

Verkehrsadaptive Netzsteuerungen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 230

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving them a 3D appearance as if they are floating above a white surface.

Verkehrsadaptive Netzsteuerungen

**Untersuchung ihrer
Einflussmöglichkeiten auf die
Emissions- und Immissions-
belastung städtischer Straßennetze**

von

Sandra Hohmann
Stefan Giuliani
Thomas Wietholt

Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Verkehrswesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 230

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, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BAST zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/benutzung>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt: FE 77.0484/2006

Untersuchung der Einflussmöglichkeiten verkehrsadaptiver Netzsteuerungen auf die Emissions- und Immissionsbelastung städtischer Straßennetze

Fachbetreuung

Anja Baum, Tobias Teichner

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-049-6

Bergisch Gladbach, Oktober 2013

Kurzfassung – Abstract

Verkehrsadaptive Netzsteuerung

Ziel der Untersuchung war es, anhand realer Fälle adaptive Steuerungen von Lichtsignalanlagen für städtische Hauptverkehrsstraßen mit konventionellen Steuerungen zu vergleichen.

Für die Untersuchung wurden je zwei Hauptverkehrsstraßen in Münster und Remscheid ausgewählt, auf denen adaptive Steuerungen eingerichtet wurden. Dabei wurde zunächst eine konventionelle Koordinierung mit weitgehend verkehrsunabhängigen Elementen hergestellt. Zusätzlich konnte jeweils eine adaptive Steuerung geschaltet werden. Auf allen Strecken wurden systematisch Testfahrten bei Schaltung der verschiedenen Steuerungszustände durchgeführt. Die hierbei mittels GPS aufgezeichneten Fahrzeugtrajektorien wurden hinsichtlich der Anzahl von Halten und der Wartezeiten analysiert, um so zu einer verkehrstechnischen Beurteilung zu gelangen. Auf der ersten Teststrecke in Münster konnte durch die adaptive Steuerung eine deutliche Verbesserung des Verkehrsablaufs erreicht werden. Auf der zweiten Teststrecke in Münster ließ sich dieser Erfolg nicht wiederholen. Es traten teilweise erhebliche verkehrliche Verschlechterungen bei Schaltung der adaptiven Steuerung ein. Auf den Teststrecken in Remscheid ergaben sich durch die adaptive Steuerung in jeweils einer Fahrtrichtung Verbesserungen des Verkehrsflusses. Dem stehen jedoch Verschlechterungen in der Gegenrichtung gegenüber.

Weil eine direkte Erfassung der Immissionen vor Ort nicht möglich war, wurde eine Antwort hinsichtlich der ökologischen Wirkungen durch mikroskopische Simulation gesucht. Für je eine Strecke in Münster und Remscheid wurde die adaptive Steuerung in ein VISSIM-Modell integriert. Die simulierten Fahrzeugtrajektorien wurden durch das Verfahren PHEM im Hinblick auf die Schätzung der Emissionen analysiert. Dabei zeigte sich in Münster eine leichte Verbesserung (1,0 %) der ökologischen Auswirkungen als Folge der adaptiven Steuerung. In Remscheid zeigte sich nach den eingetretenen ungünstigen verkehrlichen Wirkungen erwartungsgemäß auch eine Verschlechterung der ökologischen Auswirkungen. Die Ergebnisse der mikroskopischen Simulation in Verbindung mit der adaptiven Steuerung auf diesem Streckenzug unterlagen jedoch erheblichen Schwankungen, so-

dass hiermit lediglich tendenzielle Aussagen möglich sind.

Im Ergebnis zeigte sich, dass die adaptiven Verfahren die Möglichkeit eröffnen, den Verkehrsfluss auf städtischen Hauptverkehrsstraßen zu verflüssigen. Dabei können auch Verbesserungen hinsichtlich der Schadstoffemissionen und des Energieverbrauchs eintreten. Diese Verbesserungen können jedoch nicht uneingeschränkt vorausgesetzt werden, sondern bedürfen einer zum Teil längerfristigen, kostenintensiven Einstellungsphase.

Adaptive traffic control systems

The research aimed at a comparison of signal coordination with adaptive traffic control systems (ATCSs) and conventional traffic-actuated signal control systems in existing urban areas.

ATCS performance was analysed on four selected urban arterials in Münster and Remscheid. On these corridors a conventional traffic-actuated coordination was installed that could be switched over to ATCS. Data collection on all corridors was conducted to gather empirical data for the different signal control systems. The vehicle trajectories were analysed considering the number of stops and the delay. ATCS implementation in Münster on the first corridor improved traffic flow significantly while on the second corridor diverse results were gained together with partly significant declines in the level of service with the ATCS. The traffic flow quality on the corridors in Remscheid could be partially improved by the implementation of ATCS, but declines were also identified.

Due to the impossibility to measure immissions locally, the environmental impacts had to be estimated using microscopic simulation. For one corridor in Münster and one in Remscheid, the ATCS was integrated into the microsimulation program VISSIM. The simulated vehicle trajectories were analysed by the program PHEM to estimate the emissions. In Münster, marginal improvements of 1.0% concerning the environmental impact were observed after ATCS implementation. In addition to the poor traffic-related effects in Remscheid, the

ecological impact deteriorated as expected. The results of microscopic simulation in addition with an ATCS were afflicted with considerable erratic fluctuations implying that the results are only able to represent a tendency.

As a result, ATCSs provide the possibility to improve traffic flow on urban arterial highways in addition to possible improvements of emissions and energy consumption. However, these effects usually cannot be taken for granted. In many cases a cost and time-intensive calibration-process is required

Inhalt

1	Einleitung	7	3.4	Stadt Remscheid – Hastener Straße	32
2	Stand der Technik	8	3.4.1	Lage des Untersuchungsgebietes	32
2.1	Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen	8	3.4.2	Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet	33
2.1.1	Überblick	8	4	Methodik zur Bewertung der verkehrlichen Wirkung adaptiver Steuerungen	33
2.1.2	TRANSYT	9	4.1	Empirische Messungen	33
2.1.3	SCOOT	10	4.1.1	Durchführung der Floating-Car-Messungen	33
2.1.4	SCATS	11	4.1.2	Auswertung der Messungen	34
2.1.5	BALANCE	12	4.1.3	Korrektur der Messwerte	36
2.1.6	MOTION	13	4.2	Mikroskopische Simulation	36
2.2	Verkehrliche Wirkungen adaptiver Steuerungen	14	5	Methodik zur Bewertung der Umweltwirkungen adaptiver Steuerungen	38
2.3	Umweltwirkungen adaptiver Steuerungen	18	5.1	Empirische Messungen der Immissionen	38
2.3.1	Luftschadstoffe im Straßenverkehr	18	5.2	Rechnerische Ermittlung der Emissionen	39
2.3.2	Einflüsse der Lichtsignalsteuerung	21	6	Ergebnisse der empirischen Messungen	41
2.3.3	Verfahren zur Emissions- berechnung	23	6.1	Stadt Münster – Albersloher Weg	42
2.3.4	Verfahren zur Immissions- messung	25	6.2	Stadt Münster – Weseler Straße	44
3	Beschreibung der Untersuchungsgebiete	26	6.3	Stadt Remscheid – Bismarckstraße ...	46
3.1	Stadt Münster – Albersloher Weg	26	6.4	Stadt Remscheid – Hastener Straße ..	47
3.1.1	Lage des Untersuchungsgebietes	26	7	Simulationsstudien	47
3.1.2	Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet	28	7.1	Methodik	47
3.2	Stadt Münster – Weseler Straße	28	7.2	Modellaufbau	48
3.2.1	Lage des Untersuchungsgebietes	28	7.2.1	Stadt Münster – Albersloher Weg	48
3.2.2	Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet	30	7.2.2	Stadt Remscheid – Bismarckstraße ...	50
3.3	Stadt Remscheid – Bismarckstraße ...	30	7.3	Kalibrierung und Validierung	52
3.3.1	Lage des Untersuchungs- gebietes	30	7.3.1	Vorgehensweise	52
3.3.2	Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet	31			

7.3.2	Stadt Münster – Albersloher Weg	52
7.3.3	Stadt Remscheid – Bismarckstraße . . .	53
7.4	Verkehrliche Wirkungen aus den Simulationen	55
7.4.1	Stadt Münster – Albersloher Weg	55
7.4.2	Stadt Remscheid – Bismarckstraße . . .	56
7.5	Umweltwirkungen aus den Simulationen	57
7.5.1	Stadt Münster – Albersloher Weg	57
7.5.2	Stadt Remscheid – Bismarckstraße . . .	64
8	Zusammenfassung	70
	Literatur	72

Die Anhänge sind dem Bericht auf CD beigefügt.

1 Einleitung

Der Umweltschutz nimmt in der Gesellschaft einen immer größeren Stellenwert ein. Durch die 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) wurden 2010 alle geltenden EU-Richtlinien über die Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität und die Grenzwerte für verschiedene Luftschadstoffe in nationales Recht umgesetzt. Im Zuge der Luftreinhaltung müssen bei Überschreitung der Grenzwerte geeignete Maßnahmen zur Senkung der Schadstoffbelastung ergriffen werden. Seit Inkrafttreten der Grenzwerte für Schwebstaubpartikel PM₁₀ im Jahr 2005 bereitet deren Einhaltung an hoch belasteten Standorten jedoch weiterhin große Schwierigkeiten. Aufgrund der Grenzwertvorgaben werden in ganz Europa Maßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte entwickelt. Dabei wird naturgemäß auch die Möglichkeit der effektiveren Lichtsignalsteuerung diskutiert, da diese den Verkehrsablauf auf innerstädtischen Hauptverkehrsstraßen entscheidend prägt. Bisher gibt es jedoch keine belastbaren Erkenntnisse über die Möglichkeiten, über die Steuerung der Lichtsignalanlagen gezielt auf Umweltparameter einzuwirken. Im Stadtverkehr wird ein Großteil der Haltevorgänge durch Lichtsignalanlagen verursacht. Die dadurch bedingten Anfahrvorgänge verursachen verstärkt Emissionen. Somit gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen den Standorten der Lichtsignalanlagen und besonders belasteten Bereichen.

In der Vergangenheit wurden vorwiegend traditionelle festzeitgesteuerte „Grüne Wellen“ und die darauf aufbauenden koordinierten verkehrabhängigen Steuerungen eingesetzt, um einen gleichmäßigeren Verkehrsfluss zu erreichen. Als Weiterentwicklung dieser Steuerungsarten sind im Ausland vollverkehrsabhängige netzweite Steuerungen in einer Form entstanden, wie es sie in Deutschland bislang nicht gab. SCOOT, die britische Variante, erzeugt eine dynamische TRANSYT-Optimierung. Dabei wird die Optimierung im laufenden Betrieb auf der Basis von Detektorzählungen vorgenommen. SCATS ist eine vergleichbare australische Lösung. Sie orientiert sich vor allem an der Maximierung des Durchsatzes des jeweiligen Knotenpunkts. Die Systeme sind bei einem großflächigen Einsatz (z. B. ganzes Stadtgebiet) sinnvoll. Einsatzorte finden sich weltweit – allerdings nicht in Deutschland. Insofern ist ein Einbezug in die vorliegende Untersuchung weder sinnvoll noch möglich.

In die gleiche Richtung zielen so genannte adaptive Systeme, wie sie mit den Programmen MOTION und BALANCE in Deutschland entwickelt wurden. Hierbei handelt es sich um modellbasierte Steuerungssysteme, die im laufenden Betrieb eine an die aktuelle Verkehrssituation angepasste Steuerung berechnen. In diesen Systemen sind durch Veränderung der Gewichtung der Zielkriterien verschiedene Optimierungsvarianten theoretisch realisierbar. Diese Systeme verlassen das Ziel einer netzweiten Gesamtoptimierung. Sie konzentrieren sich auf eine Verflüssigung des Verkehrsaufkommens in örtlich begrenzten Teilnetzen. Durch die geschickte Planung der Schnittstellen dieser Teilnetze ist jedoch auch hier eine Optimierung des gesamten Netzes denkbar. Die verkehrsadaptiven Lichtsignalsteuerungen stoßen in den letzten Jahren in der Praxis in Deutschland auf ein großes Interesse. Ein Problem dieser Steuerungen ist jedoch oft, dass sie als „Black Box“ vom Hersteller geliefert und installiert werden. Eine vollständige Information über die Funktionsweise ist nicht zugänglich. Die adaptiven Steuerungen werden derzeit in der Praxis als Garant für einen optimalen Verkehrsablauf propagiert. Eine unreflektierte Anwendung dieser Systeme garantiert jedoch keinen optimalen Verkehrsablauf. Auch für die Bewertung der Wirkung einer adaptiven Steuerung gibt es bisher kein standardisiertes Verfahren. Dabei ist vor allem offen, wie die Wirkungen auf die Umwelt erfasst und bewertet werden können.

Dazu wäre die Entwicklung eines einheitlichen Verfahrens beim Umgang, der Optimierung und der Bewertung adaptiver Steuerungen im Hinblick auf Emissionen des Kfz-Verkehrs erforderlich. Die Normierung eines solchen Verfahrens gestaltet sich jedoch als schwierig. In jedem Stadtgebiet unterscheiden sich die Einflüsse der topografischen und meteorologischen Gegebenheiten. Zudem sind verlässliche Methoden zur Messung der Umweltbelastungen außerordentlich komplex. Dazu kommen unterschiedliche Formulierungen der (teilweise auch politisch geprägten) Zielkriterien. Daher gilt es, in dieser Untersuchung die Wirkungen der adaptiven Netzsteuerung durch empirische Messungen zu quantifizieren. Untersucht werden dazu an jeweils zwei ausgewählten Untersuchungsgebieten die Steuerungsverfahren MOTION und BALANCE. Die Bewertung der Emissions- und Immissionsbelastungen stellt ein zentrales Problem dar. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu den empirischen Messungen Simulationsstudien durchgeführt. So ist

es möglich, die Zusammenhänge zwischen verkehrlichen Wirkungen, den Schadstoffemissionen und der Art sowie Qualität der Signalkoordinierung darzustellen.

2 Stand der Technik

2.1 Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen

2.1.1 Überblick

Die Steuerungsverfahren von Lichtsignalanlagen haben sich von den ersten Anfängen bis heute stark verändert. Bis in die achtziger Jahre waren Lichtsignalanlagen hauptsächlich festzeitgesteuert. Entwicklungen der Lichtsignalanlagen vollzogen sich in der Praxis in Deutschland hauptsächlich im Bereich der Steuerungstechnik und weniger bei den Steuerungsverfahren. In diesem Sinne kommen seit den frühen achtziger Jahren vermehrt verkehrsabhängige Steuerungen auch im Zusammenhang mit der Koordinierung zum Einsatz, nachdem sie sich für einzeln gesteuerte Knotenpunkte bereits durchgesetzt hatten. Für diese Steuerungen werden überwiegend logikbasierte Verfahren eingesetzt, die zeitliche oder logische Bedingungen prüfen, die sich im Verkehrsablauf einstellen.

Mitte der achtziger Jahre wurde politisch die Attraktivitätssteigerung des ÖPNV immer wichtiger und somit wurden vermehrt ÖV-Bevorrechtigungen in die Steuerungslogiken eingebaut. Seit den neunziger Jahren kommen auch in Deutschland vermehrt adaptive Steuerungen zum Einsatz, die eine gezielte Optimierung des Verkehrsablaufs in einem Netz im laufenden Betrieb durchführen.

Abseits des praktischen Einsatzes der Steuerungsverfahren wurden schon früh erste Überlegungen in Richtung adaptiver Steuerungen angestellt. So wurde die erste adaptive Steuerungsstrategie bereits 1963 von MILLER formuliert. Die Verfahren entwickelten sich im Laufe der Zeit stetig weiter.

In GARTNER (1983) wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes zu den UTCS-Verfahren (Urban Traffic Control System) eine Einteilung der verkehrsabhängigen Steuerungen in drei Generationen entwickelt (siehe Tabelle 2-1). Aufbauend auf diesen drei Generationen kann der nächste Schritt in der Entwicklung der adaptiven Steuerungen als vierte Generation bezeichnet werden. In Turin (Italien) wurde das Verfahren UTOPIA/SPOT (DONATI et al., 1984) entwickelt.

In Deutschland sind dies im Wesentlichen die zwei Verfahren, die derzeit auf dem Markt angeboten werden: MOTION und BALANCE. Neben diesen Verfahren kommen international die Weiterentwicklungen der Verfahren SCOOT und SCATS zum Einsatz. In den folgenden Kapiteln wird die Funktionsweise dieser vier Verfahren neben dem Verfahren TRANSYT beschrieben, welches eine Grundlage für die netzweite Optimierung von Lichtsignalanlagen darstellt.

Im Weiteren werden die grundsätzlichen Funktionsweisen der wichtigsten adaptiven Steuerungen beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der praktischen Umsetzung ist nicht möglich, da sich die Verfahren in einer stetigen Weiterentwicklung befinden und die detaillierten Methoden in der Regel nicht veröffentlicht werden.

Zur Verdeutlichung der Klassifizierung von Steuerungsverfahren für koordinierte Lichtsignalanlagen

Merkmal	1. Generation	2. Generation	3. Generation
Steuerungszyklus	15 Minuten	5-10 Minuten	3-5 Minuten
Signalplan-Generierung	Offline Optimierung, Auswahl aus Bibliothek nach Tageszeit, nach Kennwerten, manuell durch Operator	Online-Optimierung	Online-Optimierung
Verkehrsvorhersage	Keine	Basierend auf historischen Daten	Geglättete Werte
Steuerung kritischer Kreuzungen	Feinanpassung der Freigabezeiten	Feinanpassung der Freigabezeiten und der Versatzzeiten	Nicht anwendbar
Umlaufzeit	Gebietsweit festgelegt	Festgelegt für variable Gruppen von Knotenpunkten	Variabel in Raum und Zeit

Tab. 2-1: Klassifizierung der Steuerungsstrategien (nach GARTNER, 1983)

	Bezeichnung
1	Festzeitsteuerung
2	Verkehrsabhängige Steuerung – logikbasiert
3	Verkehrsabhängige Steuerung – modellbasiert (adaptive Steuerung)

Tab. 2-2: Klassifizierung von koordinierten Lichtsignalsteuerungen

wird hier eine einfache Sprechweise vorgeschlagen (siehe Tabelle 2-2), die sich an die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (FGSV, 2010) anlehnt.

Dafür gilt:

1. Festzeitsteuerung

Alle Knotenpunkte haben eine einheitliche feste Umlaufzeit. Alle Signalgruppen folgen einem festen Zeitplan. Die Auswahl des jeweiligen Zeitplans kann Uhrzeit-gesteuert erfolgen oder auf der Basis einer Logik, die sich auf die Erfassung von Verkehrsdaten mittels Detektoren stützt.

2. Logikbasierte Steuerung

Eine solche Steuerung verwendet meistens als Basis einen Rahmenplan, der einer Festzeitsteuerung entspricht. Dieser Rahmenplan wird jedoch an den einzelnen Knotenpunkten durch Modifikationen der Freigabezeiten überlagert. Diese ergeben sich aus Informationen über die momentane Verkehrslage. Dazu gehören auch bevorzugte Freigaben für ÖPNV-Fahrzeuge.

3. Modellbasierte Steuerung

Eine solche Steuerung erzeugt den Signalzeitenplan mit Hilfe eines mathematischen Optimierungsmodells aus der Erfassung der gesamten Verkehrssituation in dem gesteuerten Straßennetz. Bestandteile des Systems sind:

- System zur Erfassung der Verkehrssituation (i. Allg. dargestellt durch die Verkehrsstärken aller Ströme an den Knotenpunkten, u. U. auch durch Überlastungswahrscheinlichkeiten einzelner Signalgruppen),
- mathematisches Modell zur Vorhersage der Auswirkungen (z. B. Zeitverluste, Anzahl von Halten, Umweltwirkungen) eines Signalzeitenplans,
- Optimierungsverfahren zur Minimierung der Nachteile der Signalsteuerung.

Vielfach ergibt sich dabei eine Festzeitsteuerung (entsprechend Ziffer 1), die jedoch nur über kurze Zeitperioden (z. B. 15 Minuten) erhalten bleibt. Diese wird überlagert durch logikbasierte Elemente (Ziffer 2).

Die Hintergründe der modellbasierten Steuerungen sind meistens nicht transparent, weil sie als Firmengeheimnisse nicht veröffentlicht werden. Deswegen kann ein Kunde (= Baulastträger) sich von der Qualität der Methode nicht dadurch überzeugen, dass er sie versteht. Um sich von der Güte der Methodik zu überzeugen, ist er weitgehend auf die Anwendung in der Praxis und die Beurteilung der eingetretenen Wirkungen angewiesen.

2.1.2 TRANSYT

TRANSYT ist ein Programmsystem zur Optimierung der Signalzeitenpläne in einer koordinierten Signalsteuerung. TRANSYT arbeitet offline, d. h., es erzeugt bei Vorgabe der Verkehrsstärken aller einzelnen Ströme an den Knotenpunkten einen Signalzeitenplan. Dabei kann ein verkehrstechnisches Optimum in einem flächenhaften Netz erzeugt werden.

Die Methode kann gekennzeichnet werden durch die Stichworte

- Festzeitsteuerung,
- berücksichtigt die Auflösung von Fahrzeugkolonnen,
- optimiert einen sog. Performance-Index (= gewichtetes Mittel aller Halte und Wartezeiten).

ROBERTSON (1969) entwickelte mit seinen Mitarbeitern am englischen Transport and Road Research Laboratory (TRRL) die Grundversion dieses Steuerungsverfahrens. Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich auch bei BAAß (1985). Das Programm TRANSYT besteht aus einem Verkehrsmodell und einem Optimierungsmodell. Das Verkehrsmodell ist ein zeitschrittorientiertes, makroskopisches, deterministisches Modell, mit dem die Bewegung von Fahrzeugpulks unter Berücksichtigung der aktuellen Signalisierung durch das Netz nachgebildet wird. Durch dieses Verkehrsmodell, welches auf der Berechnung der Zu- und Abflussganglinien an den Haltlinien der Knotenpunkte (siehe Bild 2-1) und der Kolonnenauflösung nach ROBERTSON (1969) beruht, können die Verlustzeiten und die Anzahl der Halte im System berechnet werden.

Das Optimierungsmodell berechnet die Versatz- und Freigabezeiten in allen Knotenpunktzufahrten, sodass für das gesamte Netz das Minimum für einen Bewertungsindex (Performance-Index) erreicht wird. Der Bewertungsindex gewichtet die Verlustzeiten und Anzahl der Halte in einem bestimmten Verhältnis und bezieht eine Gewichtung der Streckenabschnitte ein (siehe Gleichung (2-1)). So kann je nach Gewichtung der Streckenabschnitte eine Koordinierung in der Haupttrichtung oder auch eine Optimierung für das gesamte Netz erreicht werden.

$$PI = \sum_i g_i(V) \cdot v_i + k \cdot g_i(H) \cdot h_i \quad (2-1)$$

mit

PI = Performance-Index

g_i = Gewichtungsfaktor für Verlustzeiten (V) und Anzahl der Halte (H)

v_i = Verlustzeit auf dem Streckenabschnitt i

h_i = Anzahl der Halte auf dem Streckenabschnitt i

k = Gewichtungsfaktor der Anzahl der Halte gegenüber den Verlustzeiten

Durch eine „Trial and Error“-Methode werden Grünzeiten und Versatzzeiten schrittweise verändert und

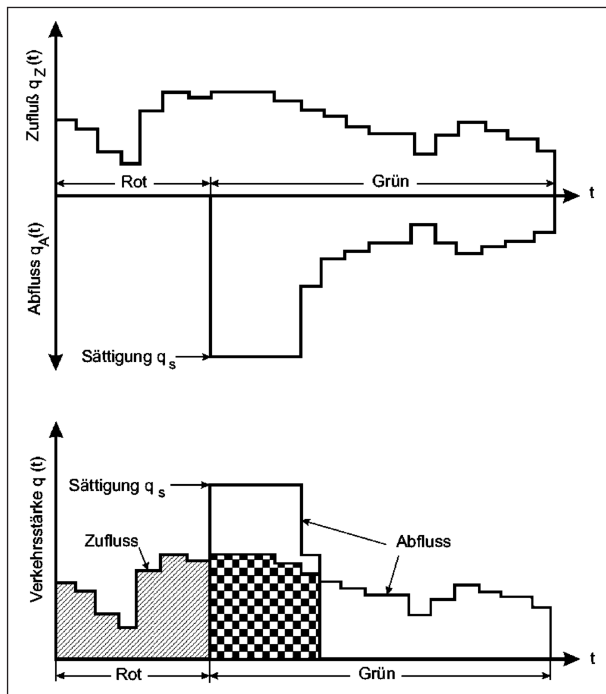


Bild 2-1: Darstellung der Zu- und Abflussganglinien im TRANSYT-Verkehrsmodell (BAAß, 1985)

die Performance-Index- (PI)-Werte neu errechnet. Die Suche nach dem geringsten möglichen Wert für PI geschieht systematisch mit einem pragmatischen Verfahren („Hill climbing“).

2.1.3 SCOOT

Das Steuerungsverfahren SCOOT kann als erstes adaptives Steuerungsverfahren bezeichnet werden. Entwickelt wurde es im Jahr 1981 von HUNT et al. Das Grundprinzip der adaptiven Steuerung SCOOT ähnelt dem Verfahren von TRANSYT. Dabei wird das Abflussprofil des vorherliegenden Knotenpunktes erfasst und basierend auf diesen Daten das Ankunftsprofil an der Haltlinie errechnet. In SCOOT werden jedoch im Gegensatz zu TRANSYT die aktuellen Verkehrsdaten online erfasst. Das Prinzip des SCOOT-Verkehrsmodells wird in Bild 2-2 verdeutlicht.

An der Ausfahrt des ersten Knotenpunktes wird die Abflussganglinie (cyclic flow profile) der ins System fließenden Fahrzeuge erfasst. Diese Ganglinie ermöglicht, unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit der Fahrzeuge, eine Berechnung der Zuflussganglinie am nächsten stromabwärts folgenden Knotenpunkt. Aus der Zuflussganglinie und den Signalzeiten können so die Verlustzeiten und Anzahl der Halte berechnet werden, die schließlich in die Bewertung eingehen.

Ähnlich wie in TRANSYT wird auch in SCOOT ein Performance-Index, der sich aus Verlustzeiten und

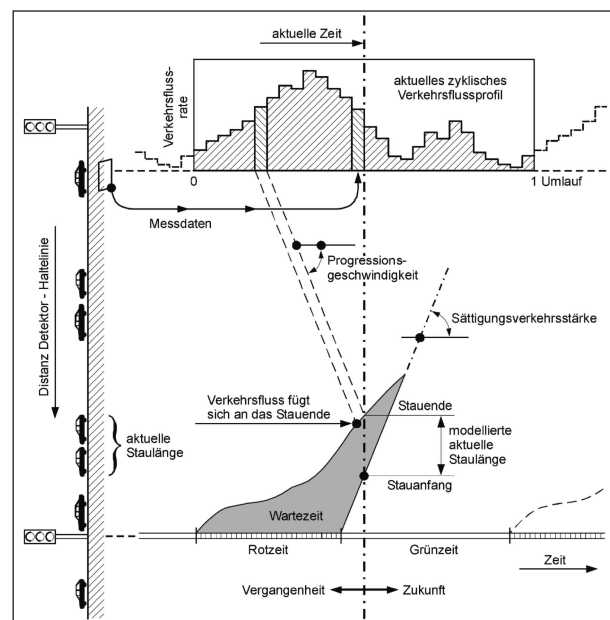


Bild 2-2: Grundprinzip des SCOOT-Verkehrsmodells (nach HUNT et al., 1981)

der Anzahl der Halte zusammensetzt, als Zielfunktion verwendet. Dieser Performance-Index wird durch einen Algorithmus optimiert, der dem „Hill-Climbing“-Algorithmus von TRANSYT ähnlich ist. Das Optimierungsmodell arbeitet nach ZACKOR et al. (1991) in folgenden Schritten:

1. Gegen Ende der Freigabezeit wird überprüft, ob der Abbruch der Freigabezeit oder eine Verlängerung um vier Sekunden günstiger für den Verkehrsablauf ist.
2. Einmal im Umlauf wird berechnet, ob eine Änderung der Umlaufzeit eine Verbesserung des Performance-Index bringt.
3. Die günstigste Umlaufzeit wird im Abstand von maximal 2,5 Minuten errechnet, wobei der am höchsten belastete Knotenpunkt genau zu 90 % ausgelastet sein sollte.

SCOOT wurde seit der Einführung im Jahr 1981 weiterentwickelt und wird heute von dem Unternehmen Siemens vertrieben. Das Verfahren wurde in zahlreichen Städten angewandt und führte teilweise zu erheblichen Steigerungen der Verkehrsqualität (vgl. HUNT et al., 1981).

2.1.4 SCATS

Das adaptive Steuerungsverfahren SCATS wurde 1982 im europäischen Raum vorgestellt. Ursprünglich wurde es für die Stadt Sydney (Australien) entwickelt, mittlerweile wird es aber auch in vielen anderen Städten (z. B. in den USA) eingesetzt.

Das Steuerungsprinzip funktioniert bei SCATS grundsätzlich anders als bei TRANSYT und SCOOT. Das gesamte Netz wird dabei in Teilnetze mit bis zu zehn LSA unterteilt. Der strategische Steuerungsalgorithmus wählt, ausgehend von den gemessenen Verkehrsstärken, die angemessene Freigabezeit, den Versatz und die Umlaufzeit für jedes Teilnetz und den Versatz zwischen den Teilnetzen. Für jede LSA sind vier Grundprogramme der Freigabezeitaufteilung hinterlegt. Basierend auf dem kritischen Knotenpunkt im Sub-System wird das Grundprogramm ausgewählt. Jedes Teilnetz hat fünf Versatzzeitenpläne innerhalb des Teilnetzes und fünf Versatzzeitenpläne für die Koordination mit den anderen Teilnetzen zur Verfügung.

In jeder Zufahrt der Knotenpunkte werden Detektoren direkt vor der Haltlinie angebracht. Die Detektoren erfüllen die strategische Aufgabe der Verkehrs-

zählung und zudem die lokalen Aufgaben zur Steuerung der LSA. Der wichtigste Parameter im SCATS-Modell ist der Sättigungsgrad, der in Gleichung (2-2) beschrieben wird.

$$DS = \frac{g'}{g} = \frac{(T - t \cdot n)}{g} \quad (2-2)$$

mit

DS = Sättigungsgrad

g = verfügbare Freigabezeit

T = Zeitraum, in dem die Fahrzeuge bei Grün über die Haltlinie fahren können

t = Zeitbedarf eines Fahrzeugs beim Passieren der Haltlinie

n = Anzahl der Zeitlücken

Die Umlaufzeit in einem Teilnetz ist eine Funktion des höchsten annehmbaren Sättigungsgrades im vorherigen Umlauf. Die Veränderung der Umlaufzeit erfolgt nach Gleichung (2-3) in Schritten von sechs Sekunden.

$$C'' = C + C' = 60 [DS + f(C)] \quad (2-3)$$

mit

C'' = berechnete Umlaufzeit für den nächsten Zyklus

C' = berechnete Umlaufzeitänderung für den laufenden Zyklus

C = Umlaufzeit im abgelaufenen Zyklus

DS = Sättigungsgrad

f(C) = höchstzulässiger Sättigungsgrad für den laufenden Zyklus

Die Freigabezeitaufteilung wird in jedem Umlauf anhand des Sättigungsgrades (DS) neu berechnet. Die Versatzzeit ist grundsätzlich unabhängig von der Umlaufzeit, sie kann jedoch als Funktion der Umlaufzeit modifiziert werden. Die Entscheidung für die Änderung eines Versatzzeitenplans muss viermal innerhalb von fünf Umläufen getroffen werden, um den Wechsel zu diesem Plan herbeizuführen. Auch die Entscheidung für die Änderungen der Versatzzeiten zwischen den Sub-Systemen wird in ähnlicher Form getroffen. Dabei wird ein Zähler verwendet, der bei einem positiven Votum um 1 erhöht und bei einem negativen Votum um 1 verringert wird. Bei einem Wert von 4 wird die Koordination

aktiviert. Der Zähler wird um 1 erhöht, wenn die Differenz der Umlaufzeit der beiden Systeme kleiner als 9 ist. Das Verkehrsmodell von SCATS verfolgt einen anderen Ansatz als die anderen hier diskutierten adaptiven Steuerungsverfahren. Während die Verkehrsmodelle dieser Steuerungsverfahren auf den Ankunftsprofilen der Fahrzeuge an den Haltlinien beruhen und somit dem Denkansatz von TRANSYT sehr ähnlich, ist das Hauptkriterium von SCATS die Sättigungsverkehrsstärke.

2.1.5 BALANCE

Das adaptive Steuerungsverfahren BALANCE (FRIEDRICH, 1999) entstand im Rahmen einer Dissertation an der TU München. Darin wurden die im Zuge der Forschungsvorhaben Munich COMFORT (MERTZ, 1996) und TABASCO (FRIEDRICH et al., 1998) gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt und erstmals unter der Bezeichnung BALANCE (BALancing Adaptive Network Control mEthod) veröffentlicht.

Das Verfahren wird von drei Hauptbereichen bestimmt:

1. Datenerfassung, Datenaufbereitung und Zuordnung,
2. Verkehrsabbildung und Wirkungsanalyse,
3. Optimierung der LSA-Steuerung.

Außerdem ist das System in eine strategische, taktische und lokale Ebene unterteilt. Die Systemstruktur des Verfahrens BALANCE ist in Bild 2-3 dargestellt. Ähnlich wie in TRANSYT und SCOOT werden bei BALANCE die abfließenden Fahrzeuge am ersten Knotenpunkt als mikroskopische Information erfasst. Die lokale Steuerung und auch die Netzsteuerung benötigen aber weitere Informationen über die Stärke der Verkehrsströme im Netz. Die Verkehrsbeziehungen werden deswegen auf lokaler Ebene dynamisch berechnet. Dies stellt die Grundlage für die Wirkungsanalyse der lokalen Steuerung dar.

Auf der Netzebene werden die dynamisch ermittelten Knotenströme für die Berechnung der Verkehrsbeziehungen und Routenverläufe genutzt. Mit Kenntnis der Ströme im Netz wird eine signalgruppenorientierte Wirkungsanalyse durchgeführt. Die Optimierung der Versatzzeiten wird ebenfalls auf taktischer Ebene durchgeführt. Die Wirkungsmodelle werden über ein Pulkmodell, das die Freiga-

bezeiten an den benachbarten Knotenpunkten berücksichtigt, berechnet. Das Modell entspricht in seinen Grundzügen dem Modell von SCOOT. Im Unterschied zu SCOOT werden die Staulängen und Wartezeiten nicht aus den Messungen, sondern über einen modellhaften Ansatz gebildet. Dadurch kann die Koordinierung auch bei Fehlen der lokalen Komponente optimiert werden. Die Rahmenpläne der einzelnen Knotenpunkte werden unter Beachtung der Zielvorgaben nach einem Bewertungsindex optimiert. Dieser Rahmenplan deckt die mittelfristigen Belange des gesamten Netzes ab. Der Rahmenplan bietet der lokalen Ebene jedoch auch genügend Flexibilität, um auf die aktuellen Ereignisse reagieren zu können.

Auch in BALANCE wird eine Zielfunktion für die Optimierung definiert. Dabei wird eine Straßenklassifizierung über die Einführung von Streckensets realisiert. Mit der Zielfunktion nach Gleichung (2-4) lässt sich dann ein strategisches Systemoptimum erreichen.

$$PI = \sum_i \sum_j \alpha_{ij} \cdot C_{ij} \quad (2-4)$$

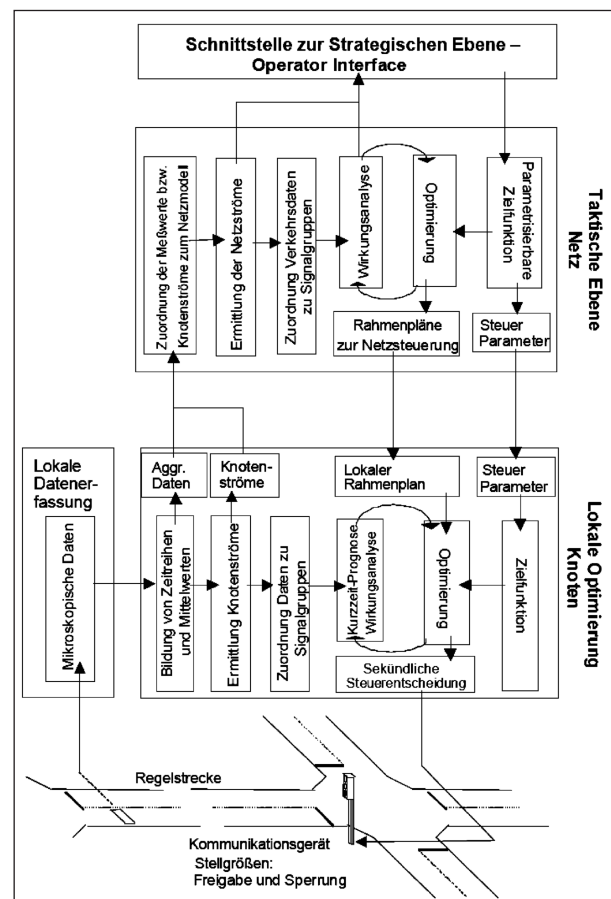


Bild 2-3: Systemstruktur von BALANCE (FRIEDRICH, 2000)

mit

PI = Performance-Index

α = Koinzidenzmatrix der Streckensets über Signalgruppen

C = allgemeine Kosten

i = Index für die Signalgruppen

j = Index für die Streckensets

Der Ausdruck C kann dabei verschiedene Wirkungskriterien wie z. B. die Wartezeit, die Staulängen, die Anzahl der Halte, die Emissionen oder den Kraftstoffverbrauch annehmen.

Die verkehrsadaptive Steuerung BALANCE wird von den Unternehmen GEVAS Software GmbH und TRANSVER GmbH kommerziell vertrieben. Das Verfahren wird ständig weiterentwickelt. Für die Optimierung der Lichtsignalsteuerung werden neben dem Hill-Climbing-Algorithmus mittlerweile auch genetische Algorithmen eingesetzt. In Bild 2-4 ist der Optimierungsprozess in BALANCE schematisch dargestellt.

Die Optimierung von Lichtsignalsteuerungen in Straßennetzen stellt ein komplexes Optimierungsproblem dar, das analytisch nicht gelöst werden kann (MERTZ, 2001).

In BALANCE wird zur Lösung des Optimierungsproblems neben dem Hill-Climbing-Algorithmus der genetische Algorithmus GALOP eingesetzt. Dieser wurde im Rahmen des Forschungsprojektes TRAVOLUTION entwickelt und erstmals in Ingolstadt im Feldversuch getestet (BRAUN und

KEMPER, 2008). GALOP wird zurzeit auch in weiteren deutschen Städten (z. B. Remscheid) für die Steuerungsoptimierung eingesetzt.

BALANCE optimiert die Rahmensignalpläne der lokalen Knotenpunktsteuerungen im Steuerungsbe- reich in 5-Minuten-Intervallen. BALANCE errechnet dafür so genannte T-Zeiten. Die T-Zeiten legen den frühesten und spätesten Beginn der Phasenübergänge in den Rahmensignalplänen fest. Vor der Optimierung werden für alle Phasenübergänge neben der Dauer des Übergangs T-Zeit-Grenzen definiert, innerhalb derer BALANCE die T-Zeiten verschieben kann. Damit wird sichergestellt, dass die Zwischenzeiten in den errechneten Rahmenplänen eingehalten werden.

Die Wirkungsanalyse ermöglicht die Berechnung signalgruppenspezifischer Kenngrößen wie Wartezeit, Anzahl der Halte und Rückstaulänge anhand aggregierter Daten des Verkehrsflussmodells. In der Zielfunktion werden die einzelnen Kenngrößen über eine signalgruppenfeine Gewichtung zu einer Zielgröße zusammengefasst. Die Minimierung dieser Größe ist das Ziel des Optimierungsprozesses.

BALANCE kann sowohl in der Online-Optimierung in städtischen Verkehrsrechnern als auch als Off-line-Tool zur Planung von Koordinierungen eingesetzt werden. Für beide Anwendungsfälle stehen genetische Algorithmen für die Steuerungsoptimierung zur Verfügung.

2.1.6 MOTION

KRUSE hat die grundsätzlichen Funktionsweisen von MOTION beschrieben (vgl. STEIERWALD und MARTENS, 2003). In MOTION werden die Vorteile von online-optimierten „Grünen Wellen“ für die Hauptverkehrsströme mit der Flexibilität von lokalen verkehrsabhängigen Steuerungen verbunden. Die grundsätzliche Funktionsweise ist in Bild 2-5 dargestellt.

MOTION ist ein kommerzielles Produkt der Siemens AG und wird ständig weiterentwickelt. Derzeit werden in MOTION zwei verschiedene Optimierungsverfahren verwendet. Das deterministische Verfahren bietet die Möglichkeit, die LSA unter Berücksichtigung von Fahrzeugpuls zu optimieren. Dieses Verfahren eignet sich besonders für linienhafte Netze mit hohen Koordinierungsanforderungen. Daneben wird ein netzweit orientiertes Optimierungsverfahren mit genetischen Algorithmen eingesetzt (MÜCK, 2008).

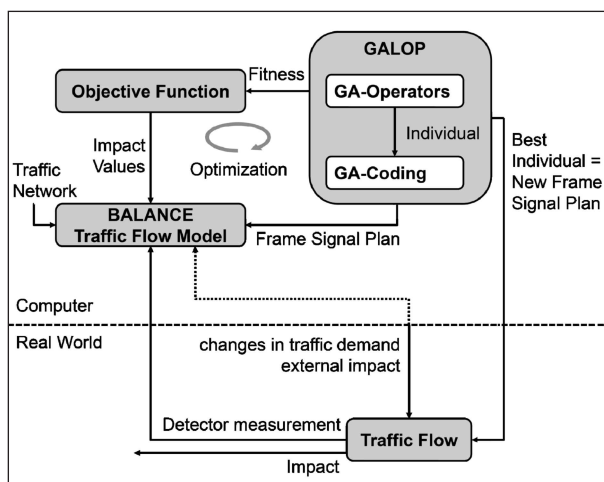


Bild 2-4: Optimierungsprozess in BALANCE (nach BRAUN und KEMPER, 2008)

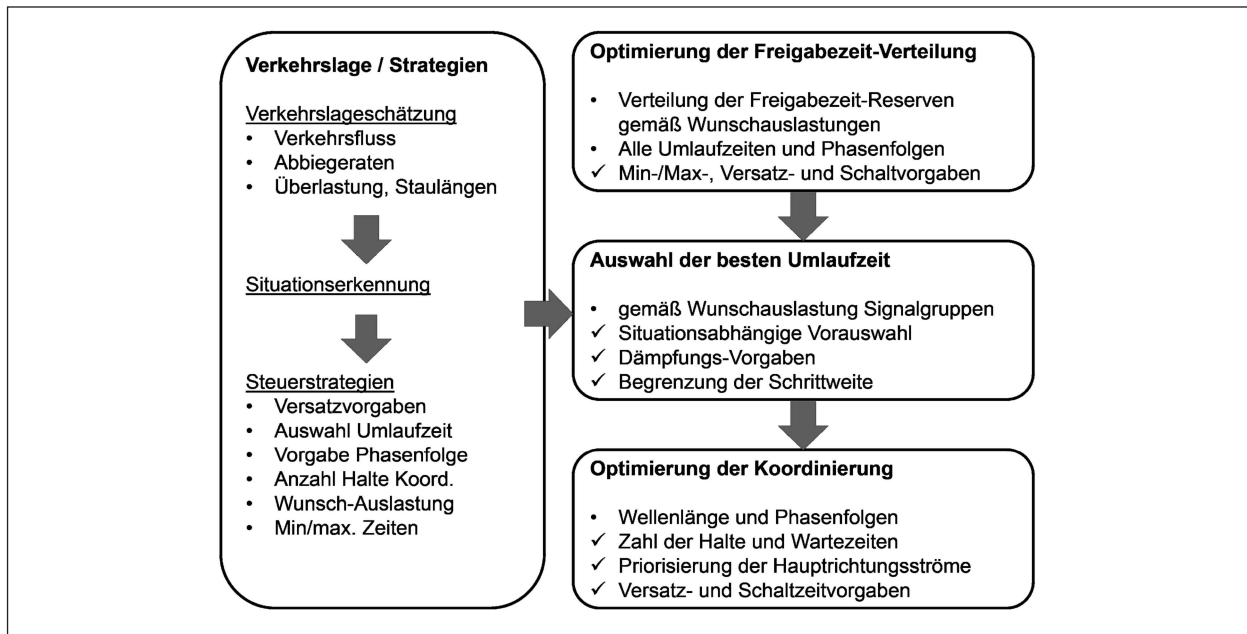


Bild 2-5: Systemarchitektur von MOTION (nach MÜCK, 2008)

Grundlage für die Netzsteuerung ist die Verkehrslageerfassung. Die Verkehrsdaten werden im gesamten Netz durch zahlreiche Detektoren erfasst. Die Daten werden analysiert und durch Einsatz eines Verkehrsmodells vervollständigt. Dadurch wird ein genaues Bild über die Verkehrssituation im gesamten Netz erlangt. Für verschiedene Verkehrssituationen können in MOTION Strategien definiert werden. So können z. B. Vorgaben für die Umlauf- und Freigabezeiten, die Versatzbedingungen oder Progressionsgeschwindigkeiten getroffen werden. Tritt eine spezielle Situation ein, wird die vorher vom Planer definierte Strategie aktiv. Nach der Strategieauswahl beginnt die Optimierung der Lichtsignalanlagen. Diese Optimierung ist in drei Phasen aufgebaut (vgl. Bild 2-5). Im ersten Schritt werden für die erlaubten Umlaufzeiten- und Phasenfolgen die günstigsten Freigabezeit-Verteilungen ermittelt. Auf Basis der Wunschauslastungen aller Signalgruppen, der Verkehrslage und der ermittelten Überlastungen werden die Reservezeiten der Signalgruppen verteilt. Wenn die erlaubten Umlaufzeiten und Phasenfolgen berechnet wurden, wird daraus die günstigste Umlaufzeit ermittelt. Die Auswahl wird durch Verwendung signalgruppenspezifischer und strategischer Daten getroffen. Im letzten Schritt wird die Koordination im Regelbereich optimiert. Bei benachbarten Bereichen werden die Umlaufzeiten abgestimmt und die Koordinierungen bereichsübergreifend optimiert. In MOTION werden zwei Verfahren zur Optimierung der Koordination parallel weiterentwickelt:

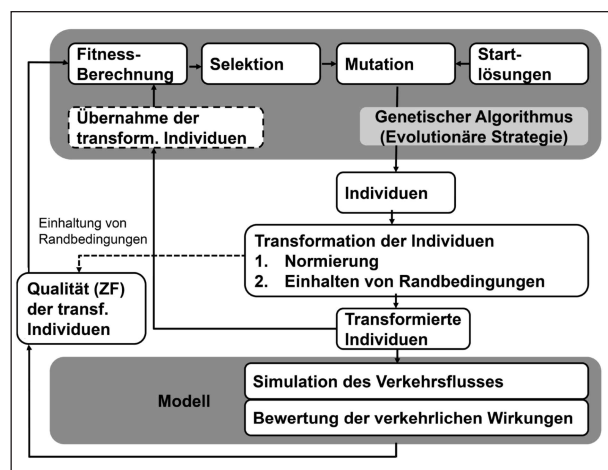


Bild 2-6: GA-basierter Optimierungsansatz der Koordination in MOTION (nach MÜCK, 2008)

- Gleichzeitige Optimierung aller LSA mit genetischen Algorithmen auf Basis eines allgemeinen mesoskopischen Verkehrsflussmodells (siehe Bild 2-6).
- Optimierung der LSA mit einem deterministischen Optimierungsverfahren auf Basis eines pulkorientierten Verkehrsflussmodells.

2.2 Verkehrliche Wirkungen adaptiver Steuerungen

Aufgrund der vielerorts vorgenommenen Entwicklungen adaptiver Steuerungsverfahren wurden sowohl national als auch international zahlreiche Un-

Steuerungsverfahren	ÖPNV		Individualverkehr	
	morgens [%]	nachmittags [%]	morgens [%]	nachmittags [%]
MOTION Standard	12,6	18,6	2,1	1,4
MOTION mit zentraler Buspriorität	8,9	10,3	5,4	6,1
MOTION mit lokaler Buspriorität	16,7	26,8	0,9	5,8

Tab. 2-3: Reduzierung der Fahrzeiten im Vergleich zur Ausgangssituation in Kopenhagen (nach KNUDSEN et al., 2001)

tersuchungen zum Nutzen dieser Systeme durchgeführt. Die Untersuchungen beziehen sich auf verschiedene Steuerungssysteme und unterschiedliche Entwicklungsstufen. Des Weiteren wurden die Untersuchungen nicht mit den gleichen Verfahren durchgeführt. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist daher nur eingeschränkt zulässig. Die meisten Untersuchungen wurden in Gestalt von Vorher-/Nachher-Analysen durchgeführt. Der Vorher-Zustand ist meist ein altes bestehendes Steuerungssystem. Weil dies durchweg nicht näher definiert ist, sind die ermittelten Wirkungen der adaptiven Systeme kaum vergleichbar. In allen Fällen wird auch nicht geprüft, ob gleiche oder stärkere Verbesserungen auch durch andere, einfachere Maßnahmen erreichbar gewesen wären.

Im Stadtzentrum von Piräus (Griechenland) steuert das System MOTION 22 Lichtsignalanlagen und wurde zusätzlich mit einem Wechselwegweisungssystem verknüpft. Die Wirkungsweise des Steuerungssystems wurde von KRUSE (1999) untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Fahrzeiten durchschnittlich um 8 bis 14 % reduziert werden konnten. Die verkehrsbedingten Emissionen wurden um 10 bis 17 % reduziert und die Anzahl der ermittelten Staus reduzierte sich um 20 bis 30 %.

In Kopenhagen (Dänemark) wurde eine adaptive Steuerung nach dem System MOTION eingerichtet. Zielkriterium des Verkehrssteuerungssystems war in erster Linie eine Reduzierung der Fahrzeit des ÖPNV, ohne die Leistungsfähigkeit des Individualverkehrs zu beeinflussen. Die Stadt Kopenhagen und die ÖPNV-Gesellschaft haben parallel zur Inbetriebnahme des adaptiven Systems Vorher-/Nachher-Analysen durchgeführt (KNUDSEN et al., 2001). In Tabelle 2-3 sind die Reduzierungen der Fahrzeiten des ÖPNV und des Individualverkehrs bei verschiedenen MOTION-Varianten dargestellt. Es wird deutlich, dass das Ziel der Erhöhung der Verkehrsqualität des ÖPNV bei gleichbleibender Qualität des Individualverkehrs in Kopenhagen erreicht wurde.

In Oakland County (Michigan, USA) steuert das System Fast-Trac mit dem adaptiven Steuerungssystem SCATS als Kern die Lichtsignalanlagen. Dieses System war die erste Anwendung einer adaptiven Steuerung in den USA. In einer Untersuchung der Wirkung des Steuerungssystems wurde festgestellt, dass die Fahrtgeschwindigkeiten um 19 % erhöht wurden. Nach Schätzungen wurden die Anzahl der Halte um 33 % und die Auffahrunfälle und CO₂-Emissionen um ca. 12 % reduziert (HICKS und CARTER, 2000). In Anaheim (Kalifornien, USA) wurde in einem Stadtteil die Version 3.1 des Systems SCOOT installiert. Bei einer Bewertung der Wirkung des Steuerungssystems stellte sich heraus, dass SCOOT keine Verbesserungen gegenüber der Ausgangssituation brachte. An einigen Knotenpunkten konnten Reduzierungen der Wartezeiten (unter 5 %) erreicht werden. Die Fälle der Verschlechterungen, in denen sich die Wartezeiten um mehr als 10 % erhöhten, überwogen jedoch.

Neben dem Vorteil, dass adaptive Steuerungsverfahren Wartezeiten, Anzahl der Halte etc. reduzieren können, sind sie in der Lage, mit den Städten zu wachsen. Die „ITS deployment tracking database“ (OAK Ridge National Laboratory, 1999) zeigt, dass die Signalanlagen nur noch in wenigen Gebieten 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 Verwaltungen der meisten Ballungsgebiete verfügen nicht über die Ressourcen, um 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.

MÜCK (vgl. STEIERWALD und MARTENS, 2003) hat in einer Simulationsstudie festgestellt, dass

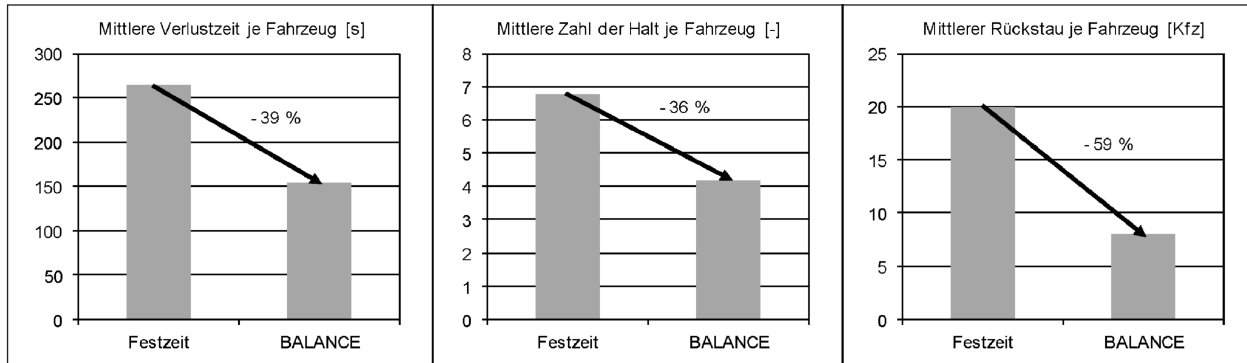


Bild 2-7: Nutzen von BALANCE (nach MÜCK, 2003)

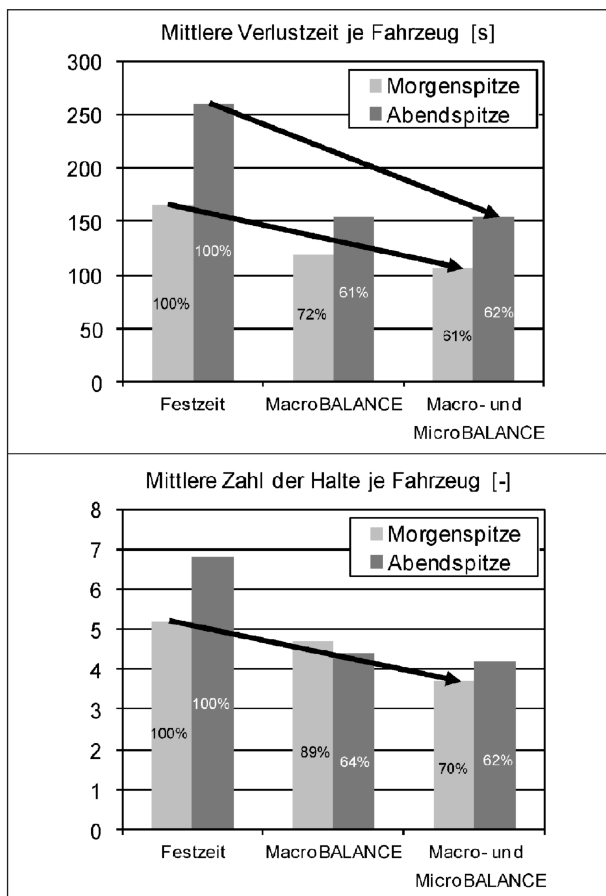


Bild 2-8: Versuchsergebnisse BALANCE, Messestadt München-Riem (nach STEIERWALD und MARTENS, 2003)

durch die Installation des BALANCE-Systems die Verlustzeiten im System um bis zu 39 % reduziert werden konnten (siehe Bild 2-7).

GANSER (siehe STEIERWALD und MARTENS, 2003) zeigte, dass durch die adaptive Steuerung BALANCE eine Verringerung der IV-Verlustzeiten von 10 bis 40 % nachgewiesen werden konnte. In Bild 2-8 sind die Ergebnisse, die im Straßennetz der Messestadt München-Riem erreicht wurden, dargestellt. Außerdem wird ein weiterer Vorteil des

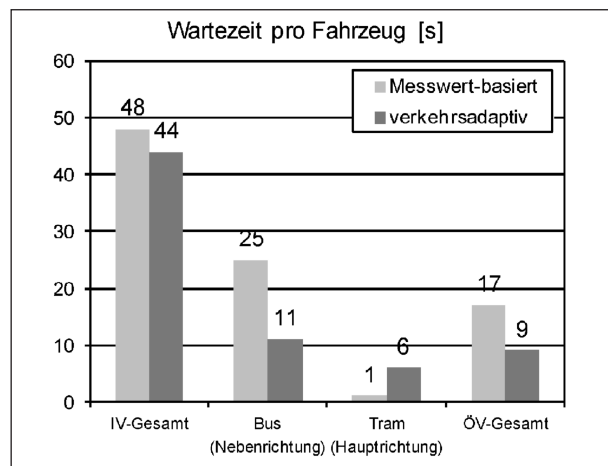


Bild 2-9: Versuchsergebnisse EON, Bauberger-/Dachauer Straße, München (nach STEIERWALD und MARTENS, 2003)

BALANCE-Verkehrs- und Wirkungsmodells beschrieben. Die Planer können die von BALANCE berechneten Daten für andere Verfahren verwenden und somit wird eine umfangreiche Analyse des Verkehrszustandes ermöglicht. Des Weiteren beschreibt GANSER in STEIERWALD und MARTENS (2003) die Wirkungsweise des BALANCE-Moduls EON. In Bild 2-9 wird deutlich, dass die Wartezeiten für den ÖPNV auf einer Teststrecke in München deutlich reduziert werden konnten.

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 Fahrtzeit 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.

In Hamburg wurde ein ursprünglich festzeitgesteuertes Netz ab dem Jahr 2004 zunächst auf eine ver-

UTCS-Strategie	Prozentuale Veränderung für die Fahrzeit im Vergleich zum Referenzfall (Festzeitsteuerung)			
	Morgenspitze	Normalzeit	Abendspitze	Tagesdurchschnitt
1-GC (Hauptader)	-2.6	-4.0	-12.2	NA
1-GC (Netz)	-3.2	+1.9	-1.6	NA
2-GC (Hauptader)	-1.3	-3.8	+0.5	-2.1
2-GC (Netz)	+4.4	+1.9	+10.7	+5.2
3-GC (Hauptader)	+9.2	+24.0	+ 21.0	+16.9
3-GC (Netz)	+14.1	-0.5	+7.0	+8.2

Tab. 2-4: Vergleich der Ergebnisse von UTCS-Steuerungsstrategien (nach GARTNER et al., 1995)

kehrabhängige Steuerung und dann auf eine adaptive Steuerung nach dem System BALANCE umgestellt. Das Netz bestand aus drei Straßenzügen mit 13 Lichtsignalanlagen. KOCH (2006) beschreibt, dass die Messungen bei jedem Steuerungsverfahren mit drei Messfahrzeugen an zwei Messtagen über jeweils acht Stunden durchgeführt wurden. Durch die adaptive Steuerung wurden Erhöhungen der Fahrtgeschwindigkeiten um 10 % gegenüber der Festzeitsteuerung und um 6 % gegenüber der verkehrabhängigen Steuerung erreicht (siehe Bild 2-10).

Nach KOCH (2006) ist seit dem Betrieb der adaptiven Steuerung auch ein positiver Trend in der Luftqualität zu verzeichnen. Eine statistische Absicherung fehlt jedoch noch. Die CO-Belastung ist an allen Messstationen zurückgegangen. Beim NO₂ und NO sind die Werte jedoch mit einer Ausnahme an allen Messstationen gestiegen. Aufgrund der positiven Ergebnisse der adaptiven Steuerung wurde in Hamburg beschlossen, auch weitere Netze mit diesem Steuerungsverfahren auszustatten.

PEARSON (2003) zeigte, dass die einfachsten Methoden im Schnitt die besseren Ergebnisse liefern. Diese Aussage basiert auf aufwändigen Feldtests in den 90er Jahren (GARTNER et al., 1995), in denen die drei Generationen (1-GC, 2-GC und 3-GC) der UTCS (Urban Traffic Control System) mit einem festzeitgesteuerten Standardsystem verglichen wurden (Tabelle 2-4). 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 Fahrzeit 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 ab-

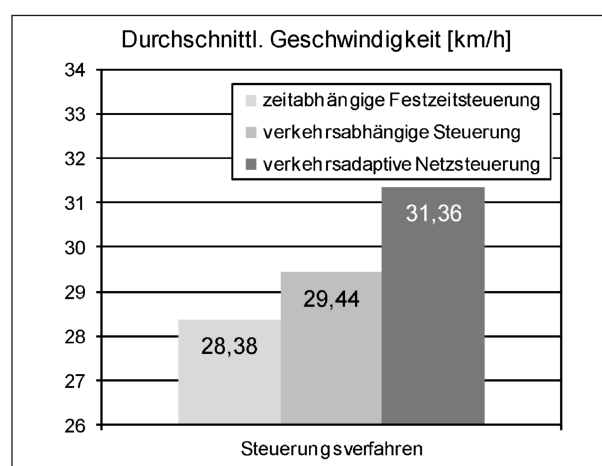


Bild 2-10: Mittlere Geschwindigkeiten in Hamburg (nach KOCH, 2006)

hängig. Die verkehrabhängige 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 hier eine höhere Verkehrabhängigkeit 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.

In Ingolstadt wurde im Jahr 2008 das Forschungsprojekt TRAVOLUTION (BRAUN et al., 2008) beendet. Beteiligte an diesem Projekt waren das Amt für Verkehrsmanagement und Geoinformation der Stadt Ingolstadt, Audi, GEVAS Software und der Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München. In diesem Projekt wurde die adaptive Steuerung BALANCE in verschiedenen Entwicklungsstufen im Straßennetz von Ingolstadt eingesetzt. Das Untersuchungsgebiet umfasste dabei 46 Lichtsignalanlagen. In drei Messreihen wurden mit Floating Cars und mit der automatischen Kennzeichenerfassung folgende Szenarien untersucht:

1. bisherige verkehrsabhängige Netzsteuerung BALANCE ohne Grüne Wellen (Basis),
2. verkehrsadaptive Netzsteuerung BALANCE ohne genetische Algorithmen (B-HC),
3. verkehrsadaptive Netzsteuerung BALANCE mit genetischen Algorithmen (B-GA).

Mit BALANCE und genetischen Algorithmen konnten Reduzierungen der Verlustzeiten im Untersuchungsnetz von 21 % im Tagesdurchschnitt und bis 32 % in den Spitzenstunden im Vergleich zum Basis-Szenario erreicht werden. Gegenüber der Hill-Climbing-Optimierung konnten die Verlustzeiten um bis zu 15 % gesenkt werden. (vgl. Tabelle 2-5).

Im Zuge des Forschungsprojektes AMONES (BOLTZE et al., 2011) wurden zwei Straßenzüge mit modellbasierten Steuerungsverfahren messtechnisch untersucht. Zum einen war dies eine 6 km lange Untersuchungsstrecke in Hamburg-Barmbek, auf der 13 LSA mit dem Verfahren BALANCE betrieben wurden. Zum anderen wurde eine 1,6 km lange Strecke mit neun LSA unter dem Verfahren MOTION untersucht. Eindeutige Ergeb-

nisse hinsichtlich der Auswirkungen der modellbasierten Verfahren waren nicht erkennbar.

2.3 Umweltwirkungen adaptiver Steuerungen

2.3.1 Luftschadstoffe im Straßenverkehr

Bei jedem Verbrennungsprozess im Motor eines Kraftfahrzeugs entstehen Abgase. Nach dem Merkblatt über Luftverunreinigung an Straßen (MLuS, 2005) sind die wesentlichen Schadstoffe, die zur Luftverunreinigung führen:

- Kohlenmonoxid (CO),
- Benzol (C₆H₆),
- Stickstoffmonoxid (NO),
- Stickstoffdioxid (NO₂),
- Schwefeldioxid (SO₂),
- Blei (Pb),
- Partikel (PM).

Außerdem entstehen im Verkehr Partikel durch die Staubaufwirbelung, den Straßen- und Reifenabrieb sowie den Brems- und Kupplungsbelagabrieb. Nach VDI-Richtlinie 3782 (VDI, 2003) bestimmen im Wesentlichen folgende Parameter das Abgasemissionsverhalten von Fahrzeugen:

- Motorbauart,
- Abgasnachbehandlungsverfahren,
- thermischer Zustand des Motors und des Abgasnachbehandlungsverfahrens,
- aktuelles Fahrverhalten,
- Fahrwiderstände,
- Klima und Orografie,
- technischer Zustand des Fahrzeuges,
- Kraftstoffart und -zusammensetzung.

Zeitraum	Vergleich Basis mit BALANCE-HC	Vergleich BALANCE-HC mit BALANCE-GA	Vergleich Basis mit BALANCE-GA
6:30 – 9:00 Uhr	-12 %	-8 %	-19 %
9:00 – 15:00 Uhr	-5 %	-4 %	-9 %
15:00 – 19:00 Uhr	-21 %	-15 %	-32 %

Tab. 2-5: Reduzierung der Verlustzeiten an den Lichtsignalanlagen (nach BRAUN et al., 2008)

Für die Berechnung von verkehrsbedingten Schadstoffen der Luft wurde das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA, 2004) eingeführt. Es wurde aus den Ergebnissen mehrerer Forschungsprojekte der Umweltämter aus Deutschland (UBA), Österreich (UBA) und der Schweiz (BUWAL, 2004) entwickelt. In dem HBEFA werden dem Benutzer Emissionsfaktoren pro Kilometer oder Verkehrsvorgang in Abhängigkeit von Parametern, wie z. B. Fahrzeugkategorie, Schadstoffen oder Emissionsart, zur Verfügung gestellt.

Ein weiteres Berechnungsverfahren zur Schätzung von verkehrsbedingten Schadstoffimmissionen wird in dem MLuS (2005) vorgestellt. Dort werden die Emissionen nach dem HBEFA berechnet. Die Immissionen werden durch ein empirisch statistisches Ausbreitungsmodell bestimmt. Das Berechnungsverfahren wird jedoch in der Regel nur bei Straßen mit lockerer oder ohne Bebauung angewendet.

Untersuchungen des Umweltbundesamtes zeigen, dass die gesamten Treibhausgase- (THG-)Emissionen in Deutschland in den letzten zwei Jahrzehnten stetig zurückgingen (siehe Bild 2-11). Von 1990 bis 2007 wurden die THG-Emissionen von 960 auf 763 Mio. t CO₂-Äquivalent reduziert. Diese Entwicklung verlief allerdings nicht ganz stetig. So wurden z. B. im Jahr 1996 höhere Emissionen als in den drei vorherigen Jahren ausgestoßen.

In Bild 2-12 wird deutlich, dass der Verkehr im Jahr 2007 mit 20 % den zweitgrößten Anteil an den THG-Emissionen hinter der Energiewirtschaft hatte. Der Anteil des Verkehrs ist dabei von 1990 bis 2007 mit Schwankungen von bis zu 2 % relativ stetig verlaufen (Bild 2-11).

Das Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU, 2010) geht von einer weiterhin steigenden Fahrleistung im Straßenverkehr aus. Bis zum Jahr 2025 steigt demnach die Fahrleistung des Personenverkehrs um 19 % im Vergleich zum Jahr 2004, die des Straßengüterverkehrs sogar um 80 %. Bei den Pkw haben jedoch ab dem Jahr 2005 Fahrzeuge ohne Abgasminderung keinen nennenswerten Anteil an der Fahrleistung mehr. Bei den Nutzfahrzeugen ist dies aufgrund der späteren Einführung der Grenzwerte erst ab 2010 der Fall.

Die fahrzeugspezifischen Schadstoffemissionen konnten in den letzten 30 Jahren durch die Entwicklung der Fahrzeugtechnik auf diesem Gebiet rapide gesenkt werden. Dies ist besonders auf die Entwicklung und Einführung von Katalysatoren

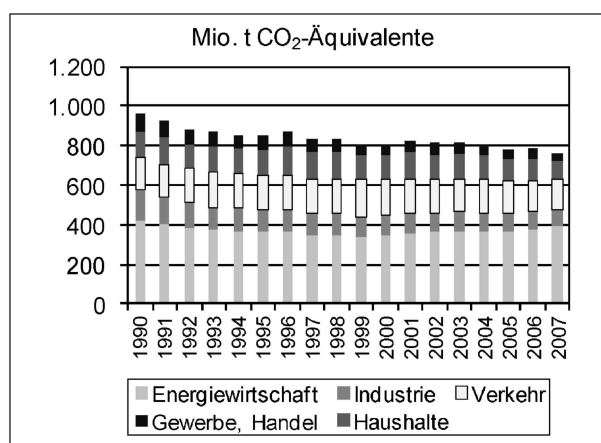


Bild 2-11: Anteile der Quellgruppen an den energiebedingten THG-Emissionen (nach Umweltbundesamt, 2009)

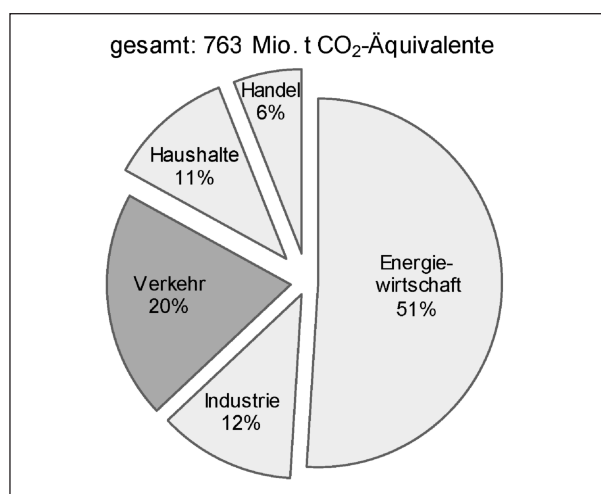


Bild 2-12: Anteile der Quellgruppen an den energiebedingten THG-Emissionen (nach Umweltbundesamt, 2009)

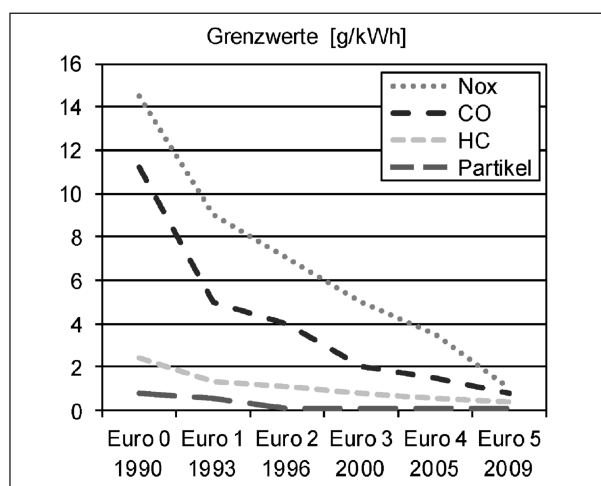


Bild 2-13: Entwicklung der Abgasgrenzwerte (nach EU, 2007)

zurückzuführen. In Europa wurden 1970 erstmals gemeinsame Abgasgrenzwerte in Kraft gesetzt. Diese begrenzten zunächst den Ausstoß von

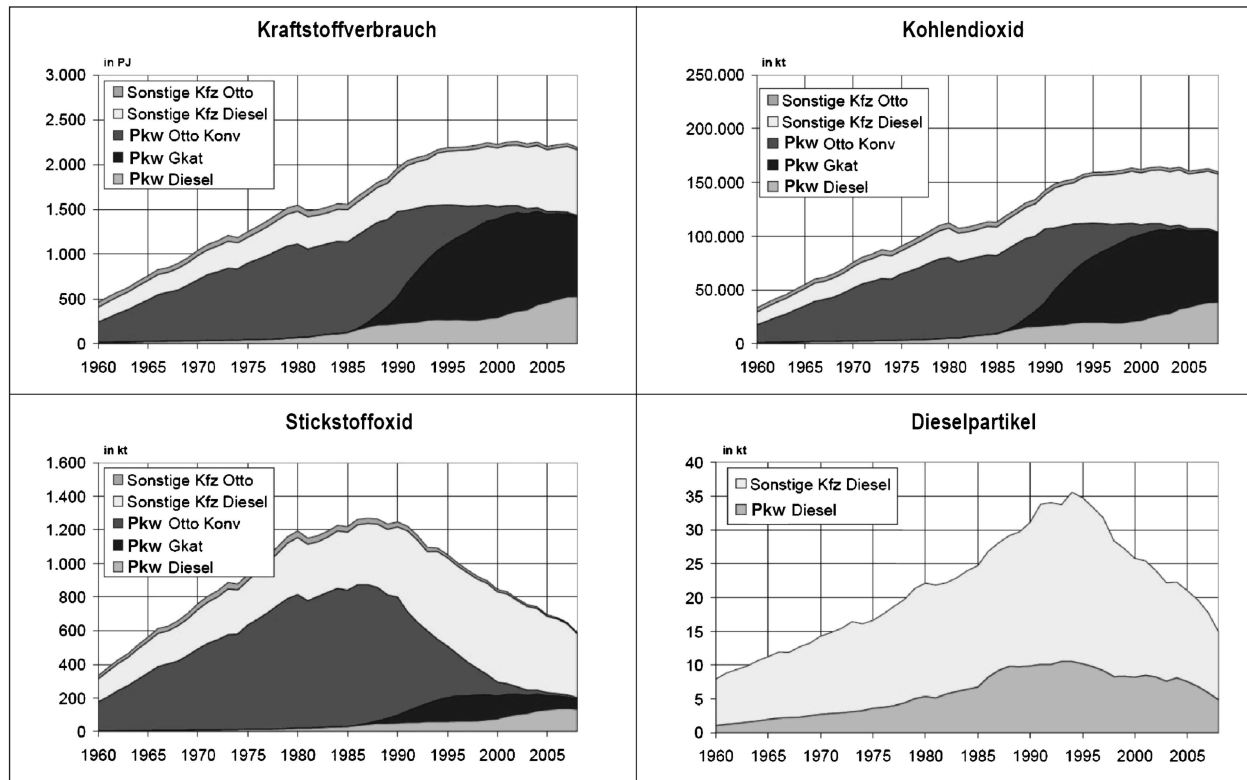


Bild 2-14: Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland 1960-2008 (IFEU, 2010)

CO und HC. 1977 und 1988 folgten dann Grenzwerte für NO_x und die Partikelemissionen von Dieselfahrzeugen.

In Bild 2-13 wird deutlich, dass die Grenzwerte schrittweise stark herabgesetzt wurden. Die Auswirkungen dieser Restriktionen sind in Bild 2-14 zu sehen. Zwar haben sich seit 1960 sowohl der Kraftstoffverbrauch als auch die Kohlendioxid-Emissionen mehr als vervierfacht, die Stickstoffoxid-Emissionen sind jedoch aufgrund der Abgasgesetzgebung stark zurückgegangen. Ebenso sind die Dieselpartikelemissionen als Folge der abgasärmeren Euronormen und der zunehmenden Ausstattung der Fahrzeuge mit Partikelfiltern seit dem Jahr 2005 rückläufig.

Im Jahr 2010 wurde die 39. Bundesimmissionschutzverordnung erlassen, welche die geltenden EU-Grenzwerte in deutsches Recht umsetzt. Seit dem 1. Januar 2005 beträgt der einzuhaltende Tagesmittelwert für PM_{10} (Feinstaub) $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wobei an 35 Tagen im Kalenderjahr Überschreitungen zugelassen sind. Die gültigen Grenzwerte für Feinstaub und der ab dem 01. Januar 2010 geltende Grenzwert für Stickstoffdioxid (NO_2) von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ werden jedoch immer noch an vielen Orten in Deutschland überschritten (siehe Bild 2-15), insbe-

sondere an stark befahrenen Straßen mit Straßenschluchten.

Das Umweltbundesamt (DIEGMANN et al., 2007) hat die folgenden verkehrlichen Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub untersucht:

- Umweltzonen,
- Durchfahrtsverbote für Lkw,
- Nachrüstung von Diesel-Kfz mit Partikelfilter,
- Erdgasfahrzeuge und synthetische Kraftstoffe,
- Verminderung und Verlagerung,
- Nutzungsbeschränkung bei Baumaschinen.

Als Ergebnis wurde die Umweltzone mit ca. 10 % Reduktion des Jahresmittelwertes von PM_{10} als Maßnahme mit dem größten Minderungspotenzial ermittelt. Das Potenzial der vollständigen Nachrüstung von Diesel-Kfz mit Partikelfiltern und der Durchfahrtsverbote wird auf 6 bzw. 5 % geschätzt. Die Wirkung von Verkehrsverlagerungen hängt stark von der konkreten Realisierung ab. Das Minderungspotenzial durch den Einsatz von Erdgas in der städtischen Busflotte liegt bei 4 bis 5 %. Punktuell wirkende Maßnahmen, wie Lkw-Durchfahrver-

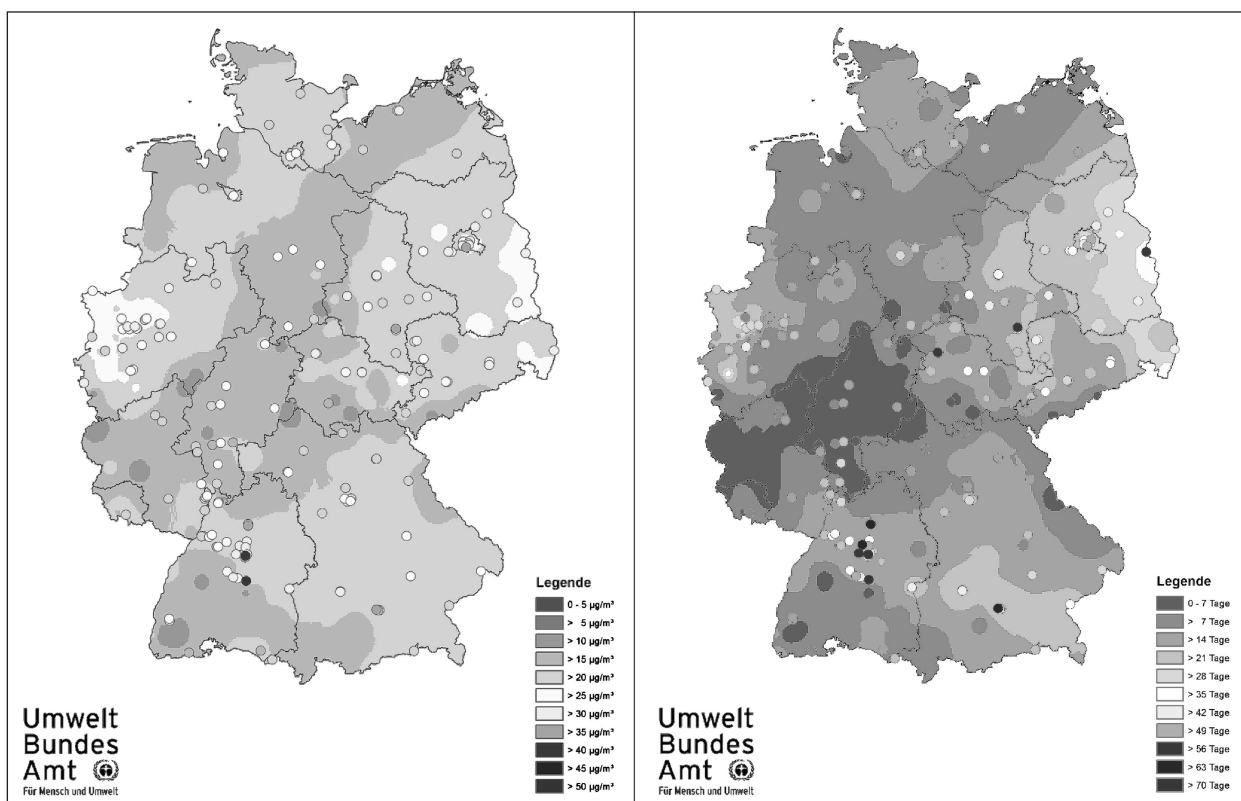


Bild 2-15: PM₁₀-Jahresmittelwerte und die Zahl der Tage mit Überschreitungen des Grenzwertes im Jahr 2010 (Umweltbundesamt, 2010)

bote für einzelne Straßenzüge, bewirken allerdings höchstens ein Herabsetzen der messbaren Belastungen einzelner Messstationen. Die Verlagerung emissionsstarker Fahrzeuge kann dabei nicht als ausreichende Minderung der Luftschadstoffe gesehen werden. Selbst bei einer Kombination der Maßnahmen kann eine Einhaltung der Grenzwerte überall in Deutschland nicht sichergestellt werden. Es besteht somit weiterhin die Aufgabe, auf allen möglichen Ebenen Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen zu ergreifen. Neueren Untersuchungen zufolge kann nur durch Verringerung des Schwerverkehrs sicher dazu beigetragen werden, dass die geltenden Grenzwerte dauerhaft eingehalten werden (RICHARD, 2010).

Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde die Datenbank MARLIS (Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft in Bezug auf Immissionen an Straßen, 2006) entwickelt. In dieser Datenbank sind Maßnahmen zur Luftreinhaltung an Verkehrswegen und deren Auswirkungen auf die Luftschadstoffkonzentration ausführlich beschrieben und bewertet.

2.3.2 Einflüsse der Lichtsignalsteuerung

Die Einflüsse von Lichtsignalsteuerungen auf den Kraftstoffverbrauch haben SCHNABEL et al. (2001) auf koordinierten Hauptverkehrsstraßen in Dresden untersucht. Dafür wurde ein Messfahrzeug eingesetzt, welches mit Messgeräten zur Aufzeichnung der Geschwindigkeit und des Kraftstoffverbrauchs ausgerüstet wurde.

In den Messungen stellte sich heraus, dass zwischen den Fahrtgeschwindigkeiten und dem Kraftstoffverbrauch ein strenger Zusammenhang besteht. Die besten Annäherungen lassen sich dabei mit der Beziehung, die auch in den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (FGSV, 1997) verwendet wird, erreichen (siehe Gleichung (2-5)).

$$\text{KSV} = f(v_R) = A \cdot v_R^2 + \frac{B}{v_R} + C \quad (2-5)$$

mit

KSV = spezifischer Kraftstoffverbrauch

v_R = Fahrtgeschwindigkeit

A, B, C = Parameter

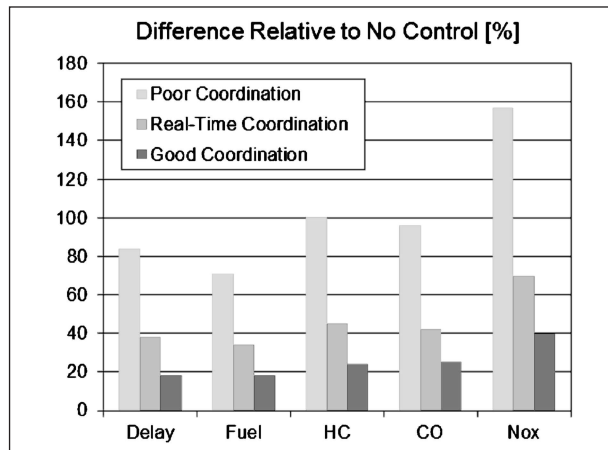


Bild 2-16: Einfluss der Koordinierung auf die Wartezeit, den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen (nach RAKHA et al., 2000)

Für die Bewertung des Kraftstoffverbrauchs auf einem Straßenzug einen konstanten Wert für einen Verkehrszustand anzunehmen, wie es in den EWS (FGSV, 1997) z. B. für „Stau innerorts“ vorgeschlagen wird, ist nicht gerechtfertigt. Außerdem haben die Untersuchungen zur zulässigen Geschwindigkeit gezeigt, dass Geschwindigkeitsreduzierungen auf 30 km/h aus energetischer Sicht wenig Sinn ergeben. Eine Koordinierung der Lichtsignalanlagen und eine vorausschauende Fahrweise werden als besonders wirkungsvoll im Hinblick auf eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs beschrieben.

RAKHA et al. (2000) haben ein mikroskopisches Emissions- und Energiemodell entwickelt. Dieses Modell wurde verwendet, um den Einfluss einer Koordinierung von Lichtsignalanlagen auf die Wartezeiten, den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen zu berechnen. In Bild 2-16 ist zu sehen, dass die Emissionen stark von der Güte der Koordinierung abhängen. Die dritte Stufe der Koordinierung (Good Coordination) stellt hierbei eine adaptive Steuerung dar. Die Studie zeigt, dass der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen sensitiv gegenüber der Geschwindigkeit und der Beschleunigung reagieren. Somit ist der Gebrauch der mittleren Fahrtgeschwindigkeit zur Schätzung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen nicht zu empfehlen.

UNAL, ROUPHAIL und FREY (2003) untersuchten die Auswirkungen der Signalsteuerung und der Verkehrsqualität eines Straßenzuges auf die Fahrzeugemissionen. In dieser Untersuchung wurden 824 Fahrten, d. h. 2.020 Fahrzeugmeilen, mit acht Messfahrzeugen auf zwei signalisierten Straßenzügen in Cary (North Carolina, USA) durchgeführt. In jedem Fahrzeug wurden Messgeräte (OEM-

2100) zur Erfassung der Fahrzeugemissionen und der Motordaten installiert. Die Messgeräte analysierten Volumenanteile von CO, CO₂, HC, NO_x und O₂. Die Motordaten wurden im 1-Sekunden-Takt auf einem Computer gespeichert. Durch diesen Messaufbau war es möglich, die Emissionen eines Fahrzeugs seinem kinematischen Zustand zuzuordnen. Die Intention der Untersuchung war es, die Auswirkungen einer koordinierten Lichtsignalsteuerung auf die Emissionen festzustellen. Deswegen wurden Vorher-Nachher-Analysen auf diesen Straßenzügen durchgeführt. In der Untersuchung konnten Zusammenhänge zwischen der Verkehrsqualität und den Emissionen hergestellt werden. Die koordinierte Signalsteuerung führte zu einer Reduktion der Emissionen und zu einer Verbesserung der Verkehrsqualität vom Level of Service (LOS) B/D auf LOS A/C. Es wurde eine substantielle Verringerung der Emissionen beim Vergleich des ungestauten mit dem gestauten Zustand festgestellt. Das Ausmaß der Abnahme der Fahrtzeit war mit der Abnahme der Emissionen vergleichbar.

BRILON und WIEBUSCH-WOTHGE (1988) haben die Auswirkungen von sog. Umweltampeln, die den Autofahrer zum Abschalten des Motors vor Lichtsignalanlagen auffordert, untersucht. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass eine flächendeckende Einführung der Umweltampeln seinerzeit nicht zu empfehlen war, da die Reduzierungen der Schadstoffemissionen bei den damals gegebenen technischen Voraussetzungen gering waren. In Einzelfällen kann der Einsatz einer Umweltampel jedoch auch sinnvoll sein.

Das Umweltbundesamt untersuchte im Jahr 2007 (HUNGER et al., 2007) die Verbesserung der Umweltqualität durch geschwindigkeitsbeeinflussende Maßnahmen auf Hauptverkehrsstraßen. Es stellte sich dabei heraus, dass Geschwindigkeiten zwischen 30 und 50 km/h bei einem stetigen Verkehrsablauf stadökologisch am sinnvollsten sind. In der Untersuchung wurde auch ein Verfahren entwickelt, nach dem die Emissionen von Kfz durch eine Auswertung von Einzelfahrkurven auf der Basis des HBEFA bestimmt werden können. Mit dem HBEFA können zwar leicht absolute Emissionsmengen in einem Straßennetz bestimmt werden, es wurde jedoch für diese Untersuchung eine Bestimmung der Verbrauchs- und Emissionswerte für einzelne Fahrprofile benötigt. Mit dem dort vorgestellten Verfahren ist diese Berechnung möglich.

Der Verein Deutscher Ingenieure legte im November 2003 eine Richtlinie zur Kfz-Emissionsbestimmung (VDI, 2003) vor. In dieser Richtlinie werden die wesentlichen Probleme behandelt, die bei der Bestimmung der Emissionen des Kfz-Verkehrs auftreten können. Eingangsgrößen sind im Wesentlichen die spezifischen Emissionen der Kfz und Kenngrößen der Straßeninfrastruktur und des Verkehrs. Als Ergebnis werden die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch als Mittelwert in räumlicher und zeitlicher Differenzierung ermittelt.

2.3.3 Verfahren zur Emissionsberechnung

Nach EICHLSEDER (2003) gibt es im Wesentlichen drei Ansätze zur Modellierung von Emissionsfaktoren. Die Verfahren werden im Folgenden beschrieben:

Emissionskurven durch gemessene Emissionswerte

Dieses Verfahren war lange Zeit der Standard für die Emissionsberechnung. Als Grundlage werden Emissionsmessungen mit Fahrzeugen für bestimmte Fahrzyklen, die durchschnittlichen Fahr Situationen entsprechen, durchgeführt. Manche Modelle verwenden getrennte Kurven nach Straßenkategorie, andere Modelle führen eine Standardmessung durch und legen dann Regressionskurven durch die Messwerte. Die Korrelation zwischen mittlerer Zyklusgeschwindigkeit und den Emissionen ist meist sehr schwach. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen im geringen Rechenaufwand und der einfachen Anwendung anhand durchschnittlicher Verkehrssituationen. Dies macht aber auch den Nachteil des Verfahrens aus. Es können nur durchschnittliche Verkehrssituationen bewertet werden. Änderungen des Fahrverhaltens (z. B. Anzahl der Halte, Tempolimits, Gangwahl) können nicht dargestellt werden.

Verfahren mit Geschwindigkeits-Beschleunigungskennfeldern

Bei diesen Verfahren werden nicht nur durchschnittliche Verkehrssituationen betrachtet. Aus den Messdaten kann jedes beliebige Fahrmuster simuliert werden. Dazu werden die sekundlichen Emissionswerte gemäß aktueller Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in Raster geordnet. Durch Messung der Geschwindigkeitsprofile eines Fahrzeugs können somit die Emissionen basierend

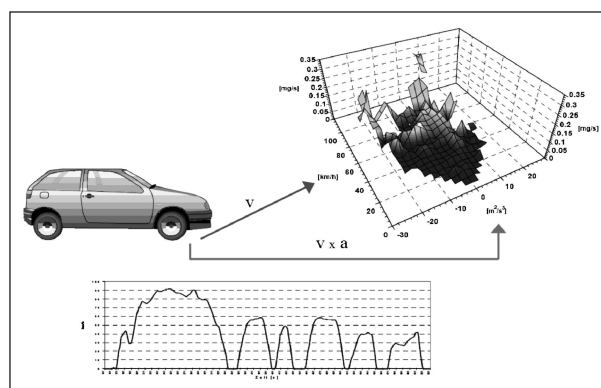


Bild 2-17: Schema zur Bildung von Geschwindigkeits-Beschleunigungskennfeldern (nach EICHLSEDER, 2003)

auf dem Geschwindigkeits-Beschleunigungskennfeld bestimmt werden (vgl. Bild 2-17). Mit diesem Verfahren können Verbrauch und Emissionen für beliebige Fahrverläufe durch Messung relativ weniger Fahrzyklen berechnet werden. Dafür muss jedoch der genaue Fahrtverlauf eines Fahrzeugs bekannt sein, was einen hohen Messaufwand voraussetzt. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass die Genauigkeit relativ schlecht sein kann, da z. B. Werte wie die Fahrbahnlängsneigung, das Schaltverhalten und die Fahrzeugbelastung nicht variiert werden können. Ein wesentliches Problem bei der Anwendung dieses Verfahrens stellt darüber hinaus die schlechte Vorhersagequalität, insbesondere für CO, HC und NO_x dar.

Verfahren mit Motorkennfeldern

Um die Einschränkungen der oben dargestellten Verfahren zu überwinden, werden vermehrt Motorkennfelder zur Berechnung der Emissionen herangezogen. Bei diesem Verfahren werden die Fahrwiderstände aus dem Fahrprofil und den Fahrzeug- und Reifenspezifikationen und die zu deren Überwindung notwendige Motorleistung sekundlich berechnet. Die Motordrehzahl wird aus der Achs- und Getriebeübersetzung ermittelt. Durch Modellierung des Schaltverhaltens können Verbrauch und Emissionen aus dem Motorkennfeld interpoliert werden (siehe Bild 2-18). Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in dem hohen Aufwand, der zu betreiben ist, um die Eingangsdaten, wie z. B. die Motorkennfelder, zu erhalten.

Verfahren nach FREY et al. (2002)

FREY et al. (2002) haben ein System entwickelt, um die Emissionen eines Fahrzeugs seinem kine-

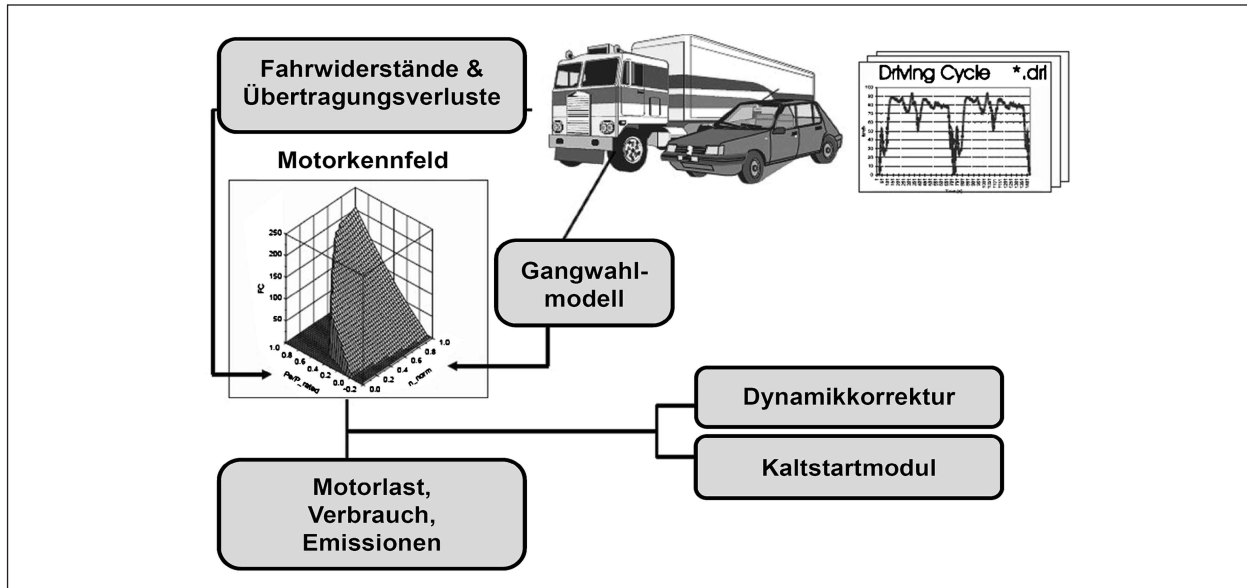


Bild 2-18: Fahrzeugemissionsmodelle mit Motorcharakterfeldern (nach EICHLSEDER, 2003)

Gruppe	Definition	NO	HC	CO	CO ₂
1	VSP < -2	9,01 · 10 ⁻⁴	4,50 · 10 ⁻⁴	7,81 · 10 ⁻³	1,67
2	-2 ≤ VSP < 0	6,28 · 10 ⁻⁴	2,57 · 10 ⁻⁴	3,91 · 10 ⁻³	1,46
3	0 ≤ VSP < 1	3,46 · 10 ⁻⁴	4,06 · 10 ⁻⁴	3,35 · 10 ⁻³	1,14
4	1 ≤ VSP < 4	1,17 · 10 ⁻³	4,32 · 10 ⁻⁴	8,34 · 10 ⁻³	2,23
5	4 ≤ VSP < 7	1,71 · 10 ⁻³	5,30 · 10 ⁻⁴	1,10 · 10 ⁻²	2,92
6	7 ≤ VSP < 10	2,37 · 10 ⁻³	7,05 · 10 ⁻⁴	1,70 · 10 ⁻²	3,53
7	10 ≤ VSP < 13	3,10 · 10 ⁻³	8,22 · 10 ⁻⁴	2,00 · 10 ⁻²	4,11
8	13 ≤ VSP < 16	4,23 · 10 ⁻³	9,76 · 10 ⁻⁴	2,92 · 10 ⁻²	4,64
9	16 ≤ VSP < 19	5,07 · 10 ⁻³	1,11 · 10 ⁻³	3,55 · 10 ⁻²	5,16
10	19 ≤ VSP < 23	5,87 · 10 ⁻³	1,44 · 10 ⁻³	5,51 · 10 ⁻²	5,63
11	23 ≤ VSP < 28	7,62 · 10 ⁻³	2,06 · 10 ⁻³	1,14 · 10 ⁻¹	6,53
12	28 ≤ VSP < 33	1,21 · 10 ⁻²	3,37 · 10 ⁻³	2,08 · 10 ⁻¹	7,59
13	33 ≤ VSP < 39	1,55 · 10 ⁻²	4,86 · 10 ⁻³	4,42 · 10 ⁻¹	9,02
14	39 ≤ VSP	1,79 · 10 ⁻²	1,10 · 10 ⁻²	8,82 · 10 ⁻¹	10,09

Tab. 2-6: VSP-Gruppen und Fahrzeugemissionen (nach FREY et al., 2002)

matischen Zustand zuzuordnen. Dafür wurde die VSP (Vehicle Specific Power), deren Ermittlung auf JIMINÈZ (1999) zurückgeht, aus Gleichung (2-6) definiert. Die VSP stellt eine vereinfachte Berechnung der erforderlichen Motorleistung dar, die jedoch auf die Eingangsvariablen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Straßenneigung reduziert ist.

$$VSP = v \cdot [1,1 \cdot a + 9,81 \cdot (\sin(a \cdot \tan(\text{grade}))) + 0,132] + 0,000302 \cdot v^3 \quad (2-6)$$

mit

VSP = Vehicle Specific Power

v = momentane Fahrzeuggeschwindigkeit

a = momentane Beschleunigung

grade = Steigung der Straße

Es wurde eine Methode entwickelt, anhand derer die Fahrzeugemissionen basierend auf 14 VSP-Gruppen geschätzt werden. Die VSP-Gruppen wurden so gewählt, dass sich die mittlere Emissionsrate jeder Gruppe statistisch unterscheidet. Die 14 gewählten Gruppen sind in Tabelle 2-6 dargestellt.

Schadstoffe automatische Messung	SO ₂	Schwefeldioxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	NO	Stickstoffmonoxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	X
	NO ₂	Stickstoffdioxid [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	X
	PM ₁₀	Schwebstaub PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	X
	O ₃	Ozon [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
Schadstoffe Laboranalytik		Schwermetalle	
	PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	
	KW	Kohlenwasserstoffe	X
	PM ₁₀	Schwebstaub PM ₁₀	
	NO ₂	Stickstoffdioxid	X
Meteorologische Messgrößen	WIR	Windrichtung	
	WGES	Windgeschwindigkeit [m/S]	
	LTEM	Lufttemperatur [Grad Celsius]	
	RFEU	Relative Luftfeuchte [%]	
	LDRU	Luftdruck [hPa]	
	NSCH	Niederschlagsmenge [mm]	
	STRA	Strahlungsbilanz [kWh/m ²]	

Tab. 2-7: Messwerte der Station zur Luftqualitätsmessung an der Weseler Straße in Münster (nach LANUV, 2008 a)

Jedes Fahrzeug kann somit aufgrund seines kinematischen Zustands einer VSP-Gruppe zugeordnet werden. Dadurch ist es möglich, die mittlere Emissionsrate des Fahrzeugs über den Fahrtverlauf zu bestimmen.

2.3.4 Verfahren zur Immissionsmessung

Seit Inkrafttreten der Bundesimmissionsschutzverordnung und der damit verbundenen Kontrolle der Grenzwerte für Luftschadstoffe werden durchgängige Immissionsmessungen durchgeführt, um Aufschlüsse über die Belastungssituation zu erhalten. Bei Überschreitungen der Grenzwerte müssen die obersten Landes- und Bundesfachbehörden der EU-Kommission in Kenntnis gesetzt werden. Der Kommission muss daraufhin über die ergriffenen Maßnahmen zur Verringerung der Luftbelastung berichtet werden. Die Messung und Überwachung der Luftschadstoffe unterliegen der Zuständigkeit der einzelnen Bundesländer.

Jedes Bundesland besitzt daher ein eigenes Messnetz. An insgesamt ca. 650 Messstationen wird die Luftqualität überwacht. Neben Feinstaub (PM₁₀), Stickstoffdioxid (NO₂) und Ozon (O₃) werden weitere Gefahrenstoffe, z. B. organische Verbindungen und Schwermetalle im Feinstaub, gemessen.

Für die Überwachung der Luftqualität stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung.

Kontinuierliche Verfahren

Unter kontinuierlichen Verfahren sind stationäre automatisch arbeitende Geräte zu verstehen, bei denen Probenahme und Analyse zeitlich lückenlos ablaufen. Auf den Internetseiten des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV, 2008a) finden sich aktuelle Angaben darüber, welche Schadstoffe mit den unterschiedlichen Messstationen erfasst werden können (Tabelle 2-7).

Diskontinuierliche Verfahren

Neben den ortsfesten kontinuierlich arbeitenden Messstationen wird an einigen Standorten auch diskontinuierlich gemessen. Die diskontinuierlichen Verfahren sind oft manuelle Verfahren. Die Probenahme erfolgt dabei an dem zu untersuchenden Ort, wobei die Analyse der Probe im Laboratorium stattfindet. Daneben besteht die Möglichkeit, Messungen mithilfe von Passivsammlern durchzuführen. Im Innern der Geräte nehmen kleine Röhren Schadstoffe aus der Luft auf. Umgeben von einem Schutzgehäuse werden sie z. B. an Laternen-

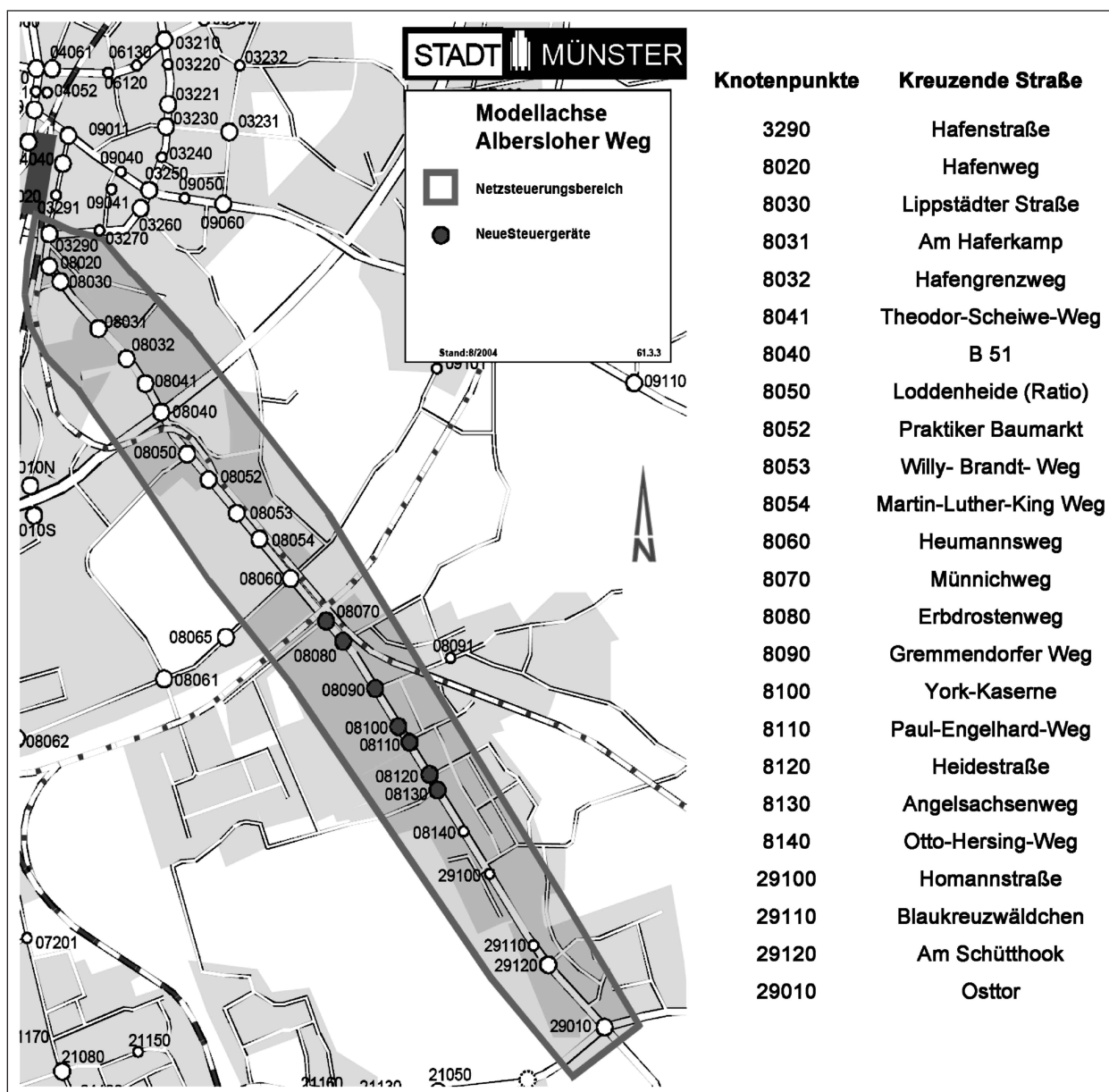


Bild 3-1: Lageplan und Knotenpunktbezeichnungen des Untersuchungsgebiets Albersloher Weg

meinde Albersloh. Der Streckenabschnitt, dessen LSA mit der adaptiven Steuerung MOTION betrieben wird, erstreckt sich von der Hafenstraße bis zum Osttor an der südlichen Stadtgrenze von Münster. Die Untersuchungsstrecke ist ca. 6 km lang und umfasst 24 Knotenpunkte. In Bild 3-1 sind die signalisierten Knotenpunkte aufgeführt, die auf dem untersuchten Straßenzug liegen.

Nördlich der B 51 ist der Albersloher Weg vierstreifig ausgebaut, die Richtungsfahrbahnen sind zwischen B 51 (8040) und Hafenweg (8020) baulich getrennt. In der Verlängerung des Albersloher Weges liegt in nördlicher Richtung der Münsteraner Hauptbahnhof. Südlich der B 51 ist der Straßen-

querschnitt bis zum Knotenpunkt Otto-Hersing-Weg (8140) vierstreifig und die Richtungsfahrbahnen sind baulich getrennt. Südlich des Otto-Hersing-Wegs ist der Querschnitt bis zum Osttor (29010) zweistreifig. Auf dem gesamten Straßenzug ist mit dem für Münster typischen starken Fahrradverkehr zu rechnen. Der Albersloher Weg führt vom Innenstadtbereich bis an den Stadtrand. Am nördlichen Ende des Albersloher Wegs liegen die Stadtverwaltung und ein Kinokomplex. Zwischen der B 51 und dem Heumannsweg (8060) liegt ein Gewerbegebiet, in dem einige Industriebetriebe angesiedelt sind. Südlich des Knotenpunkts 8060 führt der Straßenzug durch den Münsteraner Stadtteil Gremmendorf. Diese Umgebung hat einen typischen

Vorstadtcharakter mit Wohnbebauung und Einkaufsmöglichkeiten.

3.1.2 Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet

Auf dem Albersloher Weg wurde die schrittweise Umstellung der Koordinierung von der ursprünglichen Steuerung über eine neu optimierte konventionelle verkehrsabhängige Steuerung auf eine adaptive Steuerung vom Auftragnehmer wissenschaftlich begleitet.

In der Untersuchung „Evaluierung (Erfolgskontrolle und Bewertung) der Grünen Wellen im Zuge der Modellachse Albersloher Weg in Münster mittels Fahrtzeitmessung“ (BRILON et al., 2009) werden die verkehrstechnischen Wirkungen der verschiedenen Steuerungsverfahren auf den Pkw-Verkehr mit der in Kapitel 4.1 beschriebenen Methodik erfasst. Die Stadt Münster hat zugestimmt, dass die Untersuchungsergebnisse in diesem Projekt verwendet werden. In BRILON et al. (2009) werden drei Entwicklungsstufen der Steuerungsverfahren beschrieben. Im Jahr 2006 wurde auf dem Straßenzug eine Vorher-Messung durchgeführt. Die Daten schaffen eine Vergleichsbasis, mit der die verkehrliche Wirkung der neuen Steuerungsverfahren beurteilt werden kann. Die Nachher-I- und Nachher-II-Messungen fanden im Juni 2008 statt. Die Nachher-I-Messung erfasste dabei den Zustand bei einer konventionellen verkehrsabhängigen Steuerung, die in ihrer Koordinierung optimiert wurde. Die Nachher-II-Messung erfasste die verkehrlichen Auswirkungen der adaptiven Netzsteuerung MOTION (siehe Tabelle 3-1).

Trotz einiger Nachbesserungen seitens der Herstellerfirma ist es bisher nicht gelungen, die adaptive Steuerung in Münster zuverlässig in Betrieb zu nehmen. In der ersten Phase nach der Inbetriebnahme waren alle beteiligten Projektpartner zunächst nicht zufrieden mit der Steuerung der LSA durch MOTION. Als Optimierungsverfahren wurden in dieser Phase genetische Algorithmen eingesetzt mit einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden für die

MOTION-Steuerung (MÜCK, 2008). Dadurch traten jedoch sehr unterschiedliche Signalzustände in kurzen Zeitabständen auf. Die Steuerung wurde von den Verkehrsteilnehmern und den beteiligten Partnern als zu unstetig empfunden. Aufgrund dieser Probleme wurde von der Herstellerfirma ein neues Optimierungsverfahren entwickelt (MÜCK, 2008). Die Freiheitsgrade des Systems wurden dafür nach einer Abstimmungsphase heruntergefahren und das Optimierungsintervall für die Rahmensignale von 15 Minuten auf 20 Minuten gedehnt. Dieser Systemzustand wurde in der Nachher-II-Messung in die Untersuchung aufgenommen (BRILON et al., 2009). Da die Umstellung der Rahmensignale in MOTION schrittweise erfolgen muss, entstanden während der Umschaltung der Anlagen nach Aussage der Stadt Münster deutliche Störungen der Grünen-Wellen-Koordinierung im Streckenzug. Nach den Messungen wurden zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf dem Straßenzug einige Änderungen durchgeführt (Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit, zusätzliche Linksabbiegersignale, Änderung der Fahrstreifen-zuteilung vor den Knotenpunkten). Damit änderten sich auch die Koordinierungsstruktur und die Anforderungen an MOTION. In der Folge traten die Störungen der Koordinierung durch die Umschaltungen deutlich häufiger hervor. Aufgrund anhaltend hoher Kritik der Verkehrsteilnehmer zu diesen regelmäßigen Koordinierungsstörungen in Verbindung mit den Umschaltungen wurde die MOTION-Steuerung im Mai 2011 abgeschaltet, bis ein verbessertes Umschaltverfahren vorliegt. Seitdem läuft der Straßenzug wieder unter einer verkehrsabhängigen Steuerung.

3.2 Stadt Münster – Weseler Straße

3.2.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Der Straßenzug Weseler Str./Steinfurter Straße ist der wichtigste innerstädtische Straßenzug in Münster. In Bild 3-2 ist das Untersuchungsgebiet dargestellt und die betroffenen Lichtsignalanlagen sind dunkel unterlegt. Die Weseler Straße führt aus dem

Stufe	Steuerungsverfahren	Messung	Messzeitraum
0	Grundzustand der Steuerung, verkehrsabhängig und festzeitgesteuert	Vorher	07.-08.03.2006
1	Konventionell verkehrsabhängig mit neuer Optimierung	Nachher I	10.-11.06.2008
2	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren MOTION	Nachher II	17.-18.06.2008

Tab. 3-1: Messzeiträume auf dem Albersloher Weg in Münster

Süden des Stadtgebietes, wo sie einen Autobahnanschluss an die BAB 43 hat, bis in den unmittelbaren Innenstadtbereich. Hier geht die Weseler Str. in die Straßen Hindenburgplatz und Am Stadtgraben über und bildet die westliche Achse des Ringes um die Innenstadt. In nord-westlicher Richtung schließt sich die Steinfurter Straße an. Diese führt aus dem Innenstadtbereich in den nördlichen Randbereich Münsters. Sie hat einen Autobahn-

schluss an die BAB 1. Der Straßenzug weist auf seiner gesamten Länge zweistreifige Richtungsfahrbahnen auf. In einigen Bereichen sind die Fahrbahnen baulich getrennt. Sowohl in nördlicher als auch südlicher Fahrtrichtung sind auf einigen Streckenabschnitten zusätzliche Busfahrstreifen vorhanden. Außerdem ist auf dem gesamten Straßenzug mit dem für Münster typischen starken Fahrradverkehr zu rechnen.

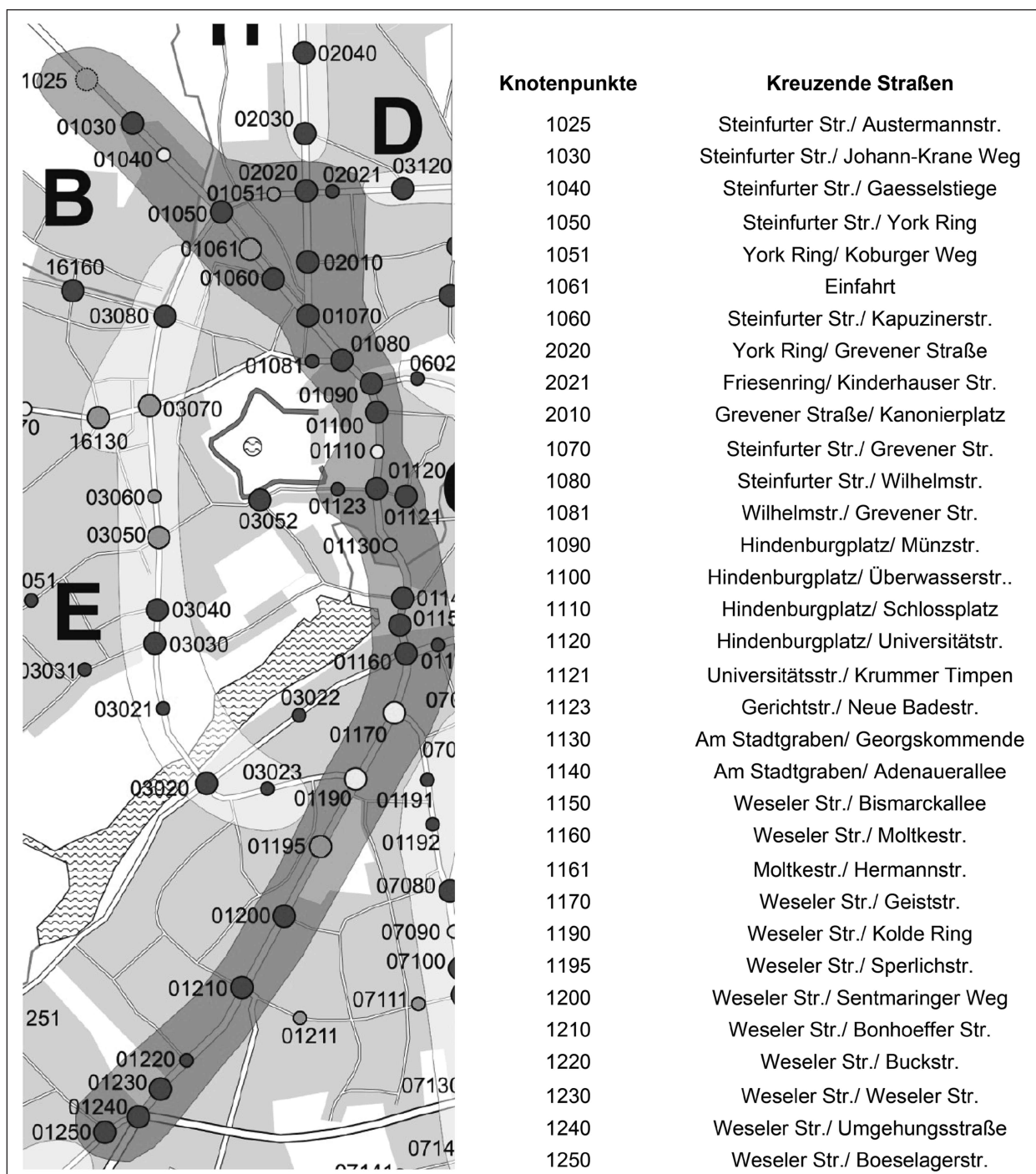


Bild 3-2: Lageplan und Knotenpunktbezeichnungen des Untersuchungsgebietes Weseler Straße/Steinfurter Straße

An der Weseler Straße befindet sich eine Messstation des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) für die Messung von Luftschadstoffen. Dieser Container ist am höchstbelasteten Knotenpunkt des Straßenzuges positioniert (Weseler Str./Moltkestr.).

3.2.2 Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet

In dem gesamten Untersuchungsgebiet befinden sich 33 Lichtsignalanlagen. Die Lichtsignalanlagen des Straßenzugs Weseler Straße/Steinfurter Straße wurden komplett neu geplant. Die neue Planung beinhaltete zunächst eine konventionelle verkehrsabhängige Steuerung. In einem zweiten Schritt wurde diese durch eine Erweiterung um die adaptive Steuerung MOTION ergänzt.

Im November 2008 wurde als Vergleichsbasis eine Vorher-Messung der im Wesentlichen ca. 10 Jahre alten verkehrsabhängigen Steuerung mit Busbeschleunigung durchgeführt. Eine Messung unter einer optimierten konventionell verkehrsabhängigen Steuerung fand im November 2010 statt. Mitte Januar 2011 wurde auf dem Streckenzug eine Vorab-Version der MOTION-Steuerung in Betrieb genommen. Nach einigen Feinanpassungen durch die Herstellerfirma wurde die Umsetzung des verkehrsadaptiven Verfahrens im Mai 2011 gemessen. Die Messzeiträume sind der Tabelle 3-2 zu entnehmen. Da bereits auf dem Streckenzug Albersloher Weg erhebliche Schwächen bei der Steuerung mit dem Verfahren MOTION aufgrund des integrierten Umschaltverfahrens beobachtet wurden, hat die Stadt Münster für die Strecke Weseler Straße ein verbessertes Verfahren seitens der Herstellerfirma gefordert.

Die Weseler Straße wird wegen der engen Abstände und der hohen Belastungen der Knotenpunkte hinsichtlich der Anforderung an die Koordinierung als besonders anspruchsvoll angesehen. Daher hat die Stadt Münster entschieden, die modellbasierte Netzsteuerung auf diesem Streckenzug dauerhaft nur mit einem nachweislich verbesserten Umschalt-

verfahren in Betrieb zu nehmen (Stadt Münster, 2011). Dies konnte innerhalb der vereinbarten Zeit (bis zur Messung im Mai 2011) jedoch nicht umgesetzt werden. Nach der Messung wurde die modellbasierte Steuerung aufgrund hoher Kritik aus der Bevölkerung außer Betrieb genommen, bis ein verbessertes Umschaltverfahren vorliegt. Seitdem werden die Lichtsignalanlagen wieder konventionell verkehrsabhängig gesteuert.

3.3 Stadt Remscheid – Bismarckstraße

3.3.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Der Straßenzug Bismarckstraße/Burger Straße befindet sich im Stadtbezirk 2 der Stadt Remscheid, südöstlich des Zentrums. Bild 3-3 zeigt die Lage der Untersuchungsstrecke. Der Straßenzug setzt sich aus zwei Landesstraßenabschnitten zusammen. Er ist die Hauptverbindung der südlich gelegenen Ortsteile zum Stadtzentrum.

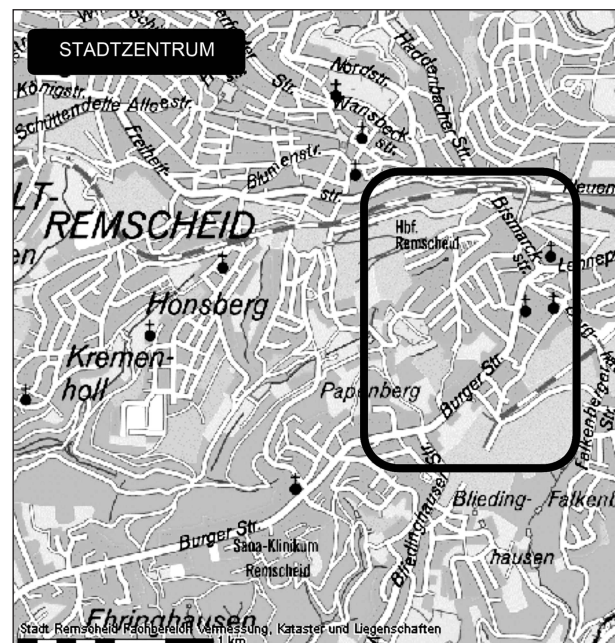


Bild 3-3: Lage des Untersuchungsgebietes Bismarckstraße/ Burger Straße im Stadtgebiet von Remscheid

Stufe	Steuerungsverfahren	Messung	Messzeitraum
0	Grundzustand der Steuerung, verkehrsabhängig und festzeitgesteuert	Vorher	12.11.2008
1	Konventionell verkehrsabhängig mit neuer Optimierung	Nachher I	09.11.2010
2	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren MOTION	Nachher II	10.05.2011

Tab. 3-2: Messzeiträume auf der Weseler Straße in Münster

Die Untersuchungsstrecke hat eine Gesamtlänge von ca. 1,8 km und quert 10 Knotenpunkte mit LSA. In Bild 3-4 sind die LSA-gesteuerten Knotenpunkte dargestellt. Die Bismarckstraße erstreckt sich über die nördlich gelegenen Knotenpunkte 02-20 bis 02-25. Sie ist ein Abschnitt der Landesstraße L 415. Der südliche Teil, die Burger Straße, verläuft vom Knotenpunkt 13-12 bis zum Knotenpunkt 13-06 und ist Teil der Landesstraße L 407.

Der nördliche Abschnitt (Bismarckstraße) hat eine Länge von ca. 600 m und verfügt größtenteils über zweistreifig ausgebaute sowie baulich getrennte Richtungsfahrbahnen. Die Bebauung besteht westlich des Abschnitts aus dichter Wohnbebauung mit Geschäftsbereichen. An den Fahrbahnrandern befinden sich Parkbuchten. An der Ostseite ist ein Gewerbegebiet angesiedelt. Am Nordende (Knotenpunkt 02-20) ist die Untersuchungsstrecke an die Bundesstraße B 229 angebunden. Der Knotenpunkt 02-20 ist als Unterführung der B 229 angelegt.

Südlich des Knotenpunktes 02-20 folgt im direkten Anschluss ein Durchlass unter der Eisenbahntrasse der Müngstener Bahnlinie (RB 47). In diesem Bereich besteht keine bauliche Trennung der Richtungsfahrbahnen. Die Fahrstreifen beider Richtungen sind verengt. Der Knotenpunkt 02-21 wurde im

Jahr 2008 vierarmig ausgebaut. Aus östlicher Richtung wurde die neu geschaffene Prešover Straße zur Erschließung des Südbereichs des neuen Bahnhofs mit Park-&-Ride-Parkhaus und Einkaufszentrum an die Bismarckstraße angebunden. Im weiteren Streckenverlauf ist südlich des Knotenpunktes 02-21 bis zum Knotenpunkt 02-25 ein Grünstreifen als bauliche Trennung der Richtungsfahrbahnen angelegt. Am Knotenpunkt 02-23 verfügt die westliche Richtungsfahrbahn über einen zusätzlichen Linksabbieger-Fahrstreifen, wodurch die Gegenrichtung zwischen den Knotenpunkten 02-23 und 02-21 aufgrund der beengten Platzverhältnisse nur einstreifig ausgebaut ist. Zwischen den Knotenpunkten 02-20 und 02-25 steigt die Strecke in südlicher Richtung zunächst gleichmäßig mit 2,5 % Steigung bis zum Knotenpunkt 02-24 an und erreicht auf dem letzten Abschnitt zwischen den Knotenpunkten 02-24 und 02-25 eine Steigung von mehr als 8 %. Die zulässige Geschwindigkeit auf dem Abschnitt beträgt 50 km/h.

Der südliche Abschnitt hat eine Länge von ca. 1.200 m und fällt nach Süden hin ab. Die Strecke weist auf dem Abschnitt zwischen den Knotenpunkten 13-12 und 13-10 ein Gefälle von über 4 % auf. Danach folgt ein ebener Abschnitt auf einer Länge von 450 m. Südlich des Knotenpunktes 13-08 fällt die Strecke bis zum Knotenpunkt 13-07 mit knapp 4 % wieder stärker ab. Die Knotenpunkte auf diesem Abschnitt sind bis auf den südlichen Knotenpunkt 13-06 (Fußgängerquerungsanlage) allesamt Einmündungen. Im Bereich der Fußgängerquerungsanlage, südwestlich des Knotenpunktes 13-07, ist die Höchstgeschwindigkeit auf 30 km/h beschränkt. Auf dem restlichen Teil des Abschnittes gilt ebenfalls eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Das Parken ist abschnittsweise in Parkbuchten oder an den Fahrbahnrandern möglich. Entlang des Streckenabschnittes besteht die Bebauung der Stadtrandlage entsprechend aus aufgelockerter Wohnbebauung mit einzelnen Einkaufsmöglichkeiten. Der südliche Bereich ist stark von dem südlich gelegenen Gewerbegebiet geprägt. Nördlich des Streckenabschnittes schließt sich eine ausgedehnte Grünfläche an die Wohnbebauung an.

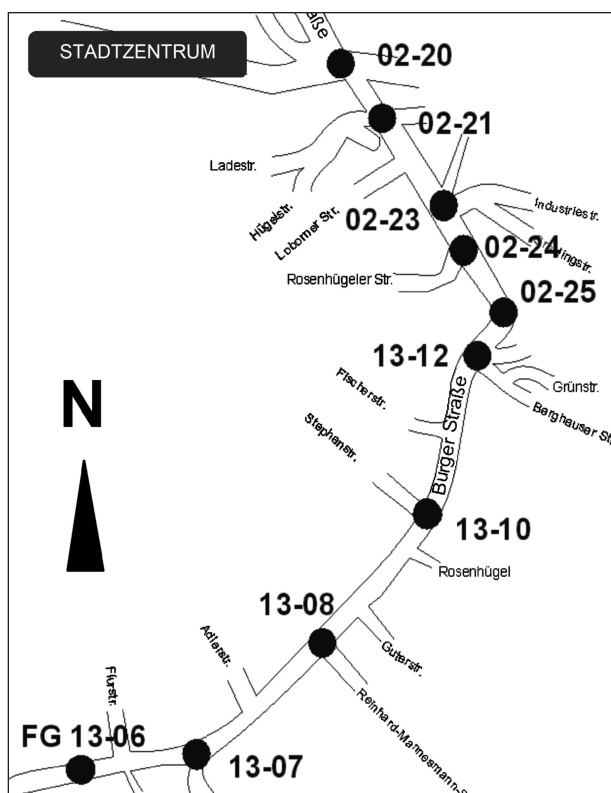


Bild 3-4: Lage der LSA im Untersuchungsgebiet Bismarckstraße/Burger Straße

3.3.2 Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet

Auf den untersuchten Straßenzügen in Remscheid werden zwei Entwicklungsstufen der Steuerungsverfahren beobachtet. Da eine Messung unter Fest-

Stufe	Steuerungsverfahren	Messung	Messzeitraum
1	Konventionell verkehrsabhängig	Vorher	28.10.2008
2	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren BALANCE	Nachher	19.05.2009

Tab. 3-3: Messzeiträume auf der Bismarckstraße in Remscheid

zeitsteuerung im Rahmen der Untersuchung nicht durchgeführt wird, gilt hier anders als bei den in Münster durchgeführten Messungen die Vorher-Messung mit der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung als Vergleichsbasis. Diese Steuerung stellt hier auch die Basis und Rückfallebene für die adaptive Steuerung dar. Die Messungen auf diesem Straßenzug fallen mit denen auf der Hastener Straße zusammen. Die Vorher-Messung wurde wie in Tabelle 3-3 dargestellt im Oktober 2008 durchgeführt. Die Nachher-Messung unter der adaptiven Steuerung nach dem Verfahren BALANCE fand im Mai 2009 statt.

3.4 Stadt Remscheid – Hastener Straße

3.4.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Der Straßenzug Hastener Str./Eberhardstr. befindet sich im Stadtbezirk 1 der Stadt Remscheid, nordwestlich des Stadtzentrums. Bild 3-5 zeigt die Lage der Untersuchungsstrecke im Remscheider Stadtgebiet.

In Bild 3-6 sind die acht mit LSA gesteuerten Knotenpunkte dargestellt. Im Untersuchungsgebiet kann von einem durchgehend adaptiv gesteuerten Straßenzug gesprochen werden. Dieser Straßenzug hat eine Gesamtlänge von knapp 2.300 m. Dabei besteht er aus unterschiedlich charakterisierbaren Bereichen.

Im Norden führt die teilweise stark belastete Hastener Str./Eberhardstr. in den Innenstadtbereich Remscheids. Daran schließen sich drei LSA an, die in der Innenstadt Remscheids liegen. Dieser Straßenzug weist einige enge Kurven und Steigungsstrecken auf. Teilweise ist eine sehr enge Bebauung mit Geschäften vorhanden. Zwischen den LSA 02-07 und 02-11 ist eine eher lockere Bebauung vorhanden.

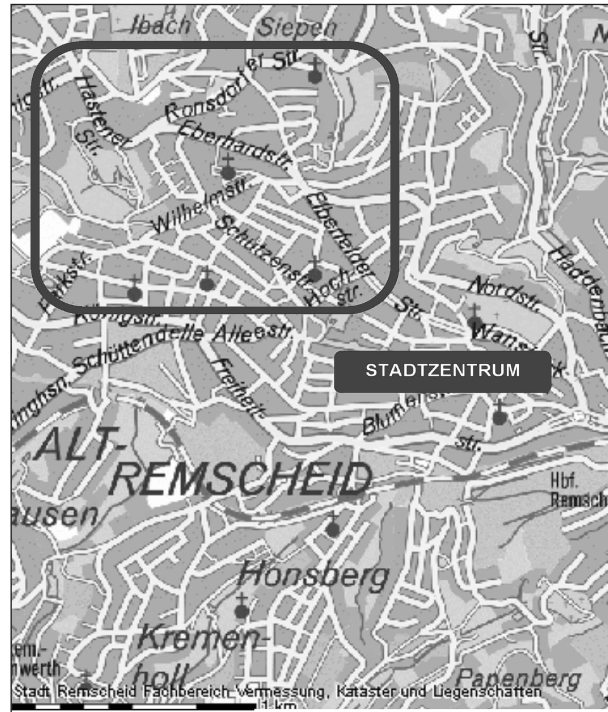


Bild 3-5: Lageplan des Untersuchungsgebiets Hastener Straße/Eberhardstraße

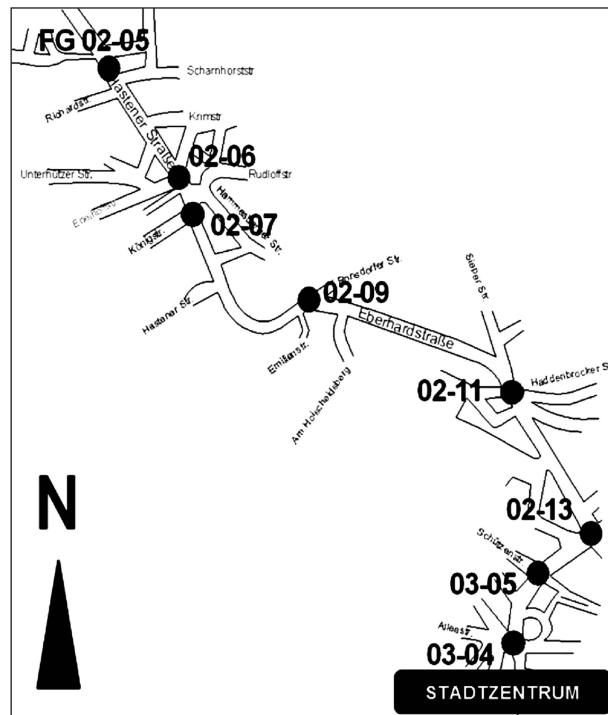


Bild 3-6: Lage der LSA im Untersuchungsgebiet Hastener Straße/Eberhardstraße

Stufe	Steuerungsverfahren	Messung	Messzeitraum
1	Konventionell verkehrsabhängig	Vorher	28.10.2008
2	Verkehradaptive Steuerung nach dem Verfahren BALANCE	Nachher	19.05.2009

Tab. 3-4: Messzeiträume auf der Hastener Straße in Remscheid

3.4.2 Realisierte Steuerungsverfahren im Untersuchungsgebiet

Wie auch auf dem Straßenzug Bismarckstraße/ Burger Straße werden lediglich zwei Entwicklungsstufen der Steuerungsverfahren beobachtet.

Eine Messung unter Festzeitsteuerung wird nicht durchgeführt, daher gilt die Vorher-Messung mit der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung als Vergleichsbasis, mit der die verkehrliche Wirkung der neuen Steuerungsverfahren beurteilt werden kann. Diese Steuerung stellt auch die Basis und Rückfallebene für die adaptive Steuerung dar. Dadurch kann die zusätzliche Wirkung der adaptiven Steuerung im Vergleich zu einer optimierten verkehrsabhängigen Steuerung beurteilt werden. Die Vorher-Messung wurde, wie in Tabelle 3-4 dargestellt, im Oktober 2008 durchgeführt. Die Nachher-Messung unter der adaptiven Steuerung nach dem Verfahren BALANCE fand im Mai 2009 statt.



Bild 4-1: Ausstattung der Messfahrzeuge

4 Methodik zur Bewertung der verkehrlichen Wirkung adaptiver Steuerungen

4.1 Empirische Messungen

4.1.1 Durchführung der Floating-Car-Messungen

Die Bewertung der verkehrlichen Wirkung adaptiver Steuerungen wird mit Messfahrten nach der Floating-Car-Methode durchgeführt. Dafür werden zehn Pkw mit GPS-Empfängern ausgestattet (siehe Bild 4-1). Die Fahrzeuge fahren entlang vorher festgelegter Routen in zwei Zeiträumen mit unterschiedlicher Verkehrsbelastung. Der Messzeitraum jeder Messung beträgt dabei zwei Stunden. Die Pkw gehören verschiedenen Fahrzeugklassen an. Durch die unterschiedliche Größe und Motorisierung der Fahrzeuge wird eine relativ breite Vielfalt an Messfahrzeugen erreicht.

In BRILON et al. (2007) wurde festgestellt, dass zehn Messfahrzeuge, in einem Messzeitraum von zwei Stunden, ausreichend genau den Verkehrsablauf auf einem Straßenzug darstellen. Insgesamt ergibt sich die in Tabelle 4-1 dargestellte Anzahl an Fahrten, getrennt nach Untersuchungsstrecke, Fahrtrichtung und Messzeitraum. Zur genauen Erfassung der kinematischen Zustände der Fahrzeuge wird 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. Um ein realistisches Bild des Verkehrsablaufes zu erhalten, werden die Fahrer angewiesen, sich in ihrer Fahrweise dem fließenden Verkehr anzupassen. Die erreichte Fahrtgeschwindigkeit der Messfahrer repräsentiert so die Fahrtgeschwindigkeit des Gesamtkollektivs.

Gebiet	Steuerungsverfahren	FR Nord	FR Süd
MS-AW	Grundzustand, verkehrsabhängig und festzeitgesteuert	265	272
MS-AW	Konventionell verkehrsabhängig mit neuer Optimierung	247	246
MS-AW	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren MOTION	286	267
MS-WS	Grundzustand, verkehrsabhängig und festzeitgesteuert	105	111
MS-WS	Konventionell verkehrsabhängig mit neuer Optimierung	88	87
MS-WS	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren MOTION	78	81
RS-BS	Konventionell verkehrsabhängig	81	80
RS-BS	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren BALANCE	71	72
RS-HS	Konventionell verkehrsabhängig	68	70
RS-HS	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren BALANCE	68	71
MS-AW	Münster – Albersloher Weg		
MS-WS	Münster – Weseler Str./Steinfurter Straße		
RS-BS	Remscheid – Bismarckstraße/Burger Straße		
RS-HS	Remscheid – Hastener Str. /Eberhardstr.		

Tab. 4-1: Anzahl der durchgeführten Messfahrten

4.1.2 Auswertung der Messungen

Jedes Messfahrzeug wird mit einem GPS-Empfänger und einem Notebook zur sekundengenauen Aufzeichnung der GPS-Daten ausgestattet. Der GPS-Empfänger des Herstellers Navilock (Modell NL-202U) weist laut Hersteller eine Genauigkeit von 10 m in der horizontalen Messung auf. Dieser Empfänger wird per USB-Anschluss an das Notebook angeschlossen und mit einem Magneten auf dem Dach der Fahrzeuge befestigt. Auf jedem Notebook ist ein Programm installiert („GPS-Manager“), welches die Daten des GPS-Empfängers verarbeitet und in einer .log-Datei speichert. Dabei kann zwischen verschiedenen Datensätzen ausgewählt werden. Die Datensätze entsprechen dem allgemein gültigen NMEA-Protokoll. Für die Messung wird 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 (siehe Bild 4-2). Die Geschwindigkeit kann bei der späteren Auswertung der Daten durch die Veränderung der Position in jeder Sekunde ermittelt werden. Die aufgezeichneten GPS-Daten werden mit einem Tabellenkalkulationsprogramm ausgewertet.

Da die Daten in Textdateien gespeichert werden, ist die Auswertung mit MS-Excel möglich. Dafür wurde ein Excel-Spreadsheet entwickelt, das es ermöglicht, die Auswertungen weitgehend automatisiert

```

$GPGGA,150757.199,5128.5211,N,00712.8939,E,1,07,1.1,154.5,M,47.5,M,0.0,0000*7
$GPGGA,150758.199,5128.5212,N,00712.8938,E,1,07,1.1,153.8,M,47.5,M,0.0,0000*7
$GPGGA,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 , 1 , 2 , 3 ,4,5, 6 , 7 , , 8 , , ,

- 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 4-2: Erläuterung des GPGGA-Datenformats

ablaufen zu lassen. Zunächst wird dabei die Position auf der Erdoberfläche durch eine Transformation der Längen- und Breitengrade in eine Ebene bestimmt.

Der Höhenunterschied des Straßenzuges wird dabei vernachlässigt. Das Ergebnis dieser Transformation sind die X- und Y-Koordinaten des Fahrzeugs in jeder Sekunde. Als Bezugspunkt wird ein Mittelwert der Streckenkoordinaten gewählt. Ein Beispiel der transformierten Daten ist in Bild 4-3 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 (siehe Bild 4-4). Die restlichen Berechnungen laufen automatisiert ab, müssen aber manuell überprüft werden, um Fehler auszuschließen. Als Er-

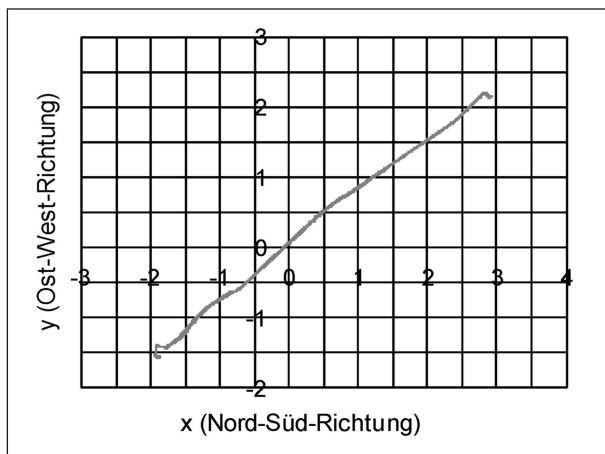


Bild 4-3: Fahrten eines Messfahrzeugs

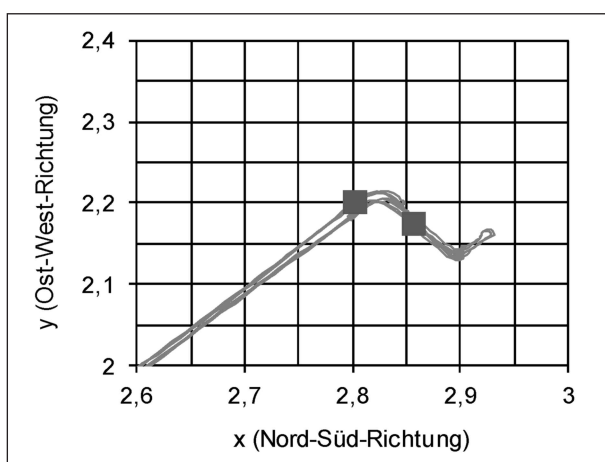


Bild 4-4: Start- und Endpunkt einer Route

gebnis der Auswertungen können die Fahrzeit, die Anzahl der Halte, die mittlere Geschwindigkeit 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 untersuchten Straßenzug eingefahren ist. Der Startpunkt der Messung liegt somit hinter der ersten Haltlinie. 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 adaptiven Steuerung nicht berücksichtigt werden. Der Endpunkt der Messung wird hinter der letzten Haltlinie des koordinierten Straßenzuges positioniert. Bei dieser Art der Auswertung werden alle durch die adaptive Steuerung kontrollierten Knotenpunkte erfasst.

Die Fahrzeiten, Verlustzeiten und Anzahl der Halte werden nicht nur für eine gesamte Fahrt, sondern

auch zwischen zwei aufeinanderfolgenden Haltlinien bestimmt. Die Positionen der relevanten Haltlinien im Netz wurden mit einem GPS-Empfänger ermittelt. Bei der Auswertung der GPS-Daten werden die Zeitpunkte des Überfahrens einer Haltlinie ermittelt. Die Differenz zwischen der tatsächlich gefahrenen Fahrzeit und der optimalen Fahrzeit einer ununterbrochenen Fahrt mit der zulässigen Geschwindigkeit ergibt die Verlustzeit auf dem Streckenabschnitt.

Ergänzend dazu lassen sich aus den Kenngrößen der empirischen Messungen weitere Bewertungsgrößen berechnen. Zum einen wird das Koordinierungsmaß nach HBS (FGSV, 2005) nach Gleichung (4-1) ermittelt und anhand dessen eine Einteilung in Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs vorgenommen. Zum anderen erfolgt eine Einteilung in Qualitätsstufen nach BRILON und SCHNABEL (2003) anhand der mittleren Fahrtgeschwindigkeit. Die mittlere Fahrtgeschwindigkeit wird nach Gleichung (4-2) mit Hilfe des harmonischen Mittels der mittleren Fahrtgeschwindigkeiten jeder einzelnen Fahrt bestimmt. Die Grenzwerte der Qualitätsstufen sind Tabelle 4-2 zu entnehmen.

$$k_i = \frac{D_i}{(N_{K,LSA} - 1) \cdot n} \cdot 100 = \left[1 - \frac{H_i}{(N_{K,LSA} - 1) \cdot n} \right] \cdot 100 \quad (4-1)$$

mit

k_i = Koordinierungsmaß für die Verkehrsrichtung i [%]

D_i = Anzahl der Durchfahrten an den Knotenpunkten mit LSA (außer am Eingangsknotenpunkt) für die Verkehrsrichtung i von allen Messfahrten [-]

H_i = Anzahl der Halte an den Knotenpunkten mit LSA (außer am Eingangsknotenpunkt) für die Verkehrsrichtung i von allen Messfahrten [-]

$N_{K,LSA}$ = Anzahl der Knotenpunkte mit LSA des Straßenzugs [-]

n = Anzahl der Messfahrten [-]

$$v_R = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i}} \quad (4-2)$$

mit

v_R = mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h]

QSV	Koordinierungsmaß [%]	Mittlere Fahrtgeschwindigkeit [km/h] bei $v_{zul} =$		
		50 km/h	60 km/h	70 km/h
A	≥ 95	≥ 40	≥ 50	≥ 60
B	≥ 85	≥ 30	≥ 35	≥ 40
C	≥ 75	≥ 25	≥ 25	≥ 30
D	≥ 65	≥ 20	≥ 20	≥ 25
E	≥ 50	≥ 15	≥ 15	≥ 15
F	< 50	< 15	< 15	< 15

Tab. 4-2: Grenzwerte der Qualitätsstufen nach Koordinierungsmaß (FGSV, 2005) und mittlerer Fahrtgeschwindigkeit (BRILON und SCHNABEL, 2003)

v_i = Fahrtgeschwindigkeit bei Messfahrt i [km/h]

N = Anzahl der Messfahrten [-]

Bei der Bestimmung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs nach dem Bewertungskriterium der mittleren Fahrtgeschwindigkeit stellt sich das Problem der unterschiedlichen zulässigen Geschwindigkeit auf den betrachteten Streckenzügen. So liegt diese z. B. auf einigen Teilen des Albersloher Wegs in Münster bei 50 km/h und auf anderen bei 70 km/h. Auf der Hastener Straße in Remscheid ist die Geschwindigkeit zum Teil auf 40 km/h bzw. 30 km/h beschränkt. Um dennoch eine Einteilung für die gesamte Strecke vornehmen zu können, wurden die Grenzwerte für eine zulässige Geschwindigkeit von 50 km/h herangezogen.

4.1.3 Korrektur der Messwerte

Die durchgeführten Messungen sollen hinsichtlich der Parameter Fahrtzeit, Verlustzeit und Anzahl der Halte ausgewertet werden. Aufgrund der Messmethodik ist eine nachträgliche Korrektur der erhobenen Daten erforderlich. So ergab sich die Notwendigkeit, nach Durchführung der Messfahrten zu entscheiden, welche Fahrten in die weitere Auswertung aufgenommen werden. Die Überprüfung der Eignung fand in unterschiedlichen Stufen statt.

Zuerst wurden Fahrten aus der Auswertung ausgeschlossen, bei denen während der Fahrt unvorhergesehene Ereignisse stattfanden, die sich stark negativ auf die Fahrtzeiten ausgewirkt haben (z. B. Polizei- oder Feuerwehreinsätze). Anschließend wurde anhand der Geschwindigkeitsprofile der Fahrer entschieden, ob durch eine ungenaue Posi-

tionsbestimmung der GPS-Geräte unrealistisch hohe Geschwindigkeiten erreicht werden (siehe Bild 4-5). Diese Ereignisse sind zufällige Fehler der gewählten Methodik der Positionsbestimmung und weisen nicht auf eine fehlerhafte Handhabung mit den GPS-Geräten hin. Bei Erkennen der „Positionssprünge“ wurden daher nicht alle Fahrten des betreffenden Fahrers gelöscht, sondern nur die eine fehlerhafte Fahrt. Bei der Ermittlung der Anzahl der Halte während einer Fahrt wurden ebenfalls wegen kurzzeitigen Ausfalls der GPS-Geräte Sekunden-Intervalle ohne Positionsänderung nicht als Halt gewertet, bei denen sowohl im Intervall davor wie auch danach mit konstanter Fahrtgeschwindigkeit gefahren wurde. Da bei sämtlichen durchgeführten Messungen die gleichen Korrekturverfahren angewendet wurden, bleiben die Ergebnisse weiterhin miteinander vergleichbar.

4.2 Mikroskopische Simulation

Um die verkehrlichen Kenngrößen wie Anzahl der Halte, Wartezeiten etc. für die unterschiedlichen Steuerungsstrategien auf den jeweiligen Streckenzügen gegenüberstellen zu können, werden zwei der vier betrachteten Untersuchungsstrecken zusätzlich mit Hilfe eines mikroskopischen Simulationsprogramms umfassend untersucht. Als Vergleichsbasis dient jeweils die verkehrabhängige regelbasierte Steuerung der Straßenzüge.

Verwendet wird in dieser Untersuchung das in Deutschland gebräuchliche Mikrosimulationsprogramm VISSIM der Firma PTV AG. Die mikroskopische Simulation bietet dem Anwender vielfältige Auswertungsmöglichkeiten bei vergleichsweise geringem Aufwand gegenüber einer empirischen Untersuchung. Dadurch lassen sich die Steuerungsalternativen der Straßenzüge nicht nur für die koordinierten Hauptrichtungen, sondern auch hinsichtlich ihrer Wirkungen auf das gesamte Straßennetz untersuchen.

In dem Simulationsmodell wird der Verkehrsablauf in dem untersuchten Ausschnitt des Straßennetzes nachgebildet. Dabei reagieren die Fahrer-Fahrzeugelemente auf die Anzeigen der Lichtsignale. Diese Anzeigen werden von dem hinterlegten Steuerungsprogramm erzeugt. Dieses Programm richtet seine Befehle nach den Informationen, die die Detektoren über den Verkehrsablauf liefern. So schließt sich eine Art Regelkreis. Entscheidend ist darin die Logik hinter dem Steuerungsprogramm.

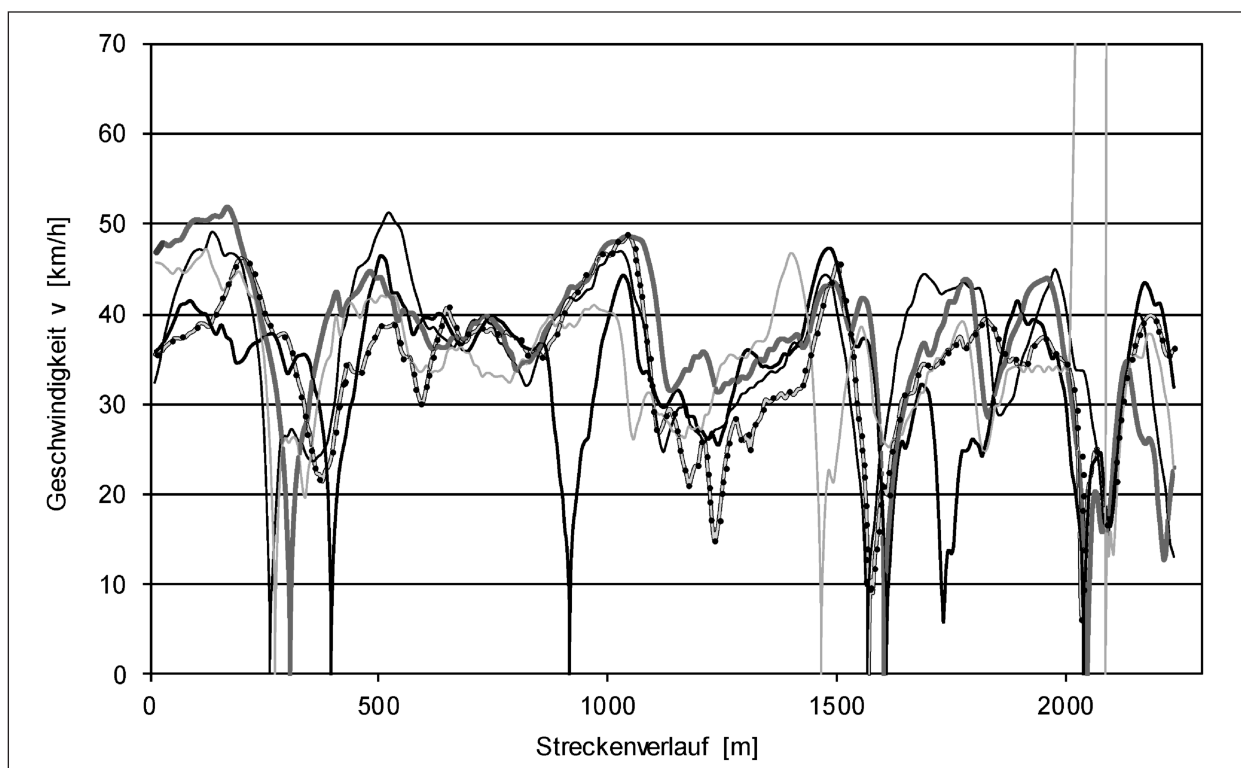


Bild 4-5: Beispiel für ein Geschwindigkeitsprofil

Im Fall der adaptiven Steuerungen wird diese Logik von den Herstellern geheim gehalten. Deswegen ist der Aufbau eines Modells für die Untersuchungsgebiete nur durch die Hersteller der adaptiven Steuerung möglich. Die beiden betroffenen Hersteller erklärten sich bereit, diese Modelle für alle vier Untersuchungsgebiete zu erstellen. Innerhalb der verfügbaren Zeit wurde jedoch von jedem der Hersteller nur die Software für ein Untersuchungsgebiet bereitgestellt. Dies sind der Albersloher Weg mit der modellbasierten LSA-Steuerung MOTION und der Straßenzug Bismarckstraße/Bürgerstraße mit der modellbasierten LSA-Steuerung BALANCE.

Das im HBS (FGSV, 2001) vorgeschlagene Koordinierungsmaß als Beurteilungskriterium für die Koordinierungsqualität in Abhängigkeit von der Anzahl der Halte auf den koordinierten Hauptrichtungen eignet sich nur bedingt für einen Vergleich unterschiedlicher Steuerungsverfahren auf einem Streckenzug. In Anlehnung an international übliche Bewertungsverfahren (siehe Kapitel 2.1.2, TRANSYT) wird für die vergleichende Bewertung der Verkehrsqualität mit unterschiedlichen Steuerungsverfahren ein Performance-Index (PI) verwendet. Neben der Anzahl der Halte fließen auch die Verlustzeiten in die Bewertung ein. Zusätzlich ergibt sich damit die Möglichkeit, auch die Nebenstraßen in die Bewertung aufzunehmen. Der PI ist eine skalare Größe,

die sich auf den Nutzen einer Alternative bezieht, in diesem Fall wird dadurch der negative Nutzen einer Steuerungsalternative ausgedrückt. Daher steht ein niedriger PI für eine höhere Verkehrsqualität. Der PI wird nach Gleichung (4-3) berechnet.

$$PI = G_{VZ} \cdot \sum_i \sum_z VZ_{i,z} \cdot Q_{i,z} \cdot g_i \cdot g_z + G_H \cdot \sum_i \sum_z H_{i,z} \cdot Q_{i,z} \cdot g_i \cdot g_z \quad (4-3)$$

mit

PI = Performance-Index [-]

G_{VZ} = Gewichtung der Verlustzeit [-]

$VZ_{i,z}$ = mittlere Verlustzeit aller Fahrzeug der Fahrzeugart z im Knotenpunktarm i [s]

$Q_{i,z}$ = Verkehrsbelastung im Knotenpunktarm i der Fahrzeugart z [Kfz]

g_i = Gewicht der Strecke im Knotenpunktarm i [-]

g_z = Gewicht für Fahrzeuge der Fahrzeugart z [-]

G_H = Gewichtung der Halte [s/Halt]

$H_{i,z}$ = mittlere Anzahl der Halte aller Fahrzeuge der Fahrzeugart z im Knotenpunktarm i [Halte]

Der PI kann in dieser Form noch nicht als Vergleichsgröße herangezogen werden. Die Verkehrsbelastungen in den Zuflüssen sind zwar für alle Simulationen einheitlich, allerdings muss das stochastische Verhalten des Simulationsmodells berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird der PI durch die gewichtete Summe der Verkehrsstärken nach Fahrzeugart und betrachteter Zufahrt geteilt.

$$PI_{\text{gesamt}} = \frac{PI}{\sum_I \sum_z Q_{i,z} \cdot g_z} \quad (4-4)$$

mit

PI = Performance-Index [-]

$Q_{i,z}$ = Verkehrsbelastung im Knotenpunktarm i der Fahrzeugart z [Kfz]

g_z = Gewicht für Fahrzeuge der Fahrzeugart z [-]

Die Gewichtung g_z der unterschiedlichen Fahrzeugarten kann entsprechend dem durchschnittlichen Besetzungsgrad der Fahrzeugart gewählt werden. In dieser Untersuchung gehen die Fahrzeugarten nicht durch eine gesonderte Gewichtung in die Berechnung des Performance-Index ein. Die Zufahrten fließen bereits durch ihre Verkehrsbelastung in gewichteter Form in die Berechnung ein, daher werden die Zufahrten in dieser Untersuchung nicht noch einmal gesondert gewichtet ($g_i = 1,0$). Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, anhand dieser Parameter einzelne Strecken oder Verkehrsteilnehmer gegenüber anderen zu bevorzugen.

Die Verlustzeit pro Fahrzeug geht mit einem Gewicht G_{VZ} und jeder Halt mit einem Gewicht von $G_H = 60$ [s/Halt] in die Bewertung ein. Dieser Wert entspricht dem Zeitäquivalent eines Halts in Bezug auf den dafür benötigten Kraftstoffmehrerverbrauch (SCHNABEL, 2001). Die Verlustzeit ergibt sich in der Simulation aus der Differenz der Überfahrzeit an einem Knotenpunkt gegenüber der Fahrtzeit bei freier Durchfahrt ohne Signalisierung und andere Fahrzeuge. Zusätzlich zum Vergleich der Verkehrsqualität auf dem gesamten Streckenzug wird die Koordinierungsqualität der LSA-Steuerung in der Simulation analog zur Auswertung der empirischen Messungen anhand des Koordinierungsmaßes aus dem HBS (FGSV, 2005) bewertet. Diese Bewertung bietet neben der Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle eine zusätzliche Möglichkeit zur Einschätzung der Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der empirischen Erhebungen.

5 Methodik zur Bewertung der Umweltwirkungen adaptiver Steuerungen

5.1 Empirische Messungen der Immissionen

Um die Umweltwirkungen der untersuchten Steuerungsverfahren ermitteln zu können, wären Immissionsmessungen an allen vier untersuchten Straßenzügen unter jeder Steuerungsvariante wünschenswert.

Die einfachste Methode, der Einsatz von Passivsammlern zur Bestimmung der Luftqualität, ist im Umfang dieser Untersuchung jedoch nicht finanzierbar. Alternativ dazu bieten sich bereits eingerichtete kontinuierliche Messstationen an (siehe Kapitel 2.3.4).

Lediglich an dem Straßenzug Weseler Straße/Steinfurter Straße in Münster ergab sich die Möglichkeit, die Ergebnisse einer Messeinrichtung des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) für diese Untersuchung zu verwenden. In den anderen Untersuchungsgebieten sind keine Messeinrichtungen dieser Art vorhanden. Von der ursprünglich geplanten Erfassung der Immissionswerte durch die dauerhaft eingerichtete Messstation des LANUV an der Weseler Straße musste allerdings abgesehen werden. Da die untersuchten Steuerungsarten nicht über so lange Perioden geschaltet blieben, war es nicht möglich, für jede untersuchte Steuerung über den erforderlichen Zeitraum von sechs Monaten Daten zu sammeln.

Stattdessen erfolgte die Bewertung der Umweltwirkungen ausschließlich über die mikroskopische Simulation. Als Voraussetzung für Studien über einen längeren Betrachtungszeitraum müssen nach Ansicht der Stadt Münster zunächst die bestehenden Probleme mit den regelmäßigen Umschaltungen der MOTION-Steuerung und damit einhergehenden Koordinierungsstörungen in der Praxis gelöst sein.

Weiterhin sollte die adaptive Steuerung zumindest das Qualitätsniveau der verkehrsabhängigen Steuerung erreichen bzw. eine bessere Verkehrs- oder Umweltqualität erwarten lassen. Unter diesen Voraussetzungen stehen beide Untersuchungsgebiete der Stadt Münster für weitergehende Forschungsvorhaben auch über einen längeren Betrachtungszeitraum zur Verfügung.

5.2 Rechnerische Ermittlung der Emissionen

Zur rechnerischen Bestimmung der Auswirkungen von Lichtsignalanlagen auf die Emissionen werden mehrere Verfahren auf ihre Tauglichkeit geprüft. Um die Emissionen der Fahrzeuge ermitteln zu können, ist die Zuordnung zum kinematischen Zustand der Fahrzeuge zwingend erforderlich. Dafür stehen zwei Methoden zur Auswahl. Die Berechnung kann entweder anhand der verkehrlichen Kenngrößen aus den Messfahrten oder aus den Simulationen durchgeführt werden.

Eine Schätzung der Emissionen anhand einer durchschnittlichen Verkehrssituation, wie sie zum Beispiel im HBEFA (2004) verwendet wird, ist in diesem Fall nicht zielführend. Die dort vorgenommene Klasseneinteilung der Geschwindigkeiten mit einer Klassengröße von 10 km/h ist zu ungenau für eine Berechnung im Stadtgebiet. Detaillierte Studien sind mit dem HBEFA nicht möglich, da es dafür nicht ausgelegt wurde.

Die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Verfahren erweisen sich ebenfalls als ungeeignet. Das Verfahren der Emissionskurven durch gemessene Emissionswerte empfiehlt sich nicht für diese Untersuchung, da es durchschnittliche Verkehrssituationen beurteilt. Auch das Modell mit Motorkennfeldern ist nicht geeignet, da diese von der Automobilindustrie nicht veröffentlicht werden.

Im Rahmen einer Diplomarbeit bereitete BUCHHOLZ (2008) das Verfahren mit Geschwindigkeits-Beschleunigungsfeldern zur Anwendung in diesem Projekt auf, das es ermöglicht, die Emissionen eines Fahrzeuges anhand seines kinematischen Zustandes zu ermitteln. Dort wurde das HBEFA als Grundlage verwendet und die mittleren Emissionen einer typischen Fahrzeugflotte berechnet. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist jedoch aufgrund der geringen Datengrundlage und der groben Skalierung für diese Untersuchung nicht ausreichend.

Als wesentlich feineres Rechenverfahren bietet sich das mikroskopische Emissionsmodell PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) an (HAUSBERGER, 2002). Mit diesem Verfahren ist es möglich, Emissionen anhand von Fahrzyklen aufbauend auf dem Modell mit Motorkennfeldern in Kapitel 2.3.3 zu ermitteln (siehe Bild 5-1). Ein Fahrzyklus setzt sich aus der Geschwindigkeitsganglinie und der Fahrbahnlängsneigung der befahrenen Strecke zusammen. PHEM errechnet für die

Emissionsberechnung zunächst die erforderliche Motorleistung aus den Fahrwiderständen und den Verlusten im Antriebsstrang.

Die für die Emissionsermittlung im Weiteren benötigte Motordrehzahl des Fahrzeugs ergibt sich aus dem Reifendurchmesser, der Achs- und Getriebeübersetzung und einem Fahrer-Gangwechselmodell. Die Emissionen werden entsprechend der aktuellen Motorleistung und Motordrehzahl aus normierten Kennfeldern interpoliert. Durch die Normierung der Motorkennfelder lassen sich Motoren unterschiedlicher Leistungsklassen nach Euro-Klassen zusammenfassen. Das Verfahren führt zu genaueren Ergebnissen und soll daher in dieser Untersuchung Verwendung finden. Das Modell wurde an der Technischen Universität Graz entwickelt. Es repräsentiert eine Vielzahl von Fahrzeugtypen und Motorkennfeldern. Die für die Emissionsberechnung benötigten Fahrzyklen werden aus der mikroskopischen Verkehrsfluss-simulation erzeugt. Der schematische Aufbau der Schnittstellen zwischen den einzelnen Simulationskomponenten ist in Bild 5-2 dargestellt.

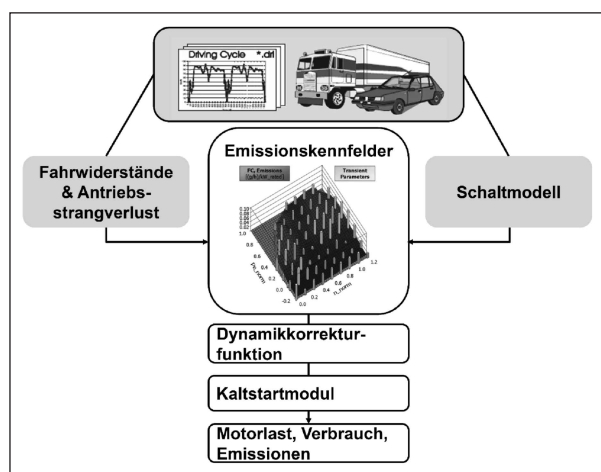


Bild 5-1: Aufbau des mikroskopischen Emissionsmodells PHEM (nach HIRSCHMANN et al., 2009)

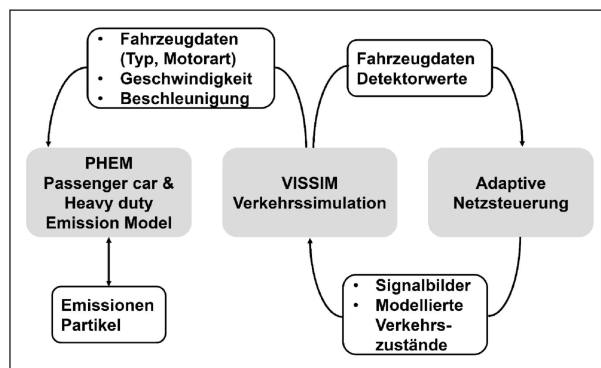


Bild 5-2: Prinzipieller Aufbau zur Verwendung von VISSIM und PHEM für die Emissionsberechnung (nach HIRSCHMANN und FELLENDORF, 2009)

An der TU Graz wurde PHEM im Rahmen des Forschungsprojektes GAVE – Grazer Adaptive Verkehrssteuerung gemeinsam mit dem adaptiven Steuerungsverfahren MOTION in VISSIM für die Ermittlung von Emissionen aus Verkehrssimulationen erprobt (HIRSCHMANN und FELLENDORF, 2009). Das Testgebiet erstreckte sich über eine Hauptverkehrsader mit zwölf LSA im Stadtgebiet von Graz. Ziel der Untersuchung war es, die adaptive Steuerung im Hinblick auf die Minimierung der Schadstoffemissionen zu optimieren.

Im Rahmen der Untersuchung wurde besonderer Wert auf das Beschleunigungsverhalten der Fahrer-Fahrzeugelemente in der Simulation gelegt, weil dieses den größten Einfluss auf den Schadstoffausstoß hat. VISSIM bildet das Beschleunigungsverhalten über die Wunschbeschleunigung und die technisch machbare Beschleunigung (maximale Beschleunigung) der Fahrer-Fahrzeugelemente als Funktionen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ab. Für das GAVE-Projekt wurden die Beschleunigungen von Messfahrzeugen von der technischen Universität Graz empirisch ermittelt. Dafür wurden zunächst an drei Tagen GPS-gestützte Messfahrten mit zwei Pkw im Untersuchungsgebiet durchgeführt und das Beschleunigungsverhalten aufgezeichnet. Ein Vergleich der aus den GPS-Messungen ermittelten Beschleunigungen und der in VISSIM voreingestellten Beschleunigungsfunktionen zeigte, dass die Standardeinstellungen von VISSIM das Beschleunigungsverhalten nicht realistisch wiedergeben. Im Rahmen der Untersuchung an der Technischen Universität Graz sind daher die empirisch ermittelten Beschleunigungen als Ausgangsdaten für Simulationen mit VISSIM aufbereitet worden. Diese Beschleunigungswerte können laut den Autoren auch auf andere innerstädtische Untersuchungsgebiete übertragen und für die Simulationen der Untersuchungsstrecken in diesem Projekt eingesetzt werden.

Aus den GPS-Messungen wurde in dem GAVE-Projekt auch das Gangwechselmodell für PHEM validiert. Damit ist sichergestellt, dass das in PHEM und VISSIM verwendete Fahrverhalten in dieser Untersuchung auf derselben Datengrundlage basiert. VISSIM bietet die Möglichkeit, die Trajektorien der simulierten Fahrzeuge detailliert aufzuzeichnen. In Fahrzeugprotokollen werden, wie in Bild 5-3 dargestellt, für jedes Fahrzeug die aktuelle Position, die eindeutige Fahrzeugnummer, der Fahrzeugtyp (100 = Pkw, 200 = Lkw, 300 = Bus) und die Geschwindigkeit für jeden Zeitschritt festgehalten.

Zusätzlich können die zugehörigen Streckendaten (Steigung, Streckennummer, Anfangs- und Endkoordinaten) ausgegeben werden.

Diese Daten bilden die Eingangsdaten aus dem Verkehrsmodell für die Emissionsermittlung mit PHEM. Als weitere Eingangsdaten werden die Daten der Flottenzusammensetzung und Temperaturdaten für Katalysatoren und Kühlwasser benötigt. Diese Daten werden von der Technischen Universität Graz für die Emissionsmodellierung zusammengestellt.

PHEM ermöglicht daraus eine detaillierte Ermittlung des Ausstoßes von Kohlenwasserstoff (HC), Stickstoffoxiden (NO_x), Feinstaubpartikel (PM), Kohlenmonoxid (CO) sowie des Kraftstoffverbrauchs (FC). Zusätzlich zu diesen Angaben werden Daten zur Beschreibung der verwendeten Fahrzeugflotte und verkehrliche Kenngrößen, wie die mittlere Geschwindigkeit und die durchschnittliche Fahrtzeit, ausgegeben. Die Berechnungen mit PHEM für diese Untersuchung werden am Institut für Straßen- und Verkehrswesen an der Technischen Universität Graz durchgeführt.

In der vorliegenden Untersuchung wird zur leichteren Vergleichbarkeit der Umweltwirkungen der verkehrsadaptiven Steuerungsverfahren gegenüber den konventionell verkehrsabhängigen Verfahren den Fahrzeugtypen Pkw, Lkw und Bus jeweils ein entsprechendes einheitliches durchschnittliches Fahrzeug in den PHEM-Berechnungen zugrunde gelegt.

Die Emissionen der simulierten Pkw entsprechen denen von Dieselfahrzeugen der Euro-4-Klasse.

Fahrzeugprotokoll							
Datei: ...							
Kennung: ...							
Datum: Dienstag, 8. September 2009 12:40:34							
VISSIM: 5.10-08 [18776j]							
t: Simulationszeit [s]							
WeltX: Weltkoordinate x (Fahrzeugvorderkante am Ende des Zeitschritts)							
WeltY: Weltkoordinate y (Fahrzeugvorderkante am Ende des Zeitschritts)							
FzNr: Nummer des Fahrzeugs							
v: Geschwindigkeit [km/h] am Ende des Zeitschritts							
Steig: Steigung [%] der aktuellen Strecke							
Typ: Nummer des Fahrzeugtyps							
Str: Nummer der aktuellen Strecke							
t:	WeltX:	WeltY:	FzNr:	v:	Steig:	Typ:	Str:
1800.0:	465.9317;	1051.2339;	1393;	0.00;	0.00;	100;	10009;
1800.0:	347.7361;	-99.5408;	1308;	37.73;	0.00;	300;	10056;
1800.0:	646.9442;	728.4108;	1308;	0.00;	2.50;	100;	10083;
1800.0:	651.2729;	765.5901;	1359;	19.72;	0.00;	100;	10106;
1800.0:	412.6974;	1061.5404;	1386;	0.00;	0.00;	200;	10112;
1800.0:	618.6774;	937.8595;	1421;	27.88;	0.00;	100;	10139;
1800.0:	499.1742;	936.7414;	1405;	32.06;	2.50;	100;	30002;
1800.0:	642.6139;	752.5276;	1324;	11.40;	-2.50;	100;	50003;
1800.0:	662.5140;	727.9933;	1371;	0.00;	0.00;	100;	50008;
1800.0:	659.6988;	734.2000;	1364;	0.00;	0.00;	100;	50008;

Bild 5-3: Beispiel eines Fahrzeugprotokolls aus einer VISSIM-Simulation

Zur Feststellung der Wirkungen der LSA-Steuerungen hinsichtlich der Partikelemissionen werden Fahrzeuge ohne Partikelfilter verwendet. Die Lkw in VISSIM werden in PHEM Schwerlastfahrzeugen der Euro-Klasse 3 mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis 26 t zugeordnet. Für die Fahrzeugtypen Bus werden Euro-4-Dieselfahrzeuge der Gewichtsklasse N1-III nach EG-Richtlinie 70/156/EWG verwendet.

Die Tabelle 5-1 zeigt die Bezeichnungen der verwendeten Fahrzeugarten in der mikroskopischen Simulation mit VISSIM (100 = Pkw, 200 = Lkw, 300 = Bus) und deren Zuordnung zu den Fahrzeugtypen für die PHEM-Berechnungen. Die in dieser Untersuchung durchgeführten PHEM-Berechnungen sind auf den Vergleich unterschiedlicher Steuerungsarten ausgelegt, d. h., die Absolutwerte eignen sich nicht für eine Übertragung auf die Realität.

Fahrzeugart	VISSIM	PHEM-Bezeichnung
Pkw	100	PC_EU4_D_MW.GEN
Lkw	200	SoloLkw_EU3_26t.GEN
Bus	300	LCV_EU4_D_III.GEN

Tab. 5-1: Flottenzusammensetzung und Bezeichnungen der Fahrzeugtypen für die PHEM-Berechnungen

Die Ergebnisse der PHEM-Berechnungen werden je Fahrzeug ausgegeben und in räumlich unterschiedlicher Aggregationsform aufbereitet. Neben Einzelfahrzeugdaten liefert die Berechnung auch Ergebnisse für einzelne Streckenabschnitte eines Streckenzuges und für ein gesamtes Untersuchungsgebiet. Nähere Informationen zu PHEM und den hier verwendeten Fahrzeugen können dem PHEM-Handbuch entnommen werden (EICHLSEDER et al., 2010).

6 Ergebnisse der empirischen Messungen

Ausgewertet werden die durchgeführten Messfahrten auf den vier untersuchten Streckenabschnitten anhand der Bewertungsparameter Fahrzeit, Wartezeit und Anzahl der Halte. Die Wartezeit ist dabei als Zeitdifferenz der tatsächlich benötigten Fahrzeit zur optimal erreichbaren Fahrzeit (bei Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) definiert. Ergänzend dazu werden sowohl das Koordinierungsmaß und die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten als auch die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs ermittelt.

Eine Übersicht über die Messzeiträume liefert Tabelle 6-1. Die Auswahl der gefahrenen Routen fand in enger Abstimmung mit den Städten Münster und

Gebiet	Steuerungsverfahren	Messung	Zeitraum
MS-AW	Grundzustand, verkehrsabhängig und festzeitgesteuert	Vorher	Mär 2006
MS-AW	Konventionell verkehrsabhängig mit neuer Optimierung	Nachher I	Jun 2008
MS-AW	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren MOTION	Nachher II	Jun 2008
MS-WS	Grundzustand, verkehrsabhängig und festzeitgesteuert	Vorher	Nov 2008
MS-WS	Konventionell verkehrsabhängig mit neuer Optimierung	Nachher I	Nov 2010
MS-WS	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren MOTION	Nachher II	Mai 2011
RS-BS	Konventionell verkehrsabhängig	Vorher	Okt 2008
RS-BS	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren BALANCE	Nachher	Mai 2009
RS-HS	Konventionell verkehrsabhängig	Vorher	Okt 2008
RS-HS	Verkehrsadaptive Steuerung nach dem Verfahren BALANCE	Nachher	Mai 2009
MS-AW	Münster – Albersloher Weg		
MS-WS	Münster – Weseler Str./Steinfurter Straße		
RS-BS	Remscheid – Bismarckstraße/Burger Straße		
RS-HS	Remscheid – Hastener Str./Eberhardstr.		

Tab. 6-1: Übersicht über die durchgeführten Messfahrten

Remscheid statt (siehe Anhang A). Das Hauptaugenmerk lag jedoch bei allen Straßenzügen auf der koordinierten Hauptrichtung, auf deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln besonders eingegangen wird. Auch bei der Wahl der Messzeiträume wurde in Abstimmung mit den Städten darauf geachtet, in den für die Auswertung relevanten Zeitbereichen zu messen. Bei allen Messungen waren die Verkehrsbelastungen vergleichbar. Ein Einfluss der Verkehrsstärken auf die Ergebnisse kann daher ausgeschlossen werden.

Die Messungen auf dem Albersloher Weg in Münster fanden in den Spitzenstunden (07:00-09:00 Uhr und 16:00-18:00 Uhr) statt. Auf der Weseler Straße in Münster wurden die Messfahrten in den Zeiträumen von 13:00 bis 15:00 Uhr und 16:00 bis 18:00 Uhr durchgeführt. Dabei haben jeweils zehn Fahrzeuge die vorgegebenen Routen befahren. In Remscheid wurden die zwei untersuchten Straßenzüge von jeweils fünf Fahrzeugen befahren. Die Messungen wurden in einem schwach belasteten Zeitraum (12:30-14:30 Uhr) und in einem stark belasteten Zeitraum (15:30-7:30 Uhr) durchgeführt.

Die in Tabelle 6-1 verwendeten Kurzbezeichnungen der Steuerungsverfahren (Vorher und Nachher bzw. Vorher, Nachher I und Nachher II) werden im Folgenden auch bei der Darstellung der Ergebnisse verwendet. Die abschnittsweise Auswertung getrennt nach Messzeiträumen und Fahrtrichtungen findet sich im Anhang B.

6.1 Stadt Münster – Albersloher Weg

Die Tabellen 6-2 bis 6-7 zeigen die Ergebnisse der Messfahrten auf dem Albersloher Weg in Münster. In den Tabellen 6-2 bis 6-4 sind als Bewertungsparameter das Koordinierungsmaß und die mittlere Fahrtgeschwindigkeit angegeben. Die Qualitätsstufen nach der mittleren Geschwindigkeit verbessern sich mit jeder Messung. Die Bewertung mit dem Koordinierungsmaß zeigt zunächst für die Fahrtrichtung Nord in beiden Messzeiträumen leichte Einbußen in der Nachher-I-Messungen gegenüber der Vorher-Messung. Diese konnten durch die adaptive Steuerung jedoch wieder ausgeglichen werden. Es zeigen sich zwar keine deutlichen Verbesserungen, insgesamt ergeben sich jedoch sowohl beim Koordinierungsmaß als auch bei den mittleren Fahrtgeschwindigkeiten unter dem modellbasierten Steuerungsverfahren jeweils höhere Werte.

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungs- maß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
07:00-09:00	77	C	31,9	B
16:00-18:00	79	C	33,2	B
Süd				
07:00-09:00	79	C	35,6	B
16:00-18:00	71	D	28,5	C

Tab. 6-2: Bewertungsparameter der Vorher-Messung für die Gesamtstrecke Albersloher Weg

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungs- maß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
07:00-09:00	74	D	31,2	B
16:00-18:00	75	C	34,6	B
Süd				
07:00-09:00	80	C	37,3	B
16:00-18:00	82	C	34,8	B

Tab. 6-3: Bewertungsparameter der Nachher-I-Messung für die Gesamtstrecke Albersloher Weg

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungs- maß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
07:00-09:00	84	C	37,5	B
16:00-18:00	84	C	41,2	A
Süd				
07:00-09:00	84	C	41,4	A
16:00-18:00	83	C	37,4	B

Tab. 6-4: Bewertungsparameter der Nachher-II-Messung für die Gesamtstrecke Albersloher Weg

Die Tabellen 6-5 bis 6-7 lassen die Unterschiede der einzelnen untersuchten Steuerungsverfahren erkennen. Dargestellt sind die verkehrlichen Kenngrößen Fahrtzeit und Anzahl der Halte und deren Differenzen als absoluter und relativer Wert.

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Vorher		Nachher I		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
07:00-09:00	11,23	6,34	11,53	8,06	0,30	2,7 %	1,72	27,1 %
16:00-18:00	10,69	5,46	10,33	6,41	-0,35	-3,3 %	0,95	17,4 %
Süd								
07:00-09:00	10,10	5,46	9,70	4,97	-0,40	-4,0 %	-0,48	-8,9 %
16:00-18:00	12,69	8,50	10,41	5,89	-2,28	-18,0 %	-2,61	-30,7 %

Tab. 6-5: Vergleich der Vorher- und Nachher-I-Messung für die Gesamtstrecke Albersloher Weg

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Nachher I		Nachher II		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
07:00-09:00	11,53	8,06	9,50	4,86	-2,02	-17,5 %	-3,20	-39,7 %
16:00-18:00	10,33	6,41	8,73	4,18	-1,60	-15,5 %	-2,22	-34,7 %
Süd								
07:00-09:00	9,70	4,97	8,72	4,36	-0,98	-10,1 %	-0,61	-12,3 %
16:00-18:00	10,41	5,89	9,66	4,73	-0,75	-7,2 %	-1,16	-19,7 %

Tab. 6-6: Vergleich der Nachher-I- und Nachher-II-Messung für die Gesamtstrecke Albersloher Weg

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Vorher		Nachher II		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
07:00-09:00	11,23	6,34	9,50	4,86	-1,72	-15,3 %	-1,48	-23,4 %
16:00-18:00	10,69	5,46	8,73	4,18	-1,95	-18,3 %	-1,28	-23,4 %
Süd								
07:00-09:00	10,10	5,46	8,72	4,36	-1,38	-13,7 %	-1,10	-20,1 %
16:00-18:00	12,69	8,50	9,66	4,73	-3,03	-23,9 %	-3,77	-44,3 %

Tab. 6-7: Vergleich der Vorher- und Nachher-II-Messung für die Gesamtstrecke Albersloher Weg

Vorher – Nachher I

In Tabelle 6-5 lassen sich Verschlechterungen durch die verkehrsabhängige Steuerung zur Festzeitsteuerung in Fahrtrichtung Nord (stadteinwärts) erkennen. Diese betragen in der Morgenspitze bei Betrachtung der Anzahl der Halte bis zu 27 %. In der entgegengesetzten Richtung (stadtauswärts) liegen in der Nachmittagspitze jedoch Verbesserungen von über 30 % bei den Halten vor. Die Änderungen der Fahrtzeiten sind nicht so deutlich. Hier ist neben leichten Verbesserungen und Verschlechterungen in Fahrtrichtung Süd (stadtauswärts) eine Verbesserung von 18 % zu erkennen.

Nachher I – Nachher II

Tabelle 6-6 zeigt ausschließlich Verbesserungen durch das modellbasierte Steuerungsverfahren im Vergleich zur verkehrsabhängigen Steuerung. Beobachtet werden können bis zu 40 % Verbesserung bei der Anzahl der Halte. Lediglich die Fahrtzeit in Fahrtrichtung Nord (stadteinwärts) in der Morgenspitze verschlechtert sich um 18 %.

Vorher – Nachher II

Wird die Veränderung von der Festzeitsteuerung zur modellbasierten Steuerung betrachtet, sind durchweg Verbesserungen zu verzeichnen. Tabelle 6-7 zeigt, dass mit MOTION die Fahrtzeit 14 % bis

24 % unter der mit Festzeitsteuerung liegt. Bei der Anzahl der Halte fallen die Verbesserungen mit 20 % bis 44 % noch höher aus.

Sowohl stadteinwärts als auch stadtauswärts sind die Ergebnisse bei Betrachtung der Gesamtstrecke positiv. Werden allerdings die einzelnen Streckenabschnitte betrachtet, so zeigt sich, dass auf einzelnen Abschnitten zum Teil deutliche Verschlechterungen vorliegen (siehe Anhang B). Diese werden erst im Laufe der Gesamtstrecke durch Verbesserungen an anderer Stelle ausgewogen oder überkompensiert. Zusammenfassend lässt sich für den Albersloher Weg feststellen: Gegenüber dem Vorherzeitraum ist sowohl Nachher I (konventionelle verkehrsabhängige Steuerung) als auch Nachher II (adaptive Steuerung, MOTION) als deutlich besser einzuschätzen. Zusätzlich ist Nachher II besser als Nachher I. Hier hat sich somit die adaptive Steuerung bewährt.

6.2 Stadt Münster – Weseler Straße

Dargestellt sind in den Tabelle 6-8 bis Tabelle 6-13 die Ergebnisse der Messfahrten auf der Weseler Straße in Münster. Als Bewertungsparameter der einzelnen Fahrten sind das Koordinierungsmaß und die mittlere Fahrtgeschwindigkeit angegeben. Im Messzeitraum von 13:00 bis 15:00 Uhr übersteigt das Koordinierungsmaß bei dem modellbasierten Steuerungsverfahren knapp die Grenze für die Qualitätsstufe C. Insgesamt verschlechtert sich das Koordinierungsmaß jedoch. Mit Ausnahme der Fahrtrichtung Nord im Zeitraum von 13:00 bis 15:00 Uhr verschlechtern sich auch die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten mit der modellbasierten Steuerung.

In den Tabellen 6-8 bis 6-10 sind die verkehrlichen Kenngrößen Fahrtzeit und Anzahl der Halte und deren Differenzen als absoluter und relativer Wert angegeben. Dadurch lassen sich die einzelnen Messfahrten miteinander vergleichen.

Vorher – Nachher I

Beim Vergleich der Festzeitsteuerung mit der verkehrsabhängigen Steuerung zeigen sich Unterschiede bei den beiden Fahrtrichtungen (Tabelle 6-11). In Richtung Norden verbessern sich sowohl Fahrtzeit als auch Anzahl der Halte, in Richtung Süden weisen beide Kriterien Verschlechterungen auf.

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungs- maß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
13:00-15:00	74	D	25,6	C
16:00-18:00	74	D	26,2	C
Süd				
13:00-15:00	80	C	33,7	B
16:00-18:00	73	D	27,9	C

Tab. 6-8: Bewertungsparameter der Vorher-Messung für die Gesamtstrecke Weseler Straße

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungs- maß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
13:00-15:00	74	D	28,8	C
16:00-18:00	73	D	28,1	C
Süd				
13:00-15:00	72	D	29,2	C
16:00-18:00	70	D	24,5	C

Tab. 6-9: Bewertungsparameter der Nachher-I-Messung für die Gesamtstrecke Weseler Straße

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungs- maß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
13:00-15:00	75	C	29,4	C
16:00-18:00	66	D	25,4	C
Süd				
13:00-15:00	75	C	30,3	B
16:00-18:00	66	D	21,3	D

Tab. 6-10: Bewertungsparameter der Nachher-II-Messung für die Gesamtstrecke Weseler Straße

Nachher I – Nachher II

Die Ergebnisse der Messung mit verkehrsabhängiger Steuerung im Vergleich zu denen unter der modellbasierten Steuerung zeigen Unterschiede in den beiden Messzeiträumen. In Tabelle 6-12 lassen

Fahrrichtung/ Zeitraum	Vorher		Nachher I		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
13:00-15:00	13,77	9,88	12,29	8,50	-1,48	-10,7 %	-1,38	-13,9 %
16:00-18:00	13,43	9,13	12,58	7,80	-0,85	-6,4 %	-1,33	-14,5 %
Süd								
13:00-15:00	10,10	6,67	12,08	7,30	1,99	19,7 %	0,63	9,5 %
16:00-18:00	12,78	8,67	14,40	9,33	1,62	12,7 %	0,67	7,7 %

Tab. 6-11: Vergleich der Vorher- und Nachher-I-Messung für die Gesamtstrecke Weseler Straße

Fahrrichtung/ Zeitraum	Nachher I		Nachher II		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
13:00-15:00	12,29	8,50	11,89	7,63	-0,40	-3,2 %	-0,88	-10,3 %
16:00-18:00	12,58	7,80	13,91	12,25	1,33	10,6 %	4,45	57,1 %
Süd								
13:00-15:00	12,08	7,30	8,72	6,50	-3,36	-27,8 %	-0,80	-11,0 %
16:00-18:00	14,40	9,33	15,99	14,00	1,59	11,0 %	4,67	50,0 %

Tab. 6-12: Vergleich der Nachher-I- und Nachher-II-Messung für die Gesamtstrecke Weseler Straße

Fahrrichtung/ Zeitraum	Vorher		Nachher II		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
13:00-15:00	13,77	9,88	11,89	7,63	-1,88	-13,6 %	-2,25	-22,8 %
16:00-18:00	13,43	9,13	13,91	12,25	0,48	3,6 %	3,13	34,3 %
Süd								
13:00-15:00	10,10	6,67	8,72	6,50	-1,38	-13,6 %	-0,17	-2,5 %
16:00-18:00	12,78	8,67	15,99	14,00	3,21	25,1 %	5,33	61,5 %

Tab. 6-13: Vergleich der Vorher- und Nachher-II-Messung für die Gesamtstrecke Weseler Straße

sich im Messzeitraum von 13:00 bis 15:00 Uhr Verbesserungen sowohl bei der Fahrtzeit als auch bei der Anzahl der Halte erkennen. Im darauffolgenden Messzeitraum von 16:00 bis 18:00 Uhr werden die Werte deutlich schlechter. Die Anzahl der Halte steigt bei höherer Verkehrsbelastung beträchtlich um 57 % in Richtung Norden und um 50 % in Richtung Süden.

Vorher – Nachher II

Vom Messzeitraum abhängige Ergebnisse zeigt auch in Tabelle 6-13 der Vergleich zwischen Festzeitsteuerung und modellbasierter Steuerung. Während sich die Anzahl der Halte im schwächer

belasteten Zeitraum von 13:00 bis 15:00 Uhr in Richtung Nord um 23 % verbessert, wird der Wert in Richtung Süd im Zeitraum von 16:00 bis 18:00 Uhr um beträchtliche 62 % schlechter. Die guten verkehrstechnischen Erfolge auf dem Albersloher Weg konnten auf der Weseler Straße nicht wiederholt werden.

Die konventionelle verkehrsabhängige Steuerung bewirkte teilweise geringe Verbesserungen, zum Teil aber auch ebensolche Verschlechterungen. Mit der Erneuerung der verkehrsabhängigen Steuerung vor der Nachher-I-Messung wurden an 17 der 33 LSA im Untersuchungsgebiet auch Verkehrssicherheitsmaßnahmen (getrennte Linksabbiegersignalisierungen, grundsätzlich Simultanschaltung an

Fußgängerfurten mit Mittelinseln, längere Fußgängergrünzeiten, einheitliche Radverkehrssignalisierung, Einrichtungen für mobilitätseingeschränkte Mitbürger und eine zusätzliche Fußgänger-/Radfahrerfurt) umgesetzt, die Leistungsfähigkeitseinbußen erwarten ließen. Die Stadt Münster sieht es daher schon als Erfolg an, dass trotz dieser Verkehrssicherheitsmaßnahmen das Qualitätsniveau der Vorher-Messung gehalten werden konnte. Die adaptive Steuerung hat in der Starklastperiode am Nachmittag erhebliche Verschlechterungen der Verkehrsqualität bewirkt. Im Schwachlastzeitraum von 13:00 bis 15:00 Uhr traten jeweils geringfügige Verbesserungen auf.

6.3 Stadt Remscheid – Bismarckstraße

In Tabelle 6-14 und Tabelle 6-15 sind für die Messfahrten auf dem Straßenzug Bismarckstraße in Remscheid das Koordinierungsmaß und die mittleren Fahrtgeschwindigkeiten aufgezeigt. Nennenswerte Veränderungen ergaben sich nur in Fahrtrichtung Nord. Im Vergleich der Vorher- und der Nachher-Messung belegen beide Qualitätskriterien eine Verschlechterung der Koordinierung. So sinkt mit der adaptiven Steuerung das Koordinierungsmaß im Zeitraum von 12:30 bis 14:30 Uhr um zwei Qualitätsstufen von C auf E und im Zeitraum von 15:30 bis 17:30 Uhr von D auf E.

Die Unterschiede der einzelnen untersuchten Steuerungsverfahren lassen sich in Tabelle 6-16 erkennen. Dabei sind die verkehrlichen Kenngrößen Fahrtzeit und Anzahl der Halte und deren Differenzen als absoluter und relativer Wert aufgeführt. Hier werden große Unterschiede zwischen den beiden Fahrtrichtungen deutlich. In Fahrtrichtung Süd (stadtauswärts) verbessern sich die Werte. In

Fahrtrichtung Nord (stadteinwärts) jedoch sind bei der Anzahl der Halte Verschlechterungen von bis zu 49 % erkennbar. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die adaptive Steuerung in Fahrtrichtung Nord zu deutlichen Verschlechterungen der Verkehrsqualität geführt hat. In Fahrtrichtung Süd sind geringere Verbesserungen eingetreten.

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungsmaß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
12:30-14:30	76	C	27,0	C
15:30-17:30	66	D	23,2	D
Süd				
12:30-14:30	77	C	29,9	C
15:30-17:30	75	C	28,0	C

Tab. 6-14: Bewertungsparameter der Vorher-Messung für die Gesamtstrecke Bismarckstraße

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungsmaß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
12:30-14:30	64	E	23,3	D
15:30-17:30	53	E	21,2	D
Süd				
12:30-14:30	77	C	29,7	C
15:30-17:30	74	D	28,5	C

Tab. 6-15: Bewertungsparameter der Nachher-Messung für die Gesamtstrecke Bismarckstraße

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Vorher		Nachher		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
12:30-14:30	3,53	2,37	4,03	3,54	0,50	14,2%	1,17	49,3%
15:30-17:30	4,10	3,34	4,46	4,59	0,36	8,7%	1,25	37,3%
Süd								
12:30-14:30	3,12	1,90	3,14	1,76	0,01	0,4%	-0,14	-7,5%
15:30-17:30	3,33	2,77	3,27	1,94	-0,06	-1,7%	-0,82	-29,8%

Tab. 6-16: Vergleich der Vorher- und Nachher-Messung für die Gesamtstrecke Bismarckstraße

6.4 Stadt Remscheid – Hastener Straße

Für die Messfahrten auf der Hastener Straße in Remscheid sind die Bewertungsparameter Koordinierungsmaß und mittlere Fahrtgeschwindigkeit mit der jeweiligen Einteilung in Qualitätsstufen in Tabelle 6-17 und Tabelle 6-18 dargestellt. Anhand des

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungsmaß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
12:30-14:30	54	E	25,3	C
15:30-17:30	45	F	18,5	E
Süd				
12:30-14:30	60	E	24,2	D
15:30-17:30	45	F	19,4	E

Tab. 6-17: Bewertungsparameter der Vorher-Messung für die Gesamtstrecke Hastener Straße

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Koordinierungsmaß		Mittlere Fahrtgeschw.	
	k_i [%]	QSV	v_R [km/h]	QSV
Nord				
12:30-14:30	47	F	21,6	D
15:30-17:30	45	F	20,7	D
Süd				
12:30-14:30	58	E	24,2	D
15:30-17:30	51	E	20,4	D

Tab. 6-18: Bewertungsparameter der Nachher-Messung für die Gesamtstrecke Hastener Straße

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Vorher		Nachher		Differenz Fahrtzeit		Differenz Halte	
	Fahrtzeit	Halte	Fahrtzeit	Halte	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Nord								
12:30-14:30	5,22	2,98	6,11	3,74	0,89	17,0 %	0,77	25,8 %
15:30-17:30	7,12	4,41	6,38	3,64	-0,74	-10,4 %	-0,77	-17,5 %
Süd								
12:30-14:30	5,36	3,24	5,34	2,74	-0,02	-0,5 %	-0,50	-15,4 %
15:30-17:30	6,72	5,28	6,32	4,25	-0,40	-5,9 %	-1,03	-19,5 %

Tab. 6-19: Vergleich der Vorher- und Nachher-Messung für die Gesamtstrecke Hastener Straße

Koordinierungsmaßes wird deutlich, dass die Koordinierung sowohl bei der Messung mit verkehrsabhängiger Steuerung als auch unter der modellbasierten Steuerung auf diesem Straßenzug unwirksam ist. Die Veränderungen der Fahrtgeschwindigkeit zwischen den beiden untersuchten Steuerungen zeigen keinen eindeutigen Trend. Sie sind teilweise positiv, teilweise negativ.

Die Tabelle 6-19 zeigt den Vergleich der verkehrstechnischen Kenngrößen beider Messfahrten. In Richtung Süd (stadteinwärts) treten sowohl im schwächer belasteten Zeitraum von 12:30 bis 14:30 Uhr als auch im stärker belasteten Zeitraum von 15:30 bis 17:30 Uhr Verbesserungen auf. Diese liegen bei der Fahrtzeit bei knapp 6 %, bei der Anzahl der Halte bei knapp 20 %. In Fahrtrichtung Nord (stadtauswärts) zeigen sich von 15:30 bis 17:30 Uhr bei der Anzahl der Halte Verbesserungen von 18 %, von 12:30 bis 14:30 Uhr verschlechtert sich dieser Wert jedoch um 26 %.

Auf der Hastener Straße hat die adaptive Steuerung überwiegend zu einer begrenzten Verbesserung der Verkehrsqualität geführt. Allerdings sind zur Mittagszeit in Fahrtrichtung Nord auch merkliche Verschlechterungen festgestellt worden.

7 Simulationsstudien

7.1 Methodik

Die Wirkungen adaptiver Steuerungssysteme werden anhand der mikroskopischen Verkehrsfluss-simulation mit dem Simulationsprogramm VISSIM (Version 5.10-12) der Firma PTV AG analysiert. Dazu wurden zwei der vier empirisch untersuchten Streckenzüge nachgebildet. Die Ergebnisse der Simulationen mit konventionell verkehrsabhängiger

Szenario	LSA-Steuerung	Zeitraum	Verkehrliche Wirkungen	Umweltwirkungen
Ohne-Fall	Konventionell verkehrabhängig	Morgenspitze 07:00-09:00 Uhr	•	-
		Abendspitze 16:00-18:00 Uhr	•	•
Mit-Fall	MOTION	Morgenspitze 07:00-09:00 Uhr	•	-
		Abendspitze 16:00-18:00 Uhr	•	•

Tab. 7-1: Szenarien für die Simulationsuntersuchungen des Albersloher Wegs

Szenario	LSA-Steuerung	Zeitraum	Verkehrliche Wirkungen	Umweltwirkungen
Ohne-Fall	Konventionell verkehrabhängig	Mittags 12:30-14:30 Uhr	•	-
		Abendspitze 15:30-17:30 Uhr	•	•
Mit-Fall	BALANCE	Mittags 12:30-14:30 Uhr	•	-
		Abendspitze 15:30-17:30 Uhr	•	•

Tab. 7-2: Szenarien für die Simulationsuntersuchungen der Bismarckstraße

(Ohne-Fall) und adaptiver LSA-Steuerung (Mit-Fall) werden gegenübergestellt.

Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 geben einen Überblick über die untersuchten Szenarien. Die Grundlage der Zusammenstellung der Szenarien bilden die Zeiträume, die für die empirischen Analysen ausgewählt wurden. Für den Albersloher Weg sind dies die Verkehrszustände der Morgen- und Abendspitze, für die Bismarckstraße die Verkehrszustände der Mittagsperiode und der Abendspitze.

Die beiden Steuerungsalternativen wurden zunächst in allen Zeiträumen analog zu den empirischen Erhebungen hinsichtlich ihrer verkehrlichen Wirkungen analysiert. Dazu dient der Performance-Index nach Gleichung 4-3 und 4-4. Diese skalare Größe kombiniert die Kenngrößen Verlustzeit und Anzahl der Halte miteinander. Der Vergleich erfolgt zum einen für das Gesamtnetz unter Berücksichtigung aller Zufahrten der Knotenpunkte. Zum anderen wurden die Wirkungen auf die koordinierten Hauptrichtungen untersucht. Zusätzlich zum Performance-Index wurden für diese Betrachtungsweise auch die Koordinierungsmaße nach HBS zur Bewertung der Qualität der Steuerungsalternativen ermittelt.

Aufbauend auf den Simulationsergebnissen wurde die Berechnung der Umweltwirkungen der LSA-Steuerungsverfahren mit dem Emissionsmodell PHEM geschätzt.

Die Berechnung der Umweltwirkungen aus den simulierten kinematischen Größen bietet die notwendige Genauigkeit für die Feststellung der Unterschiede der Steuerungsalternativen. In Verbindung mit der Mikrosimulation bietet das Verfahren den zusätzlichen Vorteil, dass die Steuerungsverfahren ohne witterungsbedingte oder andere äußere Störeinflüsse miteinander verglichen werden können. Dafür wurden für jedes Simulationsnetz die Zeiträume mit der höheren Belastung ausgewählt.

Zur Feststellung der Abhängigkeiten zwischen den verkehrlichen Größen und den Umweltwirkungen wurden weitere verkehrlich relevante Kenngrößen ermittelt.

7.2 Modellaufbau

7.2.1 Stadt Münster – Albersloher Weg

Das Simulationsmodell des Albersloher Wegs wurde im Auftrag der Stadt Münster von der Firma

Siemens AG im Zuge der Umstellung der LSA-Steuerungen des Streckenzugs von einer Festzeitsteuerung zur modellbasierten Netzsteuerung mit MOTION erstellt. Für die vorliegende Untersuchung wurde dem Auftragnehmer eine Rohversion des Simulationsmodells von Seiten der Stadt Münster zur Verfügung gestellt. Die für die Simulation benötigten Steuerungskomponenten wurden von der Firma Siemens AG erstellt.

Simulationsdauer

Die Dauer eines Simulationslaufs beträgt insgesamt sieben Stunden. Davon entfallen jeweils zwei Stunden auf die Simulation der Verkehrszustände während der Morgen- und Abendspitze. Eine Stunde wird als Vorlaufzeit verwendet. In den Stunden zwei und drei eines Simulationslaufs werden die Verkehrszustände des Morgenspitzenzeitraums von 07:00 bis 09:00 Uhr nachgebildet. Die Stunden fünf und sechs repräsentieren die Verkehrszustände während des Zeitraums der Abendspitze von 16:00 bis 18:00 Uhr (vgl. Kapitel 6). Eine Stunde liegt zwischen den Spitzenverkehrszeiten und eine Stunde dient als Nachlauf nach der Abendspitze. Die Vorlauf-, Zwischen- und Nachlaufzeit werden nicht in die Auswertung aufgenommen.

Netzstruktur

Als Grundlage für die Nachbildung der Knotenpunktbereiche sowie der Verläufe der Streckenabschnitte diente ein Lageplan des Straßenzugs mit Detailinformationen zur Versorgung der LSA-Steuerungen. Das Simulationsmodell gibt den heutigen Ausbauzustand des Straßenzugs nach der Umbauphase wieder.

Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsbelastungen und Abbiegebeziehungen an den einzelnen Knotenpunkten für die Simulation sind Detektorprotokollen entnommen. Die Protokolle wurden während der Zeiträume der empirischen Messungen auf dem Straßenzug mitgeschrieben und durch die Firma Siemens AG aufbereitet und für jeden Knotenpunkt in der Simulation hinterlegt. Die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte des motorisierten Individualverkehrs (IV) war ebenso wie der öffentliche Personennahverkehr (ÖV), die Radverkehrsteilnehmer und der Fußgängerverkehr bereits im Simulationsmodell entsprechend den Vorgaben der Stadt Münster enthalten. Alle Verkehrs-

belastungen und Abbiegebeziehungen wurden in Stundenintervallen mit jeweils konstanter Verkehrsstärke eingegeben. Dadurch sind die zeitlichen Belastungsschwankungen, auf die die MOTION-Steuerung während der Simulation reagieren muss, auf ein Mindestmaß reduziert. Diese Abweichung von der Realität ist bei der Betrachtung der Ergebnisse aus der Simulation zu beachten. Die im Simulationsmodell der Siemens AG voreingestellten Abbiegebeziehungen ermöglichten keine realistische Nachbildung des strategischen und taktischen Fahrverhaltens auf dem Streckenzug. Daher wurden zunächst alle Routenentscheidungen im Netz entsprechend positioniert.

LSA-Steuerung

Für die Simulation der lokalen Knotenpunktsteuerungen werden die vollständigen in der Realität eingesetzten Versorgungen der Steuergeräte übernommen. Die Programmkomponenten des städtischen Verkehrsrechners der Stadt Münster wurden von der Firma Siemens AG für das Zusammenspiel mit der Verkehrsflusssimulation angepasst. Die Optimierungsberechnungen erfolgen durch die zentrale SITRAFFIC-MOTION-Komponente. Die für die Optimierung benötigten Verkehrsdaten aus der mikroskopischen Simulation werden in der zentralen Steuerungseinheit SITRAFFIC-CONCERT vorgehalten. Die Schnittstelle für die Übergabe der Simulationsdaten aus VISSIM und den genannten zentralen Komponenten SITRAFFIC-MOTION und SITRAFFIC-CONCERT erfolgt durch die für die Mikrosimulation entwickelte Komponente CvSim. Darüber erfolgt auch die Bedienung der simulierten Steuergeräte. Die Komponente ermöglicht auch die Umschaltung zwischen unterschiedlichen Rahmen-signalplänen während der Simulation.

Im Gegensatz zur Realität kann die Simulation der modellbasierten Steuerung allerdings nur in Verbindung mit den Versorgungen der neuesten Generation von Siemens-Steuergeräten SITRAFFIC C900V durchgeführt werden. In der Realität entsprechen nicht alle Steuergeräte der LSA auf dem Albersloher Weg diesem Standard bzw. stammen von anderen Herstellern. Die Erstellung der Versorgung der nicht kompatiblen Geräte wurde von der Firma Siemens AG vorgenommen und dem Auftragnehmer zur Verfügung gestellt. Voraussetzung für die korrekte Umsetzung der LSA-Steuerung ist die exakte Positionierung der Detektoren und Haltlinien im Simulationsmodell anhand der Lagepläne.

7.2.2 Stadt Remscheid – Bismarckstraße

Das Simulationsmodell des Straßenzugs Bismarckstraße/Burgerstraße in Remscheid wurde vom Auftragnehmer erstellt. Die dafür benötigten Unterlagen wie Signallagepläne und Haltlinienabstände zwischen den Signalgruppen der koordinierten Hauptrichtungen wurden von der Firma GEVAS Software GmbH und der Stadt Remscheid zur Verfügung gestellt.

Simulationsdauer

Die Dauer der simulierten Verkehrszustände orientiert sich wie für die Simulation des Albersloher Wegs an den Zeiträumen der empirischen Erhebungen. In den Stunden zwei und drei eines Simulationslaufs werden die Verkehrszustände des Zeitraums von 12:30 bis 14:30 Uhr nachgebildet. Die Stunden fünf und sechs repräsentieren die Verkehrszustände während des Zeitraums der Abendspitze von 15:30 bis 17:30 Uhr (vgl. Kapitel 6). Die Vor- und Nachlaufzeiten wurden auf eine Stunde festgelegt. Zwischen den beiden Auswertezuständen liegt eine Stunde. Damit ergibt sich analog zur Simulation des Albersloher Wegs eine Simulationsdauer von insgesamt sieben Stunden je Simulationslauf.

Netzstruktur

Die Grundlage für die Erstellung des Straßennetzes bilden die Signallagepläne der Knotenpunkte. Die von der Stadt Remscheid zur Verfügung gestellten Pläne wurden als Hintergrundbilder in VISSIM geladen. Dadurch können die Knotenpunktbereiche detailgenau nachgebildet werden. Die größte Bedeutung für eine realistische Wiedergabe des Steuerungsverhaltens in der Simulation hat die exakte Positionierung der Haltlinien und Detektoren des IV sowie der Meldepunkte des ÖV im Netz. Anhand von Luftbildern des gesamten Straßenzugs wurden im Anschluss die Modelle der Einzelknotenpunkte zu einem Simulationsmodell zusammengefügt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Haltlinienabstände zwischen den Knotenpunkten der koordinierten Hauptrichtungen der Realität entsprechen. Des Weiteren ist der Höhenverlauf über die gesamte Untersuchungsstrecke bei der Modellerstellung berücksichtigt worden. Die nicht signalisierten Knotenpunkte im Streckenverlauf sind aufgrund fehlender Vorgaben hinsichtlich der Belastungen nicht nachgebildet worden. Gesonder-

te Erhebungen der Belastungen an diesen Knotenpunkten wurden im Rahmen dieser Untersuchung nicht durchgeführt. Gleiches gilt für den Parksuch- und Lieferverkehr im Untersuchungsraum.

Verkehrsnachfrage

Für die Ermittlung der Verkehrsbelastungen liegen die Detektorprotokolle für die Zeiträume während der empirischen Messungen vor. Die Protokolle enthalten die Messwerte aller Detektoren in 5-Minuten-Intervallen. Für die Eingabe in VISSIM werden die Daten zunächst in die Einheit Fahrzeuge pro Stunde umgerechnet und zu 15-Minuten-Intervallen aggregiert. Um stochastische Schwankungen bei der Erzeugung der Fahrzeuge zu vermeiden und genau die benötigte Anzahl an Fahrzeugen in den Intervallen zu erzeugen, sind die Belastungen in VISSIM als exakte Belastungswerte hinterlegt. Dadurch werden gleichbleibende Bedingungen hinsichtlich der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge in den Intervallen für die Durchführung von Simulationsläufen mit verschiedenen Startzufallszahlen erreicht. Für die Ermittlung der Intervallbelastungen sind hauptsächlich die haltlinienfernen Detektoren verwendet worden, welche in der Regel in einem Abstand von 30 m zu den Haltlinien angeordnet sind. War dies aufgrund von fehlerhaften Werten nicht möglich, sind diese Werte durch die Werte haltliniennaher Detektoren ersetzt worden. Gänzlich fehlende Protokolle wurden durch die zeitlich entsprechenden Protokolle des anderen Mess-tags ersetzt.

Die Abbiegeraten an den Knotenpunkten sind anteilig zum Gesamtverkehr in 15-Minuten-Intervallen hinterlegt. Für jene Detektoren, die mehrere Ströme messen (Mischfahrstreifen), sind die Abbiegeraten anhand der Quelle/Ziel-Matrizen des makroskopischen Verkehrsnachfragemodells von BALANCE ermittelt worden. Durch die Verwendung von Belastungsdaten in 15-Minuten-Intervallen wird zusätzlich zu den stochastischen Schwankungen der Mikrosimulation bei der Fahrzeugerzeugung innerhalb der 15-Minuten-Intervalle eine Veränderung der stündlichen Verkehrsstärken erzeugt, die denen einer realistischen Ganglinie nahekommen. Die Aggregation der Belastungen ergibt eine Glättung der durch die Signalisierung implizierten Belastungsspitzen in den protokollierten 5-Minuten-Intervallen. Trotzdem werden Änderungen der Verkehrsbelastungen hervorgerufen, die im Hinblick auf die Untersuchung modellbasierter Steuerungs-

verfahren entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben, da diese Steuerungsverfahren für die Reaktion auf veränderte Belastungssituationen konzipiert wurden.

In diesem Simulationsmodell wurden für die Vor- und Nachlaufzeiten, die aus den Detektorprotokollen vorliegenden Verkehrsbelastungen gewählt. Damit entsteht auch in den Zeiträumen, die in der Auswertung nicht betrachtet werden, ein realitätsnaher Verkehrsablauf in der Simulation.

Öffentlicher Nahverkehr

Die Buspriorisierung in Remscheid erfolgt über die lokalen Knotenpunktsteuerungen. Neben dem motorisierten Individualverkehr sind deshalb auch die Buslinien im Modell nachgebildet. Dafür sind in VISSIM die Linienwege, die Haltestellen und die Meldepunkte sowie die Fahrplandaten aller Buslinien hinterlegt, welche den Streckenzug ganz oder nur teilweise befahren. Um eine fahrplantreue Ankunft der Busse an den Haltestellen im Verlauf des Straßenzugs zu gewährleisten und somit auch die Anforderungen an die LSA zeitlich realistisch nachzubilden, sind am Beginn der Zufahrtsstrecken der ÖV-Linien so genannte Dummy-Haltestellen angeordnet. Die Einsetzsekunde der Fahrzeuge der einzelnen ÖV-Linien in der Simulation ergibt sich aus der Differenz der Ankunftszeit an der ersten Haltestelle und der Fahrzeit bis zu dieser (PTV, 2008).

LSA-Steuerung

Die lokalen Steuerungen der Lichtsignalanlagen der Untersuchungsstrecke erfolgt in der Simulation durch die externe Ausführung der TRENDS-Kerne der Steuergeräte der Einzelknotenpunkte. Die Versorgung der Steuergeräte stammt von der Firma *gevas humberg & partner*. Die Logiken der Signalprogramme jeder LSA werden über die dynamische Bibliothek *TKController.dll* aufgerufen, die Detektordaten sekundlich aus der Simulation abgefragt und an die Logiken übergeben. In umgekehrter Richtung werden die Signalzustände durch die *TKController.dll* sekundlich aus den TRENDS-Kernen abgefragt, an die mikroskopische Simulation übergeben und dort entsprechend angezeigt. Dafür werden die vollständig versorgten TRENDS-Steuerungsdateien aller simulierten LSA benötigt.

Die Simulation der BALANCE-Steuerung erfolgt über die *TakK_BAL.dll*-Bibliothek. Über die *TKController.dll* wird der Optimierungsprozess in

5-Minuten-Abständen gestartet. Die dafür benötigten Verkehrsdaten werden in der *TKController.dll* aggregiert und minütlich der BALANCE-Steuerung übergeben. Die optimierten Rahmensignalpläne werden in Form der ermittelten T-Zeiten direkt aus *TakK_BAL.dll* an die TRENDS-Kerne der lokalen Steuerungen übergeben. Die TRENDS-Kerne der einzelnen Steuergeräte können über *.vap*-Dateien gesteuert werden. Damit besteht die Möglichkeit, tageszeitabhängig zwischen unterschiedlichen Rahmensignalplänen umzuschalten. Über die *.vap*-Datei der Masteranlage im Steuerungsbereich lassen sich auch netzweite Einstellungen wie Optimierungsintervalle oder -algorithmus der BALANCE-Steuerung vornehmen. Voraussetzung für die korrekte Funktionsweise der BALANCE-Steuerung ist auch hier eine vollständige Netzversorgung über die *Balance.ini*-Datei. Die signalgruppenfeinen Parameter der BALANCE-Zielfunktion werden für jeden Knotenpunkt in einer *.bpa*-Datei hinterlegt. In diesen Dateien werden auch die zulässigen Phasenfolgen und die zeitlichen Grenzen für die Eingriffsmöglichkeiten von BALANCE an den einzelnen Knotenpunkten definiert.

Die Schnittstelle zwischen VISSIM und BALANCE für die adaptive Steuerung der LSA dieses Simulationsnetzes wurde von Seiten der Firma *GEVAS software GmbH* programmiert. Die Programmierung der Schnittstelle durch die Firma *GEVAS software GmbH* bedurfte im Laufe der Projektbearbeitung mehrfacher Nachbesserungsarbeiten. In der ersten Schnittstellenversion wurden die von BALANCE optimierten Signalplandaten bei der Übermittlung aus der *TakK_BAL.dll* zum TRENDS-Kern von Zehntel-Sekunden in Sekunden umgerechnet. Bei der darauffolgenden Übertragung der Signalbilder aus dem TRENDS-Kern zu VISSIM wurde dieser Umrechnungsschritt fälschlicherweise nochmals durchgeführt. Aufgrund des Fehlers wurden die von BALANCE errechneten Rahmensignalpläne in VISSIM falsch angezeigt. Die Programmierung der Schnittstelle erforderte zudem eine komplette Überarbeitung der BALANCE-Parameter gegenüber den realen lokalen Steuerungen. Die Parameter geben u. a. die zeitlichen Grenzen vor, innerhalb derer BALANCE Veränderungen in den Signalprogrammen vornehmen kann. Bei der Optimierung mit BALANCE werden die Zeitpunkte für den frühesten Beginn bzw. das späteste Ende der Phasenwechsel in den Signalprogrammen neu bestimmt. Anhand der zeitlichen Grenzen wird sichergestellt, dass die Veränderungen keine schwer-

wiegenden Konflikte innerhalb der Signalprogramme, wie z. B. Zwischenzeitverletzungen o. Ä., zur Folge haben. Daher können die Parameter nur mit Kenntnis der Logik von Seiten der Hersteller des jeweiligen Signalprogramms eingestellt werden.

Die Simulationen zeigten zusätzlich einen fehlerhaften Logikaufbau in der LSA-Steuerung des Knotenpunkts 0221. Der Fehler hatte zur Folge, dass die Schaltung bei bestimmten Phasenfolgen den nächsten Phasenübergang nicht einleiten konnte und in dem angezeigten Schaltbild hängen blieb. Nach der Beseitigung des Fehlers von Seiten der Firma *gevas humberg & partner* konnten die Simulationsuntersuchungen ordnungsgemäß durchgeführt werden.

7.3 Kalibrierung und Validierung

7.3.1 Vorgehensweise

Voraussetzung für die Ableitung von Kenngrößen aus der Simulation sind valide Simulationsmodelle der untersuchten Streckenzüge. Die Kalibrierung und Validierung der Modelle wurden nach den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (FGSV, 2006) durchgeführt. Beiden Schritten zur Überprüfung der Güte der Modelleinstellungen liegt die Simulation mit regelbasierter LSA-Steuerung zugrunde.

Aus den empirischen Messungen liegen Datensätze mit Ergebnissen und Verkehrszuständen von zwei unabhängigen Zeiträumen mit regelbasierter Steuerung vor. Die Datensätze unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich des Verkehrsaufkommens während der Messungen, sondern weisen auch steuerungstechnische Unterschiede auf, wie Umlaufzeit der Signalprogramme oder Auslegung der Koordinierung. Die aus den Datensätzen zur Verfügung stehenden richtungsbezogenen Kenngrößen sind die Fahrzeiten, die Anzahl der Halte und die mittleren Geschwindigkeiten auf den Streckenzügen. Um die Werte aus der Simulation mit denen der empirischen Messungen vergleichbar zu machen, wurden in VISSIM Fahrzeugklassen definiert, die die Untersuchungsstrecken durchgängig befahren. Allen ermittelten Kenngrößen liegen jeweils zehn Simulationsläufe mit unterschiedlicher Startzufallszahl zugrunde. Die Mittelwerte aus den zehn Simulationsläufen werden durch einen t-Test auf eine signifikante Abweichung gegenüber den empirisch

ermittelten Mittelwerten überprüft. Die Tests für die Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle werden mit einem Konfidenzniveau von 99 % durchgeführt. Die Standardabweichungen der Kenngrößen werden anhand des F-Tests für normalverteilte Grundgesamtheiten der Stichproben miteinander verglichen und auf signifikante Abweichungen getestet. Die aufgezeichneten Detektorprotokolle liefern die Verkehrsstärken an den Messtagen als zusätzliche Kenngröße für die Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle. Die Überprüfung der Übereinstimmung der Verkehrsstärken aus Simulation und Realität erfolgt über den GEH-Wert (UK Highway Agency, 1996). Der GEH-Wert ergibt sich aus Gleichung (7-1).

$$\text{GEH} = \sqrt{\frac{2 \cdot (E - V)^2}{E + V}} \quad (7-1)$$

mit

GEH = Vergleichswert [-]

E = simulierte Verkehrsstärke [Kfz/h]

V = empirisch ermittelte Verkehrsstärke [Kfz/h]

Anhand dieses Werts ist es möglich, die Abweichungen innerhalb von Intervallen zwischen Simulation und Realität in Bereichen niedriger Verkehrsstärken und in Bereichen hoher Verkehrsstärken gleichermaßen zu beurteilen und in einem Fehlermaß zusammenzufassen. Für die vorliegende Untersuchung werden die Verkehrsstärken zu 5-Minuten-Intervallen aggregiert. Für jedes Intervall und jeden Detektor wird ein GEH-Wert bestimmt. Ein GEH-Wert kleiner 5 zeigt eine gute Übereinstimmung der Vergleichsgrößen. Liegt der GEH-Wert für 85 % aller betrachteten Intervalle unter dem Wert 5, ist das Simulationsmodell ausreichend kalibriert bzw. validiert.

7.3.2 Stadt Münster – Albersloher Weg

Als Kalibrierungs- bzw. Validierungszeitraum wurden die Morgenspitze von 07:00 bis 09:00 Uhr und die Abendspitze von 16:00 bis 18:00 Uhr gewählt. Die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung sind in Tabelle 7-3 und Tabelle 7-4 aufgeführt. Bei Betrachtung der einzelnen Streckenabschnitte zeigte sich, dass der einstreifige Abschnitt am südlichen Ende des Straßenzugs ab dem Knotenpunkt 8130 (vgl. Bild 3-1) maßgeblich ist für die Abweichung zwischen simulierten und empirischen Daten. Diese Feststellung trifft insbesondere auf

Albersloher Weg (Morgenspitze)	Fahrtrichtung Süd			Fahrtrichtung Nord		
	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied
Fahrzeit [min]						
μ	11,27	10,41	ja	10,65	10,33	nein
σ	1,36	1,36	nein	1,10	1,33	nein
Halte [-]						
μ	8,16	5,89	ja	6,05	6,41	nein
σ	3,19	2,25	ja	2,00	2,33	nein
Geschw. [km/h]						
μ	32,05	34,77	nein	33,55	34,60	nein
σ	3,71	4,55	nein	3,98	4,60	nein

Tab. 7-3: Ergebnisse der Kalibrierung für den Messzeitraum 07:00-09:00 Uhr, Albersloher Weg (Konfidenzniveau 99 %)

Albersloher Weg (Morgenspitze)	Fahrtrichtung Süd			Fahrtrichtung Nord		
	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied
Fahrzeit [min]						
μ	9,94	9,70	nein	10,93	11,53	nein
σ	1,48	1,26	nein	1,63	2,11	nein
Halte [-]						
μ	6,33	4,97	nein	6,04	8,06	ja
σ	3,33	2,14	ja	2,29	3,65	ja
Geschw. [km/h]						
μ	36,40	37,27	nein	32,16	31,23	nein
σ	4,44	4,76	nein	4,84	5,87	nein

Tab. 7-4: Ergebnisse der Validierung für den Messzeitraum 16:00-18:00 Uhr, Albersloher Weg (Konfidenzniveau 99 %)

die Anzahl der Halte vor dem vorletzten Knotenpunkt 29120 am südlichen Streckenende zu. Die Verhältnisse an der Einmündung können in der verwendeten VISSIM-Version nicht realitätsgetreu nachgebildet werden. Dies führt dazu, dass wartende Linksabbieger den geradeaus fahrenden Fahrverkehr blockieren. Ein Umstieg auf eine neuere VISSIM-Version war aufgrund von Kompatibilitätsproblemen mit den MOTION-Komponenten nicht möglich. Bezogen auf den Streckenteil nördlich des Knotenpunkts 8130 bestehen für alle betrachteten Kenngrößen in allen Zeiträumen keine signifikanten Unterschiede zwischen Simulation und Empirie. Die den Ergebnissen zugrunde liegenden Fahrverhaltensparametersätze und Wunschgeschwindig-

keitsverteilungen unterscheiden sich nach Fahrtrichtung und Abschnitten mit unterschiedlicher Anzahl an Fahrstreifen. Ein einheitlicher Parametersatz für das gesamte Straßennetz konnte nicht gefunden werden.

7.3.3 Stadt Remscheid – Bismarckstraße

Für die Kalibrierung des Simulationsmodells anhand der richtungsbezogenen empirischen Kenngrößen wurde der weniger stark belastete Zeitraum von 12:30 bis 14:30 Uhr in der Normalverkehrszeit außerhalb der Spitzenstunden verwendet. In diesem Zeitraum werden Signalprogramme mit einer Umlaufzeit von 85 s geschaltet. Die Koordinierung

ist auf die in Fahrtrichtung Nord verkehrenden Ströme ausgerichtet. Im für die Validierung gewählten Zeitraum von 15:30 bis 17:30 Uhr liegt die Umlaufzeit der LSA auf dem Streckenzug bei 95 s. Die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung sind in Tabelle 7-5 bzw. Tabelle 7-6 eingetragen. Neben den Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs konnten für diesen Straßenzug auch die Verkehrsbelastungen in der Simulation anhand der vorliegenden Detektoraufzeichnungen kalibriert werden. Die Plausibilitätsprüfung der Detektorwerte zeigte Unstetigkeiten zwischen den Aufzeichnungen in den aufeinanderfolgenden Zufahrten der koordinierten Hauptrichtungen. Da besonders diese Belastungen die zur Kalibrierung und Validierung

herangezogenen Kenngrößen beeinflussen, sind die Verkehrsstärken der Nebenzufahrten in der Simulation entsprechend angepasst worden. Für die Überprüfung der Anpassungen wurden die Verkehrsstärken an jedem Detektor in der Simulation durch Messquerschnitte in 5-Minuten-Intervallen aufgezeichnet und den Werten aus den Detektorprotokollen gegenübergestellt. Dabei konnte eine sehr gute Übereinstimmung erreicht werden. Für 99 % aller Querschnitte wurde ein GEH-Wert unter 5 ermittelt. Damit ist die Forderung von mindestens 85 % Übereinstimmung deutlich erfüllt.

Im Zuge der Kalibrierung stellte sich heraus, dass die Simulation mit einem einheitlichen Parameter-

Bismarckstraße (mittags)	Fahrtrichtung Süd			Fahrtrichtung Nord		
	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied
Fahrzeit [min]						
μ	2,89	3,12	ja	3,42	3,53	nein
σ	0,55	0,53	nein	0,58	0,50	nein
Halte [-]						
μ	1,15	1,90	ja	1,57	2,37	ja
σ	1,18	1,34	nein	1,31	1,09	nein
Geschw. [km/h]						
μ	33,55	29,82	ja	26,91	27,89	nein
σ	6,24	5,66	nein	4,42	4,45	nein

Tab. 7-5: Ergebnisse der Kalibrierung für den Messzeitraum 12:30-14:30 Uhr, Bismarckstraße (Konfidenzniveau 99 %)

Bismarckstraße (Abendspitze)	Fahrtrichtung Süd			Fahrtrichtung Nord		
	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied	Simulation	Empirie	Signifikanter Unterschied
Fahrzeit [min]						
μ	3,12	3,33	nein	3,90	4,10	nein
σ	0,57	0,75	nein	0,69	0,60	nein
Halte [-]						
μ	2,56	2,18	nein	3,34	2,87	ja
σ	1,07	1,89	ja	1,28	1,01	nein
Geschw. [km/h]						
μ	31,01	27,88	ja	23,20	25,07	ja
σ	5,69	6,38	nein	3,05	4,30	ja

Tab. 7-6: Ergebnisse der Validierung für den Messzeitraum 15:30-17:30 Uhr, Bismarckstraße (Konfidenzniveau 99 %)

satz für den gesamten Streckenzug nicht sinnvoll ist. Daher wurden zunächst unterschiedliche Parametersätze für den einstreifigen Bereich auf der Burger Straße und den zweistreifigen Bereich auf der Bismarckstraße definiert. Diese wurden dann getrennt nach Fahrtrichtungen weiter angepasst. Gleiches gilt für die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen, die ebenfalls getrennt nach Fahrtrichtung und Streckentyp eingestellt wurden. Damit gelangen zumindest die Kalibrierung und Validierung der Fahrzeiten bis auf eine Ausnahme. Schwieriger gestaltete sich die Betrachtung der mittleren Anzahl der Halte auf dem Straßenzug. Die Simulationsergebnisse liegen durchweg deutlich unter den empirisch ermittelten Werten. Dies lässt sich damit begründen, dass in den empirisch ermittelten Halten auch Halte aufgezeichnet sind, die nicht durch die LSA-Steuerung hervorgerufen wurden, sondern aufgrund anderer Einflüsse (z. B. Parkvorgänge) verursacht wurden. Diese wurden in der Simulation nicht nachgebildet.

Die Kalibrierung des Simulationsmodells gestaltete sich sehr aufwändig, insbesondere aufgrund der Tatsache, dass dafür ein Szenario mit regelbasierter Steuerung verwendet werden musste. Die Auswirkungen mancher Anforderungskonstellationen auf die Steuerungslogiken der Knotenpunkte lassen sich durch die Veränderung von Fahrverhaltensparametern oder Wunschgeschwindigkeiten nur bedingt beeinflussen. In der Simulation ließ es sich nicht vermeiden, dass kurzfristige Verkehrszustände auftraten, die in der Realität nicht zu beobachten waren. Dies führte dazu, dass bereits geringfügige Veränderungen der Fahrverhaltensparameter zu großen Unterschieden in den betrachteten Kenngrößen führen. Die Veränderungen globaler Einstellungen wirkten sich nicht auf beide Fahrtrichtungen gleichermaßen aus. Zum Teil ergaben sich – unerwartete – Fahrtzeitverlängerungen für die Fahrtrichtung Nord, während die Fahrzeiten in die Gegenrichtung durch die Parametereinstellungen verkürzt wurden. Die Betrachtung der einzelnen Streckenabschnitte zeigte, dass selbst für die Simulationszeiträume mit guter Übereinstimmung der Mittelwerte über den gesamten Streckenzug, signifikante Abweichungen zwischen Empirie und Simulation auf den Streckenabschnitten auftraten. Diese Erkenntnisse lassen den Schluss zu, dass es sinnvoller ist, die Kalibrierung und Validierung von Simulationsmodellen für innerstädtische Straßenzüge mit festzeitgesteuerten LSA durchzuführen. Dadurch entfallen die Einflüsse der Steuerung auf die

Simulationsergebnisse. Im Falle verkehrsabhängig gesteuerter LSA kommen zu den Einflüssen wie Parkvorgängen u. Ä. die zeitlückengesteuerten Freigabezeitveränderungen hinzu, die je nach Logikaufbau sehr große Einflüsse auf das Simulationsergebnis haben. Die Verteilung der Zeitlücken kann, wenn überhaupt, nur sehr aufwändig an reale Verhältnisse angepasst werden.

7.4 Verkehrliche Wirkungen aus den Simulationen

7.4.1 Stadt Münster – Albersloher Weg

Anhand der Simulationsuntersuchung wurden die Wirkungen der adaptiven LSA-Steuerung MOTION (Mit-Fall) gegenüber denen der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) ermittelt. Die Mikrosimulation bietet in Ergänzung zur empirischen Analyse die Möglichkeit, die Steuerungsvarianten bezogen auf das gesamte Straßennetz unter gleichbleibenden Bedingungen miteinander zu vergleichen.

Als Vergleichsgröße dient der in Kapitel 4.2 beschriebene Performance-Index (PI) nach den Gleichungen 4-3 und 4-4. Den Ergebnissen liegen fünf Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen zugrunde. Jeder der fünf Simulationsläufe wurde mit konventionell verkehrsabhängiger LSA-Steuerung und mit adaptiver Steuerung durchgeführt. Durch die stochastischen Unterschiede der Verkehrszustände der einzelnen Simulationsläufe infolge der veränderten Startzufallszahlen wurden gewichtete arithmetische Mittelwerte der Kenngrößen für den Vergleich der Steuerungen gebildet.

In der Übersicht in Tabelle 7-7 sind die Performance Indices des Albersloher Wegs für beide Untersuchungszeiträume nach Steuerungsverfahren dargestellt. Je kleiner dieser Wert ist, desto höher ist die Qualität der Signalsteuerung einzuschätzen. Für den Albersloher Weg wurden die verkehrlichen Wirkungen – in Analogie zu den empirischen Unter-

Zeitraum	Performance-Index		
	Ohne-Fall	MOTION	Diff.
07:00-09:00	42,8	40,5	-5,3%
16:00-18:00	51,4	44,9	-12,7%

Tab. 7-7: Performance-Index der untersuchten Steuerungsverfahren im gesamten Netz, Albersloher Weg

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Ohne-Fall			MOTION			Differenz PI	
	PI	k_i	QSV	PI	k_i	QSV	Absolut	Relativ
Nord								
07:00-09:00	30,3	78	C	26,0	82	C	-4,3	-14,2 %
16:00-18:00	31,0	79	C	26,7	80	C	-4,3	-13,6 %
Süd								
07:00-09:00	36,2	79	C	35,2	79	C	-1,0	-2,8 %
16:00-18:00	42,3	77	C	36,5	80	C	-5,8	-13,7 %

Tab. 7-8: Vergleich der Simulationsergebnisse mit konventionell verkehrsabhängiger Steuerung (Ohne-Fall) und MOTION-Steuerung (Mit-Fall) für die koordinierten Hauptrichtungen des Albersloher Wegs

suchungen – in den Zeiträumen der Morgen- und der Nachmittagsspitze in der Simulation untersucht. Die Simulationsergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den empirischen Erhebungen am Albersloher Weg. Die Verkehrsqualität konnte durch die MOTION-Steuerung um 5,3 % in der Morgenspitze und um 12,7 % in der Abendspitze gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) gesteigert werden.

In Tabelle 7-8 sind die Performance Indices für die koordinierten Hauptrichtungen enthalten. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind zusätzlich das Koordinierungsmaß und die Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs nach HBS (FGSV, 2005) angegeben. Die Verbesserungen haben keine Auswirkung auf die Qualitätsstufeneinteilung nach HBS (FGSV, 2005). Jedoch zeigen sich deutliche Verbesserungen hinsichtlich des Performance-Index, insbesondere in nördlicher Fahrtrichtung.

7.4.2 Stadt Remscheid – Bismarckstraße

Die Untersuchungszeiträume für die Bismarckstraße in Remscheid orientieren sich ebenfalls an den Messzeiträumen der empirischen Erhebungen der verkehrlichen Wirkungen. Für alle Zeiträume wurden die Verkehrsstärken und die Abbiegeraten aus der Kalibrierung beibehalten. In Analogie zur Untersuchung des Albersloher Wegs wurden hierfür ebenfalls fünf Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen mit beiden Steuerungsarten durchgeführt. Die Kenngrößen (Verlustzeiten, Anzahl der Halte) aus den Einzelläufen wurden anschließend mit den jeweils vorherrschenden Verkehrsstärken gewichtet und für die beiden Steuerungsarten arithmetisch gemittelt. Die daraus nach den Gleichungen 4-3 und 4-4 ermittelten Performance-Indices sind in Tabelle 7-9 dar-

Zeitraum	Performance-Index		
	Ohne-Fall	BALANCE	Diff.
12:30-14:30	49,6	54,9	+10,7%
15:30-17:30	64,5	66,4	+3,1%

Tab. 7-9: Performance-Index der untersuchten Steuerungsverfahren im gesamten Netz, Bismarckstraße

gestellt. Im geringer belasteten Normalverkehrszeitraum von 12:30 bis 14:30 Uhr verschlechtert sich der Performance-Index für die BALANCE-Steuerung um mehr als 10 % gegenüber der regelbasierten, verkehrsabhängigen Steuerung. In der Abendspitze bleibt der Performance-Index für beide Steuerungsvarianten nahezu unverändert. Die Optimierung der Rahmensignalpläne in den Simulationen mit BALANCE-Steuerung erfolgte für diese Berechnungen mit dem Hill-Climbing-Algorithmus. Der genetische Optimierungsalgorithmus GALOP konnte von Seiten des Herstellers nicht für die Simulation mit VISSIM bereitgestellt werden.

Anhand der in Tabelle 7-10 dargestellten Ergebnisse lässt sich die Wirkung von BALANCE auf die koordinierten Hauptrichtungen beurteilen. Alle PI-Werte mit BALANCE-Steuerung liegen über denen der regelbasierten verkehrsabhängigen Steuerung. In beiden Zeiträumen ist die Koordination der Signalprogramme auf die höher belastete Fahrtrichtung Süd (stadtauswärts) ausgelegt. In Fahrtrichtung Nord zeigt sich im schwächer belasteten Mittagszeitraum von 12:30 bis 14:30 Uhr eine massive Verschlechterung des Performance-Index von 50 % infolge der BALANCE-Steuerung. Im Zeitraum der Abendspitze von 15:30 bis 17:30 Uhr zeigen sich mit 1,1 % hingegen nur geringfügige Verschlechterungen.

Fahrtrichtung/ Zeitraum	Ohne-Fall			BALANCE			Differenz PI	
	PI	k _i	QSV	PI	k _i	QSV	Absolut	Relativ
Nord								
12:30-14:30	34,7	68	D	52,1	68	D	+17,4	+50,0 %
15:30-17:30	38,6	66	D	39,0	60	E	+0,4	+1,1 %
Süd								
12:30-14:30	29,7	66	D	30,5	68	D	+0,8	+2,9 %
15:30-17:30	45,3	64	E	53,0	66	D	+7,7	+17,0 %

Tab. 7-10: Vergleich der Simulationen mit konventionell verkehrsabhängiger Steuerung (Ohne-Fall) und BALANCE-Steuerung (Mit-Fall) für die koordinierten Hauptrichtungen der Bismarckstraße

Simulationsnetz Albersloher Weg		PHEM-Ergebnisse		Differenz	
		Ohne-Fall	Mit-Fall	absolut	relativ
Anzahl der Fahrzeuge	[Kfz/2h]	15.870	15.869	-1	0,00 %
Gesamte Fahrtzeit	[h]	934,2	927,5	-6,68	-0,72 %
Gesamtfahrleistung	[km]	26.696,0	26.690,8	-5,19	-0,02 %
Mittl. Fahrgeschwindigkeit	[km/h]	28,6	28,8	0,20	0,70 %
Kraftstoffverbrauch FC	[g/km]	93,974	93,576	-0,40	-0,43 %
Stickstoffoxide NO _x	[g/km]	1,380	1,370	-0,01	-0,71 %
Schwebstaubpartikel PM ₁₀	[g/km]	0,232	0,230	-0,002	-0,90 %

Tab. 7-11: Vergleich der netzweiten Ergebnisse der Berechnungen mit dem mikroskopischen Emissionsmodell PHEM für die konventionell verkehrsabhängige Steuerung (Ohne-Fall) und MOTION (Mit-Fall), Albersloher Weg, 16:00-18:00 Uhr

Die Ergebnisse der Fahrtrichtung Süd zeigen, ähnlich wie die der Fahrtrichtung Nord, unterschiedlich deutliche Veränderungen in den beiden betrachteten Zeiträumen. Im Abendspitzenzeitraum von 15:30 bis 17:30 Uhr verschlechtert sich die Verkehrsqualität durch die BALANCE-Steuerung für diese Fahrtrichtung mit 17 % stärker als im Mittagszeitraum von 12:30 bis 14:30 Uhr (+2,9 %).

Der Vergleich über das Koordinierungsmaß nach HBS (FGSV, 2005) in Tabelle 7-10 zeigt hingegen nur für die Fahrtrichtung Nord im Abendspitzenzeitraum eine schlechtere Verkehrsqualität mit der BALANCE-Steuerung. In den anderen Zeiträumen ergibt die Bewertung eine gleichbleibende bzw. höhere Verkehrsqualität. Auffällig sind die Unterschiede in den Ergebnissen der Bewertung mit dem Performance-Index und dem Koordinierungsmaß. Die unterschiedliche Bewertung ist darauf zurückzuführen, dass in die Berechnung des Performance-Index auch mehrfache Halte auf den Abschnitten einfließen. Das Koordinierungsmaß unterscheidet lediglich nach Abschnitten mit und ohne Halt unabhängig von der Anzahl der Halte auf den Abschnitten.

7.5 Umweltwirkungen aus den Simulationen

7.5.1 Stadt Münster – Albersloher Weg

Die Tabelle 7-11 zeigt die Ergebnisse der Schätzung der Emissionen mit dem Emissionsmodell PHEM für das gesamte Simulationsnetz des Albersloher Wegs. Zur Feststellung der Wirkungen der adaptiven Steuerung wurden die relativen Veränderungen gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (regelbasiert) ermittelt. Zum einen wurden die verkehrlichen Veränderungen infolge der geänderten Steuerungsbedingungen durch die Kenngrößen Anzahl der Fahrzeuge, Gesamtfahrtzeit und -fahrleistung aller Fahrzeuge sowie die mittlere Geschwindigkeit je Fahrzeug berücksichtigt. Zum anderen wurden die Emissionsgrößen Kraftstoffverbrauch (FC), Stickstoffoxide NO_x und Feinstaub PM₁₀ angegeben. Für die Berechnungen wurden die Ergebnisse aus zwei Simulationsläufen gemittelt. Aus den für die Kalibrierung und Validierung in Kapitel 7.4.1 ausgewerteten Simulationsläufen wurden die beiden Si-

Knotenpunkt	Fahrleistung [km] 1	Fahrgeschw. [km/h] 2	Fahrzeit [h] 3	FC [g/km] 4	PM [g/km] 5	NO _x [g/km] 6	CO [g/km] 7	HC [g/km] 8
29010	-	-	-	-	-	-	-	-
29120	0,03 %	1,49 %	-1,44 %	-1,08 %	-1,29 %	-1,52 %	-1,83 %	-0,50 %
29110	-0,24 %	25,73 %	-20,65 %	-14,32 %	-14,65 %	-18,56 %	-21,18 %	-13,76 %
29100	-0,18 %	8,52 %	-8,02 %	-7,87 %	-7,38 %	-11,59 %	-13,18 %	-6,35 %
8140	0,02 %	3,97 %	-3,79 %	-10,41 %	-8,82 %	-13,80 %	-12,28 %	-8,91 %
8130	0,44 %	-2,46 %	2,98 %	-3,40 %	-3,84 %	-4,66 %	-3,21 %	-3,04 %
8120	-1,21 %	-29,49 %	40,12 %	1,52 %	2,67 %	1,50 %	3,54 %	9,06 %
8110	0,42 %	-20,92 %	26,98 %	7,90 %	8,40 %	9,68 %	7,00 %	13,27 %
8100	0,09 %	-11,71 %	13,37 %	20,14 %	17,15 %	22,39 %	16,58 %	27,18 %
8090	0,03 %	-26,50 %	36,10 %	22,24 %	20,97 %	24,21 %	21,65 %	20,03 %
8080	0,65 %	8,12 %	-6,90 %	0,79 %	-0,91 %	0,79 %	-1,16 %	-2,43 %
8070	0,21 %	-5,96 %	6,56 %	-3,13 %	-0,97 %	-4,57 %	-0,72 %	-3,71 %
8060	0,06 %	0,63 %	-0,57 %	6,30 %	3,79 %	8,70 %	4,81 %	4,65 %
8054	-0,75 %	-5,76 %	5,32 %	0,90 %	2,61 %	1,62 %	6,47 %	4,92 %
8053	-0,19 %	14,44 %	-12,79 %	-3,95 %	-6,06 %	-5,19 %	-10,74 %	-6,17 %
8052	-0,42 %	1,07 %	-1,47 %	-13,20 %	-9,39 %	-14,76 %	-9,05 %	-12,96 %
8050	-0,44 %	-23,19 %	29,61 %	15,90 %	15,23 %	20,79 %	26,45 %	20,32 %
8040	0,00 %	12,22 %	-10,89 %	-1,57 %	-3,29 %	-2,51 %	-5,50 %	-4,85 %
8041	-0,34 %	-7,66 %	7,93 %	-4,34 %	-1,84 %	-3,76 %	-1,91 %	-2,20 %
8032	-0,39 %	-1,12 %	0,74 %	1,19 %	-1,48 %	0,55 %	-1,38 %	-4,70 %
8031	0,15 %	12,68 %	-11,12 %	-5,63 %	-7,57 %	-8,50 %	-12,44 %	-10,82 %
8030	-0,10 %	0,03 %	-0,12 %	-3,76 %	-4,14 %	-5,12 %	-6,43 %	-4,12 %
8020	0,19 %	-2,78 %	3,05 %	-0,27 %	0,20 %	-1,13 %	-0,61 %	0,54 %
3290	0,48 %	11,13 %	-9,58 %	-6,56 %	-8,54 %	-9,25 %	-11,20 %	-10,89 %
Gesamt	-0,04 %	-0,93 %	0,90 %	-0,02 %	-0,35 %	-0,37 %	-0,94 %	0,10 %

Tab. 7-12: Abschnittsweise Wirkungen der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) Albersloher Weg, Fahrtrichtung Nord, 16:00-18:00 Uhr (nur für den Verkehr in der koordinierten Haupttrichtung)

ulationsläufe mit den geringsten Abweichungen zu den empirisch ermittelten Mittelwerten ausgewählt.

Die Ergebnisse der PHEM-Berechnungen in Tabelle 7-11 zeigen geringfügige Veränderungen von weniger als 1 % bei allen analysierten Kenngrößen. Die verkehrliche Analyse ergab eine Verringerung der Gesamtfahrzeit aller Fahrzeuge im Netz (-0,72 %). Daraus ergibt sich eine Steigerung der mittleren Geschwindigkeit der Fahrzeuge in ähnlichem Rahmen. Die Verkehrsbelastung und die Fahrleistung in den Simulationen mit adaptiver

Steuerung gegenüber denen ohne adaptive Steuerung blieben dabei unverändert. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse der verkehrlichen Analyse wurde für die hier ausgewerteten Simulationsläufe ebenfalls der Performance-Index nach Gleichungen 4-3 und 4-4 ermittelt. Der Vergleich der Steuerungen anhand des Performance-Index ergab eine Verbesserung durch die adaptive Steuerung um 1,65 %.

Hinsichtlich der Umweltwirkungen zeigen die PHEM-Berechnungen ebenfalls positive Wirkungen der adaptiven Steuerung. Bei Betrachtung des Gesamtnetzes liegen die Veränderungen zwischen

Knotenpunkt	Fahrleistung [km] 1	Fahrgeschw. [km/h] 2	Fahrtzeit [h] 3	FC [g/km] 4	PM [g/km] 5	NO _x [g/km] 6	CO [g/km] 7	HC [g/km] 8
3290	-	-	-	-	-	-	-	-
8020	-0,01 %	23,60 %	-19,10 %	-7,84 %	-7,47 %	-8,09 %	-10,42 %	-9,87 %
8030	-0,15 %	-0,34 %	0,20 %	-1,88 %	-2,12 %	-2,14 %	-5,27 %	-1,87 %
8031	0,13 %	14,67 %	-12,68 %	-4,86 %	-6,49 %	-7,25 %	-9,39 %	-9,10 %
8032	0,18 %	8,54 %	-7,70 %	-2,78 %	-5,91 %	-2,64 %	-10,47 %	-10,22 %
8041	-0,10 %	0,99 %	-1,08 %	-3,36 %	-4,62 %	-4,42 %	-9,71 %	-5,54 %
8040	0,13 %	1,47 %	-1,33 %	0,30 %	-0,40 %	-0,22 %	-1,06 %	-2,52 %
8050	-0,28 %	-13,70 %	15,54 %	4,80 %	5,08 %	4,86 %	14,69 %	4,51 %
8052	0,44 %	13,65 %	-11,63 %	6,72 %	3,17 %	6,57 %	3,82 %	1,67 %
8053	-0,12 %	0,00 %	-0,12 %	-6,89 %	-5,23 %	-10,20 %	-11,19 %	-3,30 %
8054	-0,06 %	-2,09 %	2,07 %	-3,47 %	-2,04 %	-5,15 %	-5,18 %	-2,62 %
8060	0,01 %	-0,97 %	0,99 %	3,69 %	5,62 %	4,81 %	10,57 %	6,07 %
8070	0,02 %	0,71 %	-0,68 %	1,61 %	0,88 %	1,47 %	-1,55 %	0,52 %
8080	-0,01 %	0,04 %	-0,06 %	0,10 %	1,66 %	0,62 %	2,77 %	1,96 %
8090	-0,11 %	-11,44 %	12,79 %	4,09 %	3,65 %	5,30 %	6,87 %	2,89 %
8100	-0,46 %	-5,37 %	5,18 %	9,02 %	10,16 %	11,61 %	16,39 %	9,34 %
8110	-0,25 %	-6,44 %	6,61 %	12,09 %	9,65 %	11,04 %	10,34 %	8,57 %
8120	0,35 %	-11,05 %	12,81 %	8,61 %	11,92 %	10,23 %	15,50 %	17,63 %
8130	0,20 %	-7,48 %	8,30 %	2,28 %	1,68 %	3,46 %	6,08 %	-0,11 %
8140	0,40 %	-2,91 %	3,41 %	2,41 %	2,78 %	2,05 %	4,32 %	1,39 %
29100	0,31 %	10,66 %	-9,35 %	-5,16 %	-6,20 %	-6,91 %	-9,33 %	-5,28 %
29110	0,55 %	19,05 %	-15,53 %	-9,75 %	-12,05 %	-13,58 %	-17,64 %	-15,13 %
29120	0,01 %	19,92 %	-16,61 %	-12,57 %	-15,16 %	-14,24 %	-18,94 %	-16,05 %
29010	-0,13 %	24,65 %	-19,88 %	-10,56 %	-9,69 %	-12,85 %	-11,08 %	-10,87 %
Gesamt	0,04 %	4,15 %	-3,95 %	-1,08 %	-1,53 %	-1,51 %	-2,16 %	-2,46 %

Tab. 7-13: Abschnittsweise Wirkungen der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall), Albersloher Weg, Fahrtrichtung Süd, 16:00-18:00 Uhr (nur für den Verkehr in der koordinierten Haupttrichtung)

0,43 % und 0,90 %. In Zusammenhang mit den Veränderungen der verkehrlichen Größen zeigt sich, dass die Veränderungen der Emissionen mit einer Verflüssigung des Verkehrsablaufs durch die adaptive Steuerung einhergehen.

In Tabelle 7-12 und Tabelle 7-13 sind die abschnittswise Veränderungen der koordinierten Haupttrichtungen enthalten. Dafür wurden nur die Strecken zwischen den Haltlinien der Knotenpunkte ausgewertet. Für jeden Streckenabschnitt sind die Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionsgrößen Feinstaub (PM₁₀), Stickoxid

(NO_x), Kohlenmonoxid (CO) sowie Kohlenwasserstoff (HC) angegeben (Spalten 4 bis 8). Die Veränderungen beziehen sich auf die Emissionen in g/km je Fahrzeug auf den einzelnen Streckenabschnitten. Des Weiteren sind die Veränderungen der Gesamtfahrleistung, der mittleren Fahrgeschwindigkeit und der Summe der Fahrtzeit auf den Abschnitten angegeben (Spalten 1 bis 3). Die Tabelle 7-12 zeigt die Veränderungen für die Fahrtrichtung Nord, die Tabelle 7-13 behandelt die Fahrtrichtung Süd. In beiden Tabellen sind sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen infolge der adaptiven Steuerung erkennbar. In der Summe über den

gesamten Streckenzug zeigen sich ausschließlich Verbesserungen. In Fahrtrichtung Nord liegen diese zwischen 0,02 % (Kraftstoffverbrauch) und 0,94 % (CO). Für die Hauptrichtung der Koordinierung in Fahrtrichtung Süd fallen die Wirkungen in der Summe deutlicher aus. Die Emissionsbelastungen wurden zwischen 1,51 % (NO_x) und 2,46 % 10,66 % verringert.

Die Zusammenhänge zwischen den verkehrlichen Wirkungen und den Umweltwirkungen aus Tabelle 7-12 und Tabelle 7-13 sind in Bild 7-1 verdeutlicht. In den Diagrammen sind die Veränderungen beider Fahrtrichtungen gemeinsam dargestellt. Jedes Diagramm zeigt die Entwicklung der Emissionen in Abhängigkeit von einer verkehrlichen Größe. Neben den Veränderungen der mittleren Geschwindigkeit, der Fahrzeit und der Fahrleistung sind auch die Veränderungen des Performance-Index dargestellt. Aus den Diagrammen ist ein

Zusammenhang zwischen der Fahrgeschwindigkeit sowie der Fahrzeit und der Emissionsentwicklung erkennbar. Die Fahrleistung und der Performance-Index zeigen hingegen keinen direkten Zusammenhang zur Emissionsentwicklung. Diese beiden Größen sind folglich für eine Beschreibung des Zusammenhangs zwischen verkehrlichen Veränderungen und den Emissionen ungeeignet.

Da die Fahrzeit von der Länge des betrachteten Abschnitts abhängig ist, eignet sich die mittlere Geschwindigkeit am besten für die Beschreibung des Zusammenhangs von verkehrlichen Veränderungen und Veränderungen der Emissionen. Zusätzlich zeigt sich auch, dass die Schwankungsbreite der Geschwindigkeitsänderungen und der Emissionsänderungen ähnlich groß ist (ca. ±30 %). Die Betrachtung der Fahrleistung gibt Aufschluss über einen möglichen Rückgang der Belastung auf den

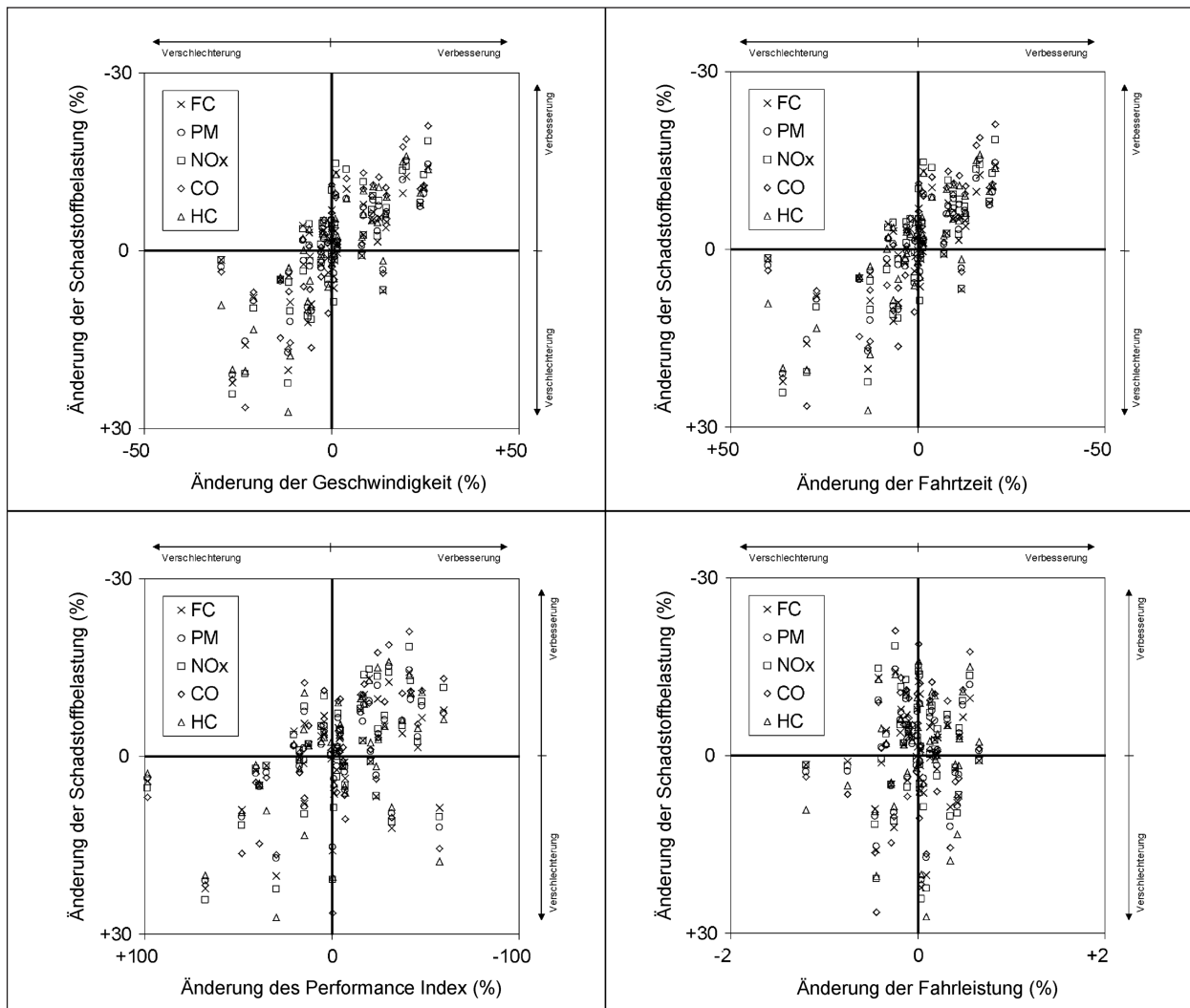


Bild 7-1: Umweltwirkungen der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) in Abhängigkeit von den untersuchten verkehrlichen Wirkungen (Albersloher Weg, 16:00-18:00 Uhr)

Abschnitten infolge von zufälligen Prozessen der Mikrosimulation. Die geringfügigen Veränderungen der Fahrleistung (vgl. Spalte 1, Tabelle 7-12 und Tabelle 7-13) lassen jedoch erkennen, dass die Ana-

lyseergebnisse davon nicht beeinflusst wurden. In Bild 7-2 sind die Änderungen jeder Emissionsgröße (PM, NO_x, CO, HC) und des Kraftstoffverbrauchs in Zusammenhang mit den Geschwindigkeitsände-

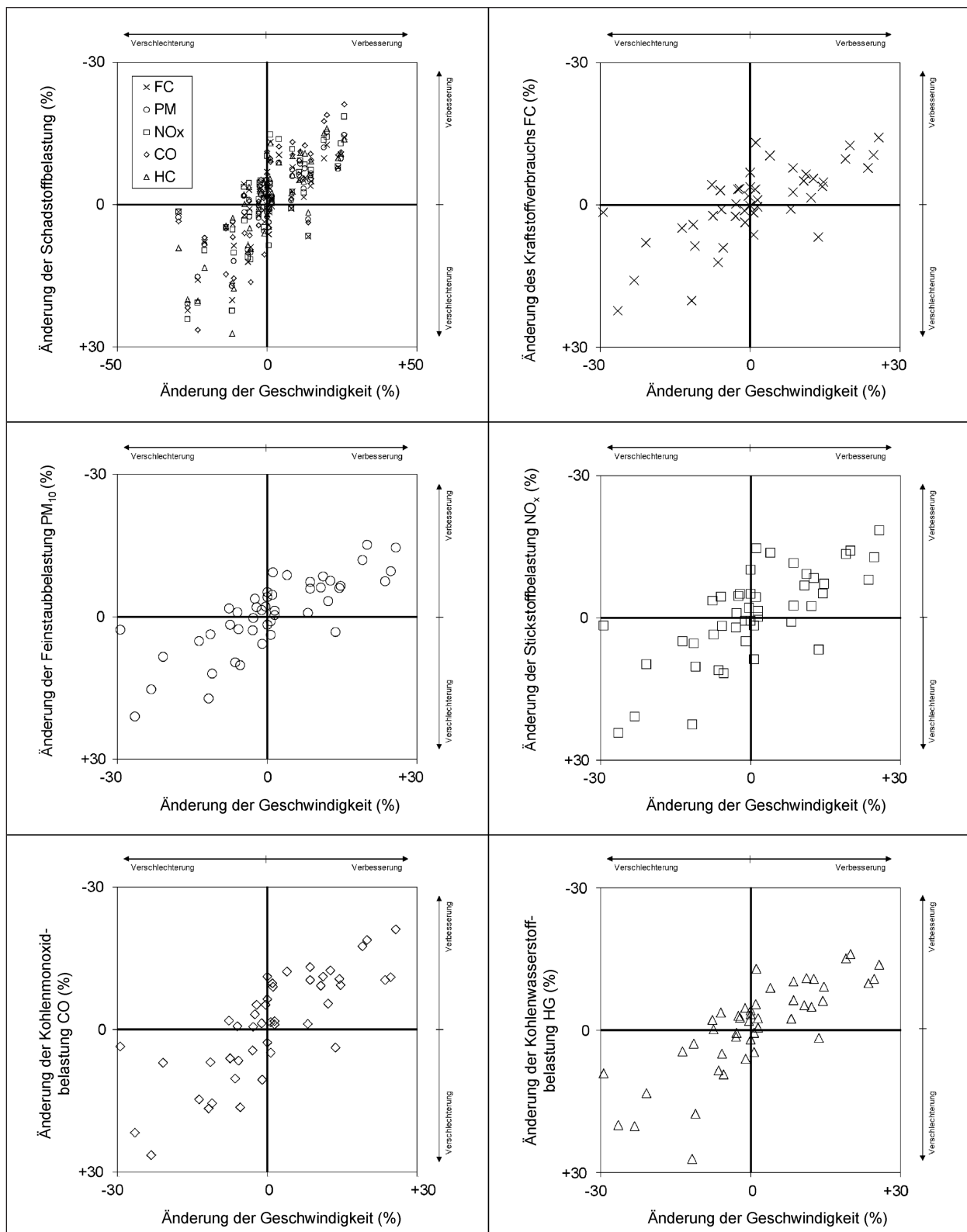


Bild 7-2: Umweltwirkungen der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit (Albersloher Weg, 16:00-18:00 Uhr)

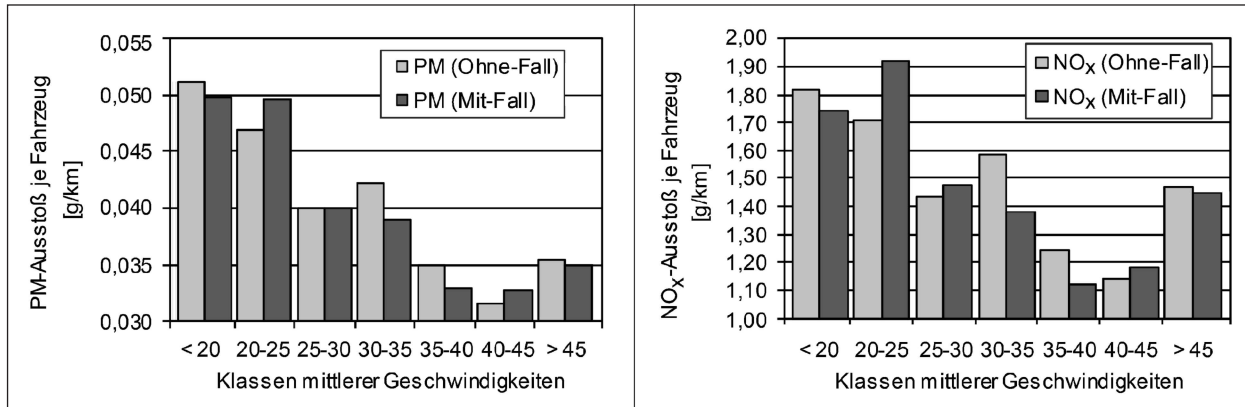


Bild 7-3: PM- (links) und NO_x-Emissionen (rechts) mit adaptiver Steuerung (Mit-Fall) und konventionell verkehrsabhängiger Steuerung (Ohne-Fall) beider Fahrtrichtungen nach Geschwindigkeitsklassen (Albersloher Weg, 16:00-18:00 Uhr)

lungen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass in die hier verwendete Fahrtgeschwindigkeit alle Haltezeiten mit eingehen.

Die Veränderungen bewegen sich jeweils in einem Rahmen von $\pm 30\%$. In allen Diagrammen ist zu erkennen, dass die größten Verschlechterungen der Emissionswerte nicht mit den höchsten Geschwindigkeitsrückgängen zusammenhängen. Bis auf wenige Ausnahmen im Bereich von Geschwindigkeitsveränderung unter ± 10 bis 15% ergibt jedoch eine Steigerung des Geschwindigkeitsniveaus auch eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen.

Diesen Zusammenhang verdeutlichen auch die Diagramme in Bild 7-3. In den Diagrammen sind der PM- und der NO_x-Ausstoß je Fahrzeug auf den beiden Hauptrichtungen im Mit- und Ohne-Fall für unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen dargestellt. Die Klassenbreite für die Geschwindigkeiten beträgt 5 km/h . Die deutlichsten Verringerungen im Mit-Fall werden für Geschwindigkeiten zwischen 30 und 40 km/h erreicht. Bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h und über 40 km/h zeigen sich hauptsächlich negative Entwicklungen im Mit-Fall gegenüber dem Ohne-Fall. Erwartungsgemäß sind die Emissionen für die Klasse zwischen 40 und 45 km/h am niedrigsten. Bei höheren Geschwindigkeiten wirkt sich der höhere Kraftstoffverbrauch negativ auf die Emissionsentwicklungen aus.

Die Darstellung in Bild 7-4 zeigt die abschnittswweisen Veränderungen der Feinstaub- und NO_x-Belastung beider Fahrtrichtungen in Zusammenhang mit den erreichten mittleren Geschwindigkeiten in den Simulationen. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die adaptive Steuerung beide Fahrtrichtungen weitestgehend in gleicher Weise beeinflusst. Nur

auf drei von 23 Abschnitten ergeben sich Verbesserungen für eine Fahrtrichtung zulasten der Gegenrichtung. Tendenziell zeigen sich deutlichere Wirkungen in Fahrtrichtung Nord mit der geringeren Belastung. Die Hauptrichtung der Koordinierung in Fahrtrichtung Süd wird hingegen weniger stark beeinflusst.

In Fahrtrichtung Nord (Bild 7-4, oben) fallen die Verbesserungen insbesondere auf den ersten fünf Abschnitten (von Knotenpunkt 29010 bis 8130) im einstreifigen Bereich deutlich aus. Dieser Bereich ist anbaufrei und durch große Knotenpunktabstände geprägt. Die Verkehrsbelastung ist mit ca. 500 Kfz/h gering im Vergleich zum weiteren Streckenverlauf sowie zur Gegenrichtung. Für die folgenden Abschnitte (von Knotenpunkt 8120 bis 8090) ergeben sich Verschlechterungen durch die verkehrsadaptive Steuerung. Diese sind vermutlich auf den starken Einbiegeverkehrsstrom am Knotenpunkt 8090 aus dem Gremendorfer Weg und die dadurch entstehende Grünzeitverkürzung für die Hauptrichtung infolge der verkehrsadaptiven Steuerung zurückzuführen. Im weiteren Streckenverlauf zeigt sich die positive Wirkung der adaptiven Steuerung an den Knotenpunkten 8053, 8052, 8031 und 3290. An den Knotenpunkten 8053, 8052 und 8031 sind die Zufahrten aus den Nebenrichtungen im Vergleich zur Hauptrichtung relativ gering belastet. Am Knotenpunkt 3290 weist die südliche Knotenpunktzufahrt die höchste Belastung aller vier Knotenpunktarme auf.

In südlicher Fahrtrichtung (Bild 7-4, unten) fallen die positiven Wirkungen der verkehrsadaptiven Steuerung in der Summe deutlicher aus als in Gegenrichtung (siehe Tabelle 7-13). Auf dem Streckenabschnitt nördlich des Knotenpunkts 8040, an

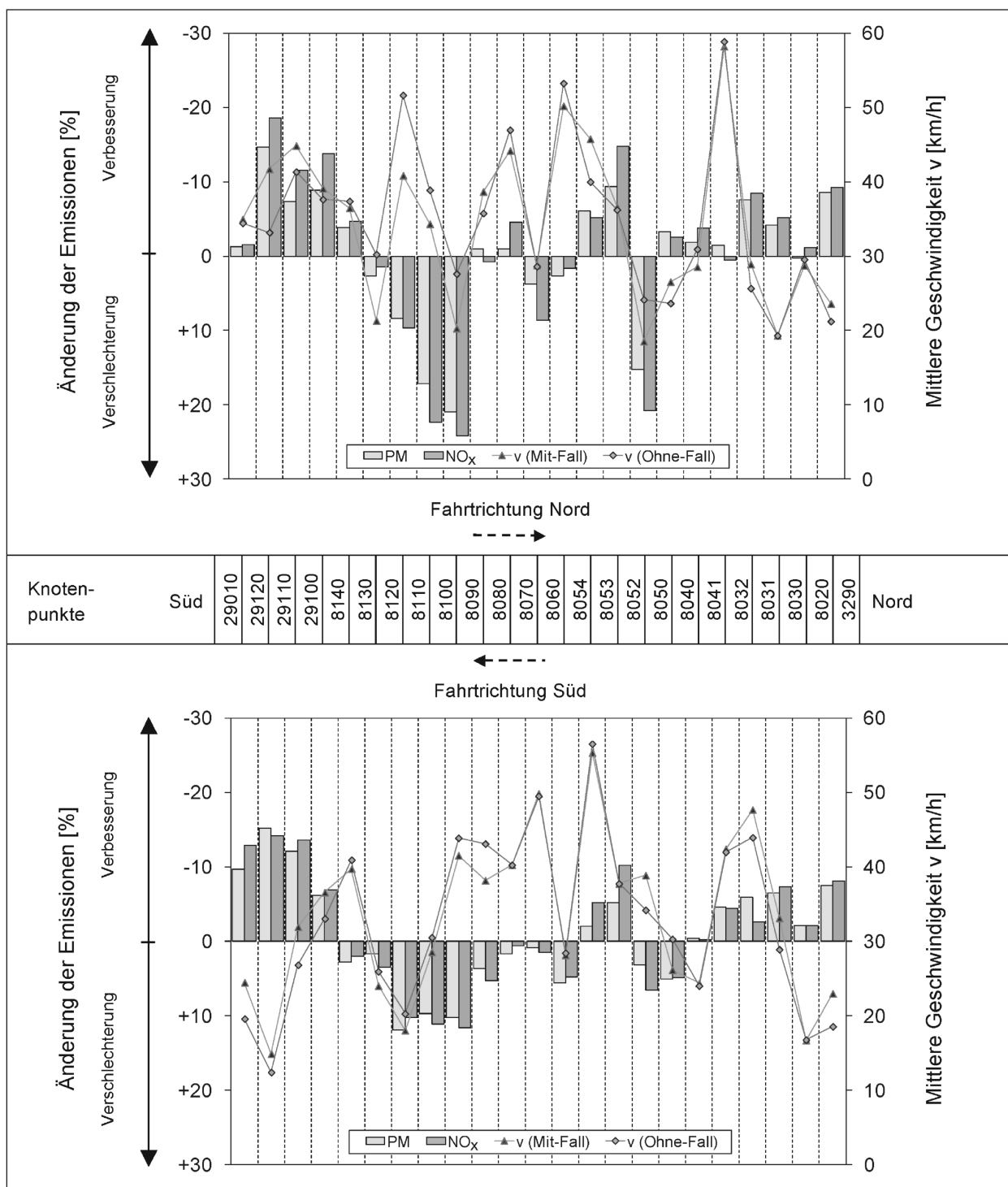


Bild 7-4: Abschnittsweise Wirkung der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) auf die PM- und NO_x-Emissionen gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) und Vergleich der erreichten mittleren Geschwindigkeiten, Albersloher Weg, 16:00-18:00 Uhr, oben: Fahrtrichtung Nord, unten: Fahrtrichtung Süd

dem die Bundesstraße B 51 an den Albersloher Weg angeschlossen ist, zeigen sich Verbesserungen. Die folgenden Knotenpunkte (8040 bis 8053) sind in den Hauptrichtungen insgesamt sehr stark belastet – in Fahrtrichtung Nord allerdings höher als in Gegenrichtung. Südlich des weiteren Streckenverlaufs zeigt sich die positive Wirkung der ad-

aptiven Steuerung an den Knotenpunkten 8053, 8052, 8031 und 3290. An diesen Knotenpunkten sind die Zufahrten aus den Nebenrichtungen im Vergleich zur Hauptrichtung relativ gering belastet. Am Knotenpunkt 3290 weist die südliche Knotenpunktzufahrt die höchste Belastung aller vier Knotenpunktarme auf.

Südlich des Knotenpunkts 8060 sind die Verkehrsbelastungen insbesondere in südlicher Fahrtrichtung sehr hoch. Hier zeigt die verkehrsadaptive Steuerung zum Teil deutliche Schwächen gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung. Eine mögliche Erklärung hierfür ist ein Rückstau durch die folgende Fahrstreifenreduktion hinter dem Knotenpunkt 8110, ab dem die Emissionen durch die verkehrsadaptive Steuerung wieder zurückgehen. Gleichzeitig geht auf den folgenden Streckenabschnitten aber auch die Fahrleistung stärker als auf den restlichen Abschnitten zurück. Aus der Darstellung in Bild 7-4 wird ebenfalls wieder deutlich, dass die Entwicklungen der Emissionen abhängig sind von der erreichten mittleren Geschwindigkeit auf dem jeweiligen Streckenabschnitt. Eine Steigerung der mittleren Geschwindigkeit geht in der Regel mit einer Verringerung der Emissionen einher.

Die den hier abgebildeten Veränderungen zugrunde liegenden Berechnungsergebnisse mit PHEM sind in Anhang C.1 (vgl. Tabelle C.1-1 bis C.1-4) dargestellt. Die Ergebnisse in Tabelle 7-11 bis Tabelle 7-13 gelten für alle betrachteten Fahrzeugklassen. Die nach den Fahrzeugklassen Pkw, Lkw und Bus getrennten Ergebnisse befinden sich in Anhang C.1 (vgl. Bilder C.1-1 bis C.1-24).

7.5.2 Stadt Remscheid – Bismarckstraße

Analog zu den Emissionsermittlungen für den Albersloher Weg wurden für die Bismarckstraße ebenfalls zwei Simulationsläufe ausgewählt. Die Simulationsläufe bilden das Verkehrsgeschehen in der Nachmittagsspitze zwischen 15:30 und 17:30 Uhr ab. Die Ergebnisse der PHEM-Berechnungen

für den gesamten Verlauf der Bismarckstraße in Remscheid sind in Tabelle 7-14 dargestellt. Aus den Simulationsdaten ergeben sich deutliche Verschlechterungen durch die verkehrsadaptive Netzsteuerung. Der Kraftstoffverbrauch und der Ausstoß von Stickstoffoxiden mit adaptiver LSA-Steuerung steigen um 2,63 % und 2,75 %, der Ausstoß von Schwebstaubpartikeln um 1,75 %. Die Verschlechterungen treten trotz eines Rückgangs der Anzahl der Fahrzeuge, der Gesamtfahrzeit und der Fahrleistung aller Fahrzeuge im Netz während des Auswertungszeitraums auf. Zusätzlich zu den verkehrlichen Größen aus den PHEM-Berechnungen wurde die Qualität der jeweiligen Steuerung auch für diese Simulationsläufe mit dem PI nach den Gleichungen 4-3 und 4-4 untersucht. Die netzweite Beurteilung der Steuerungsqualität ergibt hierfür eine Verschlechterung von 15 % durch die adaptive Steuerung.

Der Vergleich der abschnittswisen Auswertungen in Tabelle 7-15 und Tabelle 7-16 stellt sich nicht einheitlich dar. In diesen beiden Tabellen sind die verkehrlichen Veränderungen (Spalte 1 bis 3) und die Emissionsveränderungen (Spalten 5 bis 8) infolge der adaptiven Steuerung für die Abschnitte der koordinierten Hauptrichtungen enthalten. Zusätzlich gehen die Veränderungen hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs hervor (Spalte 4). In Fahrtrichtung Nord (Tabelle 7-15) ergaben die Berechnungen starke Veränderungen der Emissionen von +36 % (HC (Spalte 8)) auf dem Abschnitt vor dem Knotenpunkt 1310 bis -19 % (HC (Spalte 8)) auf dem Abschnitt vor dem Knotenpunkt 0221. Die deutlichsten Verschlechterungen im zweistelligen Prozentbereich traten im einstreifigen Bereich zwischen den Knotenpunkten 1307 bis 1312 auf. Die negativen

Simulationsnetz Bismarckstraße		PHEM-Ergebnisse		Differenz	
		Ohne-Fall	Mit-Fall	absolut	relativ
Anzahl der Fahrzeuge	[Kfz/2h]	10.299	10.226	-73	-0,72 %
Gesamte Fahrtzeit	[h]	610,8	658,3	47,42	7,20 %
Gesamtfahrleistung	[km]	12.722,0	12.513,0	-208,99	-1,67 %
Mittl. Fahrgeschwindigkeit	[km/h]	20,8	19,0	-1,82	-9,56 %
Kraftstoffverbrauch FC	[g/km]	95,970	98,563	2,59	2,63 %
Stickstoffoxide NO _x	[g/km]	1,269	1,305	0,04	2,75 %
Schwebstaubpartikel PM ₁₀	[g/km]	0,241	0,245	0,004	1,75 %

Tab. 7-14: Netzweite Wirkungen der verkehrsadaptiven Steuerung (Mit-Fall) im Vergleich zur konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall), Bismarckstraße, 15:30-17:30 Uhr

Wirkungen konnten auch nicht durch die positiven Veränderungen im folgenden zweistreifigen Bereich des Streckenzuges kompensiert werden. In Fahrtrichtung Nord zeigen sich nur für zwei der neun Abschnitte positive Veränderungen. Die Veränderungen fallen folglich für den gesamten Streckenzug in Fahrtrichtung Nord negativ aus. Für die Fahrtrichtung Süd (Tabelle 7-16) sind die Wirkun-

gen insgesamt positiv zu beurteilen. Die Emissionen konnten in der Summe über den gesamten Streckenzug in einer Größenordnung von 0,2 bis 1,0 % gesenkt werden.

Die Ergebnisse auf den einzelnen Abschnitten zeigen sowohl Verbesserungen als auch Verschlechterungen (± 3 %). Insgesamt überwiegen jedoch die

Knotenpunkt	Fahrleistung [km]	Fahrgeschw. [km/h]	Fahrtzeit [h]	FC [g/km]	PM [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]
	1	2	3	4	5	6	7	8
13-06	-	-	-	-	-	-	-	-
13-07	-1,72 %	-2,58 %	-28,96 %	37,14 %	17,39 %	14,47 %	17,07 %	14,63 %
13-08	-4,53 %	-5,10 %	-47,72 %	81,51 %	17,57 %	23,17 %	18,97 %	33,64 %
13-10	-5,22 %	-5,46 %	-53,63 %	103,86 %	26,62 %	31,88 %	31,71 %	36,26 %
13-12	-6,42 %	-6,76 %	-40,06 %	55,55 %	23,99 %	22,77 %	25,24 %	16,76 %
02-25	-5,99 %	-5,95 %	-7,95 %	2,18 %	0,59 %	-0,12 %	-1,36 %	0,30 %
02-24	-3,09 %	-3,12 %	-4,56 %	1,51 %	5,96 %	3,56 %	6,38 %	4,00 %
02-23	-2,42 %	-2,02 %	-3,34 %	1,37 %	9,34 %	7,11 %	10,52 %	8,58 %
02-21	-2,06 %	-2,11 %	19,66 %	-18,20 %	-11,77 %	-11,33 %	-13,88 %	-18,77 %
02-20	-1,73 %	-1,81 %	9,01 %	-9,92 %	-5,72 %	-6,29 %	-5,16 %	-5,51 %
Gesamt	-3,49 %	-4,23 %	-25,22 %	28,08 %	8,37 %	8,11 %	8,38 %	7,36 %

Tab. 7-15: Wirkungen der verkehrsadaptiven Steuerung (Mit-Fall) im Vergleich zur konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall), Bismarckstraße, Fahrtrichtung Nord, 15:30-17:30 Uhr (nur für den Verkehr in der koordinierten Hauptrichtung)

Knotenpunkt	Fahrleistung [km]	Fahrgeschw. [km/h]	Fahrtzeit [h]	FC [g/km]	PM [g/km]	NO _x [g/km]	CO [g/km]	HC [g/km]
	1	2	3	4	5	6	7	8
02-20	-	-	-	-	-	-	-	-
02-21	-0,15 %	-0,07 %	-1,08 %	1,02 %	-1,38 %	-0,73 %	-1,89 %	-2,24 %
02-23	-	-	-	-	-	-	-	-
02-24	0,16 %	0,23 %	-2,26 %	2,54 %	2,22 %	2,30 %	2,00 %	2,21 %
02-25	0,08 %	0,21 %	2,46 %	-2,20 %	-1,89 %	-1,35 %	-2,84 %	-4,70 %
13-12	0,33 %	0,35 %	-5,26 %	5,91 %	0,28 %	-0,84 %	-0,11 %	-1,49 %
13-10	0,22 %	0,12 %	-0,51 %	0,63 %	-0,19 %	-0,24 %	0,09 %	-0,06 %
13-08	-0,67 %	0,06 %	-3,79 %	4,00 %	2,23 %	2,76 %	2,71 %	8,25 %
13-07	-0,41 %	-0,21 %	1,57 %	-1,76 %	-0,24 %	-0,25 %	-0,01 %	0,43 %
13-06	-2,20 %	-2,72 %	-0,73 %	-2,01 %	-1,00 %	-1,56 %	-1,99 %	-5,04 %
Gesamt	-0,21 %	-0,09 %	-0,93 %	0,85 %	-0,17 %	-0,16 %	-0,62 %	-1,03 %

Tab. 7-16: Wirkungen der verkehrsadaptiven Steuerung (Mit-Fall) im Vergleich zur konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall), Bismarckstraße, Fahrtrichtung Süd, 15:30-17:30 Uhr (nur für den Verkehr in der koordinierten Hauptrichtung)

positiven Umweltwirkungen der verkehrsadaptiven Steuerung, wenn auch nur in geringem Ausmaß. Die mittleren Geschwindigkeiten liegen im Mit-Fall ebenfalls nur geringfügig über dem Ohne-Fall. In Fahrtrichtung Süd traten in allen Bereichen geringere Veränderungen auf im Vergleich zur Gegenrichtung. Zweistellige prozentuale Veränderungen konnten im Gegensatz zur Gegenrichtung für keinen Abschnitt verzeichnet werden. Die verkehrlichen Kenngrößen in den Spalten 1 bis 3 veränderten sich nur geringfügig. Trotz einer Abnahme des Geschwindigkeitsniveaus konnten in der Summe positive Einflüsse auf die Emissionsentwicklung (Spalten 5 bis 8) durch die adaptive Steuerung festgestellt werden.

Die Werte aus Tabelle 7-15 und Tabelle 7-16 sind zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten der Emissionen von den verkehrlichen Größen in Bild 7-5 grafisch

aufbereitet. Jedes Diagramm zeigt die Änderungen eines Schadstoffs sowie des Kraftstoffverbrauchs in Zusammenhang mit den Änderungen einer untersuchten verkehrlichen Kenngröße. Analog zum Albersloher Weg (vgl. Bild 7-1) ist auch auf diesem Streckenzug die Änderung der Geschwindigkeit mit der Entwicklung der Emissionen vergleichbar, sowohl hinsichtlich der Größenordnung als auch des Verlaufs. Allerdings schwanken die Ergebnisse auf diesem Streckenzug deutlich stärker (-60 % bis +30 %). Der Performance-Index und die Fahrleistung erweisen sich in dieser Betrachtung ebenfalls wieder als ungeeignet aufgrund des fehlenden Zusammenhangs zwischen den Änderungen der Emissionen und der verkehrlichen Kenngrößen.

In Bild 7-6 sind die Veränderungen der Schadstoffe getrennt voneinander in jeweils einem Diagramm dargestellt. Für große Geschwindigkeitsverände-

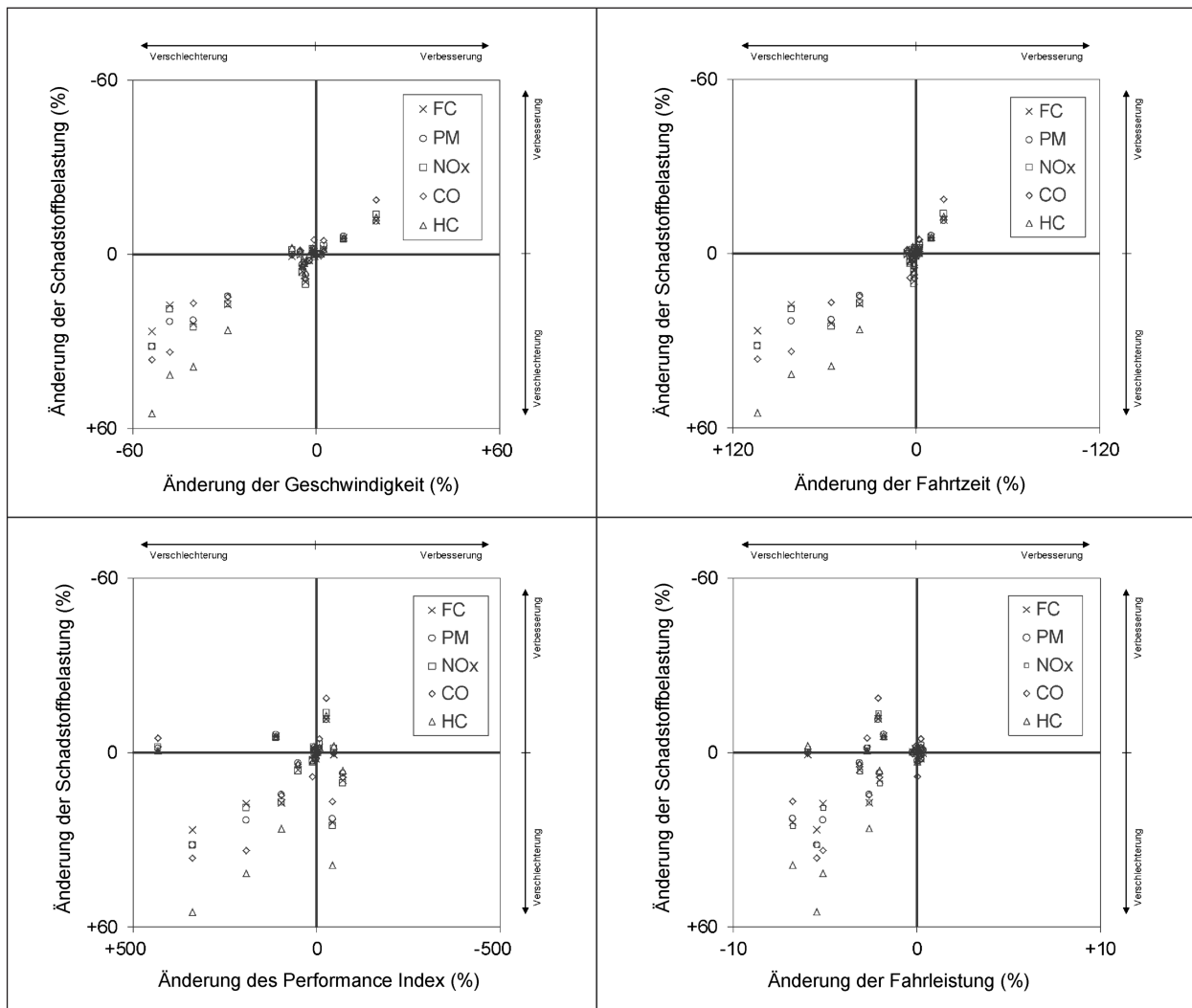


Bild 7-5: Umweltwirkungen der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) in Abhängigkeit von den untersuchten verkehrlichen Wirkungen (Bismarckstraße, 15:30-17:30 Uhr)

lungen über $\pm 10\%$ fallen die Emissionsveränderung ebenfalls deutlich aus. Für die Bereiche mit steht einer Geschwindigkeitszunahme eine deutli-

che Senkung der Emissionen gegenüber. Genauso ergab eine Abnahme der Geschwindigkeit eine Verschlechterung hinsichtlich der Emissionen. Mit zu-

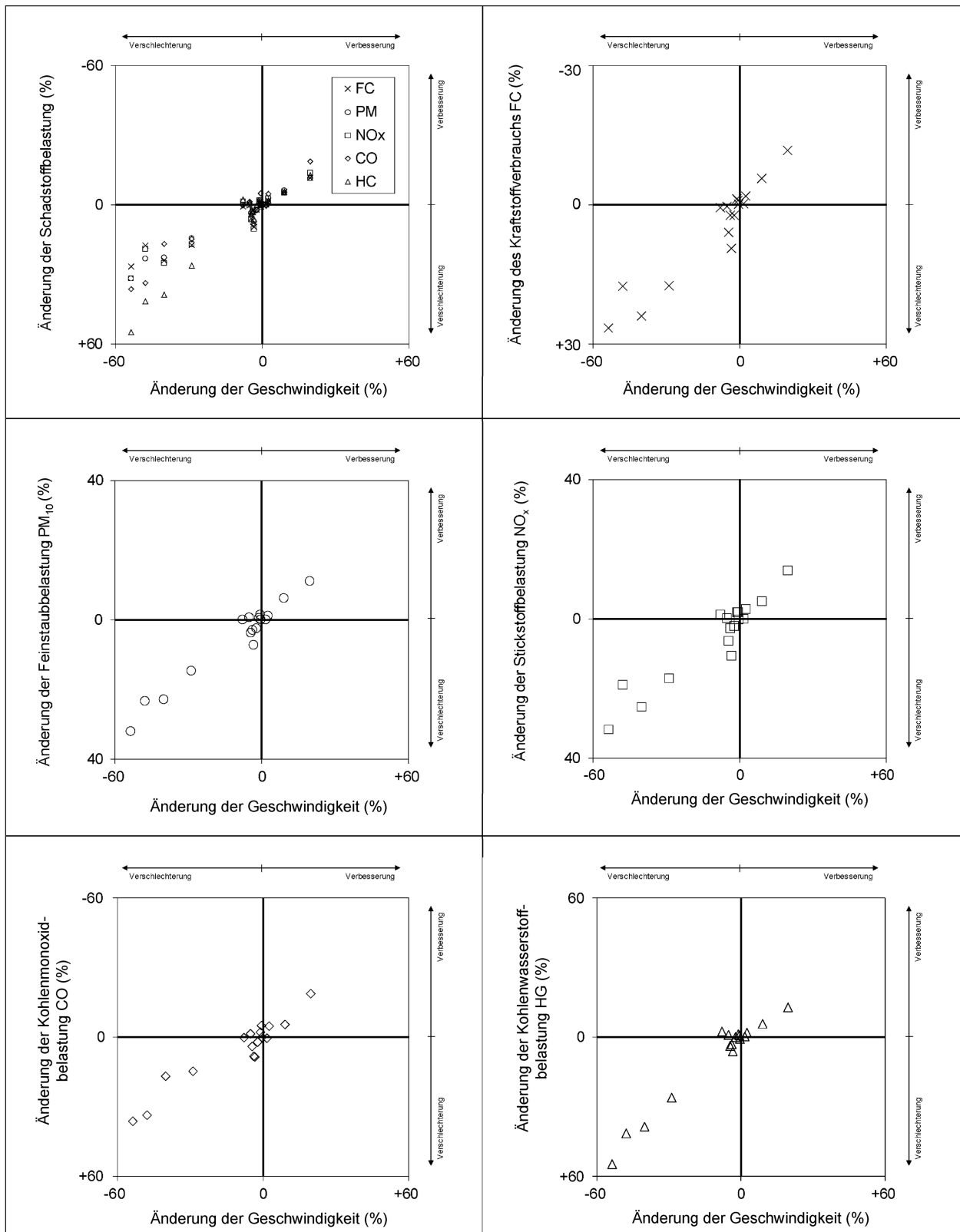


Bild 7-6: Umweltwirkungen der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit (Bismarckstraße, 15:30-17:30 Uhr)

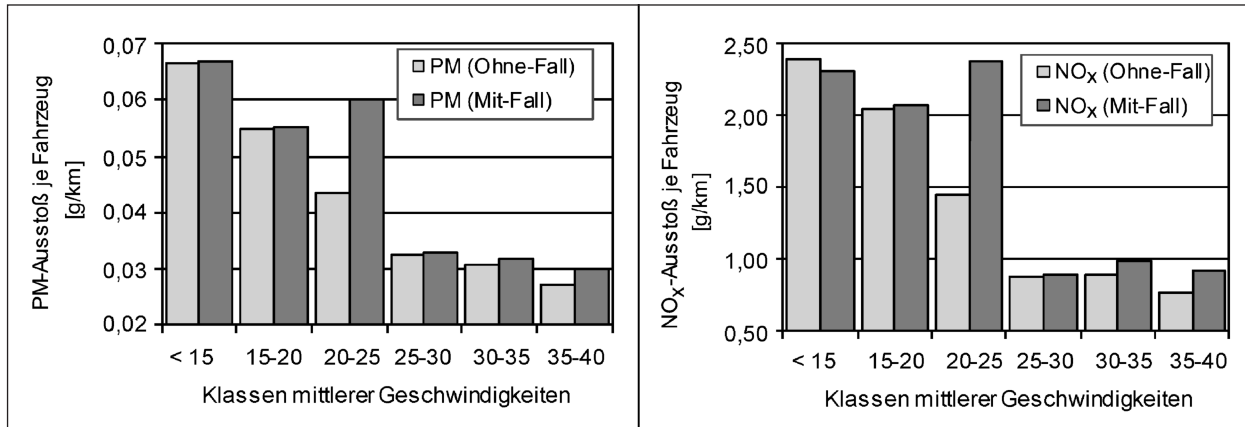


Bild 7-7: PM- (links) und NO_x-Emissionen (rechts) mit adaptiver Steuerung (Mit-Fall) und konventionell verkehrsabhängiger Steuerung (Ohne-Fall) beider Fahrtrichtungen für Geschwindigkeitsklassen (Bismarckstraße, 15:30-17:30 Uhr)

nehmender Änderung der Geschwindigkeit wird auch die Streuung der Emissionsgrößen größer (vgl. Bild 7-6, oben links). Ähnlich wie für den Albersloher Weg kann für den Bereich mit Änderungen zwischen -10 % bis +10 % keine eindeutige Entwicklungsrichtung der Emissionen festgestellt werden (vgl. Bild 7-2).

In Bild 7-7 sind die Feinstaub- (links) und NO_x-Belastungen (rechts) für unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen im Mit- und Ohne-Fall dargestellt. Die geringsten Emissionen ergaben sich in der Klasse mit Geschwindigkeiten zwischen 35 und 40 km/h. Lediglich für Geschwindigkeiten unter 15 km/h verringerten sich die NO_x-Emissionen im Mit-Fall. In allen anderen Klassen ergaben sich Verschlechterungen im Mit-Fall, insbesondere in der Klasse mit Geschwindigkeiten zwischen 20 und 25 km/h. Der Grund für die deutlichen Verschlechterungen im Mit-Fall für die Klasse von 20 und 25 km/h erschließt sich aus der folgenden Darstellung. In Bild 7-8 sind die Änderung der Schadstoffe NO_x und PM₁₀ nach Abschnitten in Zusammenhang mit den erreichten mittleren Geschwindigkeiten im Mit- und Ohne-Fall dargestellt. Das Diagramm in Bild 7-8, oben zeigt die Abschnitte der Fahrtrichtung Nord und das Diagramm unten die Abschnitte der Fahrtrichtung Süd. Die hohen Geschwindigkeitsrückgänge in Fahrtrichtung Nord (Bild 7-8, oben) lassen allerdings auf Probleme in der Simulation in Verbindung mit der adaptiven Steuerung schließen. Die Ergebnisse aus Kapitel 7.4.2 (vgl. Tabelle 7-10) ergaben im Mit-Fall eine geringere Verschlechterung in Fahrtrichtung Nord als in Fahrtrichtung Süd. Der Auswertung

lagen fünf Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen zugrunde. Aus diesen fünf Läufen wurden die beiden Simulationsläufe mit den geringsten Abweichungen – hinsichtlich der empirischen Ergebnisse – ausgewählt. Für die Ermittlung der Eingangsgrößen der PHEM-Berechnungen wurden die beiden Simulationsläufe unverändert wiederholt. Entgegen den Ergebnissen aus Kapitel 7.4.2 treten für die beiden Simulationsläufe in Fahrtrichtung Nord hinsichtlich der Emissionen größere Verschlechterungen ein als in entgegengesetzter Richtung. Auch die verkehrliche Bewertung der Simulationsläufe mit dem PI ergibt mit +15 % eine insgesamt deutlichere Verschlechterung mit adaptiver Steuerung als in Kapitel 7.4.2 (+3,1 %, vgl. Tabelle 7-9). Demzufolge besteht die Möglichkeit, dass die BALANCE-Optimierung nicht immer zu gleichen Steuerungseinstellungen für gleiche Verkehrszustände führt. Die Ursache dafür konnte nicht abschließend festgestellt werden. Die Ergebnisse der Simulationsläufe mit adaptiver Steuerung ergaben jedoch deutlich größere Streuungen als die der Simulationen mit konventionell verkehrsabhängiger Steuerung.

Die hier dargestellten PHEM-Ergebnisse beziehen sich auf alle Fahrzeugklassen in der Simulation (Pkw, Lkw, Bus). Die nach Fahrzeugklassen getrennten Ergebnisse befinden sich in Anhang C.2 (vgl. Bilder C.2-1 bis C.2-24). Die den Vergleichen zugrunde liegenden Berechnungsergebnisse mit PHEM sind Anhang C.2 (vgl. Tabelle C.2-1 bis C.2-4) zu entnehmen.

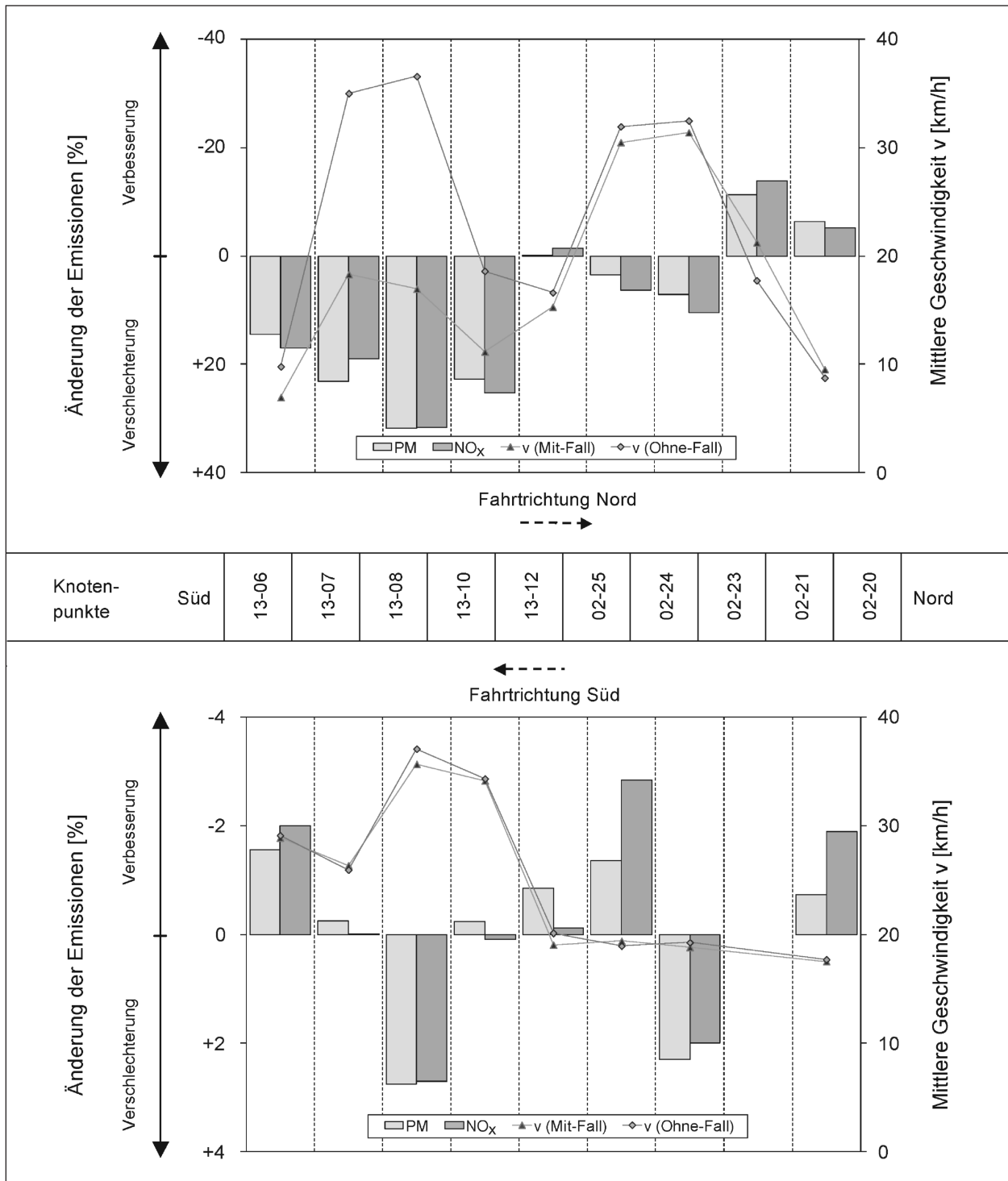


Bild 7-8: Abschnittsweise Wirkung der adaptiven Steuerung (Mit-Fall) auf die PM- und NO_x-Emissionen gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung (Ohne-Fall) und Vergleich der erreichten mittleren Geschwindigkeiten, Bismarckstraße, 15:30-17:30 Uhr, oben: Fahrrichtung Nord, unten: Fahrrichtung Süd

8 Zusammenfassung

Die Einhaltung der Grenzwerte für Luftschadstoffe stellt insbesondere die Städte in Ballungsgebieten vor eine immer größere Herausforderung. Auch die Einführung neuer Euro-Abgasnormen und die Einrichtung von Umweltzonen konnten bisher nicht verhindern, dass weiterhin vielerorts die Grenzwerte überschritten werden.

In städtischen Gebieten, bei denen die Belastungen durch Feinstaub und Stickstoffdioxid besonders hoch sind, ist vor allem der Straßenverkehr eine bedeutende Emissionsquelle. Der Feinstaub gelangt dabei nicht ausschließlich aus den Fahrzeugmotoren in die Luft, sondern zusätzlich durch den Reifen- und Bremsenabrieb und die Staubaufwirbelungen von der Straßenoberfläche. Ein flüssigerer Verkehrsablauf mit weniger Halten, Anfahr- und Bremsvorgängen ist für die Minderung verkehrsbedingter Emissionen sinnvoll. Bei der Entwicklung effizienter Lichtsignalsteuerungen werden in den letzten Jahren modellbasierte Steuerungen in der Praxis propagiert. In Deutschland sind dies vor allem die Steuerungsverfahren MOTION der Firma Siemens AG und BALANCE der Firma GEVAS software GmbH.

In dieser Untersuchung wurden für vier ausgewählte Untersuchungsgebiete, auf denen die in Deutschland gebräuchlichen Steuerungsverfahren in Betrieb sind, empirische Messungen mit der Floating-Car-Methode mit unterschiedlichen Steuerungsvarianten vorgenommen. Bei den zwei ausgewählten Straßenzügen in Münster wurden sowohl die Festzeitsteuerung und die verkehrsabhängige Steuerung als auch die modellbasierte Steuerung MOTION untersucht. In Remscheid wurden die verkehrsabhängige Steuerung und das Steuerungsverfahren BALANCE evaluiert. Bei der anschließenden Auswertung im Hinblick auf die Bewertung der Wirkungen der modellbasierten Steuerungsverfahren wurden die verkehrstechnischen Kenngrößen Fahrzeit, mittlere Fahrgeschwindigkeit und Anzahl der Halte ermittelt. Dabei wurden nicht nur die koordinierten Hauptrichtungen, sondern auf den längeren Straßenzügen in Münster auch unterschiedliche Routen aus Nebenrichtungen befahren.

Die Wirkungen der adaptiven Steuerungen auf den Streckenzügen wurden anhand eines Vorher-/Nachher-Vergleichs dargestellt. Als Bezugsgröße für die Auswertungen der empirischen Messungen dienten dabei jeweils die Ergebnisse der Befahrungen

mit den nach dem aktuellen Stand der Technik erstellten konventionellen Steuerungsvarianten. Damit konnte sichergestellt werden, dass die Wirkungen der adaptiven Steuerungen den tatsächlichen Möglichkeiten der Steuerungsvarianten entsprechen, ohne dass diese durch den Vergleich mit einem bestehenden, eventuell veralteten Steuerungssystem verzerrt werden.

Ursprüngliches Ziel der Untersuchung war es darüber hinaus, durch die Entwicklung optimierter Parametereinstellungen für die adaptiven Steuerungen zur Verringerung der Emissionen und Immissionen im städtischen Straßenverkehrsnetz beizutragen. Zu erreichen ist dies durch eine optimale Gewichtung von Wartezeiten, Standzeiten und Halten der Fahrzeuge unter Berücksichtigung der topologischen und meteorologischen Randbedingungen, mit der darüber hinaus der Kraftstoffverbrauch minimiert werden kann. Aufgrund der Tatsache, dass die Möglichkeiten, seitens der Anwender eigenständig Einstellungen innerhalb der untersuchten Steuerungsverfahren MOTION und BALANCE vorzunehmen, von Seiten der Herstellerfirmen beschränkt sind, musste auf dieses Ziel jedoch verzichtet werden. Um dennoch Aussagen darüber treffen zu können, wie sich die Umstellung der Signalsteuerung auf das verkehrsbedingte Emissionsaufkommen und somit die Immissionsbelastung auswirkt, wurden ergänzend zu den empirischen Messungen mikroskopische Simulationsstudien durchgeführt. Mit den dadurch ermittelten Fahrttrajektorien war es möglich, die Emissionen der Fahrzeuge rechnerisch zu schätzen.

Als Ergebnis lässt sich vorab festhalten, dass die Umsetzung einer modellbasierten Steuerung einen erheblichen Vorbereitungsaufwand hervorruft. So waren auf allen untersuchten Strecken umfangreiche Absprachen und Nachbearbeitungen nötig, bis ein für die Städte akzeptables Qualitätsmaß des Verkehrsablaufs erreicht wurde. Im Laufe der Projektbearbeitung wurde seitens der Signal- und Softwarehersteller an mehreren Stellen nachgebessert, um aufgetretene Schwachstellen zu beseitigen. Als besonderer Problempunkt haben sich in Münster die regelmäßigen Umschaltungen durch die adaptive Netzsteuerung mit den damit verbundenen Störungen in der Systematik der Koordinierung erwiesen. Aufgrund anhaltender Beschwerden der Verkehrsteilnehmer in diesem Zusammenhang wurde die eingeführte modellbasierte Steuerung in Münster an beiden untersuchten Achsen zunächst außer Betrieb genommen, bis ein verbessertes Umschalt-

verfahren vorliegt. Auf diesen Strecken werden die Lichtsignalanlagen seitdem wieder konventionell verkehrsabhängig gesteuert. Zudem wurde deutlich, dass ein Testen der erarbeiteten Steuerung allein in der Simulation nicht unbedingt zu dem beabsichtigten Ergebnis in der Realität führt.

Bei den empirischen Messungen zeigten sich auf keinem der vier untersuchten Straßenzüge eindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Auswirkungen der modellbasierten Steuerungsverfahren auf verkehrliche Kenngrößen. Sowohl bei Betrachtung der Fahrtzeiten als auch der Anzahl der Halte werden auf einzelnen Streckenabschnitten zwar Verbesserungen von bis zu 44 % im Vergleich zur konventionellen LSA-Steuerung beobachtet, andererseits zeigen andere Abschnitte Verschlechterungen von bis zu 62 %. Lediglich die Untersuchungsstrecke Albersloher Weg in Münster zeigt überwiegend positive Ergebnisse mit dem Steuerungsverfahren MOTION. Gerade dieses Beispiel zeigt jedoch, dass es zahlreicher Nachbesserungen bedarf, um das Potenzial der Steuerungssysteme voll auszuschöpfen. Der hohe Zeitaufwand und die im Vergleich zu einem konventionellen Betrieb höheren Investitionskosten lassen den Nutzen jedoch gering erscheinen.

Für die Untersuchungen in der mikroskopischen Simulation wurden die beiden Streckenzüge Albersloher Weg in Münster und Bismarckstraße in Remscheid möglichst genau nachgebildet. Die übrigen beiden Streckenzüge konnten aufgrund technischer Probleme seitens der Herstellerfirmen bei der Umsetzung der Schnittstelle zwischen Steuerungsverfahren und dem mikroskopischen Simulationsprogramm nicht untersucht werden. Für den Vergleich der Steuerungsverfahren auf den Streckenzügen für alle Haupt- und Nebenzufahrten der Knotenpunkte wurde ein Performance-Index verwendet. Die Beurteilung mit dem Performance-Index aus den durchgeführten Simulationen bestätigt die Erkenntnisse aus den empirischen Erhebungen.

Darüber hinaus wurden die Umweltwirkungen der verkehrsadaptiven Steuerungen im Vergleich zur konventionell verkehrsabhängigen Steuerung anhand eines Simulationslaufs je Simulationsnetz und Steuerungsverfahren bewertet. Die Daten der Simulationsläufe wurden in Form von Fahrzeugtrajektorien als Grundlage für die Ermittlung von Emissionen verwendet. Die Berechnung erfolgte am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der TU

Graz mit dem Programm PHEM. Neben den Simulationsdaten aus VISSIM gehen in die Berechnung spezifische Fahrzeugeigenschaften ein. Zur besseren Vergleichbarkeit der Umweltwirkungen der unterschiedlichen Steuerungsverfahren wurden für die Berechnungen den Fahrzeugtypen Pkw, Lkw und Bus jeweils einheitliche Fahrzeugeigenschaften zugewiesen. Zur Beurteilung der Umweltwirkungen wurden die Kenngrößen Kraftstoffverbrauch (FC), Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoff (HC) und Feinstaubpartikel (PM_{10}) ausgewertet. Zusätzlich wurden verkehrliche Größen angegeben, wie die gesamte Fahrleistung und Fahrtzeit aller Fahrzeuge im betrachteten Simulationszeitraum sowie die Verkehrsbelastung. Alle Kenngrößen wurden sowohl für das gesamte Netz als auch für die einzelnen Streckenabschnitte der koordinierten Hauptrichtungen für einen Zeitraum von zwei Simulationsstunden während der Nachmittagsspitze ausgewertet. In der vorliegenden Untersuchung dienten die PHEM-Berechnungen vorrangig der vergleichenden Betrachtung zweier Steuerungsverfahren. Die Absolutwerte werden nur zu Vergleichszwecken herangezogen.

Die PHEM-Ergebnisse zeigten, dass die Emissionen für den Streckenzug Albersloher Weg durch die verkehrsadaptive Steuerung in der netzweiten Betrachtung durchgehend positiv beeinflusst wurden. Die richtungsgetrennte abschnittsweise Auswertung zeigte größtenteils Verbesserungen, jedoch auch Verschlechterungen, insbesondere in der stärker belasteten südlichen Fahrtrichtung. Die Ergebnisse der PHEM-Berechnungen und die verkehrliche Beurteilung der ausgewählten Simulationsläufe mit dem Performance-Index zeigten gleiche Tendenzen. Die für die Beurteilung der Bismarckstraße zugrunde gelegten Simulationsläufe ergaben in verkehrlicher Hinsicht eine leichte Verbesserung des netzweiten Performance-Index mit verkehrsadaptiver Steuerung. So konnten Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß für das gesamte Simulationsnetz mit der verkehrsadaptiven Steuerung gesenkt werden. Fahrtrichtungsbezogen zeigten die Ergebnisse jedoch unterschiedliche Wirkungen der verkehrsadaptiven Steuerung gegenüber der konventionell verkehrsabhängigen Steuerung. In nördlicher Fahrtrichtung zeigte die Bewertung anhand des Performance-Index verkehrliche Verbesserungen um ca. 10 % und damit einhergehend ergab auch die PHEM-Berechnung erwartungsgemäß eine Reduzierung der Emissionen mit verkehrsadaptiver Steuerung. In Gegen-

richtung ergaben sowohl die verkehrliche Bewertung als auch die PHEM-Berechnung Verschlechterungen für die Simulation mit verkehrsadaptiver Steuerung. Die Emissionen stiegen bei gleichbleibender Verkehrsbelastung auf nahezu allen Abschnitten an.

Während des Berechnungsablaufs mit VISSIM in dieser Untersuchung wurde deutlich, dass bereits die Erstellung der Simulationsnetze und vor allem die Vorgehensweise bei der Kalibrierung und Validierung der Modelle auf eine spätere PHEM-Verwendung abzustimmen sind. Da den hier vorgestellten aggregierten PHEM-Berechnungsergebnissen detaillierte Betrachtungen der Einzelfahrzeuge vorangehen, haben die Einstellungen in der Verkehrsflusssimulation sehr großen Einfluss auf das Ergebnis. Dieser Aspekt ist bei der Betrachtung der Ergebnisse und einer Übertragung auf die Realität zu beachten.

Ein wesentlicher Kern der Erkenntnis dieses Projekts liegt darin, dass die adaptiven Steuerungen, die in Deutschland angeboten werden, schon aus rein verkehrstechnischer Sicht keine merkliche Verbesserung gewährleisten und – im Gegenteil – zu erheblichen Verschlechterungen der Verkehrsqualität führen können. Überraschend und bedenklich war insbesondere, dass sich die besonders guten Erfahrungen vom Albersloher Weg nicht für den zweiten Anwendungsfall in Münster wiederholen ließen. Wenn aber schon bei der Betrachtung der verkehrstechnischen Kennwerte keine Qualitätsanhebung erreicht werden konnte, so sind bei den Umweltwirkungen ebenfalls keine Verbesserungen zu erwarten. Trotz dieser kritischen Anmerkungen sind einige Erkenntnisse aus den Begleitumständen des Projekts und aus den hier erarbeiteten Erkenntnissen festzuhalten:

- Die in Deutschland angebotenen adaptiven LSA-Steuerungsverfahren können zu Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Methoden führen. Der Erfolg ist aber keineswegs gewiss. Deswegen ist eine kritiklose Anwendung nicht sinnvoll. Die Erfolge sollten in jedem Einzelfall unbedingt von einer unabhängigen Stelle überprüft werden („Signal-Audit“). Eine erhebliche Weiterentwicklung der Verfahren ist wünschenswert.
- Wenn keine verkehrlichen Verbesserungen erreicht werden, ist auch nicht mit ökologisch positiven Wirkungen zu rechnen.

- Wenn verkehrstechnische Verbesserungen erreicht werden, stellen sich auch ökologisch positive Wirkungen (d. h. Verringerungen) ein. In Prozent gemessen sind diese ökologischen Wirkungen geringer als die verkehrlichen Wirkungen.
- Es gibt keine Anzeichen dafür, dass die verfügbaren adaptiven Steuerungsverfahren im Vergleich zu einer herkömmlichen – gut geplanten – LSA-Steuerung eine deutliche Senkung der Feinstaub- oder NO_x-Emissionen erreichen. Bei sorgfältiger Realisierung des Konzepts einer adaptiven Steuerung lässt sich allenfalls ein begrenzter Beitrag im Rahmen eines umfassenderen Konzepts zur Luftreinhaltung erreichen.
- Um verlässliche Antworten auf die gestellten Fragen zu gewinnen, ist ein außerordentlicher weiterer Untersuchungsaufwand erforderlich. Die hier aufgezeigte Methodik mit der Mikrosimulation in Verbindung mit PHEM kann hierbei auch weiter zum Einsatz kommen.

Abschließend ist festzustellen, dass Verbesserungspotenziale modellbasierter Steuerungsverfahren zu erkennen sind. Diese allerdings hinreichend zu nutzen, führt zu einem hohen Bedarf an Weiterentwicklung dieser Systeme.

Literatur

- BAAß, K.: Ermittlung des optimalen Grünbandes auf Hauptverkehrsstraßen. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 31, Universität Karlsruhe, 1985
- BOLTZE, M.; BUSCH, F.; FRIEDRICH, B.; FRIEDRICH, M.; KOHOUTEK, S.; LÖHNER, H.; LÜßMANN, J.; OTTERSTÄTTER, T.: AMONES: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen. Straßenverkehrstechnik, Heft 05/2011-07/2011, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2011
- BRAUN, R.; KEMPER, C.: GALOP-Online – ein Genetischer Algorithmus zur netzweiten Online-Optimierung der Lichtsignalsteuerung. HEUREKA '08, Optimierung in Verkehr und Transport, Langfassung, 2008
- BRAUN, R.; KEMPER, C.; WEICHENMEIER, F.; MENIG, C.; WEGMANN, J.: TRAVOLUTION – Comparing Different Adaptive Traffic Signal

- Control Optimization Methods – Field Test Results. 15th World Congress on ITS, New York City, 2008
- BRILON, W.; SCHNABEL, W.: Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen. Straßenverkehrstechnik, Heft 01/2003, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2003
- BRILON, W.; WIEBUSCH-WOTHGE, R.: Abschalten des Motors für Lichtsignalanlagen, Auswahlkriterien für technische Einrichtung und Abschätzung des Emissionsminderungspotenzials. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 7, 1988
- BRILON, W.; WIETHOLT, T., WU, N.: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrabhängigen Steuerungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 163, Bergisch Gladbach, 2007
- BRILON, W.; WIETHOLT, T.: Evaluierung (Erfolgskontrolle und Bewertung) der Grünen Wellen im Zuge der Modellachse Albersloher Weg in Münster mittels Reisezeitmessung. Ruhr-Universität Bochum, 2009
- BUCHHOLZ, S.: Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Auswirkungen adaptiver Lichtsignalsteuerung auf die Kfz-Emissionen. Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 2008
- BUWAL: Die Luftschadstoff-Emissionen des Straßenverkehrs 1980-2030. Schriftenreihe Umwelt Nr. 355, BUWAL, Bern, 2004
- DIEGMANN, V.; PFÄFFLIN, F.; WIEGAND, G.; WURSTHORN, H.: Maßnahmen zur Reduzierung von Feinstaub und Stickoxid. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Text 22/07, 2007
- DONATI, F.; MAURO, V.; RONCOLINI, G.; VALLAURI, M.: A Hierarchical Decentralized Traffic Light Control System. IFAC 9th World Congr., Vol. II, International Federation of Automatic Control, Budapest, 1984
- EICHLSEDER, H.: Emissionsproblematik von Straßenfahrzeugen. Skriptum des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, 2003
- EICHLSEDER, H.; LUZ, R.; HAUSBERGER, S.: PHEM – Passenger Car and Heavy Duty Emission Model, User Guide for Version 10. TU Graz, 2010
- EU-Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen, 2007
- FGSV: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 1997
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 2005
- FGSV: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 2006
- FGSV: Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 2010
- FREY, H. C.; UNAL, A.; CHEN, J.; LI, S.; XUAN, C.: Methodology for Developing Modal Emission Rates for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle & Equipment Emission System. EPA 420-R-02-027, North Carolina State University, Ann Arbor, 2002
- FRIEDRICH, B.; WRIGHT, T.; MERTZ, J.; TOOMEY, C.; McLEAN, C.; BRADER, C.; FRAYNE, B.: Schlussbericht zum Forschungsprojekt TABASCO – TR 1054 – UTC with PT Priority: Report on User Needs, Functional Specifications and Demonstrators. European Commission, Brüssel, 1998
- FRIEDRICH, B.: Ein verkehradaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen. Dissertation, Schriftenreihe des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München, 1999
- FRIEDRICH, B.: Steuerung von Lichtsignalanlagen: BALANCE – ein neuer Ansatz. Straßenverkehrstechnik, Heft 7/2000, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2000
- GARTNER, N. H.: OPAC: Development of Demand-Responsive Strategy for Urban Traffic

- Control. Transportation Research Record 75-81, Transportation Research Board, 1983
- GARTNER, N. H.; STAMATIADIS, C.; TARNOFF, P. J.: Development of Advanced Traffic Signal Control Strategies for Intelligent Transportation Systems: Multilevel Design. Transportation Research Record 1494, Transportation Research Board, 1995
- HAUSBERGER, S.: Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions. Habilitationsschrift, Technische Universität Graz, 2002
- HBEFA: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1. Dokumentation, UBA Berlin, BUWAL Bern, UBA Wien (Hrsg.), 2004
- HICKS, B.; CARTER, M.: What have we learned about intelligent transportation systems? – Arterial Management. US Department of Transportation/Federal Highway Administration, 2000
- HIRSCHMANN, K.; FELLENDORF, M.: Emission minimizing traffic control – simulation and measurements. mobil.TUM 2009 International Scientific Conference on Mobility and Transport, München, 2009
- HIRSCHMANN, K.; ZALLINGER, M.; FELLENDORF, M.; HAUSBERGER, S.; MÜCK, J.: Endbericht GAVE – Grazer Adaptive Verkehrssteuerung“, I2-Intelligente Infrastruktur. Leitprojekt „MOBILE – Übergreifendes Verkehrsmanagement“, Graz, 2009
- HUNGER, D.; FIEDLER, F.; HUNGER, M.; BECKER, U. J.; RICHTER, F.: Verbesserung der Umweltqualität in Kommunen durch geschwindigkeitsbeeinflussende Maßnahmen auf Hauptverkehrsstraßen. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, Text 09/07, 2007
- HUNT, P. B.; ROBERTSON, D. I.; BRETHERTON, R. D.; WINTON, R. I.: SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 1014, Crowthorne, 1981
- IFEU: Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, 2010
- JIMINEZ, J. L.: Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing. Massachusetts Institute of Technology, 1999
- KOCH, O.: Innovative Verkehrssteuerung in Hamburg. Fachbeitrag, VSVI-Informationen, S. 46-52, 2006
- KRUSE, G.: COSMOS – Results of the MOTION Demonstrator for Congestion and Incident Management Strategies in Piraeus. Trafikdage, Aalborg, Dänemark, 1999
- KNUDSEN, T. A.; BÄCKER HANSER, P.; VARBERG, N.: MOTION I Valby – adaptivt-signalstyresystem. Trafikdage, Aalborg, Dänemark, 2001
- LANUV: Internetauftritt des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, 2008(a)
- LANUV: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW: Luftqualitätsmessung mit Passivsammlern, LANUV-Information, 2008(b)
- MARLIS: Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft in Bezug auf Immissionen an Straßen, Datenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2006
- MERTZ, J.: Abschlussbericht Munich COMFORT. Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München, 1996
- MERTZ, J.: Ein mikroskopisches Verfahren zur verkehrsadaptiven Knotenpunktsteuerung mit Vorrang des öffentlichen Verkehrs. Dissertation, Veröffentlichung des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, TU München, 2001
- MILLER, A. J.: A computer control system for traffic network. Proc., 2nd Int. Symp. on Theory of Road Traffic Flow, London, pp. 201-220, 1963
- MLuS: Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrstechnik, FGSV-Verlag GmbH, Ausgabe 2002, geänderte Fassung 2005
- MÜCK, J.: Neue Schätz- und Optimierungsverfahren für Adaptive Netzsteuerungen. Straßenverkehrstechnik, Heft 12/2008, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2008
- OAK Ridge National Laboratory: ITS deployment tracking database, 1999

- PEARSON, R.: Traffic Signal Control. Institute of Transportation Studies at the University of California at Berkeley and Caltrans, 2003
- PTV: VISSIM 5.10, Benutzerhandbuch. Karlsruhe, 2008
- RAKHA, H.; van AERDE, M.; AHN, K.; TRANI, A.: Requirements for Evaluating Traffic Signal Control Impacts on Energy and Emission Based on Instantaneous Speed and Acceleration Measurements. Transportation Research Board, 79th Annual Meeting, Paper No. 00-1134, Washington D. C., 2000
- RICHARD, J.: Konzepte zur Minderung von Lärm, Luftbelastungen und CO₂ in Städten. Straßenverkehrstechnik, Heft 11/2010, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2010
- ROBERTSON, D. I.: 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
- SCATS: The Sidney Coordinated Adaptive Traffic System. Three papers presented at the international conference on road traffic signalling, London, 1982
- SCHNABEL, W.; LÄTZSCH, L.; BRÜCKNER, N.: Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr. Straßenverkehrstechnik, Heft 12/2001, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2001
- Stadt Münster: Öffentliche Berichtsvorlage: Erneuerung der LSA-Achsen und Verkehrssicherheitsmaßnahmen. Amt für Stadtentwicklung, Stadtplanung, Verkehrsplanung, Münster, 2011
- STEIERWALD, M.; MARTENS, S.: Steuerung kommunaler Verkehrsnetze. Ergebnisse der Tagung des Themenbereichs Verkehr und Raumstruktur, Arbeitsbericht Nr. 236, Akademie für Technikfolgenabschätzung, Stuttgart, 2003
- UK Highway Agency: Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 12, Section 2, Part 1, Office of Official Publications, Richmons, Surrey, United Kingdom, 1996
- Umweltbundesamt: Schaubilder zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen in Deutschland 1990-2007, Dessau-Roßlau, 2009
- UNAL, A.; ROUPHAIL, N.; FREY, C.: Effect of Signalization and Level of Service on Measured Vehicle Emissions. Transportation Research Board, 82nd Annual Meeting, Paper No. 03-2884, Washington D. C., 2003
- VDI: Umweltmeteorologie – Kfz-Emissionsbestimmung – Luftbeimengungen. Richtlinie des VDI, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN-Normenausschuss KRdL (Hrsg.), 2003
- ZACKOR, H.; BUSCH, F.; HÖPFL, W.: Entwicklung eines Verfahrens zur adaptiven koordinierten Steuerung von Lichtsignalanlagen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn, 1999

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2008

- V 165: Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM₁₀-Emissionen von Straßen
Quass, John, Beyer, Lindermann, Kuhlbusch, Hirner, Sulkowski, Sulkowski, Hippler € 14,50
- V 166: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 26,00
- V 167: Schadstoffe von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung
Kocher, Brose, Siebertz € 14,50
- V 168: Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit
Frost, Schulze € 15,50
- V 169: Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen
Wermuth, Wulff € 15,50
- V 170: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen
Roos, Zimmermann, Riffel, Cypra € 16,50
- V 171: Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)
Weinert, Vengels € 17,50
- V 172: Luftschadstoffe an BAB 2007
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 173: Bewertungshintergrund für die Verfahren zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offenerporiger Straßenbeläge
Altreuther, Beckenbauer, Männel € 13,00
- V 174: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Düring, Lohmeyer, Moldenhauer, Knörr, Kutzner, Becker, Richter, Schmidt € 29,00
- V 175: Maßnahmen gegen die psychischen Belastungen des Personals des Straßenbetriebsdienstes
Fastenmeier, Eggerdinger, Goldstein € 14,50
- ## 2009
- V 176: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw
Schulze, Hübel € 13,00
- V 177: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A24
Lerner, Hegewald, Löhe, Velling € 13,50
- V 178: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen € 26,00
- V 179: Straßenverkehrszählung 2005: Methodik
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,50
- V 180: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn

- V 181: Voraussetzungen für dynamische Wegweisung mit integrierten Stau- und Reisezeitinformationen
Hülsemann, Krems, Henning, Thiemer € 18,50
- V 182: Verkehrsqualitätsstufenkonzepte für Hauptverkehrsstraßen mit straßenbündigen Stadt-/Straßenbahnkörpern
Sümmermann, Lank, Steinauer, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen € 17,00
- V 183: Bewertungsverfahren für Verkehrs- und Verbindungsqualitäten von Hauptverkehrsstraßen
Lank, Sümmermann, Steinauer, Baur, Kemper, Probst, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen, Jachtmann, Hebel € 24,00
- V 184: Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern
Alrutz, Bohle, Müller, Prahlow, Hacke, Lohmann € 19,00
- V 185: Möglichkeiten zur schnelleren Umsetzung und Priorisierung straßenbaulicher Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit
Gerlach, Kesting, Thiemeyer € 16,00
- V 186: Beurteilung der Streustoffverteilung im Winterdienst
Badelt, Moritz € 17,00
- V 187: Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes
Kirschfink, Aretz € 16,50

2010

- V 188: Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb
Kocher, Brose, Feix, Görg, Peters, Schenker € 14,00
- V 189: Einfluss von verkehrsberuhigenden Maßnahmen auf die PM₁₀-Belastung an Straßen
Düring, Lohmeyer, Pöschke, Ahrens, Bartz, Wittwer, Becker, Richter, Schmidt, Kupiainen, Pirjola, Stojiljkovic, Malinen, Portin € 16,50
- V 190: Entwicklung besonderer Fahrbahnbeläge zur Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Lank, Steinauer, Busen € 29,50
- V 191: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2008
Fitschen, Nordmann € 27,00
Dieser Bericht ist als Buch und als CD erhältlich oder kann ferner als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
- V 192: Anprall von Pkw unter großen Winkeln gegen Fahrzeugrückhaltesysteme
Gärtner, Egelhaaf € 14,00
- V 193: Anprallversuche an motorradfahrerfreundlichen Schutzeinrichtungen
Klöckner € 14,50
- V 194: Einbindung städtischer Verkehrsinformationen in ein regionales Verkehrsmanagement
Ansorge, Kirschfink, von der Ruhren, Hebel, Johanning € 16,50
- V 195: Abwasserbehandlung an PWC-Anlagen
Londong, Meyer € 29,50
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
- V 196: Sicherheitsrelevante Aspekte der Straßenplanung
Bark, Kutschera, Baier, Klemps-Kohnen € 16,00
- V 197: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2008
Lensing € 16,50
- V 198: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2005/2006
Kocher, Brose, Chlubek, Karagüzel, Klein, Siebertz € 14,50
- V 199: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2006/2007
Kocher, Brose, Chlubek, Görg, Klein, Siebertz € 14,00

- V 200: Ermittlung von Standarts für anforderungsgerechte Datenqualität bei Verkehrserhebungen
Bäumer, Hautzinger, Kathmann, Schmitz,
Sommer, Wermuth € 18,00
- V 201: Quantifizierung der Sicherheitswirkungen verschiedener Bau-, Gestaltungs- und Betriebsformen auf Landstraßen
Vieten, Dohmen, Dürhager, Legge € 16,00

2011

- V 202: Einfluss innerörtlicher Grünflächen und Wasserflächen auf die PM₁₀-Belastung
Endlicher, Langner, Dannenmeier, Fiedler, Herrmann,
Ohmer, Dalter, Kull, Gebhardt, Hartmann € 16,00
- V 203: Bewertung von Ortsumgehungen aus Sicht der Verkehrssicherheit
Dohmen, Vieten, Kesting, Dürhager, Funke-Akbiyik € 16,50
- V 204: Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM₁₀-Belastung
Bracke, Reznik, Mölleken, Berteil, Schmidt € 22,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
- V 205: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2009
Fitschen, Nordmann € 27,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
- V 206: Sicherheitspotenzialkarten für Bundesstraßen nach den ESN
Färber, Lerner, Pöppel-Decker € 14,50
- V 207: Gestaltung von Notöffnungen in transportablen Schutzeinrichtungen
Becker € 16,00
- V 208: Fahrbahnquerschnitte in baulichen Engstellen von Ortsdurchfahrten
Gerlach, Breidenbach, Rudolph, Huber, Brosch, Kesting € 17,50
- V 209: Stoffeintrag in Straßenrandböden - Messzeitraum 2008/2009
Beer, Surkus, Kocher € 14,50

2012

- V 210: Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (RQ 21)
Maier, Berger € 18,50
- V 211: Innliegende Linkseinfädungsstreifen an plangleichen Knotenpunkten innerorts und im Vorfeld bebauter Gebiete
Richter, Neumann, Zierke, Seebo € 17,00
- V 212: Anlagenkonzeption für Meistereigehöfte – Optimierung von Arbeitsabläufen
Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00
- V 213: Quantifizierung von Verkehrsverlagerungen durch Baustellen an BAB
Laffont, Mahmoudi, Dohmen, Funke-Akbiyik, Vieten € 18,00
- V 214: Vernetzungseignung von Brücken im Bereich von Lebensraumkorridoren
Schmellekamp, Tegethof
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 215: Stauprävention auf BAB im Winter
Kirschfink, Poschmann, Zobel, Schedler € 17,00
- V 216: Verbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen (AOSI)
Lippold, Weise, Jährig € 17,50
- V 217: Verbesserung der Bedingungen für Fußgänger an Lichtsignalanlagen
Alrutz, Bachmann, Rudert, Angenendt, Blase, Fohlmeister, Häckelmann € 18,50

- V 218: Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen
Hausmann € 16,00
- V 219: Bewältigung großer Verkehrsmengen auf Autobahnen im Winter
Roos, Zimmermann, Schulz, Riffel € 16,50

2013

- V 220: Maßnahmen zur Bewältigung der besonderen psychischen Belastung des Straßenbetriebsdienstpersonals – Pilotstudie
Pöpping, Pollack, Müller € 16,00
- V 221: Bemessungsverkehrsstärken auf einbahnigen Landstraßen
Arnold, Kluth, Ziegler, Thomas € 18,50
- V 222: Aktualisierung des MLuS 02 – Erstellung der RLuS
Düring, Flassak, Nitzsche, Sörgel, Dünnebeil, Rehberger € 19,50
- V 223: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2010
Fitschen, Nordmann € 16,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
- V 224: Prüfung und Bewertung von Schutzeinrichtungen der Aufenthaltstufe H4b für den Einsatz auf Brücken – Teil 1 und 2
Bergerhausen, Klostermeier, Klöckner, Kübler € 19,00
- V 225: Neue Technik für den Straßenbetriebsdienst – Teil 1: Neue Informations- und Kommunikationstechniken
Teil 2: Autonomes Fahren für den Straßenbetriebsdienst
Holldorb, Häusler, Träger € 21,50
- V 226: Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Landstraßen
Maier, Berger, Schüller, Heine € 18,00
- V 227: Radpotenziale im Stadtverkehr
Baier, Schuckließ, Jachtmann, Diegmann, Mahlau, Gässler € 17,00
- V 228: Sicherheitskenngrößen für den Radverkehr
Baier, Göbbels, Klemps-Kohnen € 15,50
- V 229: Straßenverkehrszählungen (SVZ) mit mobilen Mess-Systemen
Schmidt, Frenken, Hellebrandt, Regniet, Mahmoudi € 20,50
- V 230: Verkehrsadaptive Netzsteuerungen
Hohmann, Giuliani, Wietholt € 16,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.