

AMONES: Anwendung und Analyse modellbasierter Netzsteuerungsverfahren in städtischen Straßennetzen – Teil 2: Analyse und Ergebnisse

Verfasseranschriften:
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Boltze,
 boltze@verkehr.tu-darmstadt.de,
 Dipl.-Ing. S. Kohoutek,
 kohoutek@verkehr.tu-darmstadt.de,
 Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Petersenstraße 30, 64287 Darmstadt;
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Busch,
 fritz.busch@tum.de,
 Dipl.-Ing. J. Lüßmann,
 jonas.luessmann@vt.bv.tum.de,
 Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Arcisstraße 21, 80333 München;
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Friedrich,
 friedrich@tu-braunschweig.de,
 Dipl.-Inform. H. Löhner,
 h.loehner@tu-braunschweig.de,
 Technische Universität Braunschweig, Institut für Verkehr und Staudbauwesen, Rebenring 31, 38106 Braunschweig;
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Friedrich,
 markus.friedrich@isv.uni-stuttgart.de,
 Dipl.-Ing. T. Otterstätter,
 thomas.otterstaetter@isv.uni-stuttgart.de,
 Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart

Manfred Boltze, Fritz Busch, Bernhard Friedrich, Markus Friedrich, Sven Kohoutek, Holger Löhner, Jonas Lüßmann und Thomas Otterstätter

Modellbasierte Netzsteuerungsverfahren sind bis jetzt in Deutschland nicht weit verbreitet. Die wesentlichen Hemmnisse für eine breite Umsetzung der Verfahren sind die Schnittstellenproblematik und die damit verbundenen hohen Investitionskosten sowie unzureichende Kenntnisse über die erzielbaren verkehrlichen und umweltbezogenen Wirkungen. Hier setzt das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderte Forschungsvorhaben AMONES an. Durch umfassende empirische Untersuchungen in zwei städtischen Testfeldern und ergänzende Simulationsstudien soll beantwortet werden, welche verkehrlichen und umweltbezogenen Vorteile und Wirkungen gegenüber den klassischen verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren nachweisbar sind und welche Methoden sich zur Wirkungsermittlung eignen. Der erste Teil der dreiteiligen Veröffentlichung enthält einen Überblick über verschiedene LSA-Steuerungsverfahren. Es werden die Funktionsweise modellbasierter Steuerungen und die im Rahmen des Projekts verwendeten Erhebungs- und Analysemethoden erläutert. Der zweite Teil stellt die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen in den Testfeldern Hamburg und Bremerhaven vor. Im dritten und letzten Teil werden die Ergebnisse diskutiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Up to now adaptive traffic signal control systems are not widely spread in Germany. Main obstacles for a wider propagation are interface problems and high investment costs, as well as insufficient knowledge regarding the benefits for traffic flow and environmental impacts. These are the core issues of the research project AMONES funded by the Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development. Comprehensive empirical studies in two urban test fields and complementary simulation studies shall clarify which traffic and environment related benefits and impacts can be identified compared to conventional traffic dependent signal control systems and which methods are suitable for the evaluation of impacts. The first part of the three-part publication contains an overview of different methods for signal control focusing on the functionality of adaptive traffic signal control systems. It describes the survey and analysis methods applied in the project. The second part presents the results of the empirical studies in the test fields Hamburg and Bremerhaven. In the third and last part the results are discussed and recommendations are derived.

Mit diesem Teil 2 wird der Beitrag fortgesetzt, dessen Teil 1 im Heft 5/2011 dieser Zeitschrift erschienen ist.

4 Testfelder und Ergebnisse

4.1 Hamburg

4.1.1 Beschreibung des Testfeldes

Das Hamburger Testfeld liegt im Stadtteil Barmbek und besteht aus drei Straßenzügen von zusammen ca. 6 km Streckenlänge, die ein Dreieck bilden (Bild 7). Die Hauptrelationen verlaufen dabei entlang der Bramfelder Straße (gelb) und der Ha-

bichtstraße (braun), die durchweg zweistreifig sind. In dem Untersuchungsgebiet, das ein Teil der Hamburger adaptiven Netzsteuerung (HANS) mit insgesamt 41 Lichtsignalanlagen ist, befinden sich 13 Lichtsignalanlagen, die seit Ende 2004 mit dem verkehrsadaptiven Netzsteuerungsverfahren BALANCE gesteuert werden.

Die zehntägigen Erhebungen wurden in der ersten Juniwoche und der zweiten Oktoberwoche 2008 durchgeführt (von Montag bis Freitag, 6:30 bis 18:30 Uhr). Aufgrund unterschiedlicher BALANCE-Parametersätze wurden vier Steuerungsszenarios untersucht. Dabei fallen drei Tage auf eine Festzeitsteuerung, drei Tage auf

eine lokale regelbasierte Steuerung, und jeweils zwei Tage auf BALANCE mit Juni- bzw. Oktober-Parametersätzen. Diese werden im Folgenden mit „BALANCE PS1“ (Juni) und „BALANCE PS2“ (Oktober) bezeichnet. Im Rahmen der Simulationen wurden darüber hinaus die folgenden Szenarios untersucht:

- Variation der Verkehrsnachfrage,
- Variation der Gewichtungparameter für die Zielfunktion in BALANCE,
- Verwendung eines alternativen Optimierungsverfahrens (genetischer Algorithmus) in BALANCE.

Die für das Testfeld erstellten Luftqualitätspläne weisen für die untersuchten

Schadstoffe einen Handlungsbedarf für die Stadt Hamburg und insbesondere für die Habichtstraße aus [Freie und Hansestadt Hamburg 2004]. Auch der Verursacheranteil des Verkehrs ist hoch (NO_2 : 50 bis 60 %; PM_{10} : 22 %), so dass verkehrliche Maßnahmen ein Verbesserungspotenzial zumindest für NO_2 in einer messbaren Größenordnung erwarten lassen.

4.1.2 Ergebnisse – verkehrliche Kenngrößen

Erhebung

Die vier ANPR-Messstellen (Bild 7) erlauben die Erhebung der Fahrzeiten von zwölf Relationen. Wie die Tabelle 1 zeigt, weisen die Geradeaus-Beziehungen entlang der Bramfelder Straße und der Habichtstraße die höchsten Verkehrsstärken auf.

Die Verkehrsstärken an den relevanten Eingangsquerschnitten des Untersuchungsgebiets liegen in Hamburg zwischen 16.000 und 24.000 Kfz/Tag. Während der Morgen- und der Nachmittagspitze treten regelmäßig Störungen im Verkehrsfluss auf. Das Bild 8 zeigt den Verlauf der mittleren Fahrzeiten differenziert nach Steuerungsverfahren über alle beobachteten Relationen für einen durchschnittlichen Tag.

Wie in der Tabelle 2 dargestellt, zeigen sich zwischen LRS und BALANCE im Verlauf eines gesamten Tages von 6:30 bis 18:30 Uhr keine auffälligen Unterschiede. Werden hingegen nur die Morgenstunden von 6:30 bis 9:30 Uhr betrachtet, schneiden die beiden BALANCE-Verfahren besser ab. Der Verlauf der Kenngrößen im Bild 8 zeigt, dass über die Mittagszeit die lokale regelbasierte Steuerung die besten Kenngrößen aufweist und BALANCE PS2 in der Nachmittagsspitze am besten abschneidet. Die FZS weist im Vergleich die deutlich schlechtesten Kennwerte auf, da dieses Steuerungsverfahren keine Verkehrsströme oder Anforderungen von Fußgängern abrechnen oder überspringen kann. Die Verkehrsnachfrage in der Hauptverkehrszeit überschreitet die Kapazität, so dass das Ausnutzen dieser Eingriffsmöglichkeit mit messbaren Verbesserungen verbunden ist.

Aufgrund der Überlastsituation ist keines der Steuerungsverfahren in der Lage, den deutlichen Anstieg der Fahrzeiten in der Hauptverkehrszeit zu verhindern. Eine Analyse der Fahrzeiten auf den einzelnen Relationen zeigt, dass sich die mittleren Fahrzeiten über alle Relationen für LRS

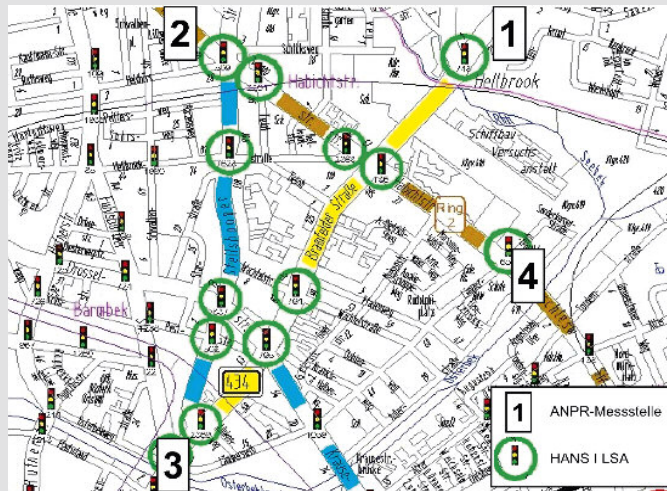


Bild 7: Netzplan Hamburg, Steuerungsgebiet HANS I (Quelle: Stadt Hamburg)

Relation	Abbiegebeziehung	ANPR-Beobachtungen		GPS-Fahrten	
		Gesamt	pro Stunde	Gesamt	pro Stunde
1-2	←	4.478	37	nicht befahren	
1-3	↓	31.817	265	150	1,3
1-4	↘	4.256	35	nicht befahren	
2-1	↑	4.536	38	nicht befahren	
2-3	↙	1.462	12	144	1,2
2-4	→	68.449	570	150	1,3
3-1	↑	32.800	273	141	1,2
3-2	←	1.289	11	141	1,2
3-4	↘	1.381	12	nicht befahren	
4-1	↑	6.015	50	nicht befahren	
4-2	←	47.241	394	147	1,2
4-3	↙	682	6	nicht befahren	

Tabelle 1: Statistik der in Hamburg erhobenen Daten

und BALANCE PS1, aufgrund einer anderen Gewichtung der Parameter der Bewertungsfunktion, deutlich anders zusammensetzen. Demzufolge lässt sich mit BALANCE eine Priorisierung bestimmter Fahrtrichtungen realisieren.

Simulation

Die Ergebnisse der Simulationen können hier nur ausschnittsweise wiedergegeben werden und werden am Beispiel eines Szenarios verdeutlicht, welches in der Spit-

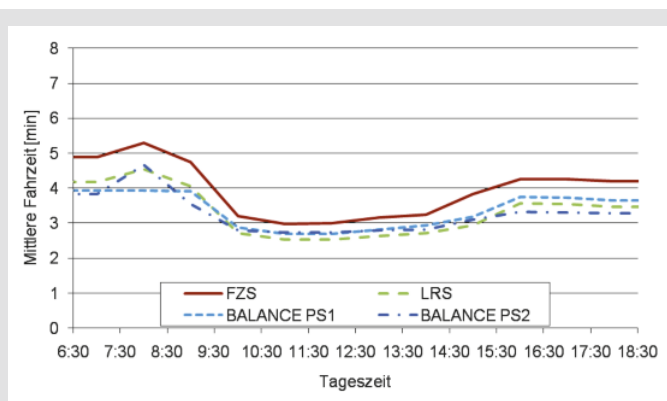


Bild 8: Mittlere Fahrzeiten für einen durchschnittlichen Tag in Hamburg.

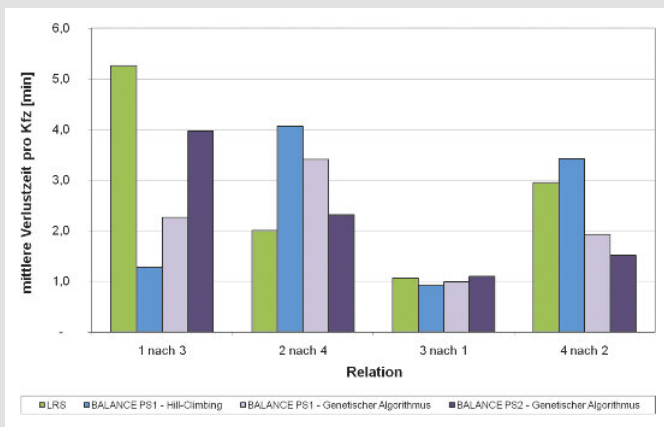
Steuerungsverfahren	6:30 bis 18:30 Uhr		6:30 bis 9:30 Uhr	
	Fahrzeit (LRS = 100)	Anzahl der Halte (LRS = 100)	Fahrzeit (LRS = 100)	Anzahl der Halte (LRS = 100)
Festzeitsteuerung	120	137	117	125
Lokale regelbasierte Steuerung	100	100	100	100
BALANCE PS1	103	103	93	87
BALANCE PS2	100	97	94	92

Tabelle 2: Vergleich der normierten mittleren Kenngrößen Fahrzeit und Anzahl der Halte in Hamburg (Lokale regelbasierte Steuerung LRS = 100)

Tabelle 3: Vergleich der mittleren normierten Verlustzeit pro Kfz im Simulationsszenario (Lokale regelbasierte Steuerung LRS = 100)

Steuerungsverfahren	Mittlere normierte Verlustzeit (LRS = 100) im Szenario, Zeitraum 6:30 bis 9:30 Uhr	
	auf den vier Hauptrelationen	netzweit
Festzeitsteuerung	128	146
Lokale regelbasierte Steuerung	100	100
BALANCE PS1 - Hill-Climbing-Algorithmus	100	106
BALANCE PS1 - Genetischer Algorithmus	82	81
BALANCE PS2 - Genetischer Algorithmus	78	108

Bild 9: Vergleich der mittleren Verlustzeiten pro Kfz auf den vier Hauptrelationen im Simulationsszenario



zenstunde eine um 19 % höhere Nachfrage in der östlichen Zufahrt 4 gegenüber dem Mittelwert der über alle Messstage erhobenen Nachfrage aufweist (weshalb die Ergebnisse nicht direkt mit den Ergebnissen aus der Erhebung vergleichbar sind). In der Simulation wurde der Zeitraum zwischen 6:30 und 9:30 Uhr betrachtet, welcher die morgendliche Spitzenstunde im Wesentlichen einschließt. Wie das Bild 8 zeigt, ist dies auch der Zeitbereich, in dem bei den Messungen die auffälligsten Unterschiede zwischen den einzelnen Steuerungsverfahren auftraten.

Bei Verwendung des aktuell in Hamburg zur Optimierung innerhalb von BALANCE eingesetzten Gradientenverfahrens (Hill-Climbing-Algorithmus) liegen die Verlustzeiten in dem betrachteten Szenario in der Gesamtbetrachtung etwa gleichauf mit denen der LRS. Der im Projekt TRAVOLUTION erstmals zur Optimierung in BALANCE eingesetzte genetische Algorithmus

[Braun et al. 2009] kann dagegen bei geeigneter Parametrierung auch bei der hohen Auslastung in diesem Szenario noch eine deutliche Verringerung der Verlustzeiten bewirken (Tabelle 3).

Die Ergebnisse des hier betrachteten Szenarios belegen außerdem, dass es für eine umfassende Bewertung nicht ausreicht, lediglich einen Teil der Verkehrsströme zu betrachten (Tabelle 3). Während man aufgrund der Daten für die vier Hauptrelationen hier wohl den Parametersatz 2 (PS2) für das Steuerungsverfahren BALANCE favorisieren würde, zeigt die netzweite Betrachtung auf, dass PS1 die bessere Wahl wäre. Wirkungsbetrachtungen für das Gesamtnetz lassen sich nur in Simulationsstudien durchführen.

Je nach Optimierungsverfahren und Parametereinstellung verschiebt BALANCE die auftretenden Verlustzeiten unterschiedlich stark auf die einzelnen Relationen (Bild 9). Dies verdeutlicht die Möglichkeit, dass ein

Planer über geeignete Parametersätze im Sinne des Verkehrsmanagements steuernd eingreifen kann. Leider sind die Auswirkungen der Parametrierung und der daraus resultierenden Optimierung nicht direkt vorhersehbar, so dass sich der Bearbeiter an eine geeignete Lösung herantasten muss. Da sich bei ungeeigneten Parametern auch extreme Verschlechterungen für einzelne Verkehrsströme ergeben können, ist hierzu die Nutzung einer Simulation unbedingt zu empfehlen.

Wie in dem hier dargestellten Szenario kann BALANCE bei bestimmten Parametereinstellungen auch in allen anderen betrachteten Szenarios gegenüber der LRS eine deutliche Verringerung der Verlustzeiten (netzweit um 7 bis 19 %) sowie der Anzahl der Halte (netzweit um 5 bis 16 %) bewirken. Die dazu erforderliche Parametrierung ist jedoch nicht transparent und variiert zwischen den verschiedenen Szenarios. Sie ist daher nicht einfach durchzuführen.

4.1.3 Ergebnisse – umweltbezogene Kenngrößen

Erhebung

Wie im ersten Teil der Veröffentlichung unter 3.2 dargestellt, wurde die Untersuchung differenziert für immissionsbezogene Wirkungen, die sich aus dem Tagesgang der Einflussgrößen ergeben, und für Wirkungen, die aus kurzzeitigen Schwankungen der Einflussgrößen erkennbar sind, untersucht. Erstere werden in der Tabelle 4 als „niederfrequent“ und Letztere als „hochfrequent“ bezeichnet.

Die Modelle zur Quantifizierung der tagesgangbezogenen Wirkungen erklären mehr als 80 % der Varianz des Tagesgangs der betrachteten Schadstoffe. Der relative Standardfehler liegt unter 20 % und damit in einer für die Immissionsmodellierung guten Größenordnung. Die verkehrlichen Prädiktoren der Modelle beziehen sich auf Kenngrößen zur Nachfrage des Schwerverkehrs und teils auch auf Kenngrößen zur Qualität des Verkehrsablaufs. Im NO_x-Modell und im PM_{2,5}-Modell bewirkt ein Anstieg der Schwerverkehrsstärke signifikant höhere Immissionen. Im PM₁₀-Modell sind es die Durchfahrten des Schwerverkehrs. Aufgrund des erhöhten Aufwirbelungspotenzials der großen Partikel bei Durchfahrten und damit einhergehender erhöhter fahrzeuginduzierter Turbulenz erscheint dies grundsätzlich plausibel. Die aufgenommenen meteorologischen Prä-

Tabelle 4: Relevante Kenngrößen für die lokalen Immissionsmodelle im Testfeld Hamburg (die Vorzeichen stehen für die Richtung des Einflusses getrennt nach den beiden Messwochen)

Prädiktorkenngröße	NO _x		PM ₁₀		PM _{2,5}	
	niederfrequent	hochfrequent	niederfrequent	hochfrequent	niederfrequent	hochfrequent
Windgeschwindigkeit	-/-	-/-		-/-		-/-
Windrichtung		/-	/-	/-		/-
Luftdruck	-/-		-/-		-/-	
Luftfeuchte					+/-	
Globalstrahlung	/+					
Ozon-Konzentration	/-					
PM ₁₀ -Hintergrund			+/+		+/+	
SV-Verkehrsstärke	+/+	+/+			+/-	+/+
(SV-)Durchfahrten			/+	/+		
Anfahrvorgänge	+/+	+/+				

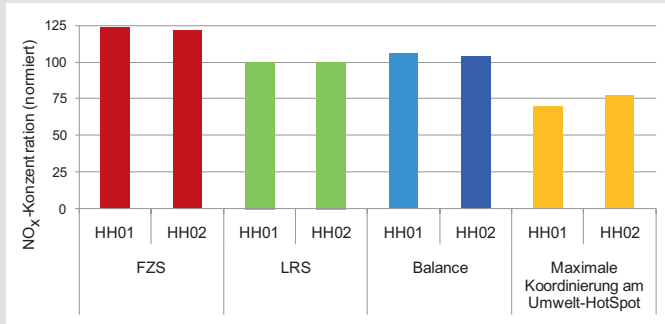


Bild 10: Wirkungen der LSA-Steuerungsverfahren am Messquerschnitt Hamburg Habichtstraße, basierend auf Messungen vom 2.6. bis 6.6.2008 (Messwoche HH01) und vom 6.10. bis 10.6.2008 (Messwoche HH02) und normiert auf die lokale regelbasierte Steuerung (LRS = 100)

diktoren sind fachlich plausibel und weitestgehend konsistent zu den meteorologischen Prädiktoren in den Modellen für das Testfeld Bremerhaven.

Die Modelle zur Quantifizierung der kurzzeitigen Schwankungen erklären im Mittel ca. 40 bis 50 % der Varianz bei einem relativen Fehler von ca. 30 bis 40 %. Eine graphische Gegenüberstellung von Modell und Messung zeugt von einer befriedigenden Modellgüte. Die eingebundenen verkehrlichen Kenngrößen sind konsistent zu den Kenngrößen der Modelle zur Analyse der mittelfristig erkennbaren Wirkungen.

Die Wirkungen einer verbesserten Koordination durch die LSA-Steuerung lassen sich anhand der Kenngröße Anfahrvorgänge quantifizieren. Dafür wird die mittlere Anzahl an Anfahrvorgängen, die bei vergleichbarer Verkehrsnachfrage bei den unterschiedlichen Steuerungsverfahren auftritt, bewertet. Im Vergleich zur Festzeitsteuerung reduziert die Netzsteuerung die Anzahl der Halte in der ersten Messwoche im Mittel um 30 %. Die lokale regelbasierte Steuerung reduziert die Anzahl der Halte am Umweltmessquerschnitt in diesem Zeitraum sogar um ca. 40 %. Eine Verknüpfung des NO_x-Immissions-Erklärungsmodells mit den festgestellten verkehrlichen Wirkungen ermöglicht die Abschätzung der Immissionsreduktion relativ zur mittleren gemessenen Immissionskonzentration. Das Bild 10 zeigt die Wirkungen der verschiedenen Steuerungsverfahren für die NO_x-Immissionen, die aus dem tagesgangbezogenen Modell abgeleitet werden können. Dargestellt sind

- die Wirkungen der Festzeitsteuerung (FZS),
- die Wirkungen der lokalen regelbasierten Steuerung (LRS),
- die Wirkungen von BALANCE mit Parametersatz 1 und 2 (Messwochen HH01 und HH02) sowie

- die Wirkungen einer annähernd „perfekten Koordination“ am lokalen Umwelt-HotSpot, d. h.

einem Verkehrsablauf (nahezu) ohne Halte in der untersuchten Zufahrt.

Für die festgestellten, durchaus erheblichen Reduktionspotenziale ist zu berücksichtigen, dass die Messungen an 10 verkehrlich hoch belasteten Werktagen durchgeführt wurden und folglich ein hoher Erklärungsanteil der Verkehrskenngrößen festgestellt wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine LSA-Steuerung mit Fokus auf die Optimierung von Umweltkenngrößen gerade in diesen Zeiträumen zur Einhaltung von Luftqualitäts-grenzwerten und zur Minderung negativer gesundheitlicher Wirkungen beitragen kann.

Simulation

Das netzbezogene Wirkungspotenzial der adaptiven Netzsteuerung im Testfeld Hamburg wird anhand der VISSIM-Mikrosimulation bewertet. Das Bild 11 zeigt die Mittelwerte der motorbedingten Emissionen aus 20 Simulationsläufen, differenziert nach den Szenarios

- Festzeitsteuerung (FZS),
- Lokale regelbasierte Steuerung (LRS),
- BALANCE PS1 mit genetischem Algorithmus sowie
- BALANCE PS2 mit genetischem Algorithmus.

Die Netzauswertung zeigt, dass die modellbasierte Steuerung BALANCE PS1 die Emissionen im Vergleich zur LRS unabhängig vom betrachteten Schadstoff reduzieren kann. Darüber hinaus wird aber auch hier die Relevanz der Parametrierung deutlich – die mit dem zweiten Parametersatz ermittelten Emissionen liegen in

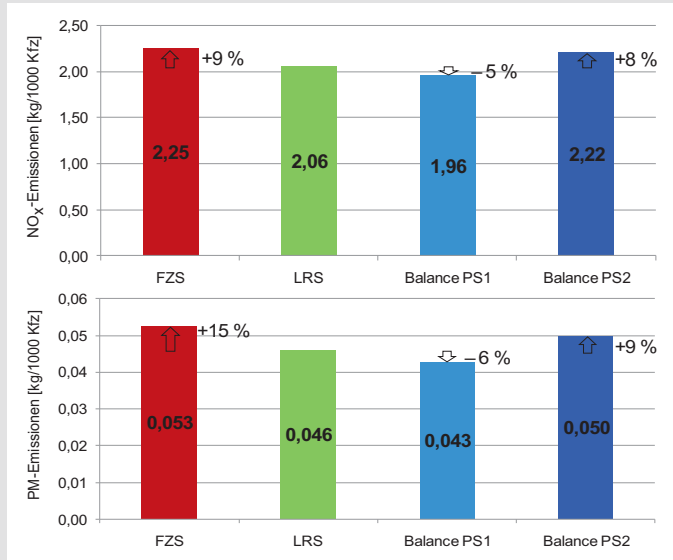


Bild 11: Netzbezogene PM- und NO_x-Emissionen der untersuchten LSA-Steuerungsverfahren im Vergleich (Lokale regelbasierte Steuerung LRS = 100)

einer Größenordnung mit der Festzeitsteuerung.

4.2 Bremerhaven

4.2.1 Beschreibung des Testfeldes

Das Bild 12 zeigt das Testfeld Bremerhaven. Entlang dieses ca. 1,6 km langen und vornehmlich zweistreifigen Streckenzugs befinden sich insgesamt neun Lichtsignalanlagen, die seit Anfang 2008 mit dem verkehrsadaptiven Netzsteuerungsverfahren MOTION gesteuert werden.

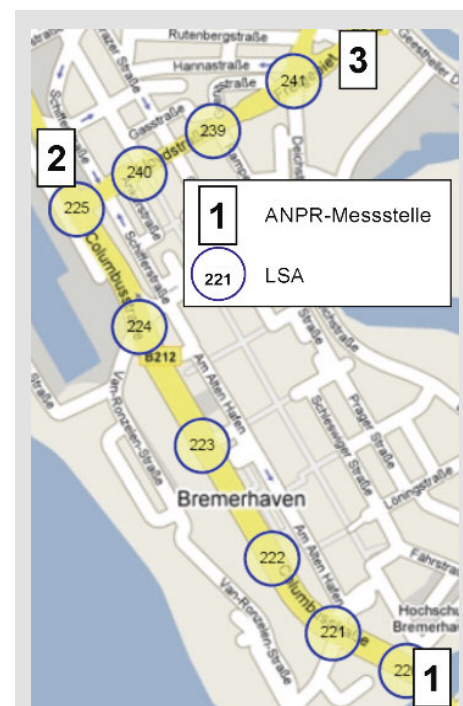


Bild 12: Netzplan Bremerhaven (Quelle: Stadt Bremerhaven)

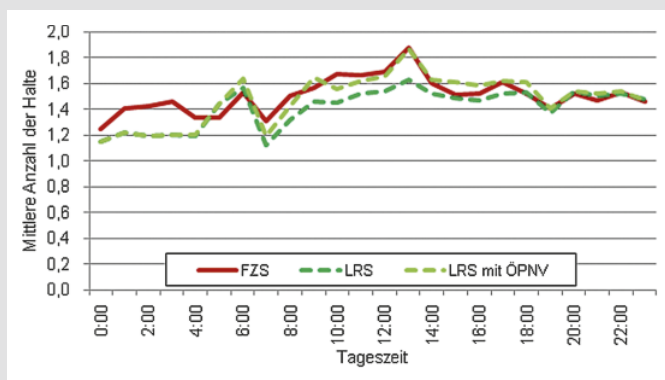
Tabelle 5: Statistik der in Bremerhaven erhobenen Daten

Relation	ANPR-Beobachtungen		GPS-Fahrten	
	Gesamt	pro Stunde	Gesamt	pro Stunde
1-2	12.429	104	185	1,5
2-1	13.763	115	202	1,7
2-3	5.411	45	180	1,5
3-2	5.323	44	191	1,6

Tabelle 6: Vergleich der mittleren normierten Kenngrößen Fahrzeit und Anzahl der Halte in Bremerhaven (Lokale regelbasierte Steuerung mit ÖPNV LRS = 100)

Steuerungsverfahren	Mittlere normierte Fahrzeit (LRS = 100)	Mittlere normierte Anzahl der Halte (LRS = 100)
Festzeitsteuerung	99	101
Lokale regelbasierte Steuerung mit ÖPNV-Beschleunigung	100	100
MOTION mit ÖPNV-Beschleunigung	96	85

Bild 13: Durchschnittliche Anzahl der Halte nach Steuerungsverfahren für das gesamte Netz.



Die zehntägigen Erhebungen wurden in den letzten beiden Februarwochen 2009 von Montag bis Freitag im Zeitraum von 6:30 bis 18:30 Uhr durchgeführt. Im Rahmen der Simulationen wurden folgende Szenarios untersucht:

- Festzeitsteuerung,
- Lokale regelbasierte Steuerung ohne ÖPNV-Beschleunigung,
- Lokale regelbasierte Steuerung mit ÖPNV-Beschleunigung.

Für die Simulationen mit MOTION konnten bis zum Ende des Projekts keine plausiblen Ergebnisse aus der Simulation erzeugt werden.

Nach einer Untersuchung durch die Freie Hansestadt Bremen [2006] treten im Testfeld Bremerhaven keine Grenzwertüberschreitungen der Luftschadstoffe auf. Folglich dienen die durchgeführten Untersuchungen der Umweltkenngrößen im Rahmen von AMONES primär dem Er-

Tabelle 7: Vergleich der mittleren normierten Kenngrößen in der Simulation für das gesamte Netz (Lokale regelbasierte Steuerung mit ÖPNV LRS = 100)

Steuerungsverfahren	Mittlere normierte Verlustzeit (LRS mit ÖPNV = 100)	Mittlere normierte Standzeit (LRS mit ÖPNV = 100)	Mittlere normierte Anzahl der Halte (LRS mit ÖPNV = 100)
Festzeitsteuerung	96	95	99
Lokale regelbasierte Steuerung ohne ÖPNV-Beschleunigung	92	90	93
Lokale regelbasierte Steuerung mit ÖPNV-Beschleunigung	100	100	100

Tabelle 8: Relevante Kenngrößen für die lokalen Immissionsmodelle im Testfeld Bremerhaven (die Vorzeichen stehen für die Richtung des Einflusses getrennt nach Messwochen)

Prädiktorkenngröße	NO _x		PM ₁₀		PM _{2,5}	
	niederfrequent	hochfrequent	niederfrequent	hochfrequent	niederfrequent	hochfrequent
Windgeschwindigkeit	-/-	-/-				
Windrichtung	+/+	+/+				
Windvektor (Geschwindigkeit X Richtungsvektor)			+/+	+/+	+/+	+/+
Luftdruck			/+		/+	
Wasserdampf-Verhältnis	-/-					
Ozon-Konzentration	-/-					
PM ₁₀ -Hintergrund			+/+		+/+	
Verkehrsstärke		+/+		+/+		+/+
Durchfahrten	+/+					
SV-Anteil			+/+		+/-	

kennnisgewinn in Bezug auf die Zusammenhänge zwischen Verkehrs- und Umweltkenngrößen und auf die Optimierungspotenziale einer Verkehrssteuerung.

4.2.2 Ergebnisse – verkehrliche Kenngrößen

Erhebung

Der geringe Durchgangsverkehr zwischen den Messstellen 1 und 3 (Bild 12) erlaubt lediglich die Erhebung der Fahrzeiten entlang vier der theoretisch möglichen sechs Relationen. Die Tabelle 5 zeigt die Anzahl der von den ANPR-Systemen erhobenen Fahrzeiten und die GPS-Fahrten, die zur Ableitung der Anzahl der Halte und zur Plausibilisierung der Ergebnisse verwendet werden.

Die Verkehrsstärken in Bremerhaven sind mit ca. 6.000 bis 10.000 Kfz/Tag an den relevanten Eingangsquerschnitten des Untersuchungsgebiets relativ niedrig. Größere Störungen im Verkehrsfluss lassen sich nicht beobachten. Die Tabelle 6 zeigt keine auffälligen Unterschiede zwischen der FZS und der LRS. MOTION liefert im Vergleich eine etwas niedrigere Fahrzeit und eine reduzierte Anzahl der Halte. Die niedrigere Anzahl der Halte ist das Ergebnis einer besseren Koordinierung der Lichtsignalanlagen, die mit MOTION erreicht wird.

Simulation

Im Bild 13 ist für die verschiedenen Steuerungsverfahren die mittlere Anzahl der Halte über den Tag als Mittelwert der zehn durchgeführten Simulationsläufe dargestellt.

Bis 5:00 Uhr und ab 22:00 Uhr sind die Ergebnisse für die lokale regelbasierte Steuerung mit und ohne ÖPNV-Beschleunigung deckungsgleich, da in dieser Zeit keine Busse verkehren.

Die lokale regelbasierte Steuerung kann ihre Vorteile in Bremerhaven vor allem bei mittleren und sehr niedrigen Verkehrsstärken ausspielen. Bei hohen Verkehrsstärken kann die Steuerung aufgrund der Auslastung der Nebenströme nicht sehr stark eingreifen. Der Grund für die zeitweise schlechteren Ergebnisse der lokalen regelbasierten Steuerung zwischen 5:00 und 6:00 Uhr und zwischen 18:30 und 22:00 Uhr ist, dass bei der relativ geringen Nachfrage dieser Zeitbereiche die Fahrzeugpuls sehr leicht auseinander brechen und eine Phase dann aufgrund der Zeitlückensteuerung abgebrochen wird, obwohl noch nicht alle Fahrzeuge die Haltelinie passiert haben. Bei sehr niedrigen Verkehrsstärken

(0:00 bis 5:00 Uhr) sind dagegen gar keine Pulks vorhanden, so dass dieser Effekt nicht eintreten kann.

Die Priorisierung des ÖPNV gleicht in den meisten Fällen die Vorteile, die die lokale regelbasierte Steuerung gegenüber der Festzeitsteuerung erzielen konnte, wieder aus.

Die wichtigsten Kenngrößen für den gesamten Tag und im gesamten Netz sind in der Tabelle 7 aufgeführt.

4.2.3 Ergebnisse – umweltbezogene Kenngrößen

Die Tabelle 8 zeigt die in den verschiedenen lokalen Immissionsmodellen enthaltenen Kenngrößen mit signifikantem Erklärungsbeitrag an den gemessenen Immissionszeitreihen. Die Modelle zur Quantifizierung der tagesgangbezogenen Wirkungen erklären mehr als 80 % der Varianz des Tagesgangs der drei untersuchten Schadstoffe; der relative Standardfehler liegt bei unter 30 % und damit in einer für die Immissionsmodellierung befriedigenden bis guten Größenordnung. Die verkehrlichen Prädiktoren der Modelle beziehen sich auf Kenngrößen der Verkehrsnachfrage und der Verkehrszusammensetzung. Im NO_x -Modell besitzt die Kenngröße „Durchfahrten“ (Fahrzeuge, die den Knotenpunkt ohne Halt passieren) von den Verkehrskenngrößen erstaunlicherweise den größten Erklärungsbeitrag, obwohl auf Grundlage der recherchierten Zusammenhänge die Gesamtverkehrsstärke oder die Schwerverkehrsstärke für die NO_x -Immissionen wichtiger erscheinen. In den PM_{10} -Modellen ist der Schwerverkehrsanteil die maßgebende verkehrliche Kenngröße. Die relevanten meteorologischen Prädiktoren und ihre Vorzeichen sind fachlich plausibel.

Die Modelle zur Quantifizierung der kurzzeitigen Schwankungen erklären im Mittel etwa 40 bis 50 % der Varianz der Immissionen bei einem relativen Fehler von etwa 20 %. Die maßgebende verkehrliche Kenngröße ist hier die Verkehrsstärke.

Festgehalten werden kann, dass die Immissionsmodelle für das Testfeld Bremerhaven Kenngrößen mit Bezug zur Verkehrsnachfrage und zur Verkehrszusammensetzung enthalten. Kenngrößen zur Qualität des Verkehrsablaufs haben im Testfeld keinen signifikanten Erklärungsanteil. Demnach ist eine Minimierung der verkehrsbedingten Feinstaub- und Stickoxidbelastung weniger über eine verbesserte Koordinierung, sondern eher über eine

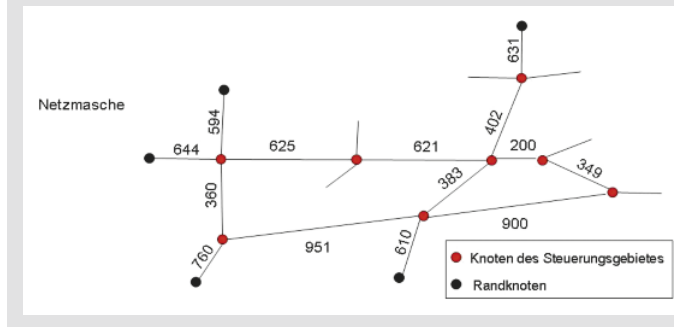


Bild 14: Virtuelles Testfeld mit Angabe der Streckenlängen in Metern

Zuflussdosierung oder eine Zufahrtbeschränkung für den Schwerverkehr möglich. Aufgrund der meist niedrigen Verkehrsstärke am Umweltmessquerschnitt und der grundsätzlich guten Qualität des Verkehrsablaufs ist es plausibel, dass im Testfeld Bremerhaven der Einfluss der meteorologischen Kenngrößen dominiert und dass die Wirkungen von Veränderungen im Verkehrsfluss in den gemessenen Immissionen nicht erkennbar sind.

4.3 Virtuelles Testfeld

4.3.1 Beschreibung des Testfeldes

Der Netzaufbau im virtuellen Testfeld ermöglicht die Untersuchung typischer Netzausschnitte städtischer Straßennetze vom einfachen Linienzug bis zu Netzmaschen. Aus Erfahrung sind allzu komplizierte Netzstrukturen und Steuerungsgebiete in der Wirklichkeit (besonders in Deutschland) nicht existent, so dass folgende Szenarios im virtuellen Testfeld betrachtet werden können:

- Netz 1: Linienzug: 5 Knotenpunkte (Ost-West Richtung)
- Netz 2: kreuzende Linienzüge: 7 Knotenpunkte (2ter Linienzug in Nord-Süd Richtung)
- Netz 3: Netzmasche: 8 Knotenpunkte (Bild 14).

Neben den Knoten des Steuerungsgebietes beinhaltet das Netz noch Randknoten an einigen Zufahrten. Diese sollen Knoten außerhalb des Steuerungsgebietes darstellen und für einen gepulkten Zufluss der Fahrzeuge sorgen. Die Randknoten fließen nicht in die Auswertung ein. Sie laufen in jedem Szenario in einer tagesplanabhängigen Festzeitsteuerung.

In dem Netz werden folgende Randbedingungen der RiLSA [FGSV 2010] für die Koordinierung von Straßenzügen eingehalten:

- Knotenpunktabstände < 1000 m,
- je Richtung mehr als ein Fahrstreifen für den durchgehenden Verkehr sowie

- Abbiegestreifen für Linksabbieger.

Bei der Erstellung der Schnittstellen zur Anbindung der modellbasierten Steuerungsverfahren an VISSIM durch die Hersteller kam es zu nicht vorhersehbaren Problemen und zeitlichen Verzögerungen. Außerdem zeigte sich im Laufe des Projektes, dass die Versorgung der Systeme sowie die Kalibrierung der Simulationen deutlich aufwändiger waren, als vor Projektbeginn absehbar.

Ergebnisse liegen für die Netzmasche (Netzvariante 3) und die Steuerungsszenarien FZS, LRS und BALANCE (Hill-Climbing) vor. LRS und BALANCE können dabei wahlweise mit und ohne ÖPNV-Beschleunigung für die im Netz vorhandenen Buslinien betrieben werden.

Festzeitsteuerung (FZS)

Für die Festzeitsteuerungen werden für jeden Knotenpunkt in jedem Nachfrageszenario vier Tagesprogramme mit unterschiedlichen Umlaufzeiten erstellt (SchwachVerkehrsZeit60, Morgenspitze90, NebenVerkehrsZeit70, Abendspitze80). Die Signalprogramme sind 4- (Kreuzung) bzw. 3-phasig (Einmündung). Die Koordinierung erfolgt für die im Bild 15 dargestellten vier Linienzüge jeweils auf das Freigabezeitende.

Lokale regelbasierte Steuerung (LRS)

Die koordinierten Festzeitprogramme bilden gleichzeitig die Rahmenpläne für die LRS. Als Eingriffsmöglichkeit der lokalen Steuerung ist eine Freigabezeitzeitanpassung mittels einer Zeitlückensteuerung für jede Phase realisiert. Jede einzelne Phase kann früher abgebrochen werden. Der Bemessungszeitraum für die Zeitlückensteuerung beträgt in Abhängigkeit der Umlaufzeit, der Phasenanzahl und der Dauer der aktuell laufenden Phase zwischen 20 und 12 Sekunden für die Hauptrichtung und zwischen 12 und 6 Sekunden für Nebenrichtungen und Linksabbieger.

Bild 15: Hierarchie der Linienzüge für die Grundnachfrage im Signalprogramm der Morgenspitze

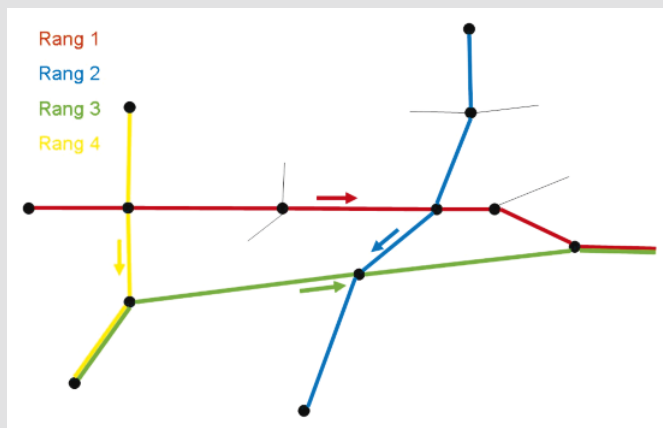
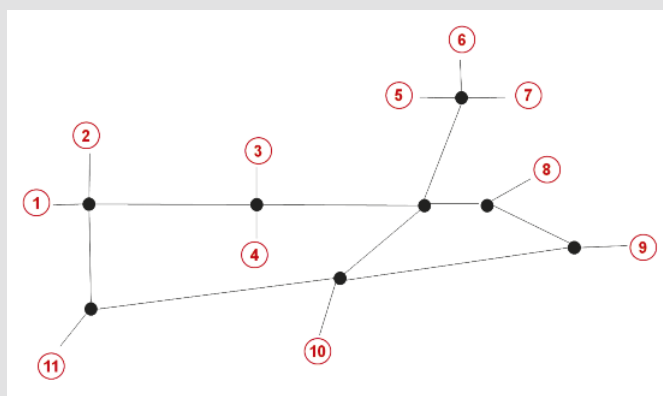


Bild 16: Übersicht über die Zufahrten des Gesamtnetzes



Phasentausch, Phasenforderung und Versatzzeitanpassung werden nicht vorgenommen.

An drei Knotenpunkten wird zusätzlich eine Beschleunigung des ÖPNV umgesetzt. Diese erfolgt ebenfalls über eine Freigabezeitanpassung. Dazu kann bei Vorliegen einer Anforderung durch den ÖPNV jede Phase nach ihrer Mindestfreigabezeit abgebrochen werden. Eine Verlängerung der Phase des ÖPNV ist bis zur Abmeldung vorgesehen. Für die Anforderung und Verlängerung der Phase mit ÖPNV Freigabe

besteht für die Beschleunigung ein Dauerahmen.

Netzsteuerung BALANCE

BALANCE erhält von den lokalen TRENDS-Steuerungen der einzelnen Knotenpunkte minütlich die aggregierten Messwerte der Detektoren. Alle 5 Minuten optimiert BALANCE auf Basis dieser Messwerte die Rahmensignalpläne für die einzelnen Knoten im Hinblick auf die eingestellte Zielfunktion. Das Optimierungser-

gebnis verschickt BALANCE in Form von sogenannten T-Zeit-Grenzen an die lokalen Steuergeräte. Die T-Zeit-Grenzen beschreiben dabei die frühesten und spätesten Zeitpunkte für die Einleitung der Phasenübergänge auf lokaler Ebene. Sie geben damit die Rahmenbedingungen für die möglichen Freigabezeitanpassungen der lokalen Steuerungen vor und beeinflussen indirekt auch die Versatzzeiten.

Bei den im virtuellen Testfeld eingesetzten Default Parametern von BALANCE fließen in die Berechnung der Zielfunktion ausschließlich die Wartezeiten ein, wobei alle Signalgruppen gleich gewichtet werden. Der Beginn eines Phasenübergangs kann durch die lokale Steuerung um bis zu 30 % bezogen auf die maximale Phasendauer vorgezogen werden.

Die Grenzen, innerhalb derer BALANCE die T-Zeiten für die jeweiligen spätesten Phasenabbrüche wählen kann, wurden für die Hauptphase an jeden Knoten so vorgegeben, dass die T-Zeit maximal 5 s kleiner und 10 s größer werden kann als der Originalwert in der lokalen Steuerung. Dadurch wird sichergestellt, dass die in den Logiken der lokalen Programme implizit enthaltene Koordinierung nicht zerstört wird. Alle anderen Puffer werden mittels eines vom Hersteller zur Verfügung gestellten Tools automatisch geeignet bestimmt.

Verkehrsnachfrage

In Anlehnung an reale Verkehrsnachfragen wird ein typischer Tagesverlauf mit nächtlicher Schwachverkehrszeit, Morgenspitze, einer Nebenverkehrszeit und einer Abendspitze abgebildet. Die Hauptlast konzentriert sich dabei auf die Zufahrten 1, 6, 9 und 10 und somit auf die Routen 1-9 und 6-10 sowie deren Rückrichtung (Bild 16). Während die Zufahrten 8 und 11 noch etwas stärker belastet sind, handelt es sich bei den Zufahrten 3, 4, 5 und 7 um Anliegerstraßen. Der Schwerverkehrsanteil beträgt einheitlich für jede Zufahrt 5 %. Fußgängerströme werden zwar in den Signalprogrammen berücksichtigt, aber nicht simuliert und bewertet.

Im Netz gibt es auf der Route 6-10 eine Buslinie des ÖPNV. Diese wird im Zeitraum von 6:00 bis 20:00 Uhr in Nord-Süd-Richtung mit einem 10-Minuten-Takt und in Süd-Nord-Richtung mit einem 8-Minuten-Takt bedient. Sie führt über 3 Knotenpunkte, Haltestellen befinden sich in beiden Richtungen jeweils hinter dem mittleren Knotenpunkt.

Tabelle 9: Mittlere Verlustzeiten des ÖPNV (LRS mit ÖPNV-Beschleunigung = 100)

Steuerungsszenario	Mittlere normierte Verlustzeit pro Bus (LRS mit ÖPNV-Beschleunigung = 100)		
	Fahrtrichtung Nord nach Süd	Fahrtrichtung Süd nach Nord	Mittel über beide Fahrtrichtungen
Festzeitsteuerung	165	174	170
LRS mit ÖPNV-Beschleunigung	100	100	100
LRS ohne ÖPNV-Beschleunigung	181	168	175
BALANCE mit ÖPNV-Beschleunigung	106	105	105
BALANCE ohne ÖPNV-Beschleunigung	188	184	186

Tabelle 10: Mittlere Verlustzeiten und mittlere Anzahl der Halte des MIV in der Morgenspitze (LRS mit ÖPNV-Beschleunigung = 100)

Steuerungsszenario	Mittlere normierte Verlustzeit pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)	Mittlere normierte Anzahl der Halte pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)
Festzeitsteuerung	78	84
LRS mit ÖPNV-Beschleunigung	100	100
LRS ohne ÖPNV-Beschleunigung	83	87
BALANCE mit ÖPNV-Beschleunigung	81	86
BALANCE ohne ÖPNV-Beschleunigung	83	88

4.3.2 Simulationsergebnisse

Verlustzeiten im ÖPNV

Bei LRS und BALANCE liegen die Verlustzeiten des ÖPNV im Szenario ohne ÖPNV-Beschleunigung im Mittel ca. um den Faktor 1,75 höher als mit ÖPNV-Beschleunigung (Tabelle 9). Im Detail variiert die Wirkung der ÖPNV-Beschleunigung je nach Fahrtrichtung und Tageszeit bzw. Signalprogramm. Die Spanne der erzielbaren Beschleunigung reicht von 5 % (BALANCE, Süd nach Nord, Morgenprogramm) bis 72 % (BALANCE, Nord nach Süd, Morgenprogramm). Beim Einsatz von BALANCE sind die Verlustzeiten der Busse im Vergleich zur LRS jeweils geringfügig größer (4 % mit und 6 % ohne ÖPNV-Beschleunigung). Die Verlustzeiten bei Festzeitsteuerung sind vergleichbar mit denen der LRS ohne ÖPNV-Beschleunigung.

Verlustzeiten im MIV

Das Bild 17 zeigt das Verhältnis der Verlustzeiten des MIV zwischen den verschiedenen Steuerungsszenarios im Tagesverlauf, dargestellt als mittlere Verlustzeit normiert auf das Steuerungsszenario LRS mit ÖPNV-Beschleunigung.

Die Verlustzeiten der Festzeitsteuerung liegen (mit Ausnahme der Schwachverkehrszeit) immer unterhalb der Zeiten für die verkehrabhängigen Verfahren. Dies ist insofern plausibel, als die Festzeitprogramme genau für die simulierte Verkehrsnachfrage geplant wurden, und bestätigt die Aussage, dass eine Festzeitsteuerung Szenarios mit bekannter und vorhersagbarer Nachfrage sehr gut bewältigen kann.

In der *Schwach-* und in der *Nebenverkehrszeit* zeigen sich zwischen den verschiedenen verkehrabhängigen Steuerungsverfahren nur geringe Unterschiede, was durch die vorhandenen kurzen Umlaufzeiten und die insgesamt niedrigere Verkehrsnachfrage erklärbar ist.

Während der *Morgenspitze* sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Steuerungsszenarios zu beobachten (Tabelle 10). Bei der dort geschalteten Umlaufzeit von 90 s (40 Umläufe pro Stunde) greift im Mittel in jedem dritten Umlauf die ÖPNV-Beschleunigung. Bei der LRS führt dies zu einem Anstieg der Verlustzeiten des MIV um ca. 20 %. BALANCE kann dagegen mit diesen „Störungen“ offensichtlich besser umgehen und schafft es, die Verlustzeiten gegenüber der Variante ohne ÖPNV-Beschleunigung insgesamt nicht anwachsen zu lassen. (Die erzielte

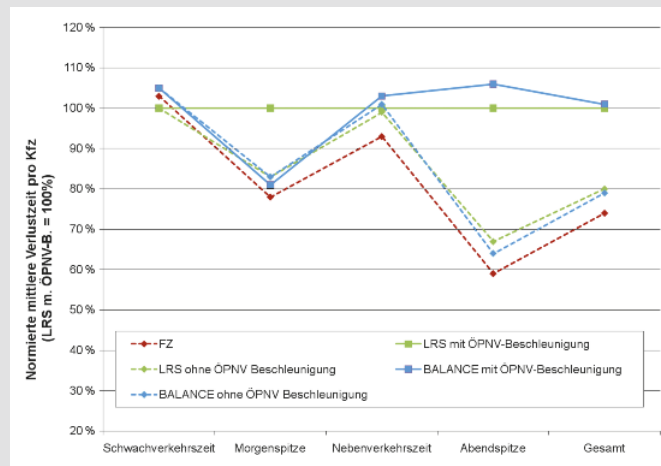


Bild 17: Vergleich der mittleren Verlustzeiten des MIV im Tagesverlauf

Steuerungsszenario	Mittlere normierte Verlustzeit pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)	Mittlere normierte Anzahl der Halte pro Kfz (LRS m. ÖPNV-B. = 100)
Festzeitsteuerung	59	62
LRS mit ÖPNV-Beschleunigung	100	100
LRS ohne ÖPNV-Beschleunigung	67	67
BALANCE mit ÖPNV-Beschleunigung	106	102
BALANCE ohne ÖPNV-Beschleunigung	64	66

Tabelle 11: Mittlere Verlustzeiten und mittlere Anzahl der Halte des MIV in der Abendspitze (LRS mit ÖPNV-Beschleunigung = 100)

geringfügige Verbesserung ist statistisch nicht signifikant). Da auch die LRS auf der gut geplanten FZS aufsetzt, besteht in der Variante ohne ÖPNV-Beschleunigung offensichtlich wenig Optimierungspotenzial für eine Netzsteuerung.

In der *Abendspitze* treten verglichen mit den anderen Tagesabschnitten die größten Verlustzeiten auf. Auch die Ergebnisse der verschiedenen Steuerungsszenarios unterscheiden sich hier am stärksten (Tabelle 11). Bedingt durch die hohe Auslastung im Netz wirken sich die „Störungen“ durch die ÖPNV-Beschleunigung besonders stark auf die MIV-Verlustzeiten aus.

Mit Ausnahme der FZS treten in der Abendspitze in allen Steuerungsszenarios zwischen den einzelnen Simulationsläufen deutlich größere Streuungen auf als zu den anderen Tageszeiten. Die Unterschiede zwischen LRS und BALANCE sind dadurch sowohl ohne als auch mit ÖPNV-Beschleunigung jeweils statistisch nicht signifikant.

Insgesamt betrachtet, spielt BALANCE seine Stärken insbesondere bei aktivierter ÖPNV-Beschleunigung und starker Verkehrsnachfrage (Morgenspitze) aus. Bei zu starker Auslastung und schlechter lokaler Steuerung (Abendspitze) kann sich der Effekt allerdings auch ins Gegenteil umkehren. Einschränkend ist festzuhalten, dass bei BALANCE aus Zeitgründen keine Tests mit anderen Parametern (Gewichtungsfaktoren, erlaubte T-Zeit-Grenzen,

Optimierung mittels genetischen Algorithmen) durchgeführt werden konnten. Die Erfahrungen aus dem Testfeld Hamburg legen nahe, dass hier noch Potenzial besteht.

Literaturverzeichnis

Braun, R.; Kemper, C.; Menig, C.; Busch, F.; Hildebrandt, R.; Paulus, I.; Preßlein-Lehle, R.; Weichenmeier, F. (2009): TRAVOLUTION – Netzweite Optimierung der Lichtsignalsteuerung und LSA-Fahrzeug-Kommunikation. Straßenverkehrstechnik 6/2009, FGSV (Hrsg), Kirschbaum Verlag, Bonn.

Bremen – Freie Hansestadt Bremen (2006): Luftreinhalte- und Aktionsplan Bremen, Senator für Bau Umwelt und Verkehr, Bremen.

Freie und Hansestadt Hamburg (2004): Luftreinhalteplan für die Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg.

Der Beitrag wird in Heft 7/2011 dieser Zeitschrift mit dem Teil 3: „Evaluierung und Handlungsempfehlungen“ abgeschlossen.