei einer Belastung über 100 % bringen beide Steuerungsverfahren für den IV eine ähnliche Qualität. Für den ÖV zeigt sich kein Unterschied in der Verkehrsqualität.

Bei Änderung der Verkehrsbelastungen in Haupttrichtung zeigt sich kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Steuerungsverfahren (siehe Anhang 14). In Bild 8.28 und 8.29 wird deutlich, dass die VA-Steuerung unter veränderlicher Verkehrsbelastung auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße die höhere Verkehrsqualität bringt. Im IV ist der PI beider Steuerungsverfahren im Intervall der Belastungssteigerungen (Intervall 0-75 min) zunächst gleich. Im höchstbelasteten Bereich (75-90 min) ergibt sich eine Reduzierung des PI durch die Verkehrsabhängigkeit von mehr als 20 %. Im Zeitraum des Belastungsabbaus (90-120 min) können durch die Verkehrsabhängigkeit ebenfalls Qualitätssteigerungen erreicht werden.

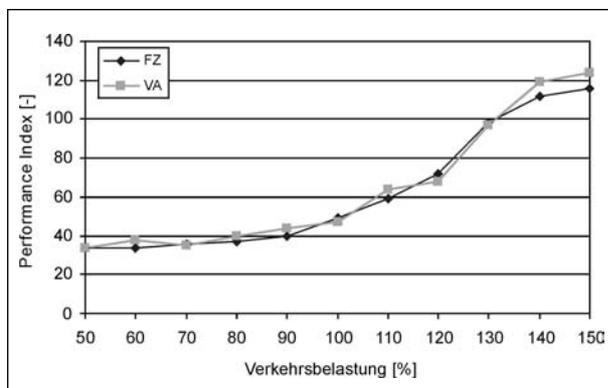


Bild 8.25: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Brehmstr./Lindemannstr.)

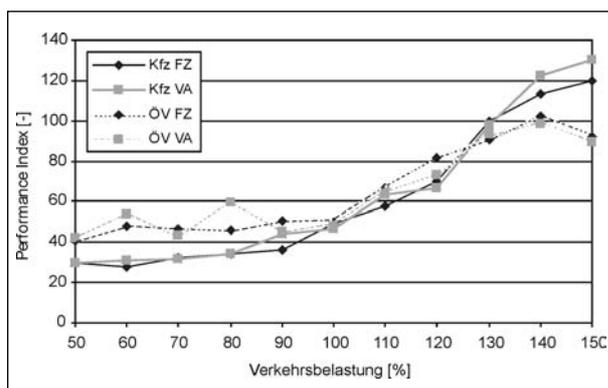


Bild 8.26: Performance Index der Fahrzeugarten bei Änderung der Verkehrsbelastung (Brehmstr./Lindemannstr.)

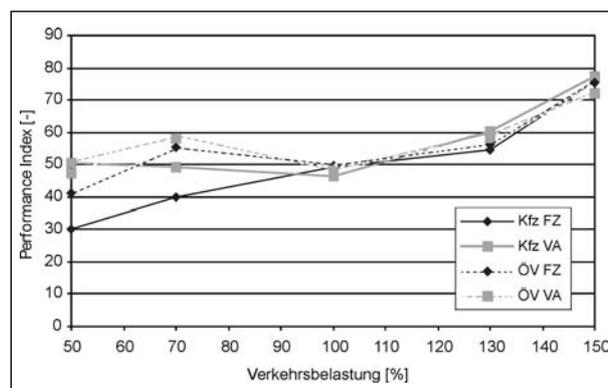


Bild 8.27: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung in der Nebenrichtung (Brehmstr./Lindemannstr.)

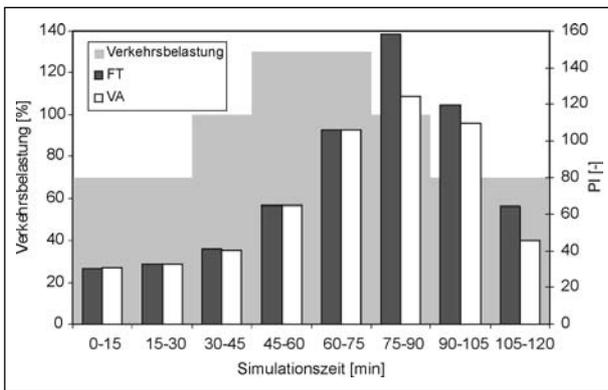


Bild 8.28: Performance Index des IV bei Simulation einer Spitzenstunde (Brehmstr./Lindemannstr.)

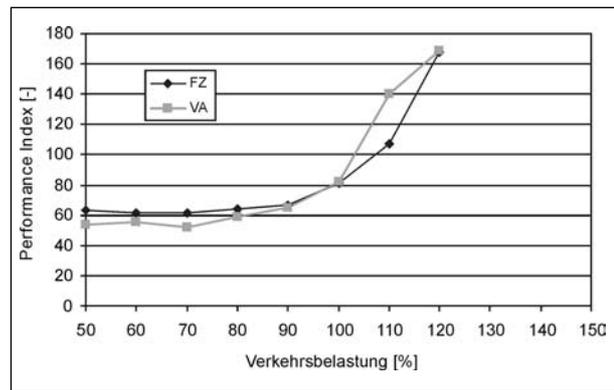


Bild 8.30: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Kettwiger Str./Kruppstr.)

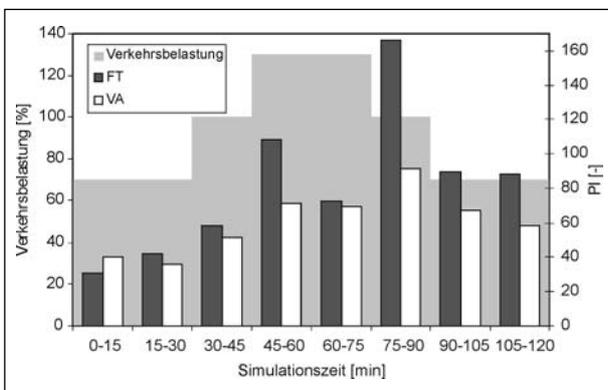


Bild 8.29: Performance Index des ÖV bei Simulation einer Spitzenstunde (Brehmstr./Lindemannstr.)

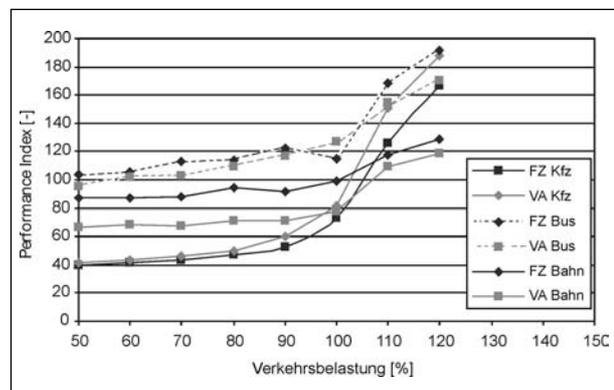


Bild 8.31: Performance Index des ÖPNV bei Änderung der Verkehrsbelastung (Kettwiger Str./Kruppstr.)

Die Verkehrsabhängigkeit auf dem Straßenzug ist vornehmlich auf die Priorisierung des ÖV ausgelegt. Es konnte bei der Simulation konstanter Verkehrsbelastungen jedoch keine Reduzierung des PI nachgewiesen werden. Bei der Simulation der Spitzenstunde zeigt sich jedoch, dass der PI des ÖPNV bei höherer Verkehrsbelastung durch die Verkehrsabhängigkeit stark reduziert wird (siehe Bild 8.29).

Auf dem Straßenzug Brehmstraße/Lindemannstraße sind bei konstanter Belastung keine Vorteile in der verkehrlichen Wirkung der VA-Steuerung festzustellen. Bei veränderlicher Belastung wirkt sich die Verkehrsabhängigkeit in den hochbelasteten Zeiträumen im IV und insbesondere auf den ÖV positiv aus.

8.3.9 Kettwiger Straße/Kruppstraße (D)

Der Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße wird durch eine verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenplan gesteuert. Die vorhandene Steuerung wurde im Simulationsmodell, den Planungsunterlagen entsprechend umgesetzt. Auf diesem Straßenzug sind fast ausschließlich Anforderungen für

ÖPNV-Fahrzeuge vorhanden. Vereinzelt sind auch Stauabfragen für den IV vorgesehen, die allerdings nur die Einfahrt eines ÖPNV-Fahrzeugs in die Haltestelle sichern sollen. Der mittlere Besetzungsgrad der Straßenbahnen wurde nach den Angaben des ÖPNV-Betriebs auf diesem Straßenzug mit 123 Personen pro Fahrzeug angesetzt. Die Busse sind im Mittel mit 25 Personen pro Fahrzeug besetzt.

Die Verkehrsbelastung ist auf dem Straßenzug bereits so hoch, dass die Belastung in der Simulation nur bis 120 % erhöht werden kann. Bei einer höheren Belastung bricht der Verkehr im System völlig zusammen.

In Bild 8.30 ist zu sehen, dass sich die Verkehrsabhängigkeit nur bei einer Belastung von 110 % negativ auf den PI auswirkt. Bei Belastungen unter 90 % ist die VA-Steuerung günstiger als die FZ-Steuerung, ansonsten ist die Qualität beider Steuerung gleich. Der ÖV profitiert sehr stark von der VA-Steuerung, während der IV durch diese Steuerung eher benachteiligt wird. Dies ist in Bild 8.31 zu sehen. Die Verkehrsabhängigkeit reduziert den PI der Straßenbahnen im nicht überlasteten Zustand

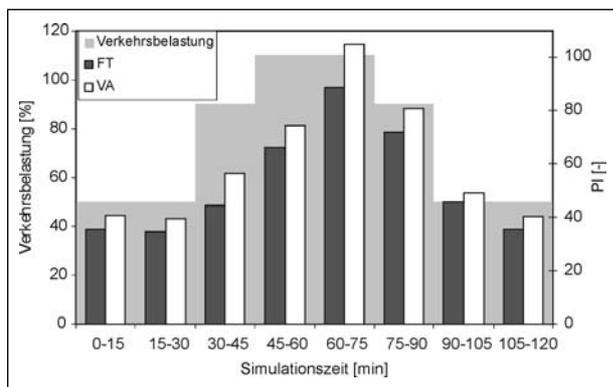


Bild 8.32: Performance Index des IV bei Simulation einer Spitzenstunde (Kettwiger Str./Kruppstr.)

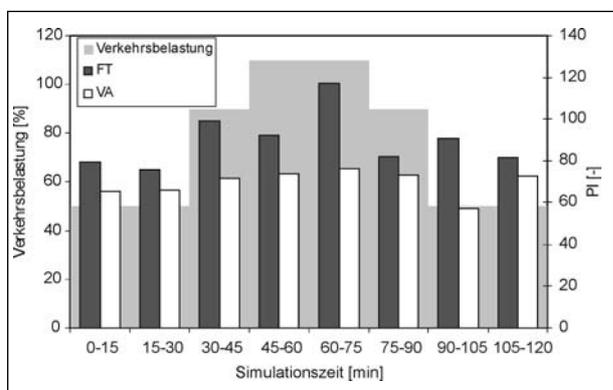


Bild 8.33: Performance Index der Straßenbahnen bei Simulation einer Spitzenstunde (Kettwiger Str./Kruppstr.)

konstant um ca. 20 %. Der PI der Busse wird um 3-10 % verringert.

Die Verlustzeiten und Anzahl der Halte des IV in Hauptrichtung liegen bis zu einer Verkehrsbelastung von 105 % auf einem Niveau. Bei einer höheren Belastung wirkt sich die VA-Steuerung ungünstiger auf die Verlustzeiten und Halte aus (siehe Anhang 15).

Bei Änderung der Verkehrsbeziehungen zeigt sich, dass die verkehrliche Wirkung beider Steuerungsarten auf den gesamten Verkehr auf einem ähnlichen Niveau ist. Auch hier wirkt sich die VA-Steuerung deutlich positiv auf die Straßenbahnen aus. Der PI der Straßenbahnen wird um ca. 20 % reduziert. Die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte in Hauptrichtung liegen bei der FZ-Steuerung konstant unter der VA-Steuerung (siehe Anhang 15).

Auch in der Simulation einer Spitzenstunde wird deutlich, dass die Verkehrsqualität des IV bei der VA-Steuerung geringer ist als bei einer FZ-Steuerung (siehe Bild 8.32). Der PI der Verkehrsabhängigkeit ist hier um 6-25 % höher als bei der FZ-Steuerung. In Bild 8.33 ist ersichtlich, dass mit dieser Verschlechterung der Qualität des IV eine Ver-

besserung der Qualität des ÖV einhergeht. Der PI wird in jedem Zeitintervall deutlich reduziert. Es werden Verbesserungen von 10-35 % erreicht.

Auf dem Straßenzug Kettwiger Straße/Kruppstraße ist die Wirkung einer ÖPNV-Priorisierung sichtbar. Die Verkehrsqualität der Straßenbahnen wird gegenüber der Festzeitsteuerung deutlich gesteigert. Dies kann jedoch nur auf Kosten der Verkehrsqualität des IV geleistet werden.

8.3.10 Bonnstraße (FRE)

Das Simulationsmodell der Bonnstraße in Frechen wurde in einer Diplomarbeit erstellt [JAKERT, 2006]. Die Steuerungsdateien der verkehrsabhängigen Steuerungen wurden von einem Ingenieurbüro zur Verfügung gestellt. Die Dateien sind in einem von dem Ingenieurbüro entwickelten Dateiformat vorhanden. Dieses Format ermöglicht den Einsatz der Steuerungsdateien, die so auch in der Realität verwendet werden, im Simulationsprogramm VISSIM.

In der o. g. Diplomarbeit wurden umfangreiche Simulationsstudien durchgeführt, in denen die vorhandene verkehrsabhängige Steuerung mit der dafür zugrunde liegenden Festzeitsteuerung und einer optimierten Festzeitsteuerung in verschiedenen Varianten verglichen wurden. Aufbauend auf diesen Studien werden für diese Untersuchung die Verkehrsbelastungen variiert und nach demselben Prinzip wie bei den anderen Untersuchungsstrecken ausgewertet.

Die Verkehrsbelastungsdaten stammen aus den Jahren 1999 und 2003. Zudem sind Prognosedaten für das Jahr 2015 vorhanden. Diese Daten wurden in der Diplomarbeit auf das Jahr 2006 umgerechnet, um einen einheitlichen Bezugszeitpunkt zu schaffen. Die Belastungsdaten werden dieser Untersuchung zugrunde gelegt. Bei der Variation der Verkehrsbelastungen werden zwei Zufahrten nicht erhöht, da diese schon im 100%-Fall überlastet sind. Da das gesamte Netz schon bei der Belastung von 100 % stark belastet ist, wird die Belastung maximal bis 120 % erhöht.

In Bild 8.34 ist zu erkennen, dass der PI ab einer Verkehrsbelastung von 100 % bei der VA-Steuerung ungünstiger ist als bei einer FZ-Steuerung. Bei Betrachtung der Verlustzeiten in der koordinierten Hauptrichtung (Anhang 16) wird deutlich, dass die VA-Steuerung die Verkehrsqualität in der Hauptrichtung erhöht. Dies geschieht durch Grünzeitver-

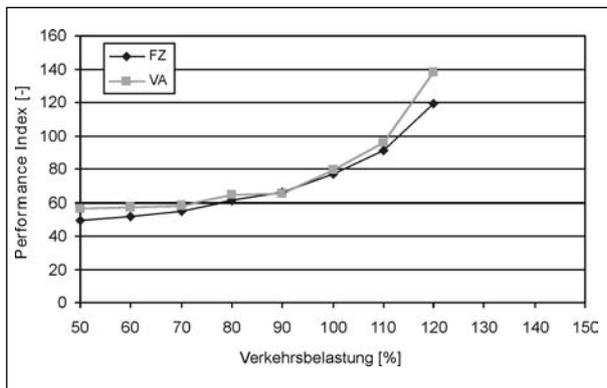


Bild 8.34: Performance Index bei Änderung der Verkehrsbelastung (Bonnstr.)

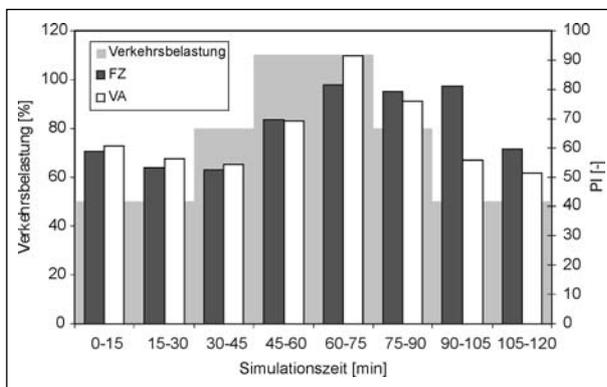


Bild 8.35: Performance Index in 15-Min-Intervallen bei Simulation einer Überlastung (Bonnstr.)

längerungen in der Hauptrichtung, was aber zur Folge hat, dass die anderen Richtungen benachteiligt werden. Insgesamt wirkt sich dieses Verhalten der Steuerung negativ auf die Verkehrsqualität des gesamten Netzes aus.

Bei Änderung der Verkehrsbeziehungen verhält sich der PI ähnlich wie bei konstanter Belastung. Unter schwacher Verkehrsbelastung ist der PI beider Steuerungsverfahren auf einem Niveau. Erhöht sich jedoch die Belastung, wird die VA-Steuerung im gesamten Netz ungünstiger.

In der Simulation der Spitzenstunde (Bild 8.35) wird deutlich, dass bei schwacher Verkehrsbelastung die Verkehrsqualität beider Steuerungen nahezu gleich ist. In dem Intervall mit der höchsten Belastung zeigt sich, dass die Verkehrsabhängigkeit einen höheren PI erzeugt. Im Auflösungszeitraum der höchsten Belastung (Intervall 90-105 min), reduziert die Verkehrsabhängigkeit den PI um über 30 %.

Auf dem Straßenzug Bonnstraße erzeugt die Verkehrsabhängigkeit bei konstanter Verkehrsbelastung keine Verbesserung der Verkehrsqualität gegenüber der Festzeitsteuerung. Unter hoher Ver-

kehrsbelastung verschlechtert sich die Qualität sogar. Bei einer veränderlichen Belastung wirkt die VA-Steuerung positiv auf den Abbau der Überlastung.

8.4 Zusammenfassung

Zur Feststellung der Güte des Simulationsprogramms und der Qualität der vorgenommenen Programmierung der Lichtsignalsteuerung wurden die fünf Straßenzüge, die durch empirische Messungen untersucht wurden, geeicht. Bei der Kalibrierung wurde festgestellt, dass das Simulationsprogramm sehr gut in der Lage ist, die in der Realität festgestellten Verkehrszustände abzubilden. Es wurden nicht nur die koordinierten Hauptrichtungen untersucht, sondern sämtliche befahrenen Routen. So ist es vereinzelt auf einigen Routen zu Abweichungen gekommen. Insgesamt wurde jedoch eine hohe Übereinstimmung der Simulation mit der Realität festgestellt.

In der Simulation wurden zunächst die vorhandenen festzeitgesteuerten Koordinierungen mit den neu optimierten Koordinierungen verglichen. Die optimierten Steuerungen wurden nach dem Prinzip der Strecken- und der Netzoptimierung entwickelt. Es zeigte sich, dass die optimierten Steuerungen in den meisten Fällen zu einer höheren Verkehrsqualität führten. Die Defizite der vorhandenen Steuerungen lagen jedoch vielmehr in der nicht ausreichenden Bemessung einzelner Knotenpunkte als in der schlechten Koordinierung des gesamten Straßenzuges. In der Simulation stellte sich heraus, dass die beiden Optimierungsvarianten (Netz- und Streckenoptimierung) eine ähnliche verkehrliche Wirkung auf das Gesamtnetz haben. Die Streckenoptimierung weist jedoch eine höhere Qualität in der koordinierten Hauptrichtung auf.

Die verkehrlichen Wirkungen der verkehrsabhängigen Steuerungen wurden mit der Wirkung der festzeitgesteuerten Koordinierungen verglichen. Dies geschah durch umfangreiche Simulationsstudien, in denen die Verkehrsbelastungen und die Verkehrsbeziehungen verändert wurden. Für jede der zehn Untersuchungsstrecken wurden diese Simulationen durchgeführt. Es wurden insgesamt 207 Simulationen verkehrsabhängiger Steuerungen mit konstanter Verkehrsbelastung durchgeführt. Dabei wurden die Anteile der Verbesserungen und Verschlechterungen der Bewertungskriterien gegenüber einer Festzeitsteuerung ermittelt.

	Besser	Gleich	Schlechter
PI	37 %	39 %	24 %
QSV nach HBS	14 %	62 %	24 %
Verlustzeiten in Haupttrichtung	41 %	19 %	40 %

Tab. 8.8: Änderung der Güte der Verkehrsqualität bei Einsatz einer verkehrshängigen Steuerung

In Tabelle 8.8 ist ein Vergleich der Festzeitsteuerung und der verkehrshängigen Steuerung dargestellt. Es wird deutlich, dass der PI, das maßgebende Bewertungskriterium des gesamten Netzes, in lediglich 37 % der untersuchten Fälle durch die Verkehrshängigkeit verbessert wurde. In 63 % der Fälle blieb der PI gleich oder wurde schlechter. Bei den Simulationen, in denen sich die Verkehrsbeziehungen änderten, war ein größerer Anteil der Verbesserungen der Verkehrsqualität zu verzeichnen. Hier führte die Verkehrshängigkeit in 45 % aller untersuchten Fälle zu einem niedrigeren PI. Gerade in diesem Untersuchungsfall ist ein Vorteil der verkehrshängigen Steuerung zu erwarten. In 20 % der untersuchten Fälle führt diese Verkehrshängigkeit jedoch auch hier zu einer Reduzierung der Verkehrsqualität.

In den Simulationen einer Spitzenstunde, in der die Verkehrsstärken in einem Simulationslauf verändert werden, wird der Vorteil der verkehrshängigen Steuerung deutlich. In jedem Intervall des Belastungsabbaus führt die Verkehrshängigkeit zu einer besseren Verkehrsqualität. Eine hohe Belastung kann demnach durch die Verkehrshängigkeit schneller wieder abgebaut werden. Es wird jedoch auch in diesen Simulationen, in den Intervallen des Belastungsaufbaus und der Belastungsspitze, nicht immer eine bessere Verkehrsqualität durch die Verkehrshängigkeit erzeugt.

Die Simulationen verdeutlichen, dass es im Bereich der geringen Verkehrsbelastungen keine deutlichen Unterschiede in der Wirkung der beiden Steuerungsverfahren gibt. In der verkehrshängigen Steuerung laufen lediglich die minimalen Grünzeiten ab und dadurch bildet sich praktisch eine Festzeitsteuerung. Sowohl bei den Verlustzeiten und der Anzahl der Halte als auch in der Betrachtung der Verkehrsqualität im gesamten Netz zeigt sich bei der verkehrshängigen Steuerung kein Vorteil. Durch eine ÖPNV-Priorisierung kann auch unter geringer Verkehrsbelastung eine bessere Verkehrsqualität des ÖPNV erreicht werden.

Unter hohen Belastungen, die im Bereich der Belastungen einer Spitzenstunde liegen, sind in den Simulationsergebnissen Vorteile der verkehrshängigen Steuerungen zu erkennen. Auf sechs Straßenzügen wird unter dieser Belastung durch die Verkehrshängigkeit der Performance Index reduziert.

Bei einer sehr hohen Verkehrsbelastung, bei der die Kapazitätsgrenzen erreicht oder überschritten werden, wirkt sich die Verkehrshängigkeit meistens negativ auf die Verkehrsqualität aus. Lediglich auf drei Straßenzügen (Hauptstraße, Eickeler Str. und Albersloher Weg-Nord) wurde eine Reduzierung des PI durch die Verkehrshängigkeit festgestellt. Die niedrigere Verkehrsqualität entsteht in der Regel dadurch, dass durch die hohe Belastung in der koordinierten Richtung die Grünzeiten voll angefordert werden und somit die Querrichtungen benachteiligt werden. Außerdem wurde beobachtet, dass hochbelastete Ströme, die in die Haupttrichtung einbiegen, ihre Grünzeit maximal ausreizen. Dadurch fließen wesentlich mehr Fahrzeuge ins System als bei der Festzeitsteuerung. Bei dieser sinkt zwar die Verkehrsqualität eines bestimmten Knotenpunktes, dies wirkt sich aber positiv auf die Verkehrsqualität des gesamten Netzes aus.

Auf Straßenzügen mit einem hohen Verkehrsaufkommen in Querrichtung zeigen sich negative Wirkungen der verkehrshängigen Steuerung auf die Verkehrsqualität. So ist besonders auf den Straßenzügen Stader Straße und Bonnstraße, die ein sehr hohes Verkehrsaufkommen in den Nebenrichtungen haben, eine negative Wirkung der Verkehrshängigkeit bei Steigerung der Belastungen zu erkennen. Die Straßenzüge in Herne und der Albersloher Weg-Süd haben dagegen ein sehr geringes Verkehrsaufkommen in der Querrichtung. Auf diesen Straßenzügen wirkt sich die Verkehrshängigkeit positiv auf die Verkehrsqualität des gesamten Netzes aus.

Bei Änderungen der Verkehrsbeziehungen wurde die Verkehrsqualität des gesamten Netzes auf vier Straßenzügen (Herner Str., Eickeler Str. und Albersloher Weg-Nord und -Süd) durch die verkehrshängige Steuerung gesteigert. Auf den übrigen Straßenzügen war die Qualität beider Steuerungen auf einem Niveau.

In den Simulationen wurde außerdem deutlich, dass auf den Straßenzügen mit ÖPNV-Priorisierung eine deutliche Steigerung der Verkehrsqualität

des ÖPNV erreicht wurde. Dies gelingt aber nur unter Inkaufnahme von Qualitätseinbußen des Individualverkehrs.

Zusätzlich zu den koordinierten Steuerungen wurden auf drei Straßenzügen (Königsallee, Stader Straße und Hauptstraße) vollverkehrsabhängige Steuerungen simuliert. Die Steuerungen orientieren sich nicht an einem Rahmenzeitplan. Es sind lediglich minimale und maximale Grünzeiten definiert. Die Grünzeiten bilden sich also vollkommen selbstständig auf Grundlage der jeweiligen Anforderungen der Zeitlückensteuerung. In den Simulationen wurde festgestellt, dass dieses Steuerungsverfahren zu einer wesentlich schlechteren Verkehrsqualität des gesamten Netzes führte als die anderen untersuchten Verfahren. Es wurde keine automatische Erzeugung einer Koordinierung durch die vollverkehrsabhängige Steuerung festgestellt. Die Anzahl der Halte in der Hauptrichtung ist in allen Simulationen höher als bei den koordinierten Steuerungen. Eine vollverkehrsabhängige Steuerung ist dementsprechend nicht für die Steuerung eines Straßenzuges geeignet.

9 Bewertung der Steuerungsverfahren nach Modellberechnungen

Neben den Simulationsstudien wurden Modellrechnungen zur Bewertung der Koordinierungsverfahren durchgeführt. Die Anwendung dieser Berechnungsverfahren ermöglicht eine Bewertung der Steuerungsverfahren ohne die Notwendigkeit eines Simulationsprogramms.

Zur Bewertung der verkehrsabhängigen Steuerung wird ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem die mittlere Grünzeit der Signalgruppen geschätzt wird. Die Berechnung der Wartezeit erfolgt schließlich nach dem Verfahren des HCM (2000), in dem die Progression der Fahrzeuge berücksichtigt wird.

Zusätzlich zu dieser Bewertung der Koordinierungen sind alle Untersuchungsstrecken in der Planungssoftware PASSER-V erfasst worden. Diese Planungssoftware ist international und besonders in den USA weit verbreitet. Mit dieser Software können Koordinierungen nach dem Verfahren des HCM (2000) geplant und bewertet werden. Dies ermöglicht einen Vergleich zwischen deutschen und internationalen Verfahren.

9.1 Bewertung der verkehrsabhängigen Steuerung

Die Bewertung verkehrsabhängiger Steuerungen erfolgte bisher nur durch die Simulation. Um jedoch auch eine Bewertung von verkehrsabhängigen Steuerungen ohne Anwendung eines Simulationsprogramms zu ermöglichen, wird im Folgenden ein Verfahren zur theoretischen Ermittlung der Qualität einer verkehrsabhängigen Steuerung vorgestellt.

Zur Ermittlung der Wartezeiten ist die Kenntnis der Grünzeiten der Signalgruppen zwingend erforderlich. Da diese bei einer verkehrsabhängigen Steuerung jedoch nicht exakt zu bestimmen sind, müssen die mittleren Grünzeiten geschätzt werden. Dies stellt das wesentliche Problem der Beurteilung einer verkehrsabhängigen Steuerung dar. Die Steuerungslogik kann je nach Vorstellung des Auftraggebers, der Arbeitsweise des Programmierers oder den örtlichen Gegebenheiten stark variieren und ist nur schwer in eine allgemeingültige Form zu abstrahieren. Es wird ein Verfahren zur Ermittlung der mittleren Grünzeiten vorgeschlagen, welches für zahlreiche Steuerungen der untersuchten Straßenzüge anwendbar ist.

Nach WU (2005) wird die mittlere Grünzeit durch folgende Gleichung geschätzt:

$$G_i = \min(\max(y_i \times C_{\text{fest}} + (1 - y_i) \times G_{e,i} - ZL_i; G_{\text{min}}), G_{\text{max}}) \quad [9-1]$$

Die Grünzeitverlängerung wird durch Gleichung [9-3] berechnet:

$$G_{e,i} = -\frac{1}{q_i} + \left(\frac{\Delta_i}{1 - \Delta_i q_i} \right) \times e^{(q_i(ZL_i - \Delta_i))} \quad [9-3]$$

Mit:

$$y_i = \frac{q_i}{s_i} = \frac{\text{Verkehrsstärke} \left[\frac{\text{Fz}}{\text{s}} \right]}{\text{Sättigungsverkehrsstärke} \left[\frac{\text{Fz}}{\text{s}} \right]} \quad [9-2]$$

$$C_{\text{Fest}} = \text{Umlaufzeit} \quad [\text{s}]$$

$$G_{\text{min}} = \text{Mindestgrünzeit} \quad [\text{s}]$$

$$G_{\text{max}} = \text{Maximalgrünzeit} \quad [\text{s}]$$

$$ZL_i = \text{Abbruchzeitlücke} \quad [\text{s}]$$

$$\Delta_i = \text{Mindestzeitlücke} \quad [\text{s}]$$

Die LSA der untersuchten Straßenzüge sind in der Regel nach dem Prinzip der Abfrage der Zeitlücken gesteuert. Dabei können sowohl die Hauptrichtung als auch die Nebenrichtung die Grünzeit aktiv ver-

längern. Die Mindest- und Maximalgrünzeiten jeder Signalgruppe sind definiert. Innerhalb dieses Rahmens können die Grünzeiten verkürzt oder verlängert werden. Bei Überschreitung der Abbruchzeitlücke wird die Grünzeit einer Richtung zugunsten der konkurrierenden Richtung abgebrochen. Zur Ermittlung der endgültigen mittleren Grünzeit werden die Grünzeitverlängerungen beider Richtungen berechnet. Die nicht benötigten Verlängerungen werden jeweils der konkurrierenden Phase zugerechnet.

Das Verfahren zur Ermittlung der mittleren Grünzeit wird für alle zweiphasigen Steuerungen oder solche Steuerungen, die als zweiphasig angenommen werden können, angewandt. Die Straßenzüge in Düsseldorf werden nicht berücksichtigt, da hier vorwiegend ÖPNV-Priorisierungen geschaltet sind. Die Steuerungen der Bonnstraße entsprechen nicht dem für das Verfahren benötigten Muster, sodass auch diese Steuerungen nicht berücksichtigt werden können.

Die mittleren Wartezeiten werden basierend auf den geschätzten mittleren Grünzeiten nach dem Verfahren des HCM (2000) durch die Gleichung [9-4] bestimmt. Das Verfahren wird gewählt, da im HBS bisher weder die Koordinierung noch die verkehrshängige Steuerung berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu wird die Wartezeit im HCM unter anderem durch einen Progressionsfaktor (PF) und einen Faktor für die Steuerungsart (k) berechnet.

$$d = d_1 \times PF + d_2 + d_3 \quad [9-4]$$

Die Wartezeit setzt sich aus drei Teilen zusammen:

d_1 = Grundwartezeit (Uniform Control Delay), aus der Sperrung durch die LSA bei gleichverteilter Ankunft der Fahrzeuge

d_2 = Zuwachswartezeit (Incremental Delay), zur Berücksichtigung der zufälligen Ankunft der Fahrzeuge und Übersättigung (Annahme = 0)

d_3 = Reststauwartezeit (Initial Queue Delay), wird nicht berücksichtigt. Es wird d_2 verwendet.

Um den Effekt der Koordinierung auf die Fahrzeugankunft zu berücksichtigen, wird die Grundwartezeit mit dem Progressionsfaktor (Gleichung [9-5]) multipliziert:

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1 - \left(\frac{g}{C}\right)} \quad [9-5]$$

P = Anteil der Fahrzeuge, die während der Grünzeit eintreffen

$\frac{g}{C}$ = Anteil der Grünzeit an der Umlaufzeit

f_{PA} = Zusatzfaktor zur Berücksichtigung der in der Grünzeit ankommenden Fahrzeugpuls

Der Anteil der Fahrzeuge, die während der Grünzeit eintreffen, wird anhand der Koordinierungszeitpunkte des Rahmenzeitplans bestimmt. Eine Verschiebung der Grünzeiten durch die Verkehrsabhängigkeit wird hier nicht berücksichtigt.

Die Wartezeitanteile d_1 und d_2 werden nach den Gleichungen [9-6] und [9-7] [HCM, 2000] berechnet:

$$d_1 = \frac{0,5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{g}{C}\right]} \quad [9-6]$$

$$d_2 = 900T \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad [9-7]$$

X = Sättigungsgrad [-]

T = Zeitraum der Analyse [h]

k = Faktor zur Berücksichtigung der Steuerungsart [-]

I = Faktor zur Berücksichtigung der Fahrzeugverteilung stromaufwärts [-]

c = Kapazität [Fz/h]

Nach dem beschriebenen Verfahren wurden 22 LSA auf verschiedenen Straßenzügen bewertet. Die Steuerung dieser LSA entspricht den Anforderungen zur Anwendung des Verfahrens. Von diesen LSA liegen jedoch bei verkehrshängiger Steuerung keine realen Messwerte vor. Deswegen werden zum Vergleich die Ergebnisse aus der Simulation herangezogen.

In dem Verfahren bleibt unberücksichtigt, dass durch die Koordinierung eine geringfügige Verschiebung der Ankunftszeiten möglich ist. So ist es möglich, dass ein Fahrzeugpuls in der Realität erst gegen Ende der Grünzeit ankommt, die Grünzeit aber vorher nicht vollständig ausgenutzt wird. In der Berechnung ist somit keine Verlängerung vorgesehen, die jedoch in der Realität angefordert werden würde. Dies kann vernachlässigt werden, da die Verschiebung der Grünzeiten durch den Rahmen-

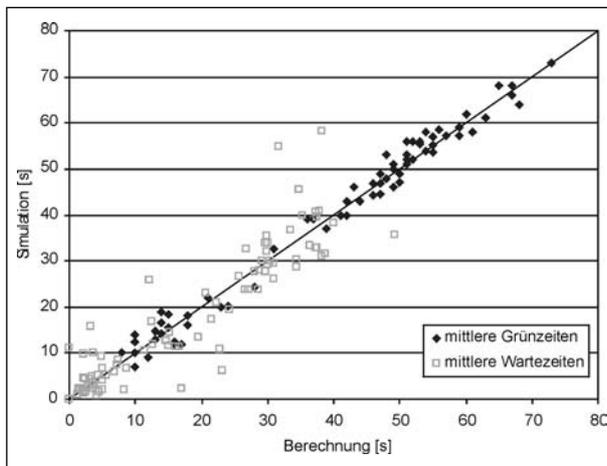


Bild 9.1: Vergleich der simulierten und berechneten mittleren Grün- und Wartezeiten

zeitplan begrenzt und eine volle Ausnutzung der Grünzeit bei einer funktionierenden Koordinierung sehr unwahrscheinlich ist.

In der Simulation werden die mittleren Grünzeiten und die Verlustzeiten in den Einfahrten ermittelt und mit den berechneten Werten verglichen. In Bild 9.1 ist zu erkennen, dass zwischen der Simulation und dem Berechnungsverfahren eine hohe Übereinstimmung in den mittleren Grünzeiten und den Wartezeiten besteht. Der Standardfehler zwischen Simulation und Berechnung beträgt bei den mittleren Grünzeiten 2,5 s und bei den Verlustzeiten 6,1 s. Das Verfahren ist also zur Schätzung der mittleren Grünzeit geeignet und auch die Wartezeiten können mit dem Verfahren nach HCM ermittelt werden.

Verkehrsabhängige Steuerungen können beliebig kompliziert gesteuert werden. Wird die Komplexität einer Steuerungslogik zu hoch, ist die Gefahr der Auflösung des Rahmenzeitplans und somit der Koordinierung gegeben. Besteht ein solcher Rahmenzeitplan, sind die Koordinierungszeitpunkte fest vorgegeben. Die Grünzeit in der Haupttrichtung kann also nur auf eine bestimmte Maximalgrünzeit gedehnt werden. Mit dem oben beschriebenen Verfahren ist es möglich, den Grünzeitbedarf der Haupt- und Nebenrichtungen zu bestimmen und somit die mittleren Grünzeiten abzuschätzen.

9.2 Festzeitsteuerung nach PASSER-V

Die Koordinierung einer Festzeitsteuerung wird auch im internationalen Kontext betrachtet. Dafür werden alle Untersuchungsstrecken in der Pla-

nungssoftware PASSER-V erfasst. Diese Software orientiert sich ausschließlich an den Verfahrensweisen des HCM (2000). Somit ist es nicht möglich, die vorhandenen Signalzeitenpläne der Lichtsignalanlagen zu übernehmen.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass ein Vergleich von PASSER-V mit den deutschen Steuerungsverfahren problematisch ist, da das Prinzip der Steuerung von Lichtsignalanlagen in dem Programm von dem deutschen Verfahren abweicht. So ist es nicht möglich, Zwischenzeiten einzelner Ströme einzugeben. Sämtliche Grünzeiten einer Phase enden also zum selben Zeitpunkt. Außerdem wird der Fußgänger- und Radverkehr nicht berücksichtigt. Die untersuchten Straßenzüge werden dennoch implementiert, um die Verfahrensweise eines international gebräuchlichen Koordinierungsverfahrens kennen zu lernen.

Zur Optimierung der Koordinierung verwendet PASSER-V mehrere Optimierungsalgorithmen. Diese Algorithmen bestehen aus einem vollständigen Suchalgorithmus, einer Interferenz-Minimierung und einem genetischen Algorithmus. PASSER-V berechnet die Grünzeitaufteilung basierend auf der Methode von Webster für jede Lichtsignalanlage einzeln. Anschließend werden diese Aufteilungen durch die Optimierung der Wartezeiten angepasst. Diese vorkalkulierten Grünzeiten werden durch Anwendung einer Bandbreitenoptimierung des Grünbandes in Ihrem Versatz angepasst. Dabei wird zunächst eine Richtung optimal koordiniert. Anschließend werden die Störungen des Bandes in der entgegengesetzten Richtung durch Anpassung des Versatzes und der Phasenfolgen minimiert. Durch den Benutzer kann eine priorisierte Richtung eingegeben werden oder eine automatische Gewichtung nach der Verkehrsstärke gewählt werden.

Nach Optimierung der Signalzeiten werden die Wartezeiten und Halte basierend auf der Methode des HCM (2000) berechnet. Außerdem werden die Progressionseffektivität und die Progressionsreichbarkeit nach den Gleichungen [9-8] und [9-9]

PE	Qualität	
0,37 - 1,00	Great Progression	A/B
0,25 - 0,36	Good Progression	C
0,13 - 0,24	Fair Progression	D
0,00 - 0,12	Poor Progression	E/F

Tab. 9.1: Qualitätsstufen nach PASSER-V

berechnet, da im HCM (2000) kein Maß zur Bewertung einer Koordinierung enthalten ist.

$$PE = \frac{(\text{Bandbreite}_A + \text{Bandbreite}_B)}{2 \times \text{Umlaufzeit}} \times 100 \quad [9-8]$$

$$PA = \frac{(\text{Bandbreite}_A + \text{Bandbreite}_B)}{(\min \text{Grün}_A + \min \text{Grün}_B)} \times 100 \quad [9-9]$$

Bei der Bewertung der Koordinierungsqualität wurden die Aufteilungen aus Tabelle 9.1 verwendet. Den angegebenen Qualitätsbegriffen wurden die in Deutschland üblichen Qualitätsstufen zugewiesen (A, B, C, D, E und F), um einen Vergleich mit dem Koordinierungsmaß nach dem HBS (2001) zu ermöglichen.

Die mit PASSER-V optimierten Koordinierungen wurden den vorhandenen Steuerungen und den mit AMPEL-K optimierten Steuerungen gegenübergestellt. Bei der vorhandenen und optimierten Steuerung wurden die Wartezeiten und Koordinierungsmaße aus den Simulationen mit VISSIM herangezogen. Die PASSER-V-Steuerungen wurden nicht in einem VISSIM-Modell implementiert. Es wurden also die Berechnungen aus dem Programm selbst für den Vergleich verwendet.

In Tabelle 9.2 ist zu sehen, dass die Qualität der mit PASSER-V koordinierten Straßenzüge, bis auf die beiden Strecken in Herne, durchweg schlechter ist. Sowohl die Wartezeiten als auch die Anzahl der Halte sind deutlich ungünstiger. Da hier aber die

berechneten Werte aus PASSER-V mit den VISSIM-Simulationsergebnissen verglichen werden, ist eine Bewertung aufgrund der unterschiedlichen Systemvoraussetzungen kritisch zu sehen.

9.3 Zusammenfassung

In den deutschen Richtlinien ist bisher kein Verfahren zur Bewertung von verkehrsabhängigen Steuerungen bekannt. Es wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem die Qualität dieses Verfahrens ermittelt werden kann ohne die Notwendigkeit der Verwendung eines Simulationsmodells. Mit diesem Verfahren können die mittleren Grünzeiten geschätzt und daraus die mittleren Wartezeiten in der Zufahrt eines Knotenpunktes errechnet werden. Die berechneten mittleren Wartezeiten wurden mit den Simulationsergebnissen verglichen und eine ausreichende Genauigkeit wurde festgestellt.

Um auch internationale Verfahren in die Untersuchung einzubeziehen, wurden Koordinierungen für die zehn Untersuchungsstrecken mit der Planungssoftware PASSER-V entwickelt und bewertet. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die Qualität der Koordinierungen nach PASSER-V in keiner Weise der Bewertung nach dem HBS (2001) entspricht. Die Koordinierungen sind nach dem HBS bis auf zwei Beispiele unwirksam. Nach dem Bewertungskriterium von PASSER-V sind jedoch die meisten Straßenzüge gut koordiniert. In PASSER-V wird die reine planerische Güte der Progression be-

Straßenzug	PASSER-V-Steuerung				vorhandene Steuerung		optimierte Steuerung		QSV nach PASSER-V	QSV nach HBS
	PE [%]	PA [%]	Wartezeit [s]	k [-]	Wartezeit [s]	k [-]	Wartezeit [s]	k [-]		
Albersloher Weg-Nord (MS)	22	100	398	0,11	232	0,70	218	0,65	D	F
Albersloher Weg-Süd (MS)	31	100	391	0,57	122	0,73	190	0,65	C	D
Königsallee (BO)	33	84	189	0,45	107	0,81	109	0,78	C	F
Herner Str. (BO)	35	93	119	0,43	197	0,73	52	0,85	C	F
Stader Str. (BUX)	38	83	297	0,40	249	0,63	221	0,67	A/B	F
Hauptstr. (HER)	29	100	139	0,63	186	0,56	117	0,62	C	E
Eickeler Str.(HER)	44	79	112	0,68	112	0,72	119	0,61	A/B	D
Brehmstr./Lindemannstr. (D)	24	100	536	0,03	206	0,68	167	0,66	D	F
Kettwiger Str./Kruppstr. (D)	34	74	175	0,48	177	0,68	204	0,55	C	F
Bonnstr. (FRE)	26	100	450	0,15	330	0,57	221	0,77	C	F

Tab. 9.2: Vergleich nach PASSER-V optimierte Koordinierungen mit den deutschen Steuerungen (AMPEL-K)

wertet, während im HBS (2001) die Auswirkung der Steuerung auf die Anzahl der Halte bewertet wird. Die Wartezeiten und Anzahl der Halte der einzelnen Knotenpunkte werden auch in PASSER-V berechnet, dies wird jedoch nicht als Maß zur Bewertung der Koordinierung herangezogen.

10 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

10.1 Steuerungsverfahren

10.1.1 Festzeitkoordinierung

Eine festzeitgesteuerte Koordinierung von Lichtsignalanlagen wird in der Praxis als ein Steuerungsverfahren angesehen, welches nicht mehr dem Stand der Technik entspricht. Neuplanungen von Straßenzügen werden in der Regel nach dem Verfahren der verkehrsabhängigen Steuerung oder der adaptiven Steuerung entwickelt. Ein Grund für diesen Trend zur verkehrsabhängigen Steuerung liegt in der fehlenden Flexibilität einer Festzeitsteuerung. Festzeitsteuerungen sind nicht in der Lage, auf kurzfristige Änderung der Verkehrsbelastungen und -beziehungen zu reagieren. Außerdem können sie durch die äußeren Gegebenheiten (z. B. Knotenpunktabstände) in ihrer Wirkungsweise stark eingeschränkt sein. Es sind aber oft auch politische Gründe ausschlaggebend für die Auswahl des Verfahrens. Hier ist der Hintergrund, dass politische Entscheidungsträger leicht bereit sind zu glauben, dass die aufwändigere Lösung besser sein muss.

Nach wie vor stellt jedoch ein Rahmenplan, also im Grunde eine Festzeitkoordinierung, die Grundlage für sämtliche Verfahren der Koordinierung dar. Sieben der zehn untersuchten Strecken weisen eine verkehrsabhängige Steuerung auf. Auf jedem dieser Straßenzüge liegt der Steuerung eine Festzeitkoordinierung in Form eines Zeit-Weg-Diagramms zugrunde. Diese Koordinierung wird entweder per Hand geplant oder mit einer Planungssoftware optimiert. Auch bei einer ÖPNV-priorisierten Steuerung wird ein solcher Rahmenplan in der Regel zugrunde gelegt, um eine Orientierung für die Koordinierungszeitpunkte zu schaffen.

Sämtliche vorhandenen Rahmenpläne oder Festzeitsteuerungen wurden durch Simulationen untersucht. Den vorhandenen Steuerungen wurden neu optimierte Festzeitsteuerungen, die nach dem Prinzip der Strecken- und der Netzoptimierung ent-

wickelt wurden, gegenübergestellt. Durch die neue Optimierung konnten auf acht Straßenzügen wesentliche Verbesserungen der Verkehrsqualität erreicht werden. Im Vergleich der verkehrlichen Wirkung der Koordinierung nach dem Prinzip der Netzoptimierung und der Streckenoptimierung konnten nur geringe Unterschiede festgestellt werden. Es wurde deutlich, dass nicht in jedem Fall eine bessere Koordinierung der Hauptrichtung auch eine höhere Verkehrsqualität des gesamten Netzes ergibt. So wurde in einigen Fällen durch die Optimierung eine höhere Verkehrsqualität des gesamten Netzes, trotz einer Verschlechterung der Verkehrsqualität in der koordinierten Richtung, erreicht. Dies ist auf eine nicht ausreichende Bemessung des Querverkehrs in der vorhandenen Steuerung zurückzuführen. Die Bevorzugung der Hauptrichtung kann sich nachteilig auf das gesamte Netz auswirken, wenn die Querrichtungen eine hohe Bedeutung haben. Unter Umständen kann es aber auch sinnvoll sein, einbiegende Ströme bewusst zu benachteiligen, um die Verkehrsqualität im gesamten Netz zu erhöhen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nicht in jedem Fall die vorhandenen Koordinierungen eine geringere Qualität hatten. Die Verbesserungen in der Verkehrsqualität wurden eher durch die neue Optimierung der einzelnen Knotenpunktsteuerungen erreicht.

Im Vergleich zu den national üblichen Verfahren der Koordinierung eines Straßenzuges wurde auch ein internationales Verfahren getestet. Mit der Planungssoftware PASSER-V wurden Koordinierungen für alle zehn Straßenzüge entworfen. Die Software arbeitet nach dem Verfahren des HCM (2000) und berechnet die Wartezeiten und die Anzahl der Halte nach diesem Verfahren. Die Verfahren zur Berechnung und Planung von Lichtsignalanlagen nach dem HCM (2000) sind nicht unmittelbar mit den Vorgehensweisen in den deutschen Richtlinien zu vergleichen. Deswegen wurden die Steuerungen nicht in den Simulationsmodellen simuliert. Es stellte sich heraus, dass die Bewertung der Koordinierung in PASSER-V nicht auf Qualitätskriterien, sondern rein auf der geometrischen Güte der Progression beruht. Nach den Berechnungsergebnissen der Wartezeiten und der Anzahl der Halte in der Software stellt sich keine bessere Koordinierung ein als mit den national üblichen Verfahren.

10.1.2 Verkehrsabhängige Steuerung

Verkehrsabhängige Steuerungen werden derzeit von vielen Experten als der Stand der Technik an-

gesehen. Diese Verfahren sind in der Lage, die Grünzeiten oder Phasenfolgen dem Bedarf der lokalen Verkehrssituationen anzupassen. Auch adaptive Steuerungen, die die modernste Entwicklung im Bereich der Steuerung von Lichtsignalanlagen in Netzen darstellen, folgen auf lokaler Ebene dem Prinzip dieser Steuerung. Verkehrsabhängige Steuerungen können beliebig kompliziert gestaltet werden. Um jedoch dem Prinzip der koordinierten Steuerung zu folgen, muss sich auch eine verkehrsabhängige Steuerung an Koordinierungszeitpunkten orientieren, sodass auch ihre Flexibilität eingeschränkt ist. Grünzeiten können verlängert oder nicht benötigte Phasen übersprungen werden. Dadurch ist es möglich, Konflikte, die in der Festzeitsteuerung aufgrund der Knotenpunktabstände entstehen, zu verringern. Je komplizierter eine Steuerungslogik wird, desto größer wird jedoch die Gefahr einer Zerstörung der Koordinierung. Diese Steuerungsverfahren sind aufgrund des erheblich höheren Planungsaufwandes und der benötigten Hardware wesentlich kostenintensiver als klassische festzeitgesteuerte Koordinierungen.

In dieser Untersuchung wurden die auf den Straßenzügen vorhandenen verkehrsabhängigen Steuerungen durch Simulationen untersucht. In den Simulationen wurde ein Vergleich mit Festzeitsteuerungen, die auf den vorhandenen Rahmenplänen basieren, durchgeführt. Die Koordinierungszeitpunkte der verkehrsabhängigen Steuerung sind also mit denen der Festzeitsteuerung identisch. Bei einigen Steuerungen orientieren sich die Steuerungen ohne Anforderungen an den Rahmenplänen (z. B. bei der ÖPNV-Priorisierung in Düsseldorf). Auf anderen Straßenzügen (Herner Str., Stader Str.) werden die Rahmenpläne bei voller Ausnutzung der Verlängerungen und Anforderungen erreicht.

Beim Vergleich der Steuerungsverfahren wird also der tatsächliche Unterschied, den die Verkehrsabhängigkeit gegenüber ihrem Rahmenplan bewirkt, betrachtet. In der Simulation stellte sich heraus, dass die verkehrsabhängige Steuerung keineswegs immer vorteilhaft gegenüber der Festzeitsteuerung ist (siehe Kapitel 10.4). Es zeigte sich, dass unter konstanter Verkehrsbelastung nur im Bereich der Belastungen einer Spitzenstunde Verbesserungen in der Verkehrsqualität durch die Verkehrsabhängigkeit erreicht wurden. Bei starker Belastungsänderung zeigten sich deutliche Vorteile der verkehrsabhängigen Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung in den Zeitintervallen des Belas-

tungsabbaus. Außerdem konnte auf einigen Straßenzügen eine positive Wirkung bei einer Änderung der Verkehrsbeziehungen festgestellt werden. Ist die Verkehrssituation im Netz hinsichtlich der Verkehrsstärke und -beziehung konstant, konnte durch die Verkehrsabhängigkeit keine Verbesserung der Verkehrsqualität erreicht werden. Außerdem zeigten sich bei geringer Auslastung der Straßenzüge keine Verbesserungen durch die Verkehrsabhängigkeit.

Die Steuerungslogiken der verschiedenen Straßenzüge sind von verschiedenen Ingenieurbüros und Verwaltungen geplant worden. Dem zufolge sind der Aufbau und die Funktionsweise dieser Steuerungen verschieden. Bei einigen Steuerungen ist jedoch auffällig, dass sie für den jeweiligen Knotenpunkt logisch erstellt werden. Im Zusammenhang mit dem restlichen Netz verfehlen sie jedoch ihre Wirkung. So wird z. B. eine Verlängerung stark belasteter Ströme zugelassen. Dadurch wird aber die Pfortnerwirkung der Festzeitsteuerung zerstört und die Verkehrsqualität des gesamten Netzes sinkt. In anderen Fällen wurde der Querverkehr gegenüber der Hauptrichtung so stark benachteiligt, dass die Qualität des gesamten Netzes zurückging. Es ist also sehr wichtig, dass nicht nur der Rahmenplan der Steuerung, sondern auch die Verkehrsabhängigkeiten an sich im Netzzusammenhang geplant werden.

In die deutschen Richtlinien hat die Bewertung verkehrsabhängiger Steuerungen bisher noch keinen Einzug erhalten. Verkehrsabhängige Steuerungen sind sehr schwierig durch ein Standardverfahren zu erfassen. Je nach Anforderung des Auftraggebers, räumlichen und verkehrlichen Voraussetzungen und der Programmieretechnik ist jedes Programm verschieden. Um jedoch das Prinzip der Koordinierung zu wahren, sind bestimmte Koordinierungszeitpunkte in jedem Fall einzuhalten. Dies ermöglicht eine theoretische Erfassung der Steuerung. Es wurde gezeigt, dass die mittleren Grünzeiten einer verkehrsabhängigen Steuerung durch ein theoretisches Verfahren geschätzt werden können. Darauf aufbauend können die Wartezeiten berechnet werden und somit die Güte der verkehrsabhängigen Steuerung ohne die Notwendigkeit einer Simulation bestimmt werden.

10.1.3 Adaptive Steuerung

Die adaptive Steuerung stellt, so wie sie in der Literatur beschrieben wird, eine gute Lösung zur

Steuerung eines Straßenzuges dar. Anhand zahlreicher Detektoren im gesamten Netz wird die aktuelle Verkehrssituation analysiert. Durch die Auswertung dieser Daten unter Einbeziehung historischer Daten wird die Entwicklung der Verkehrssituation prognostiziert. Dadurch kann der Rahmenplan online für die aktuelle Verkehrssituation optimiert werden. Der Rahmenplan an sich ist also nicht mehr starr, sondern passt sich selbstständig an die Verkehrssituation an. Auf lokaler Ebene der einzelnen Knotenpunkte wird auch in der adaptiven Steuerung das Prinzip der verkehrsabhängigen Steuerung verwendet. Bei adaptiven Steuerungen sind so viele Detektoren im Netz vorhanden, dass auch eine lokale Anpassung der Steuerungszustände möglich ist. Den Nachteilen der verkehrsabhängigen Steuerung, die sich in dieser Untersuchung gezeigt haben, wie z. B. der Benachteiligung des Querverkehrs oder einer geringeren Schleusenwirkung, könnte durch die Anpassung der Steuerung an die gesamte Verkehrssituation entgegengewirkt werden.

Inwieweit die adaptiven Steuerungen tatsächlich in der Lage sind, die theoretischen Vorteile gegenüber der Festzeitsteuerung und der verkehrsabhängigen Steuerung auch in der Praxis umzusetzen, ist bisher für deutsche Verhältnisse noch nicht ausreichend und objektiv untersucht worden. Die verkehrliche Wirkung der adaptiven Steuerung sollte von einer unabhängigen Institution durch weitere Untersuchungen und Messungen erforscht werden.

10.1.4 Vollverkehrsabhängige Steuerung

In der Praxis werden vollverkehrsabhängige Steuerungen in der Regel nicht für koordinierte Straßenzüge verwendet. Dies wird von den meisten Experten auch nicht als sinnvoll angesehen. Es kann vereinzelt vorkommen, dass zwei dicht aufeinander folgende Knotenpunkte durch eine vernetzte vollverkehrsabhängige Steuerung gesteuert werden. Vollverkehrsabhängige Steuerungen werden eher für Einzelknotenpunkte angewendet, die in keinem Netzzusammenhang stehen.

Die verkehrliche Wirkung dieser Steuerungsart auf einen Straßenzug wurde in der Simulation auf drei Strecken (Königsallee, Stader Straße und Hauptstraße) untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die vollverkehrsabhängige Steuerung ausnahmslos zu einer schlechteren Verkehrsqualität des gesamten Netzes führte als die koordinierten Steuerungsverfahren. Es konnte keine auto-

matische Koordinierung durch dieses Steuerungsverfahren festgestellt werden. Die Anzahl der Halte in Hauptrichtung ist in allen Simulationen wesentlich höher als bei den Steuerungen mit Rahmenplan.

Eine Steuerung nach dem Verfahren der Vollverkehrsabhängigkeit müsste eine wesentlich höhere Anzahl an Detektoren aufweisen, um die gleiche Qualität wie die Steuerungen mit Rahmenplan zu erreichen. Zudem wäre eine Vernetzung der Steuergeräte sinnvoll. Dies würde aber wieder dem Prinzip der Vollverkehrsabhängigkeit widersprechen. Um Fahrzeugpuls zu erfassen, sind größere Abstände der Detektoren zu den Haltelinien notwendig. Dies ist allerdings auf vielen innerstädtischen Straßenzügen nicht möglich, da die Knotenpunktabstände zu gering sind. In der Untersuchung zeigt sich, dass eine vollverkehrsabhängige Steuerung ohne Rahmenplan nicht geeignet ist für die Steuerung eines Straßenzuges.

10.2 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Es wurde festgestellt, dass das Bewertungskriterium nach dem HBS (2001), das Koordinierungsmaß, nicht allein ausreichend ist, um die Verkehrsqualität eines Straßenzuges zu bewerten. Nach der Bewertung des HBS (2001) sind viele Koordinierungen unwirksam, obwohl die mittlere Reisegeschwindigkeit noch ausreichend ist. Es wurde ein gewisser Widerspruch zwischen dem Bewertungsmaß nach dem HBS (2001) und der Bewertung nach BRILON, SCHNABEL (2003), die sich auf die mittlere Reisegeschwindigkeit bezieht, deutlich. Um einen Straßenzug ausreichend zu bewerten, sollten beide Bewertungskriterien verwendet werden, sowohl die Anzahl der Halte als auch die Reisegeschwindigkeit. Diese Bewertungskriterien beziehen sich allerdings nur auf die Verkehrsqualität der koordinierten Hauptrichtung. In den Untersuchungen hat sich jedoch herausgestellt, dass bei einem Variantenvergleich eine Bewertung der Verkehrsqualität des gesamten Netzes mit dem Performance Index sinnvoll ist. Nur so kann die gesamte verkehrliche Wirkung der Lichtsignalsteuerung ausreichend bewertet werden.

Der Performance Index stellt aber nur einen abstrakten Wert dar, mit dem verschiedene Varianten verglichen werden können. Um den Unterschied in der verkehrlichen Wirkung monetär bewerten zu können, wird eine Nutzen-Analyse durchgeführt.

Die genauen Investitions- und laufenden Kosten der Lichtsignalsteuerung der Straßenzüge waren nicht bekannt. Es ist aber davon auszugehen, dass die Kosten der verkehrsabhängigen Steuerung, durch den höheren Planungsaufwand und die benötigte Hard- und Software, die Kosten einer Festzeitsteuerung wesentlich übersteigen. Um aber trotz der fehlenden Kosten die wirtschaftlichen Wirkungen der Steuerungsverfahren festzustellen, wird der Nutzen anhand der Zeitkosten quantifiziert. Die Betriebskostenunterschiede sind im Vergleich zu den Zeitkosten verschwindend gering, sodass sie hier nicht berücksichtigt werden.

Für den Vergleich wurden typische Werktage und Sonn- und Feiertage betrachtet. Ein Tag wurde dabei nach der typischen Tagesganglinie des HBS (2001) (siehe Bild 2-4) für den Pkw-Verkehr aufgeteilt. Es wurden jeweils Zeitintervalle mit gleicher Verkehrsstärke aus diesem Diagramm abgeleitet. In diesem Diagramm werden der Tagesganglinientyp TGw1 (Tangentialstraßen im Kernstadtbereich) für die Straßenzüge in Düsseldorf und der Typ TGw2 (Radialstraßen zur Kernstadt) für die restlichen Straßenzüge verwendet.

Die vereinfachten Tagesganglinien, in denen Zeitintervalle mit konstanter Belastung angesetzt wurden, sind in Bild 10.1 dargestellt. Die Ausgangsverkehrsbelastung in den Simulationen wurde nicht immer im selben Zeitraum gemessen. So waren die Verkehrsbelastungen einiger Straßenzüge aus der morgendlichen Spitzenstunde (Albersloher Weg, Königsallee, Herne und Bonnstr.) bekannt. Andere Straßenzüge wurden in der nachmittäglichen Spitzenstunde (Herner Straße und Stader Straße) untersucht. Die Verkehrsbelastungen der Straßenzüge in Düsseldorf wurden außerhalb der Spitzenstunde gemessen. Für alle drei Fälle wurden die Verkehrsbelastungen für den Rest des

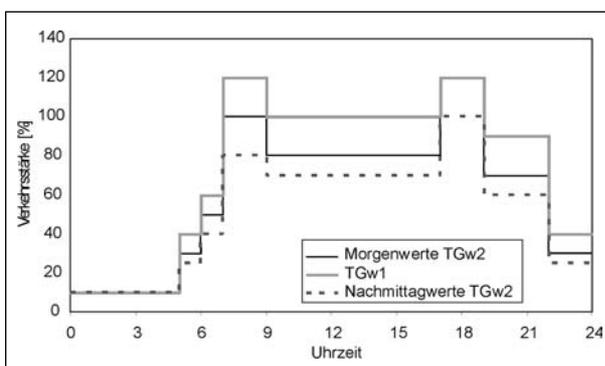


Bild 10.1: Typisierte Tagesganglinien für die untersuchten Straßenzüge

Tages nach Bild 10.1 geschätzt. Dabei wurde angenommen, dass in der Zeit von 0 bis 5 Uhr kein ÖPNV unterwegs ist.

Für die so ermittelten Zeiträume mit konstanter Belastung wurden nun die Verlustzeiten in jeder Knotenpunktzufahrt auf dem Straßenzug ermittelt. Diese Daten standen bereits aus der Ermittlung des Performance Index zur Verfügung. Die Unterschiede der beiden Steuerungsverfahren in den Verlustzeiten konnten somit sehr genau für das gesamte Netz ermittelt werden. Nach Gleichung [10-1] konnten daraus schließlich die Zeitkosten ermittelt werden. Die Zeitkostensätze der Fahrzeuggruppen wurden der EWS (1997) entnommen. Dabei wurde der Zeitkostensatz der Straßenbahnen dem der Busse (62,5 €/Kfz * h)) gleichgesetzt.

$$TK_{FZ-VA} = \sum_{Fzg} \sum_i \sum_t WT_{Fzg} \times T_i \times (Q_{FZ} \times t_{FZ} - Q_{VA} \times t_{VA})_{i,t,Fzg} \quad [10-1]$$

Mit:

i = Knotenpunktzufahrt

t = Nummer des Zeitraums mit annähernd gleichem Verkehrsablauf

Fzg = Fahrzeuggruppe

T = Zeitraum mit annähernd gleichem Verkehrsablauf [h/a]

WT_{FZ} = Zeitkostensatz [€/Kfz * h]

$Q_{FZ/VA}$ = Verkehrsstärke in den Zufahrten [Kfz/h]

$T_{FZ/VA}$ = Verlustzeiten in den Zufahrten [s]

In Tabelle 10.1 sind die Zeitkosten, die durch die Verlustzeiten der Fahrzeuge in den Knotenpunktzufahrten in einem Jahr entstehen, dargestellt. Auf zwei Straßenzügen (Stader Straße und Bonnstraße) entstanden deutliche negative Nutzen der verkehrsabhängigen Steuerung im Vergleich zur Festzeitsteuerung. Die negativen Auswirkungen der Verkehrsabhängigkeit auf diesen Straßenzügen wurden auch schon in Kapitel 8.3 festgestellt und bestätigen sich hier. Auf der Hauptstraße waren die Steuerungsverfahren nahezu gleichwertig. Auf den übrigen Straßenzügen entstand ein deutlicher Nutzen der verkehrsabhängigen Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung. Die höchsten Einsparungen wurden auf dem Straßenzug mit einer ÖPNV-Priorisierung (Kettwiger Straße/Kruppstraße) erreicht.

			Kfz [€/a]	Lkw [€/a]	Bus [€/a]	Straßenbahn [€/a]	Jährlicher Nutzen der VA-Steuerung [€/a]
1	Albersloher Weg- Nord (MS)	FZ	1.773.545	138.198	280.944	-	156.674
		VA	1.793.462	132.689	233.548	-	
2	Albersloher Weg- Süd (MS)	FZ	1.412.920	269.160	187.590	-	159.390
		VA	1.297.605	247.193	165.483	-	
3	Königsallee (BO)	FZ	2.411.103	178.385	176.297	-	52.186
		VA	2.361.494	174.715	177.390	-	
4	Herner Straße (BO)	FZ	1.431.093	105.879	-	-	244.580
		VA	1.203.362	89.031	-	-	
5	Stader Straße (BUX)	FZ	1.792.285	200.849	-	-	-248.629
		VA	2.015.859	225.903	-	-	
6	Hauptstraße (HER)	FZ	805.456	90.262	32.831	132.163	-3.851
		VA	810.901	90.872	32.035	130.756	
7	Eickeler Straße (HER)	FZ	490.579	54.976	121.586	140.932	97.117
		VA	411.862	46.155	114.780	138.158	
8	Brehmstraße/ Lindemannstraße (D)	FZ	4.254.572	314.774	-	268.496	35.151
		VA	4.201.902	310.877	-	289.912	
9	Kettwiger Straße/ Kruppstraße (D)	FZ	6.829.210	1.576.885	193.376	568.936	469.371
		VA	6.568.129	1.516.600	189.663	424.643	
10	Bonnstraße (FRE)	FZ	4.034.111	608.721	-	-	-149.969
		VA	4.164.417	628.384	-	-	

Tab. 10.1: Zeitkosten verursacht durch die Verlustzeiten pro Jahr

Die Berechnung der Nutzen einer verkehrsabhängigen Steuerung erfolgte, um eine Größenordnung der wirtschaftlichen Wirkung zu erhalten. Im konkreten Anwendungsfall müssen diese Nutzen natürlich den laufenden Kosten und den Investitionskosten gegenübergestellt werden, um dann zu entscheiden welche Steuerungsvariante wirtschaftlicher ist. An den Bewertungen der Untersuchungsstrecken wurde jedoch deutlich, dass in der Mehrzahl der Fälle die verkehrsabhängige Steuerung wirtschaftliche Vorteile bringt.

10.3 Ableitung der zweckmäßigen Einsatzkriterien

Die Einsatzkriterien für die verschiedenen Steuerungsverfahren einer Koordinierung sind sehr schwer in Kategorien einzuordnen, da die örtlichen und verkehrlichen Gegebenheiten auf jedem Straßenzug sehr verschieden sind. Die Einsatzbereiche werden voneinander abgegrenzt, indem verallgemeinerbare Ergebnisse aus der Untersuchung gewonnen werden (siehe Tabelle 10.2). Der Grad der Eignung der Steuerungsverfahren ist anhand der

Anzahl der Pluszeichen zu erkennen. Nicht geeignet sind die Steuerungen mit einem Minuszeichen.

Die Einsatzkriterien der Festzeitsteuerung, der verkehrsabhängigen Steuerung und der vollverkehrsabhängigen Steuerung wurden im Wesentlichen aus den Ergebnissen der in dieser Untersuchung durchgeführten Messfahrten und Simulationen entwickelt. Es wurden aber auch die Erfahrungen aus der Praxis und der Literatur berücksichtigt.

Die adaptive Steuerung wurde durch eine Literaturrecherche untersucht, da für diese Steuerung keine Möglichkeit der Untersuchung anhand eines Untersuchungsbeispiels gegeben war. Auf Grundlage der so gesammelten Erfahrungen kann jedoch keine Aussage über den Einsatz dieser Steuerungsart getroffen werden. Zur Entwicklung von Empfehlungen für die adaptiven Steuerungen sollten in Zukunft durch eine unabhängige Institution genauere Untersuchungen durchgeführt werden.

In der Untersuchung wurde festgestellt, dass eine vollverkehrsabhängige Steuerung, die sich nicht an Rahmenplänen orientiert, nicht geeignet ist um die Lichtsignalanlagen eines Straßenzuges koordiniert zu steuern.

Anwendungsfälle		Festzeitsteuerung	verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenplan	vollverkehrsabhängige Steuerung
konstante Verkehrsbelastung	geringe Belastung	++	-	-
	hohe Belastung	+	++	-
	Überlastung	+	-	-
Querverkehr	geringe Belastung	-	++	-
	hohe Belastung	+	-	-
Schwankungen in der Verkehrsbelastung	gering	++	-	-
	stark	-	++	-
Änderung der Verkehrsbeziehungen	gering	++	-	-
	stark	+	++	-
Priorisierung des ÖPNV		--	++	-
Optimierung der Hauptachse		++	+	-
ungünstige Knotenpunktabstände		-	+	-

Tab. 10.2: Einsatzkriterien der Steuerungsverfahren

11 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden die verschiedenen Steuerungsverfahren einer Koordination untersucht. Dabei wurden im Schwerpunkt die festzeitgesteuerte Koordination, die verkehrsabhängige Steuerung mit Rahmenzeitplan und die vollverkehrsabhängige Steuerung miteinander verglichen. Das Verfahren der adaptiven Netzsteuerung wurde anhand von Literaturrecherchen untersucht.

Zur Erfassung des Standes der Technik bei der Koordination von Lichtsignalanlagen wurden Quellenanalysen durchgeführt. Zusätzlich fanden Expertengespräche mit Ingenieurbüros, Verwaltungen und den Signalherstellern statt, um auch Erfahrungen aus der Praxis in die Untersuchung einzubeziehen. Dabei stellte sich heraus, dass in der Fachwelt die Meinung vorherrscht, dass eine festzeitkoordinierte Steuerung nicht mehr dem Stand der Technik entspricht, da sie zu unflexibel sei. Die verkehrsabhängigen Steuerungen seien dagegen in der Lage, auf lokaler Ebene flexibel auf die Verkehrssituation zu reagieren, und hätten somit einen Vorteil gegenüber der Festzeitsteuerung. Der vollverkehrsabhängigen Steuerung wird in der Literatur vereinzelt theoretisch die Möglichkeit eingeräumt, automatisch eine Koordination zu erzeugen.

Um die tatsächliche Wirkung der Steuerungsverfahren zu überprüfen, wurden zehn Straßenzüge durch empirische Messungen und Simulationen untersucht. Die empirischen Messungen dienten dabei in erster Linie der Kalibrierung der Simulationsmodelle. Die auf den Straßenzügen in der Rea-

lität vorhandenen Steuerungen wurden in den Simulationsmodellen exakt nachgebildet. Dadurch konnten umfangreiche Vergleiche zwischen vorhandenen und optimierten Steuerungen sowie zwischen verkehrsabhängigen und festzeitgesteuerten Koordinierungen angestellt werden.

In der Untersuchung der Steuerungsverfahren wurde deutlich, dass das Bewertungskriterium nach dem HBS (2001), das Koordinierungsmaß, nicht allein ausreichend ist, um die Verkehrsqualität eines Straßenzuges zu bewerten. Nach der Bewertung des HBS (2001) sind viele Koordinierungen unwirksam, obwohl die mittlere Reisegeschwindigkeit noch ausreichend ist. Es wurde ein gewisser Widerspruch zwischen dem Bewertungsmaß nach dem HBS (2001) und der Bewertung nach BRILON, SCHNABEL (2003), die sich auf die mittlere Reisegeschwindigkeit bezieht, deutlich. Um einen Straßenzug ausreichend zu bewerten, sollten beide Bewertungskriterien verwendet werden, sowohl die Anzahl der Halte als auch die Reisegeschwindigkeit. Diese Bewertungskriterien beziehen sich allerdings nur auf die Verkehrsqualität der koordinierten Haupttrichtung. Es zeigte sich aber, dass bei einem Variantenvergleich eine Bewertung der Verkehrsqualität des gesamten Netzes mit dem Performance Index sinnvoll ist. Nur so kann die gesamte verkehrliche Wirkung der Lichtsignalsteuerung ausreichend bewertet werden.

In der Simulation wurden für jeden Straßenzug zahlreiche Fälle der Verkehrsbelastungen und Verkehrsbeziehungen untersucht. Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass die verkehrsabhängige Steuerung keineswegs nur Vorteile gegenüber

der Festzeitsteuerung hat. Es ergaben sich je nach Verkehrssituation sehr unterschiedliche Qualitäten der Steuerungsverfahren:

- Bei der Simulation schwankender Verkehrsbelastungen führt die Verkehrsabhängigkeit in jedem Intervall des Belastungsabbaus zu einer besseren Verkehrsqualität. Eine hohe Belastung kann demnach durch die Verkehrsabhängigkeit schneller wieder abgebaut werden.
- Im Bereich der geringen Verkehrsbelastungen gibt es keine deutlichen Unterschiede in der Wirkung der beiden Steuerungsverfahren. Sowohl bei den Verlustzeiten und der Anzahl der Halte als auch in der Betrachtung der Verkehrsqualität im gesamten Netz zeigt sich bei der verkehrsabhängigen Steuerung kein Vorteil.
- Durch eine ÖPNV-Priorisierung kann auch unter geringer Verkehrsbelastung eine bessere Verkehrsqualität des ÖPNV erreicht werden.
- Unter hohen Belastungen, die im Bereich der Belastungen einer Spitzenstunde liegen, sind in den Simulationsergebnissen Vorteile der verkehrsabhängigen Steuerungen zu erkennen. Auf sechs Straßenzügen wird unter dieser Belastung durch die Verkehrsabhängigkeit der Performance Index reduziert.
- Bei einer sehr hohen Verkehrsbelastung, bei der die Kapazitätsgrenzen erreicht oder überschritten werden, wirkt sich die Verkehrsabhängigkeit meistens negativ auf die Verkehrsqualität aus. Die niedrigere Verkehrsqualität entsteht in der Regel dadurch, dass durch die hohe Belastung in der koordinierten Richtung die Grünzeiten voll angefordert werden und somit die Querrichtungen benachteiligt werden. Außerdem wurde beobachtet, dass hochbelastete Ströme, die in die Hauptrichtung einbiegen, ihre Grünzeit maximal ausreizen. Dadurch fließen wesentlich mehr Fahrzeuge ins System als bei der Festzeitsteuerung. Bei dieser sinkt zwar die Verkehrsqualität eines bestimmten Knotenpunktes, dies wirkt sich aber positiv auf die Verkehrsqualität des gesamten Netzes aus.
- Es ist sehr wichtig, dass nicht nur der Rahmenplan der Steuerung, sondern auch die Verkehrsabhängigkeiten an sich im Netzzusammenhang geplant werden.
- Auf Straßenzügen mit einem hohen Verkehrsaufkommen in Querrichtung zeigen sich negati-

ve Wirkungen der verkehrsabhängigen Steuerung auf die Verkehrsqualität. Bei einer sehr geringen Verkehrsbelastung in der Querrichtung wirkt sich die Verkehrsabhängigkeit positiv auf die Verkehrsqualität des gesamten Netzes aus.

- In den Simulationen wurde außerdem deutlich, dass auf den Straßenzügen mit ÖPNV-Priorisierung eine deutliche Steigerung der Verkehrsqualität des ÖPNV erreicht wurde. Dies gelingt aber nur unter Inkaufnahme von Qualitätseinbußen des Individualverkehrs.
- Eine vollverkehrsabhängige Steuerung ohne Rahmenplan ist nicht geeignet für die Steuerung eines Straßenzuges.

In den deutschen Richtlinien wird bisher kein Verfahren zur Bestimmung der Verkehrsqualität verkehrsabhängiger Steuerungen beschrieben. In dieser Untersuchung wurde zusätzlich zu den Simulationen ein theoretisches Verfahren zur Bewertung verkehrsabhängiger Steuerungen vorgestellt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, die mittleren Grünzeiten verkehrsabhängiger Steuerungen zu bestimmen. Damit ist auch die Bewertung der Qualität der Steuerung über die ermittelten Wartezeiten möglich.

Aus den so gewonnenen Untersuchungsergebnissen wurden schließlich Kriterien für die Einsatzbereiche der verschiedenen Steuerungsverfahren entwickelt, die eine Entscheidungsfindung zukünftiger Planungsvorhaben erleichtern sollen.

12 Literatur

- [1] ADAC (2004): Tagungsunterlagen der ADAC Workshops 2004: Lichtsignalanlagen – heute und morgen, 2004
- [2] ALBRECHT, H. (1994): VS-Plus – ein neuer Weg zur Realisierung verkehrsabhängiger Steuerung, FGSV-Kolloquium Verkehrsabhängige Steuerung am Knotenpunkt, Seite 19-30, FGSV-Verlag, Köln 1994
- [3] BAAß, K. (1985): Ermittlung des optimalen Grünbandes auf Hauptverkehrsstraßen, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 31, Universität Karlsruhe 1985
- [4] BELL, M. G. H., BROOKES, D. (1993): Discrete Time-Adaptive Traffic Signal Control, Transportation Research, 1C, No. 1

- [5] BIELEFELDT, Ch. (1996): COSMOS, Congestion Management Strategies and Methods in Urban Sites, Project Programme, Edinburgh, Schottland, 1996 (COSMOS unter www.prosoma.lu bzw. www.cordis.lu/en/home.html)
- [6] BRENNER, M. F., ZIEGLER, H., SEELING, K. (1997): Sicherheitsrisiken an Lichtsignalanlagen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 44, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1997
- [7] BRETHERTON, B. (1996): SCOOT Current Developments: Version 3. Preprint no. 960128, Transportation Research Board, 75th Annual Meeting, Washington, D. C., January 1996
- [8] BRILON, W., SCHNABEL W. (2003): Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen, Straßenverkehrstechnik, Heft 01/2003, S. 21-26
- [9] BROOKES, D., BELL, M. G. (1991): Expected Delays and Stop Calculation for Discrete Adaptive Traffic Signal Control. Proc. 1st Int. Symp. Highway Capacity, Karlsruhe, Germany, U. BRANNOLTE, Ed.
- [10] BUSCH, F. (1996): MOTION – a new approach to urban network control. Traffic Technology International 1996
- [11] BUSCH, F., KRUSE, G. (1993): MOTION – ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung, HEUREKA, Karlsruhe, Deutschland, 1993
- [12] DAHLGREN, J. et al. (1996): Lessons from Case Studies of Advanced Transportation and Information Systems, California PATH, 1996
- [13] DÜRR, P. (2002): Evolution adaptiver Steuerungsverfahren für den städtischen Mischverkehr, Straßenverkehrstechnik, Heft 4, Seite 188-195, Kirschbaum-Verlag, Bonn 2002
- [14] EWS (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV Verlag GmbH, Köln, 1997
- [15] FAMBRO, D. et al. (1995): Benefits of the Texas Traffic Light Synchronization (TLS) Grant Program II, Texas Transportation Institute, 1995
- [16] FOX, K., BALMFORTH, P., FRANKLIN, P., MONTGOMERY, F., SIU, Y. L., HEYWOOD, R. (1995): Integrated ATT Strategies For Urban Arterials: DRIVE II Project PRIMAVERA: 3. The Dewsbury Road Experiment, Traffic Engineering And Control, 1995/07/08, 36(7/8) pp. 427-31 (8 Refs.). Published by: Printerhall Ltd, 29 Newman Street, London, W1P 3PE, United Kingdom, 1995
- [17] FRIEDRICH, B. (1996): Methoden und Potenziale adaptiver Verfahren für die Lichtsignalsteuerung, Straßenverkehrstechnik, Heft 9, Seite 431-442, Kirschbaum-Verlag, Bonn 1996
- [18] FRIEDRICH, B. (2000): Steuerung von Lichtsignalanlagen: BALANCE – ein neuer Ansatz, Straßenverkehrstechnik, Heft 7, Seite 321-328, Kirschbaum-Verlag, Bonn 2000
- [19] FRIEDRICH, B., FISCHER, N. (2002): Nahverkehrsbevorrechtigung an Lichtsignalanlagen unter besonderer Berücksichtigung des nichtmotorisierten Verkehrs, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 92, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2002
- [20] GARTNER, N. H., STAMATIADIS, C., TARNOFF, P. J. (1995): Development of Advanced Traffic Signal Control Strategies for Intelligent Transportation Systems: Multilevel Design, Transportation Research Record 1494, TRB
- [21] GRAVAT, J. (undatiert): FAST-TRAC – Success In: Any Lane, [http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/PRESREL/\\$801!.PDF](http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/PRESREL/$801!.PDF), undated
- [22] HBS (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 299, FGSV Verlag GmbH, Köln
- [23] HCM (2000): Highway Capacity Manual. Special Report 209, Transportation Research Board, Washington D. C.
- [24] HICKS, B., CARTER, M. (2000): What have we learned about intelligent transportation systems? Arterial Management, US Department of Transportation/Federal Highway Administration, 2000, http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/jpodocs/repts_te/@9w01!.pdf

- [25] HOFFMANN, G., GLATZ, M. (2002): Fehlertolerante Verkehrserfassungssysteme für verkehrsabhängige Steuerungsverfahren, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 833, Bundesminister für Verkehr – Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2002
- [26] HÖPFL, W. (2000): Ampelsteuerung in Graz, Konferenz des Ungarischen Verkehrswissenschaftlichen Vereins in Pecs, Ungarn 2000
- [27] ITS AMERICA (2002): Transit Signal Priority, Internetquelle, 2002
- [28] JAKERT, D. (2006): Verkehrstechnische Untersuchung des Straßenzuges Bonnstraße in Frechen, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum
- [29] JONGENOTTER, E., MOSMA, S. (2002): Green logic and the benefits for traffic-actuated control – the Dutch experience, Traffic Engineering and Control, Heft 10, Seite 351-353, Printerhall, London, UK 2002
- [30] KAUL, H., ALBRECHT, H. (1994): VS-PLUS: Ein neuer Weg zur Realisierung verkehrsabhängiger Steuerung, Vortragsschrift für das Kolloquium „Verkehrsabhängige Steuerung an Knotenpunkten“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 8. Feb. 1994, Kassel
- [31] KNUDSEN, T. A., HANSEN, P. B., VARBERG, N. (2001): MOTION i Valby – adaptivt signalstyresystem, Trafikdage, Aalborg, Dänemark, 2001 (www.trafikdage.dk)
- [32] KOSONEN, I., DAVIDSSON, F. (1994): Evaluation And Testing Of SPOT And SOS-II Control Strategies Using HUTSIM Simulator, Seventh International Conference On Road Traffic Monitoring And Control, 26-28 April 1994, Proceedings (IEE Conference Publication 391), 1994, IEE, Savoy Place, London, United Kingdom 1994
- [33] KRONBORG, P., DAVIDSON, F. (1993): MOVA and LHOVRA: traffic signal control for isolated intersections, Traffic Engineering and Control, Heft 4, Seite 195-200, Printerhall, London, UK 1993
- [34] KRUSE, G. (1999): COSMOS – Results of the MOTION Demonstrator for Congestion and Incident Management Strategies in Piraeus, Trafikdage, Aalborg, Dänemark, 1999, (www.trafikdage.dk)
- [35] KUHLMANN, D. (2005): Verkehrstechnische Untersuchung des Straßenzuges Hauptstraße/Rainerstraße/Eickeler Straße in Herne-Eickel, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum
- [36] KUWAHARA, M., KOSHI, M. (1990): Decision of Timing of Signal Program Switching in Pretime Multi-Program Control, Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the Eleventh International Symposium on Transportation, Seite 531-550, Elsevier, New York, NY, USA 1990
- [37] LITTLE, J. D. C., KELSON, M. D. (1980): Optimal Signal Timing for Arterial Signal Systems, MAXBAND. Operations Research Center, MIT, Cambridge, MA, USA
- [38] LÖNS, D. (1989): Entwicklung eines Algorithmus zur Maximierung von Grünbändern für mehrphasige Lichtsignalprogramme, Diplomarbeit, Hannover, 1989
- [39] LOWRIE, P. R. (1982): The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System – Principles, Methodology, Algorithms. Department of Main Roads, N. S. W., Australia 1982
- [40] LU, Y. (2002): Traffic Network Simulation and Optimization by TSIS5.0 and TRANSYT-7F. Master Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Canada
- [41] MESSER, C. J., HAENEL, H. E., KOPPE, E. (1974): A Report on the User's Manual for Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine – PASSER II. TTI Research Report 165-14, College Station, Texas
- [42] MEYER, M. (1997): A Toolbox for Alleviating Traffic Congestion and Enhancing Mobility (Washington, DC: Institute of Transportation Engineers, 1997), pp. 11-74
- [43] MOORE, J. E., JAYAKRISHNAN, R., McNALLY, M. G., ARTHUR, C., HU, H.-H., MATTINGLY, D., CHO, S., ROLDAN, J. (1999): Independent Evaluation of the City of Anaheim Advanced Traffic Control System IVHS Field Operational Test: SCOOT

- Performance, Report on MOU 653134, Annual PATH Conference, Richmond Field Station, October 14, 1999
- [44] MUSSA, R., SELEKWA, M. (2003): Proposed methodology of optimizing transitioning between time-of-day timing plans, *Journal of Transportation Engineering*, Heft 7/8, Seite 392-398, ASCE, Reston, VA, USA 2003
- [45] Oak Ridge National Laboratory (1999): ITS deployment tracking database
- [46] OBENBERGER, J., COLLURA, J. (1995): Transition strategies to exit preemption control, *Transportation Research Record*, Heft 1484, Seite 72-79, Transportation Research Board, Washington, DC, USA 1995
- [47] OLDACH, Y. (2005): Verkehrstechnische Untersuchung des Straßenzuges Hauptstraße in Herne-Eickel mit VISSIM, Studienarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum
- [48] PARK, B., ROUPHAIL, N. M., HOCHANADEL J., SACKS, J. (2000): Evaluating the Reliability of TRANSYT-7F Optimization Schemes, Paper presented at the 79th TRB Annual Meeting, Washington, D. C., January 2000
- [49] PAßGANG, C. (2006): Verkehrstechnische Untersuchung des Straßenzuges Herner Straße in Bochum mit dem Programm VISSIM, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum
- [50] PEARSON, R. (2003): Traffic Signal Control, Institute of Transportation Studies at the University of California at Berkeley and Caltrans, 2003
- [51] PITZINGER, P., SULZER, E. (1985): Lichtsignalanlagen für den Straßenverkehr, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1985
- [52] RAKHA, H. et al. (2000): Requirements for Evaluating Traffic Signal Control Impacts on Energy and Emission based on Instantaneous Speed and Acceleration Measurements, *Transportation Research Board*, 79th Annual Meeting, January 9-13, 2000, Washington, D. C.
- [53] RiLSA (1992): Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr (RiLSA); Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Nr. 321, Köln, Berichtigter Nachdruck 1998
- [54] RiLSA (2003): Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) – Teilfortschreibung 2003, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2003 (Autorenkollektiv)
- [55] ROBERTSON, D. I. (1969): TRANSYT, Beiträge zur Theorie des Verkehrsflusses, *Proceedings of the 6th International Symposium on Traffic Theory*, Karlsruhe, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 86, S. 134-144, 1969
- [56] ROWE, E. (1990): The Los Angeles Automated Traffic Surveillance and Control (ATSAC) System, Los Angeles Department of Transportation, 1990
- [57] RUHNKE, D. (1993): Konzept für die busbeeinflusste Lichtsignalsteuerung in Hamburg, *Straßenverkehrstechnik*, Heft 1, Seite 5-10, Kirschbaum-Verlag, Bonn 1993
- [58] SCHNABEL, W., LOHSE, D., LÄTZSCH, L., WINDOLPH, J. (1997): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 1, *Verkehrstechnik*, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin 1997
- [59] SCHNABEL, W., LÄTZSCH, L., BRÜCKNER, N. (2001): Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr, *Straßenverkehrstechnik*, Heft 12/2001, S. 584-595
- [60] STEIERWALD, M., MARTENS, S. (Hrsg.) (2003): Steuerung kommunaler Verkehrsnetze – Was können und was kosten die neuen Verfahren? Was setzen sie voraus? <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2003/1544/pdf/ab236.pdf>
- [61] SUNKARI, S. R., BEASLEY, P. S., URBANIK, T., FAMBRO, D. B. (1995): Model to Evaluate the Impacts of Bus Priority on Signalized Intersections, *Transportation Research Record* No. 1494, pp. 117-123
- [62] *Traveling with Success: How Local Governments Use Intelligent Transportation Systems: On the Fast-Trac to Economic Health-Oakland County, Michigan*, Public Technologies, Inc., undated (http://pti.nw.dc.us/task_forces/transportation/docs/success/travel31.htm)

- [63] VINCENT, R. A., PIERCE, J. R. (1988): MOVA: Traffic Responsive, Self Optimizing Signal Control for Isolated Intersections. TRRL Report, 170. Transport and road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- [64] WILD, B. (1994): SAPPORO, a framework for intelligent integrated traffic management systems, Artificial intelligence applications to traffic engineering, pp. 117-136, VSP, Utrecht, Netherlands 1994
- [65] WU, N. (2005): Evaluierung und Erweiterung von Verfahren zur Bewertung von verkehrabhängigen, zeitlückengesteuerten Lichtsignalanlagen, Straßenverkehrstechnik, Heft 9/2005, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn 2005

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2002

- V 88: Täglicher Fernpendeln und sekundär induzierter Verkehr
Vogt, Lenz, Kalter, Dobeschinsky, Breuer € 17,50
- V 89: Verkehrsqualität auf Busspuren bei Mitnutzung durch andere Verkehre
Baier, Kathmann, Schuckließ, Trapp, Baier, Schäfer € 13,50
- V 90: Anprallversuche mit Motorrädern an passiven Schutzeinrichtungen
Bürkle, Berg € 16,50
- V 91: Auswirkungen der Umnutzung von BAB-Standstreifen
Mattheis € 15,50
- V 92: Nahverkehrsbevorrechtigung an Lichtsignalanlagen unter besonderer Berücksichtigung des nichtmotorisierten Verkehrs
Friedrich, Fischer € 14,00
- V 93: Nothaltemöglichkeiten an stark belasteten Bundesfernstraßen
Brilon, Bäumer € 17,00
- V 94: Freigabe von Seitenstreifen an Bundesautobahnen
Lemke, Moritz € 17,00
- V 95: Führung des ÖPNV in kleinen Kreisverkehren
Topp, Lagemann, Derstroff, Klink, Lentze, Lübke, Ohlschmid, Pires-Pinto, Thömmes € 14,00
- V 96: Mittellage-Haltestellen mit Fahrbahnanhebung
Angenendt, Bräuer, Klöckner, Cossé, Roeterink, Sprung, Wilken € 16,00
- V 97: Linksparken in städtischen Straßen
Topp, Riel, Albert, Bugiel, Elgun, Roßmark, Stahl € 13,50
- V 98: Sicherheitsaudit für Straßen (SAS) in Deutschland
Baier, Bark, Brühning, Krumm, Meewes, Nikolaus, Räder-Großmann, Rohloff, Schweinhuber € 15,00
- V 99: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2000 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Laffont, Nierhoff, Schmidt € 21,00

2003

- V 100: Verkehrsqualität unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage
Brilon, Miltner € 17,00
- V 101: Straßenverkehrszählung 2000 – Ergebnisse
Lensing € 13,50
- V 102: Vernetzung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen
Kniß € 12,50
- V 103: Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten
Falkenberg, Blase, Bonfranchi, Cossé, Draeger, Kautzsch, Stapf, Zimmermann € 11,00
- V 104: Standortentwicklung an Verkehrsknotenpunkten – Randbedingungen und Wirkungen
Beckmann, Wulfhorst, Eckers, Klönne, Wehmeier, Baier, Peter, Warnecke € 17,00
- V 105: Sicherheitsaudits für Straßen international
Brühning, Löhe € 12,00
- V 106: Eignung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen gemäß den Anforderungen nach DIN EN 1317
Ellmers, Balzer-Hebborn, Fleisch, Friedrich, Keppler, Lukas, Schulte, Seliger € 15,50

V 107: Auswirkungen von Standstreifenumnutzungen auf den Straßenbetriebsdienst
Moritz, Wirtz € 12,50

V 108: Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen
Baier, Kathmann, Baier, Schäfer € 14,00

V 109: Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf auf b2+1-Strecken mit allgemeinem Verkehr
Weber, Löhe € 13,00

2004

- V 110: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2001 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Laffont, Nierhoff, Schmidt, Kathmann € 22,00
- V 113: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden
Schweig, Keuchel, Kleine-Wiskott, Hermes, van Acken € 15,00
- V 114: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing
Loose, Mohr, Nobis, Holm, Bake € 20,00
- V 115: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Kathmann, Laffont, Nierhoff € 24,50
- V 116: Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen – Zentralrechner/Knotenpunktgerät und Zentralrechner/Ingenieurarbeitsplatz
Kroen, Klod, Sorgenfrei € 15,00
- V 117: Standorte für Grünbrücken – Ermittlung konfliktreicher Streckenabschnitte gegenüber großräumigen Wanderungen jagdbarer Säugetiere
Surkus, Tegethof € 13,50
- V 118: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer
Steinauer, Maier, Kemper, Baur, Meyer € 14,50

2005

- V 111: Autobahnverzeichnis 2004
Kühnen € 21,50
- V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00
- V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50
- V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50
- V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50
- V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik
Lensing € 15,50
- V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simović, Bozkurt, Buchmann, Roeterink € 15,50
- V 125: PM₁₀-Emissionen an Außererststraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM₁₀-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen
Düring, Bösinger, Lohmeyer € 17,00
- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckließ € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003
Fitschen, Koßmann € 24,50

- V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation
Boltze, Reusswig € 17,00
- V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst
Badelt, Breitenstein € 13,50
- V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02
Steven € 12,00
- V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50
- V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme
Boltze, Breser € 15,50

2006

- V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge
Hübelt, Schmid € 17,50
- V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50
- V 135: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00
- V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00
- V 137: PM_x-Belastungen an BAB
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO_x)- und Ozon (O₃)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50
- V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00
- V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 15,50
- V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003
Lensing € 15,00
- V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen
Fischer, Brannolte € 17,50
- V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50
- V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50
- V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland
Baier, Klemp, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: Prüfung von Sensoren für Glättmeldeanlagen
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50
- V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie –
Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger € 16,50
- V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung
Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig € 18,50
- V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst
Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin € 18,00

2007

- V 151: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO
Böhl, Mause, Kloppe, Brückner € 16,50
- V 152: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer
Gerlach, Oderwald € 15,50
- V 153: Standstreifenfreigabe – Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen
Lemke € 13,50
- V 154: Autobahnverzeichnis 2006
Kühnen € 22,00
- V 155: Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie in Deutsches Recht
Bartolomaeus € 12,50
- V 156: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen
Badelt, Seliger, Moritz, Scheurl, Häusler € 13,00
- V 157: Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317
Klößner, Fleisch, Balzer-Hebborn € 14,50
- V 158: Zustandserfassung von Alleebäumen nach Straßenbaumaßnahmen
Wirtz € 13,50
- V 159: Luftschadstoffe an BAB 2006
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 160: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 25,50
- V 161: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen
Listl, Otto, Zackor € 14,50
- V 162: Ausstattung von Anschlussstellen mit dynamischen Wegweisern mit integrierter Stauinformation – dWiSta
Grahl, Sander € 14,50
- V 163: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen
Brilon, Wietholt, Wu € 17,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.